

Влияние промерзания почв речных бассейнов на процессы формирования пространственной и временной изменчивости зимнего и весеннего стока рек Башкортостана

В.И. Барышев  , И.Л. Калюжный

 hfl@mail.ru

ФГБУ "Государственный гидрологический институт", Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Процессы формирования зимнего и весеннего стока рек имеют важнейшее значение при проектировании и эксплуатации водохозяйственных систем, разработке методов прогнозов и расчетов стока. Актуальность этих исследований значительно возрастает при изменении климата, что обусловлено необходимостью поиска путей оптимизации водохозяйственного комплекса к новым условиям. **Методы.** Оценка изменений характеристик стока и механизма его формирования на речных водосборах основана на учете закономерностей почвенно-гидрологических и гидрофизических процессов. **Результаты.** На основании анализа натурных наблюдений на сети гидрологических станций УГМС Башкортостана установлено, что при изменении климата, уменьшилась глубина промерзания почвы, увеличился запас зимней стокоформирующей влаги, что вызывает повсеместное увеличение зимнего стока. При климатических изменениях сток весеннего половодья может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от процесса образования водонепроницаемого слоя и других факторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: промерзание почвы, зимний и весенний сток, процессы формирования стока, изменение климата.

Для цитирования: Барышев В.И., Калюжный И.Л., Влияние промерзания почв речных бассейнов на процессы формирования пространственной и временной изменчивости зимнего и весеннего стока рек Башкортостана // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 51–68. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-51-68.

Дата поступления 25.04.2024.

Influence of soils freezing of river basins on processes of formation of spatial and temporal variability of winter and spring flow of Bashkortostan rivers

Valeriy I. Baryshev  , Igor L. Kalyuzhny

 hfl@mail.ru

State Hydrological Institute, St.-Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. The processes of formation of winter and spring flow of rivers are of paramount importance in the design and operation of water management systems, the development of methods for forecasting and calculating flow. The relevance of these studies increases significantly with climate change, as it becomes necessary to find ways to optimize the economic complex to new conditions. **Methods.** Assessment of changes in the characteristics of runoff and the mechanism

© Барышев В.И., Калюжный И.Л., 2024

of its formation on river catchments is based on taking into account the laws of soil-hydrological and hydro/physical processes. **Results.** Based on the analysis of field observations at the network of hydrological stations of Bashkortostan, it was established that with climate change, the depth of soil freezing decreased and the stock of winter stocking moisture increased. The latter causes a widespread increase in winter runoff. With climatic changes, spring flood runoff can either increase or decrease, depending on the process of formation of a waterproof layer and other factors.

Keywords: soil freezing, winter and spring runoff, runoff formation processes, climate change.

For citation: Baryshev V.I., Kalyuzhny I.L. Influence of soils freezing of river basins on processes of formation of spatial and temporal variability of winter and spring flow of Bashkortostan rivers. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 5. P. 51–68. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-51-68.

Received 25.04.2024.

ВВЕДЕНИЕ

На территории России во второй половине XX в. наблюдался рост температуры воздуха, атмосферных осадков и стока в речных системах. В работах [1, 2] впервые показано, что наибольшие изменения речного стока происходили на рубеже 1980–1981 гг., при этом интенсивность протекания этого процесса была индивидуальна для каждого региона России.

В аналитической работе, с детальным анализом инструментальных наблюдений, Б.Г. Шерстюковым [3] предложено современное изменение климата рассматривать как продолжение многолетних долгопериодных природных колебаний, которые являются основными факторами изменения климата. В практическом плане возникает вывод о том, что необходима адаптация к этим природным колебаниям, которая является оптимальным путем к преодолению возникших (или возникающих) препятствий на пути стабильного функционирования экономики конкретного региона [4]. В полной мере это относится и к бассейнам рек Республики Башкортостан.

Возможность оценки изменений характеристик зимнего и весеннего стока рек позволяет разработать методы адаптации водохозяйственного комплекса к новым климатическим условиям, а также усовершенствовать методы расчета и прогноза стока [5].

Изучение закономерностей процессов формирования стока речных бассейнов и оценка их временных изменений, обусловленных глобальным потеплением климата, является весьма актуальной проблемой для регионов России [6–8]. Так, проведенные исследования в бассейне р. Волги позволили установить разнонаправленный характер изменения весеннего стока: на 30 % водосборов происходит рост стока половодья, на 70 % – его уменьшение [7].

В статье [9], на основе анализа многолетних рядов среднегодовых значений температуры воздуха и годового количества осадков, установлено повышение на территории Республики Башкортостан температуры воздуха и осадков, а также определена доля изменений их сезонных значений. Однако оценка влияния этих климатических изменений на все фазы речного стока рек отсутствует.

Оценка изменений характеристик зимнего и весеннего стока рек осложняется тем, что они располагаются как в предгорной, так и в горной частях

Урала, охватывая при этом лесостепную и степную зоны, с существенно различающимися по своим водно-физическим свойствам типами почв [10, 11] и строением речных бассейнов [12].

Целью представленной работы является оценка пространственных и временных изменений характеристик зимнего и весеннего стока рек, исследование механизма и процессов его формирования под влиянием изменения климата.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В зимний период основным природным фактором воздействия на речной бассейн является температура приземного слоя воздуха. Под ее влиянием почва промерзает на определенную глубину, вследствие чего изменяется фазовое состояние воды в почве. Как следствие, часть почвенной влаги замерзает, становится неподвижной и исключается из процесса формирования зимнего стока. Другая часть, находящаяся в талой зоне, не изменяет своего физического состояния и, возможно, принимает определенное участие в формировании зимнего стока. Запасы влаги в талом слое почвы расходуются на зимний сток, в мерзлой зоне – на формирование талого стока в весенний период.

Глубина промерзания почвы на речных водосборах осуществляет регулируемую функцию перераспределения стока в зимний период [13]. Фактором, оказывающим значительное влияние на формирование талого стока, является запас воды в снежном покрове речного бассейна. Снежный покров осуществляет также теплоизолирующие функции, существенно замедляя промерзание почвы. Таким образом, основным методом достижения поставленных в данной работе целей становится критический анализ механизма формирования зимнего и весеннего стока в условиях изменения климата и под воздействием промерзания почвы, состояния почвенной влаги и других факторов.

Исходная гидрометеорологическая информация

Исходная информация о глубине промерзания почвы, временной и пространственной ее изменчивости получена из данных многолетних наблюдений на сети метеорологических, агрометеорологических и гидрологических станций и постов УГМС Республики Башкортостан. Глубины промерзания почвы измерялись в 25 пунктах, составляют ряды длительностью до 83 лет, начиная с зимы 1936–1937 гг. [14]. Характеристики зимнего и весеннего стока рек определялись по 26 пунктам наблюдений. Продолжительность рядов 83 и больше лет, начиная с 1933–1936 гг. Запасы воды в снежном покрове в период наибольшего снегонакопления рассчитывались по данным снегомерных съемок на 23 гидрометеорологических станциях, осуществляющих этот вид наблюдений, начиная с 1961 г.

На всем протяжении рядов инструментальных наблюдений как за глубиной промерзания, так и за стоковыми характеристиками выделяются в каждом из них два периода. Первый, квазистационарный, характерен практически стабильными, относительно небольшими временными изменениями наблюдаемой характеристики (глубины промерзания и характеристики стока), второй – их существенной изменчивостью. Оценка переломного периода носит достаточно условный характер. В работах [15, 16] критически оценена задача оптимально-

го построения трендов и определения моментов времени, устанавливающих границы интервалов с устойчивой тенденцией изменения. Влияние изменения климата в ряду изучаемой характеристики может проявляться в виде монотонного его убывания или ступенчатого перехода между двумя относительно стационарными состояниями. При монотонном убывании членов ряда переломную точку перехода определяли путем оценки достоверности тренда.

Значимость линейных трендов оценивали по методике, приведенной в работе¹. При уровне значимости 5 %, что соответствует удвоенной случайной средней квадратической ошибке (σ), величина 2σ меньше коэффициента корреляции (R), на основании чего признается неоднородность рядов и значимость тренда.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Краткий анализ пространственно-временной изменчивости глубин промерзания приведен в работе [14]. Установлено, что весь период наблюдений за гидрометеорологическим режимом в бассейнах рек Башкортостана можно представить в виде двух отрезков: период квазистационарного состояния (с 1937 по 1980–1984 гг.) и период климатических изменений (с 1981–1985 гг. по 2017–2020 гг.).

В период квазистационарного состояния климата средние глубины промерзания по Башкортостану составляли 79 см, изменяясь при этом от 44 до 115 см. В горных речных бассейнах промерзание достигало 198 см. На южном склоне его величина снижалась до 65 см.

В период климатических изменений глубины промерзания во всех речных бассейнах в среднем уменьшились на 22 см, что составляет 28 % от первоначальной величины. Наблюдается корреляция глубин промерзания почв смежных речных бассейнов. На территории Башкортостана коэффициент корреляции изменяется в пределах от 0,45 до 0,73.

В табл. 1 приведены средние глубины промерзания в речных бассейнах в квазистационарный и последующий периоды климатических изменений.

Одним из основных факторов, влияющих на формирование пространственной изменчивости глубин промерзания почвы, является растительный покров, его влияние на динамику снежной массы и теплоизоляционные свойства снежного покрова. С увеличением высоты снега увеличиваются его теплоизоляционные свойства и уменьшается глубина промерзания. В горно-лесной и лесной зонах ветровой перенос снега практически отсутствует, снег в этот период обладает высокими теплофизическими свойствами (его плотность на протяжении зимы составляет 0,20–0,22 г/см³) поэтому средняя глубина промерзания как в квазистационарный период (58 и 82 см соответственно), так и при климатических изменениях (40 и 60 см) в 1,5–2,0 раза меньше, чем в лесостепной и степной зонах. В степных зонах, на полях, высота снега формируется под влиянием пожнивных остатков и ветрового переноса с последующим отложением снега в отрицательных формах рельефа. Эти факторы обуславливают пространственную изменчивость глубины промерзания и, как следствие, влияют на пространственную изменчивость характеристик стока.

¹ Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по однородным рядам. Санкт-Петербург, 2010. 162 с.

Таблица 1. Изменения глубин промерзания почв речных бассейнов, обусловленные изменением климата (фрагмент таблицы [14])
 Table 1. Changes in soils freezing depths of river basin caused by climate change (fragment of Table [14])

Метеостанция	Квазистационарный режим климата		Режим изменения климата		Изменение промерзания	
	период, год	промерзание, см	период, год	промерзание, см	см	%
Горнолесная область						
Архангельское	1937–1980	44	1981–2020	25	19	43,2
Зилаир	1937–1980	58	1981–2020	52	6	10,3
Мраково	1937–1980	72	1981–2020	44	28	38,9
Лесная зона						
Янаул	1972–1986	96	1987–2020	61	35	36,5
Аскино	1937–1981	60	1982–2020	41	19	31,7
Дуван	1937–1981	90	1982–2020	78	12	13,3
Лесостепная зона						
Чишмы	1937–1980	115	1981–2020	72	43	37,4
Аксаково	1937–1980	99	1981–2020	67	32	32,3
Раевский	1972–1986	124	1987–2020	64	60	48,4
Будяк	1972–1986	109	1987–2020	60	49	53,1
Степная зона						
Мелеуз	1937–1980	97	1981–2020	85	12	12,4
Зауральская лесостепная зона						
Учалы	1973–1982	138	1982–2020	104	34	24,6
Зауральская степная зона						
Акъяр	1952–1981	177	1982–2020	96	81	45,8

Примечание: уменьшение глубины промерзания почвы в % дано относительно средней глубины промерзания в квазистационарный период.

Согласно данным табл. 1, в период изменения климата средняя глубина промерзания в природных зонах Башкортостана уменьшилась от 22,6 % (лесная зона) до 42,8 % (лесостепная зона) по отношению к средним величинам квазистационарного периода.

Зимний сток

Промерзание почвы разделяет ее на талую и мерзлую зоны [13]. Влага талой зоны является основным источником формирования зимнего стока. Увеличение его возможно только в случае, если зимние запасы влаги превышают наименьшую полевую влагоемкость (НВ). В большинстве пунктов наблюдений НВ на территории Башкортостана составляет 300–340 мм.

В предосенний период почва имеет существенный дефицит влаги. Осенние осадки его ликвидируют и запас влаги в почве становится равным НВ или превышает его. При глубоком промерзании стокоформирующая талая

зона значительно уменьшается, что влечет снижение расходов зимнего стока, в ряде случаев – до аналитического нуля. В качестве характеристики зимнего стока принят 30-дневный минимальный расход воды ($Q_{\text{ЗИМ}}$).

На рис. 1 приведена динамика глубин промерзания и минимальных зимних расходов воды в створе р. Белая – г. Стерлитамак ($F = 21\,000\text{ км}^2$) по данным наблюдений за период с 1937 по 2018 гг. Оба ряда наблюдений разделяются ступенчатым переходом в 1982–1983 гг. на два периода: квазистационарный – с 1937 по 1983 гг. и период изменения климата – с 1983 по 2018 гг., при котором формируется новый квазистационарный уровень глубин промерзания и, аналогично ему, минимальных расходов.

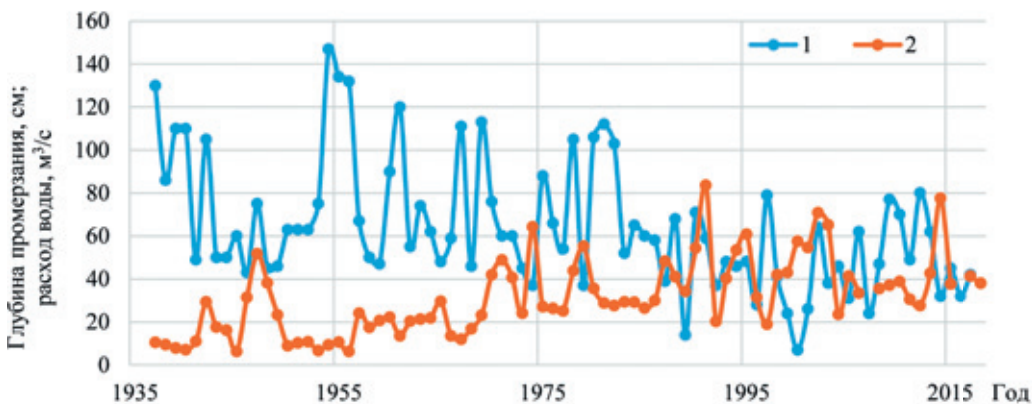


Рис. 1. Временные изменения глубин промерзания почвы (1) и 30-дневного минимального расхода воды (2) в створе р. Белая – г. Стерлитамак.

Fig. 1. Temporary changes in soil freezing depths (1) and 30-day minimum water flow (2) in the range of the Belaya River – the city of Sterlitamak.

Анализ динамики этих двух элементов показывает достаточно устойчивую корреляционную зависимость между ними. С увеличением глубины промерзания уменьшаются зимние расходы воды.

Зависимость $Q_{\text{ЗИМ}} = f(\Pi)$ аппроксимируется выражением вида:

$$Q_{\text{ЗИМ}} = 52,136 * e^{-0.11 * \Pi} (\text{м}^3/\text{с}), \quad (1)$$

где Π – здесь и далее, глубина промерзания почвы, см;

e – основание натуральных логарифмов. Коэффициент корреляции уравнения (1) $R = 0,511$.

При глубинах промерзания менее 80–100 см значительный динамический запас влаги располагается в талой зоне, расходы воды ($Q_{\text{ЗИМ}}$) возрастают и приближаются к 6–8 $\text{м}^3/\text{с}$.

На больших реках лесостепной зоны, но со значительно меньшей площадью водосбора (р. Дема – д. Бочкарево, $F = 12\,800\text{ км}^2$) характер зависимости $Q_{\text{ЗИМ}} = f(\Pi)$ (2) сохраняется. На рис. 2 приведена зависимость $Q_{\text{ЗИМ}}$ от наибольшей глубины промерзания почвы в бассейне р. Дема, которая аппроксимируется уравнением вида:

$$Q_{\text{ЗИМ}} = 31,08 * e^{-0.007 * \Pi} (\text{м}^3/\text{с}), \quad (2)$$

при коэффициенте корреляции $R = 0,694$.

Наиболее значительная зависимость зимних расходов проявляется на реках зауральской лесостепной и степной зон. На рис. 3 представлен временной ход глубины промерзания и зимние расходы в створе р. Миндюк – с. Новобайрамгулово ($F=785 \text{ км}^2$). В этих зонах при квазистационарном режиме климата глубина промерзания почвы достигала 1,5–2,0 м. Практически вся стокоформирующая влага в мерзлом слое была в форме льда и не участвовала в зимнем стоке. Зимний сток прекращался, только глубокие оттепели за счет фазовых превращений воды в почве формировали кратковременный сток.

При изменении климата изменяются глубины промерзания почвы, перемерзание русел не наблюдается и, как следствие, возрастает зимний сток.

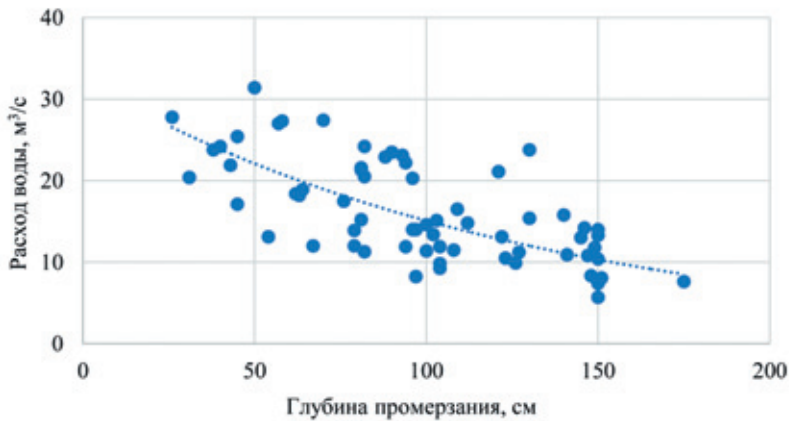


Рис. 2. Зависимость минимального 30-суточного зимнего стока от наибольшей глубины промерзания в бассейне р. Дема – д. Бочкарево.

Fig. 2. Dependence of the minimum 30-day winter runoff on the highest freezing depth in the basin of the Dema River – the village of Bochkarevo.

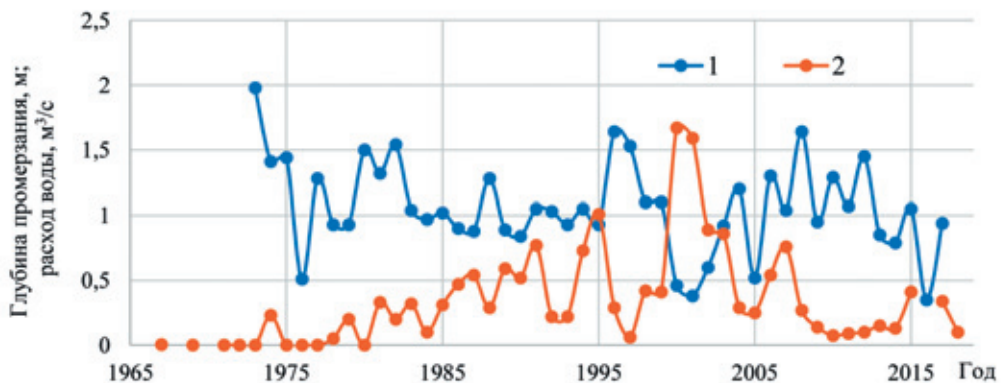


Рис. 3. Временные изменения глубин промерзания почвы (1) по м/с Учалы и зимнего 30-суточного минимального расхода воды (2) в створе р. Миндюк – с. Новобайрамгулово.

Fig. 3. Temporary Changes of Soil Freezing Depths (1) of m/s Uchaly and Winter 30-Day Minimum Water Flow (2) in the range of the Mindyak River – the village of Novobayramgulovo.

Зависимость $Q_{зим} = f(\Pi)$ для р. Миндяк – с. Новобайрамгулово описывается линейным уравнением (при $R = 0,599$):

$$Q_{зим} = -0,007 * \Pi + 1,17 \text{ (м}^3\text{/с)}, \quad (3)$$

Таблица 2. Средние значения минимального 30-суточного зимнего стока рек в природных зонах при квазистационарном периоде климата и при его изменении
Table 2. Average values of minimum 30-day winter flow of rivers in natural zones at quasi-stationary period of climate and at its change

Гидрометрический створ	Климатические периоды				Увеличение расхода ($P_{и} - P_{к}$)	
	квазистационарный		изменения климата		м ³ /с	в %
	период	среднее ($P_{к}$), м ³ /с	период	среднее ($P_{и}$), м ³ /с		
Горнолесная область						
р. Нугуш – д. Новосеитово	1950–1980	1,41	1981–2018	3,68	0,59	54
р. Лемеза – с. Нижние Лемезы	1959–1983	4,49	1984–2018	5,91	1,42	32
р. Сакмара – д. Верхне-Галеево	1958–1985	1,27	1986–2019	1,85	0,58	46
р. Малый Кизил – пос. Муракаево	1960–1983	0,32	1984–2018	0,40	0,08	25
р. Б. Кизил – д. Верхне-Абдряшево	1959–1983	0,23	1984–2018	0,38	0,15	65
Лесная зона						
р. Бирь – с. Малосухоязово	1951–1985	7,05	1986–2018	8,20	1,15	16
р. Быстрый Танып – д. Алтаево	1936–1980	10,8	1981–2018	15,8	5,00	46
р. Ай – с. Лаклы	1935–1988	9,91	1989–2018	17,7	7,79	79
р. Инзер – д. Азово	1958–1980	6,55	1981–2018	7,48	0,93	14
Лесостепная зона						
р. Дема – д. Бочкарево	1947–1980	11,6	1981–2018	21,3	9,70	84
р. Мияки – с. Мияки-Тамак	1955–1980	0,30	1981–2018	0,64	0,34	113
р. Уршак – с. Ляхово	1949–1981	2,28	1982–2018	4,00	1,72	75
р. Ик – с. Нагайбаково	1934–1979,	13,0	1980–2018	26,7	13,7	105
р. Белая – г. Стерлитамак	1937–1982	23,2	1983–2018	42,4	19,2	83
Степная зона						
р. Мелеуз – г. Мелеуз	1951–1981	0,23	1982–2019	0,88	0,65	280
Зауральская лесостепная зона						
р. Миндяк – с. Новобайрамгулово	1967–1981	0,064	1982–2017	0,45	0,38	600
Зауральская степная зона						
р. Таналык – с. Самарское	1958–1980	0,039	1981–2018	0,243	0,20	520
р. Карагайлы – д. Старо-Сибаето	1949–1980	0,024	1982–2018	0,071	0,05	240

Примечание: увеличение 30-суточного расхода в % дано относительно среднего расхода в квазистационарный период.

На малых и средних реках горно-лесной области и лесной зоны сохраняется аналогичная зависимость $Q_{\text{ЗИМ}} = f(\Pi)$. В бассейне р. Лемеза (р. Лемеза – с. Нижние Лемезы, $F = 1680 \text{ км}^2$) эта зависимость имеет вид (при $R = 0,576$):

$$Q_{\text{ЗИМ}} = -0,0437 * \Pi + 6,44 \text{ (м}^3\text{/с)}. \quad (4)$$

Анализ зависимостей $Q_{\text{ЗИМ}} = f(\Pi)$ по ряду речных бассейнов показывает низкую коррелятивную зависимость ($R = 0,280-0,600$), что свидетельствует о воздействии на процесс формирования зимнего стока ряда неучтенных факторов.

В табл. 2 приведены средние величины минимального 30-суточного зимнего стока ряда рек, приуроченных к основным природным зонам Башкортостана в условиях квазистационарного режима и изменения климата. Анализ табл. 2 показывает, что увеличение зимнего 30-дневного минимального расхода воды происходит на всех реках, но в разных природных зонах степень увеличения различная, вне зависимости от площади речных водосборов. На реках горно-лесной и лесной зон среднее увеличение за зиму, по отношению к средней величине аналогичного расхода в квазистационарный период, возросло на 44–45 и 47 % соответственно; в лесостепной зоне – на 90–92 %. Наибольшее увеличение зимнего стока наблюдается на реках высокогорной и степной зон, где оно в разы (3–6 раз) может превышать аналогичный сток квазистационарного периода.

Сток весеннего половодья

Анализ рядов большой длительности как по промерзанию почвы речных водосборов, так и по стоку весеннего половодья приведен в табл. 3. Каждый из многолетних рядов наблюдений разбит на два периода: квазистационарный отрезок характеризует относительно стабильный период, второй отрезок отличается монотонным убыванием или ступенчатым переходом на новый квазистационарный уровень. Оценка значимости трендов глубин промерзания и стока весеннего половодья также представлена в табл. 3.

Характерным примером влияния климатических изменений на сток весеннего половодья являются результаты наблюдений по створу р. Ашкадар – д. Ново-Федоровка с 1971 по 2017 гг. Для выбранного створа использованы результаты наблюдений за глубиной промерзания по м/с Стерлитамак с 1937 по 2017 гг. В многолетнем ходе наибольших глубин промерзания наблюдается два характерных периода: с 1937 по 1985 гг. и с 1986 по 2017 г. Первый период имеет хорошо выраженный квазистационарный режим со средней глубиной промерзания ($\Pi_{\text{к}}$) в 76 см. Линейный тренд глубин промерзания этого периода описывается уравнением:

$$\Pi_{\text{к}} = -0,2208\tau + 508,6 \text{ (м}^3\text{/с)}, \quad (5)$$

где τ – член ряда, начиная с 1937 г. при $R = 0,106$ и $\sigma = 0,143$.

Во втором периоде 1983–1986 гг. глубина промерзания резким ступенчатым переходом уменьшилась на 29 см и составила 47 см, т. е. на 38 % меньше по отношению к первому периоду. С 1986 по 2017 гг. тренд изменения глубины промерзания отсутствует, а ряд наблюдений переходит в новое квазистаци-

Таблица 3. Статистические характеристики трендов глубины промерзания и стока весеннего половодья (С) по бассейнам рек Дема, Ашкадар и Бирь
 Table 3. Statistical characteristics of trends of the depth of freezing and spring flood runoff (C) in the basins of the Dema, Ashkadar and Birkh rivers

Период, год	Уравнение тренда	Статистические характеристики			Характер изменения тренда, значимость
		R	2	Среднее	
Гидроствор р. Дема – д. Бочкарево, данные промерзания по м/с Чишмы					
1947–1984	$C_K = -0,663\tau + 1369$ (мм)	0,243	0,305	65	Слабое возрастание, не значим
1985–2019	$C_{И} = -1,4770\tau + 2986$ (мм)	0,497	0,251	67/+2	Монотонное снижение, значим
1937–1984	$\Pi_K = 0,5851\tau - 1034$ (см)	0,311	0,260	113	Слабое возрастание, значим
1985–2020	$\Pi_{И} = -0,3363\tau + 744$ (см)	0,138	0,333	70/43	Ступенчатый переход, не значим
Гидроствор р. Ашкадар – д. Ново-Федоровка, данные по м/с Стерлитамак					
1971–1985	$C_K = -5357\tau + 1143$ (мм)	0,078	0,513	84	Слабо выражен, не значим
1998–2017	$C_{И} = -4,0452\tau + 8196$ (мм)	0,642	0,250	71/13	Монотонное снижение, значим
1937–1985	$\Pi_K = -0,2208\tau + 504,4$ (см)	0,106	0,296	76	Стационарный режим, не значим
1986–2017	$\Pi_{И} = 0,0718\tau - 97$ (см)	0,036	0,352	47/29	Ступенчатый переход, не значим
Гидроствор р. Бирь – с. Малосухоязово, данные по м/с Бирск					
1951–1985	$C_K = 0,0619\tau + 9,29$ (мм)	0,014	0,338	174	Стационарный режим, не значим
1986–2020	$C_{И} = -3,216\tau + 6563$ (мм)	0,572	0,242	167/7	Монотонное снижение, значим
1937–1985	$\Pi_K = 0,1506\tau - 219,5$ (см)	0,077	2,84	76	Стационарный режим, не значим
1986–2020	$\Pi_{И} = -0,1423\tau + 320$ (см)	0,069	0,366	35/41	Ступенчатый переход, не значим

Примечание: С – слой стока весеннего половодья, мм. В знаменателе (см. графу Среднее) разность между средними величинами квазистационарного периода (индекс К) и последующего измененного ряда (индекс И).

онарное состояние (рис. 4). На реках Дема и Бирь (табл. 3) на втором отрезке рядов глубин промерзания переход в новое квазистационарное состояние происходил хорошо выраженным ступенчатым переходом. Коэффициент корреляции тренда ряда становится не значим. Реакции формирования слоя стока в переломный момент уменьшения глубин промерзания (1983–1986 гг.) не наблюдается, т. е. тренд не значим. В период 1971–1985 гг. средняя величина слоя стока весеннего половодья равна 84 мм.

На коротком отрезке от 1986 до 1988 гг. сохраняется средняя величина слоя весеннего стока (на протяжении с 1971 до 1997 гг.). Его монотонное снижение, как реакция на значительно сниженную глубину промерзания (средняя величина 47 см), наступает в 1997 г. (рис. 4). Тренд отрицательный, значим и хорошо выражен, его параметры приведены в табл. 3. Средняя величина слоя талого стока в этот период равна 71,0 мм, т. е. он уменьшился на 13 мм (на 15,5 % от первоначальной величины). Таким образом, снижение глубины промерзания на 38 % обусловило уменьшение стока весеннего половодья на 15,5 %.

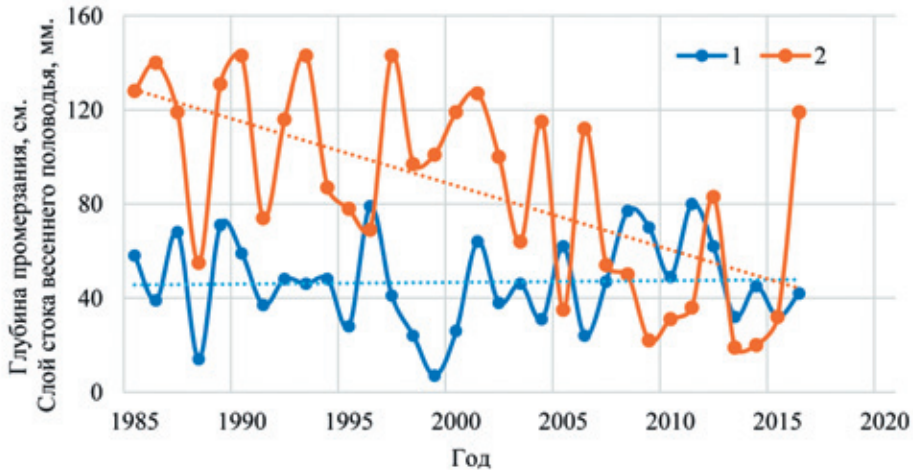


Рис. 4. Фрагмент динамики глубин промерзания (1) и слоев стока весеннего половодья (2) в период формирования процесса их изменений, р. Ашкадар – д. Ново-Федоровка.
Fig.4. Fragment of the dynamics of freezing depths (1) and runoff layers of spring flood (2) during the formation of the process of their changes Ashkadar River – the village of Novo-Fedorovka.

Снежный покров в речном бассейне косвенно и прямо воздействует на процесс формирования стока в период половодья. Косвенное его воздействие происходит путем некоторого повышения температуры поверхности почвы, обусловленного теплоизолирующими свойствами снега. Прямое – аккумулярованными запасами воды в снежном покрове. На рис. 5 приведена динамика годовых изменений наибольших снегозапасов за период с 1961 до 2020 гг. и слоя стока весеннего половодья в бассейне р. Ашкадар. Все изменения хорошо выражены и происходят практически синхронно.

Анализ данных хода снегозапасов показывает, что они повышаются до 1981 г. и составляют в среднем 99,5 мм. За относительно короткий период (1982–1998 гг.) они повысились до 135 мм. Далее, с 1999 до 2020 гг., следует уменьшение запасов воды в снеге (S) до 130 мм, т. е. на 5 мм. Тренд описывается уравнением (при $R=0,220$ и $\sigma=0,206$):

$$S = -1/883t + 3814 \text{ (мм)} \quad (6)$$

Тренд отрицательный (6), что свидетельствует об уменьшении снегозапасов.

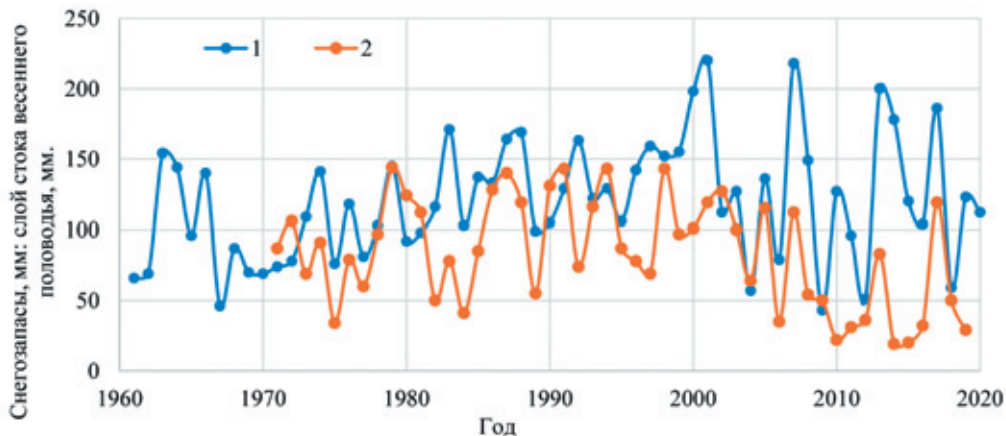


Рис. 5. Временные изменения запасов воды в снегу (1) и слоя стока весеннего половодья (2) по створу р. Ашкадар – д. Ново-Федоровка.

Fig. 5. Temporary Changes in Water supply in Snow (1) and Spring Flood Runoff Layer (2) in the range of the Ashkadar River – the village of Novo-Fedorovka.

В табл. 4 приведены средненные значения слоя весеннего половодья в период квазистационарного состояния климата и при его изменении.

Анализ стока рек весеннего половодья при изменении климата показывает, что наблюдается как увеличение слоя стока, так и его уменьшение. Наименьшие значения слоя стока весеннего половодья отмечаются в том случае, когда в почве речного бассейна при таянии снега образуется водонепроницаемый слой (ВС). Согласно работам [17, 18], он наблюдается при температуре почвы февраля от $-2,0$ до $-4,0$ °С и ниже, увлажнении близком к наименьшей полевой влагоемкости.

На рис. 6 приведена динамика температуры почвы на глубине 20 см по данным наблюдений м/с Чишмы, Дуван и Зилаир. Анализ временного хода температуры с 1981–1982 по 2020 гг. соответствует периоду климатических изменений. Температура февраля ниже $-2,0$ °С позволяет определить зимы, в которых возможно образование водонепроницаемого слоя.

При образовании водонепроницаемого слоя, в слое от поверхности почвы до нижней границы, влага консервируется и не участвует в стоке весеннего половодья. В период его существования на сток расходуются только запасы влаги в снежном покрове и влага, образовавшаяся при фазовых переходах в мерзлом слое. При полном оттаивании мерзлого слоя талая влага инфильтрационным путем пополняет запасы грунтовых вод и не участвует в формировании половодья. Поэтому при образовании в почве водонепроницаемого слоя наблюдаются наименьшие величины весеннего половодья.

В горнолесной области слой стока весеннего половодья при изменении климата незначительно увеличивается, в среднем на 6–7,5 %. По данным м/с Дуван в бассейне р. Большой Ик до створа с. Таишево за период климатических изменений с 1981 по 2019 гг. из 42 лет температура почвы (в слое 20 см) в феврале ниже $-2,0$ °С наблюдалась в 30 зимах. В период весеннего половодья

Таблица 4. Средние значения слоя стока весеннего половодья в природных зонах Башкортостана при квазистационарном периоде климата и его изменении
Table 4. Average values of the spring flood runoff layer in the natural zones of Bashkortostan during the quasi-stationary period of the climate and its change

Гидрометрический створ	Климатические периоды				Разность (Уи–УК)	
	квазистационарный		Изменение климата		мм	%
	период, год	Сток (УК), мм	период, год	Сток (Уи), мм		
Горнолесная область						
р. Нугуш–д. Новосейтово	1950–1980	249	1981–2018	252	+3	+1,2
р.Лемеза – с. Нижние Лемезы	1959–1984	293	1985–2019	318	+25	+8,1
р. Селеук – д. Нижнеиткулово	1946–1987	193	1988–2019	199	+6	+3,1
р. Инзер – д. Азово	1958–1987	238	1988–2019	265	+28	+11,8
р. Большой Ик – с. Таишево	1950–1981	94	1982–2019	106	+12	+12,8
Лесная зона						
р. Бирь – с. Малосухоязово	1951–1985	174	1986–2019	167	-7	-4,0
р. Быстрый Танып – д. Алтаево	1935–1980	124	1981–2019	119	-5	-4,0
р. Ай – с. Лаклы	1936–1987	115	1988–2019	111	-4	-3,2
р. Юрюзань – пос. Атняш	1932–1981	132	1982–2019	131	-1	-0,77
Лесостепная зона						
р. Дема – д. Бочкарево	1947–1981	67	1982–2019	65	-2	-3,0
р. Мияки – с. Мияки Тамак	1955–1980	70	1981–2019	62	-8	-11,4
р. Уршак – с. Ляхово	1949–1981	58	1982–2019	53	-5	-8,6
р. Ик – с. Нагайбаково	1934–1979	70	1980–2019	52	-18	-25,7
р. Белая – г. Стерлитамак	1919–1983	119	1984–2019	109	-10	-8,4
р. Ашкадар – д. Новофедоровка	1971–1985	84	1986–2017	71	-13	-13,8
Степная зона						
р. Мелеуз – г. Мелеуз	1950–1981	94	1982–2019	76	-18	-19,2
Зауральская лесостепная зона						
р. Миндяк – с. Новобайрамгулово	1967–1981	66	1982–2017	76	+10	+15
Зауральская степная зона						
р. Таналык – с. Самарское	1958–1980	25,7	1982–2021	32,2	+6,5	+25

Примечание: изменение слоя весеннего стока дано относительно средней величины стока в квазистационарный период.

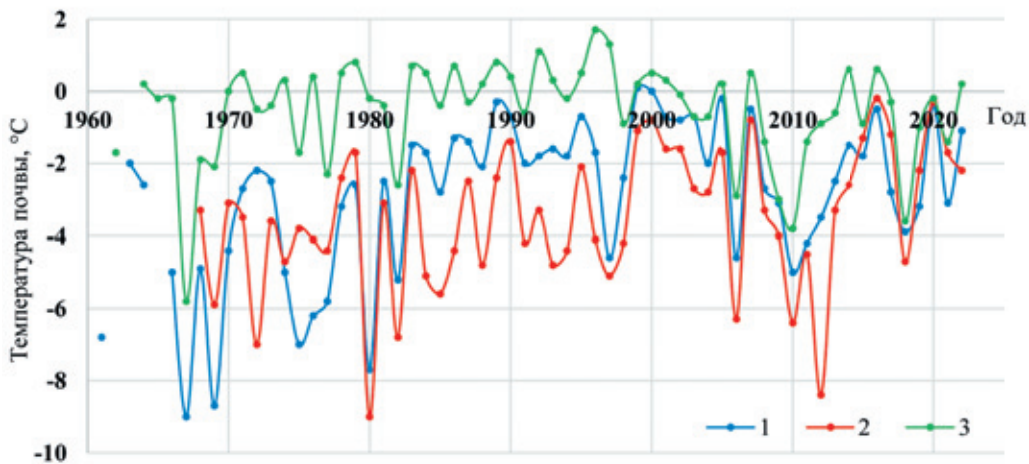


Рис. 6. Временные изменения средней температуры почвы в феврале на глубине 20 см по данным наблюдений на м/с Чишмы (1), м/с Дуван (2) и м/с Зилаир (3).
 Fig. 6. Temporary changes in the average soil temperature in February at a depth of 20 cm according to observations on Chishma (1), Duvan (2) and Zilair (3) meteorological stations.

в почвах речных бассейнов образовывался водонепроницаемый слой. Слой стока весеннего половодья в среднем составлял 93 мм при средней температуре февраля в эти зимы равной $-4,2$ °С. Образование водонепроницаемого слоя исключает часть стокоформирующей влаги из процесса формирования весеннего половодья. При полном оттаивании мерзлого слоя содержащаяся в нем талая влага инфильтрационным путем частично может пополнять запасы грунтовых вод. В 12 зимах температура февраля была выше $-2,0$ °С. Ее среднее значение составило $-1,2$ °С и водонепроницаемый слой, естественно, образоваться не мог. Слой стока половодья в среднем составлял 163 мм. В годы при образовании водонепроницаемого слоя сток половодья уменьшался в среднем в 1,8 раза. Таким образом, за период изменения климата, соотношение зим с наличием водонепроницаемого слоя и его отсутствием обуславливали среднее значение стока весеннего половодья.

Характерной особенностью горнолесной зоны является превышение запасов воды в снеге в период изменения климата по сравнению с квазистационарным периодом. По результатам наблюдений на м/с Улу-Теляк – это превышение в среднем достигает 33 мм при средней величине снегов запасов 229,3 мм.

В лесной и лесостепной зонах слой стока за половодье уменьшается. Обусловлено это тем, что в этих зонах зимний сток увеличился на 80–100 %. Часть стокоформирующей влаги была израсходована на зимний сток, что значительно уменьшило запасы стокоформирующей влаги весеннего половодья. Так, по данным м/с Верхнеяркеево в 2010 г. температура февраля в слое почвы 20 см была равна $-7,6$ °С, что свидетельствует об образовании водонепроницаемого слоя на водосборе р. База в створе с. Рсаево. За период изменения климата (1981–2019 гг.) средняя величина стока весеннего половодья составила 65,4 мм. В 2010 г., когда наблюдался водонепроницаемый

слой, слой весеннего половодья составил 51 мм, что на 22 % меньше величины от среднего значения стока половодья.

Аналогичные значения наименьших слоев стока весеннего половодья при образовании водонепроницаемого слоя наблюдались в бассейне р. Дема до створа с. Бочкарево в 2006, 2010 и 2018 гг. При температуре февраля, соответственно, $-4,6^{\circ}\text{C}$, $-5,0$ и $-3,4^{\circ}\text{C}$, слои стока весеннего половодья составили 25 мм, 37 и 47 мм, что значительно меньше средней многолетней величины 65,5 мм.

Зауральская степная и лесостепная зоны характеризуются глубокими промерзаниями почвы как при квазистационарном климате, так и при его изменении. При глубоком промерзании почвы в период квазистационарного режима климата более 1,5 м практически ежегодно возникали условия образования водонепроницаемого слоя. В период климатических изменений промерзание уменьшилось до 35–80 см, что несколько изменило условия образования водонепроницаемого слоя. Слой стока весеннего половодья возрос в среднем на 20 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фактором, обуславливающим изменение характеристик зимнего и весеннего стока рек, является глубина промерзания почв речного бассейна. При климатических изменениях глубина промерзания осуществляет регулирующую функцию перераспределения стока. В зимний период она разделяет стокоформирующие запасы влаги на две зоны: талую и мерзлую. При изменении климата в результате уменьшения глубины промерзания увеличивается запас влаги в талой зоне. Влага талой зоны формирует зимний и весенний сток.

Установлено, что в период квазистационарного состояния климата средние глубины промерзания составляли 79 см, изменяясь при этом от 44 до 115 см. В период климатических изменений глубины промерзания во всех речных бассейнах в среднем уменьшились на 22 см, что составляет 28 % от первоначальной величины. Коэффициент корреляции зависимости $Q_{\text{зим}} = f(\Pi)$ изменяется в пределах от 0,280 до 0,700, это свидетельствует о воздействии на формирование зимнего стока ряда неучтенных факторов.

Увеличение зимних расходов воды происходит на всех реках. На реках горнолесной и лесной зоны Башкортостана среднее увеличение за зиму, по отношению к аналогичному расходу в квазистационарный период, возросло на 44–45 и 47 % соответственно; в лесостепной зоне – на 90–92 %. Наибольшее увеличение зимнего стока (в 2–6 раз) наблюдается на реках высокогорной и зауральской степной зон. При увеличении зимнего стока, уменьшается запас стокоформирующей влаги, которая пополняет сток весеннего половодья. В лесной и лесостепной зонах, где зимний сток увеличился на 80–100 %, слой стока за половодье уменьшается: в лесостепной зоне в среднем на 11,8 %, от 3 до 25,7 %; в лесной – на 3 %. Уменьшение слоя стока весеннего половодья наблюдается также в том случае, когда в почве при таянии снега образуется водонепроницаемый слой. При образовании водонепроницаемого слоя, влага консервируется в мерзлом слое и только при его оттаивании принимает участие в стоке весеннего половодья.

Зауральская степная и лесостепная зоны отличаются глубокими промерзаниями почвы как при квазистационарном климате, так и его изменении. При промерзании почвы до 0,6–0,8 м практически ежегодно создаются условия образования водонепроницаемого слоя. В условиях климатических изменений, при возрастании зимних осадков, слой стока весеннего половодья в этих зонах возрос в среднем на 20 %. В горнолесной зоне, за счет увеличения зимних осадков, весенний сток увеличивается в среднем на 7,4 %, изменяясь в пределах от 1,2 до 12,2 %.

Таким образом, в рамках проведенной работы впервые показано, что при потеплении климата на территории Республики Башкортостан главным фактором, обуславливающим изменения характеристик гидрологического режима рек, является глубина промерзания почвы. В практическом плане возникает вывод о том, что необходима адаптация к этим природным изменениям как в области гидрологических прогнозов и расчетов стока, так и при разработке мероприятий по стабильному функционированию экономики региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Георгиевский В.Ю., Ежов А.В., Шалыгин А.А., Шикломанов И.А., Шикломанов А.И. Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР // *Метеорология и гидрология*. 1996. № 11. С. 89–99.
2. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Современные и перспективные изменения стока рек России под влиянием климатических факторов // *Водные ресурсы суши в условиях изменяющегося климата*. 2007. С. 20–32.
3. Шерстюков Б.Г. Глобальное потепление и его возможные климатические причины // *Гидрометеорология и экология*. 2023. № 70. С. 7–37. DOI:10.33933/2713-2023-70-7-37.
4. Школьник И.М., Мелешко В.П., Кароль И.Л., Киселев А.А., Надеждина Е.Д., Говоркова В.А., Павлова Т.В. Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в XXI веке // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2014. Вып. 575. С. 65–118.
5. Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. М.: Гидрометеоздат, 1963. 395 с.
6. Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Джамалов Р.Г. Изменение водного баланса крупных речных бассейнов Европейской части России // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2018. № 4. С. 36–47. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-4-3.
7. Лавров С.А., Калюжный И.Л. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2016. № 6. С. 42 – 60. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-4.
8. Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б. Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне Верхней Волги под влиянием климатических изменений // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2021. № 4. С. 6–28. DOI: 10.33933/2713-2023-70-7-37.
9. Красногорская Н.Н., Фащевская Т.Б., Головина А.В., Феропонтов Ю.И., Жданова Н.В. Климатические особенности формирования стока р. Белая // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 1. С. 82–91.
10. Хазиев Ф.Х. Экология почв Башкортостана. Уфа: Гилем, 2012. 312 с.
11. Мукатанов А.Х. Ландшафты и почвы Башкортостана. Уфа: БНЦ УрО РАН, 1992. 118 с.
12. Гареев А.М. Реки, озера и болотные комплексы Башкортостана. Уфа: Гилем, 2012. 246 с.
13. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Механизм влияния глубины промерзания почв речных бассейнов на зимний сток // *Водные ресурсы*. 2017. Т. 44. № 4. С. 442–451. DOI 10.7868/S0321059617040071.

14. Барышев В.И., Калюжный И.А. Глубины промерзания почв при изменении климата в бассейнах рек Республики Башкортостан // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2023. № 608. С. 91–108.
15. Лобанов В.А., Шаду́рский А.Е. Применение эмпирико-статистических методов для моделирования и анализа климатических изменений // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 14. С. 73–88.
16. Восканян К.А., Иванова Т.И., Кузнецов А.Д., Никитина В.С., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. Анализ смены периодов климатической стабильности северной территории России // Гидрометеорология и экология. 2022. № 67. С. 207–220. DOI: 1033933/2713-3001-2022-67-207-220.
17. Вершинина Л.К., Крестовский О.И., Калюжный И.А., Павлова К.К. Оценка потерь талых вод и прогнозы объема стока половодья. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 192 с.
18. Журавин С.А. Исследование процессов влагооборота на воднобалансовых станциях в России. СПб.: РИАА, 2022. 224 с.

REFERENCES

1. Georgievsky V. Y., Ezhov A. V., Shalygin A. L., Shiklomanov I. A., Shiklomanov A. I. Assessment of the effect of possible climate changes on hydrological regime and water resources of rivers in the former USSR. *Meteorology and Hydrology*. 1996. No. 11. P. 89–99 (In Russ.).
2. Shiklomanov I.A., Georgievsky V.Y. Modern and prospective changes in the flow of rivers in Russia under the influence of climatic factors. *Land water resources in a changing climate*. 2007. P. 20–32. (In Russ.).
3. Sherstyukov B. G. Global warming and its possible causes. *Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023. No. 70. P. 7–37. doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-7-37 (In Russ.).
4. Shkolnik, I.M., Meleshko, V.P., Karol I.L., Kiselev A.A., Nadyozhina E.D., Govorkova V.A., Pavlova T.V. Expected climate change in the Russian Federation in the 21st century. *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory*. 2014. Iss. 575. P. 65–118. (In Russ.).
5. Popov E.G. The questions of theory and practice of streamflow forecasting. Moscow: Gidrometeoizdat, 1963. 394 p. (in Russ.)
6. Grigoryev V. Y., Frolova N. L., Dzhamaalov R.G. The Water Balance Change of Large River Basins of the European Russia. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2018. № 4. P. 36–47. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-4-3 (in Russ.).
7. Lavrov S.A. Kalyuzhniy I.L. Impact of the climatic changes on the spring flood runoff and its formation factors in the Volga River basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2016. No. 6. P. 42–60. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-4 (in Russ.).
8. Gorbarenko A.V., Varentsova N.A., Kireeva M.B. Transformation of the Spring High-water and Flood Runoff in the Upper Volga Basin under the Climate Change Impact. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, management*. 2021. No. 4. P. 6–27. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-1 (in Russ.).
9. Krasnogorskaja N.N., Fashhevskaja T.B., Golovina A.V., Ferapontov Ju.I., Zhdanova N.V. Climatic features of the formation of the flow of the Belaya River. *Meteorology and hydrology*. 2012. № 1. P. 82–91. (In Russ.).
10. Khaziev F.H. Ecology of soils in Bashkortostan. Ufa: Gilem, 2012. 311 p. (In Russ.).
11. Mukatanov A.Kh. Landscapes and soils of Bashkortostan. Ufa: Bashkir Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 1992. 118 p. (In Russ.).
12. Gareev A. M. Rivers, lakes and bog complexes of the Republic of Bashkortostan. Ufa: Gilem, 2012. 248 p. (In Russ.).
13. Kalyuzhniy, I.L., Lavrov, S.A. The mechanism of the influence of the soil freezing depth in river basins on the winter runoff. *Water resources*. 2017. Vol. 44. No. 4. P. 442–451 (In Russ.).
14. Baryshev V.I., Kalyuzhniy I.L. Depth of soil freezing in climate change in river basins of the Republic of Bashkortostan. *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory*. 2023. Iss. 608. P. 91–108 (In Russ.).
15. Lobanov V.A., Shadursky A.E. Application of empiric-statistical methods for modeling and analysis of climatic changes. *Proceedings of the Russian State Hydro/meteorological University*. 2010. No 14. P. 73–88. (In Russ.).

16. Voskanyan K.L., Ivanova T.I., Kuznetsov A.D., Nikitina V.S., Seroukhova O.S., Simakina T.E. Analysis of the changes of periods of climatic stability in the northern territory of the Russian Federation. *Hydrometeorology and Ecology*. 2022. No 67. P. 207–220. DOI: 1033933/2713-3001-2022-67-207-220 (In Russ.).
17. Verzhinina, L.K., Krestovskiy, O.I., Kalyuzhnyi, I.L., Pavlova, K.K. Assessment of meltwater losses and forecasts of flood runoff. L: Gidrometeoizdat, 1985. 189 p. (In Russ.).
18. Zhuravin S. A. Study of water at the water balance stations in Russia. St. Petersburg: RIAL ltd, 2022: 224 p. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Барышев Валерий Иванович, аспирант, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23; ORCID: 0000-0002-3756-1683; e-mail: hfl@mail.ru

Калюжный Игорь Леонидович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий гидрофизической лабораторией, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23; Scopus Author ID: 6602575483; ID РИНЦ: 58201; e-mail: hfl@mail.ru

About the authors:

Valerii I. Baryshev, Postgraduate student, State Hydrological Institute, 2nd Liniya V.O., 23, St.-Petersburg 199053 Russia; ORCID: 0000-0002-3756-1683; e-mail: hfl@mail.ru

Igor L. Kalyuzhny, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head, Hydro/physical laboratory, State Hydrological Institute, 2nd Liniya V.O., 23, St.-Petersburg 199053 Russia; Scopus Author ID: 6602575483; ID РИНЦ: 58201; e-mail: hfl@mail.ru