


Выбор периода гидрологического ряда наблюдений для разработки эффективных правил регулирования стока водохранилищем в условиях климатических и антропогенных изменений на водосборе

М.В. Болгов¹  , А.Е. Косолапов² , В.Б. Бубер³, В.В. Ильинич³,
А.Л. Бубер³

 bolgovmv@mail.ru

¹ Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия

² Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону, Россия

³ Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Статья посвящена выявлению изменений режима речного стока под влиянием климатических и антропогенных изменений на водосборе Цимлянского водохранилища. Основная цель работы – объективный выбор расчетного периода из длительного временного ряда наблюдений для получения эффективных правил регулирования стока водохранилищем. **Методы.** Обоснован методический подход к выделению периода из длительного временного ряда наблюдений на основе статистических методов, используемых в гидрометеорологии. В рамках методического подхода для решения поставленных задач был выбран инструмент разностной интегральной кривой стока к ряду наблюдений с 1881 по 2022 гг. Проведена оценка основных статистических характеристик годового и сезонного стоков, квантилей их распределения и соответствующих статистических ошибок, полученных за разные периоды наблюдений. **Результаты.** На основании полученных численных значений для характеристик стока и факторов, влияющих на его режим, выбран репрезентативный период наблюдений за стоком, позволяющий разрабатывать достаточно объективные и эффективные правила управления:

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: речной сток, водосбор, водохранилище, регулирование стока, климатические изменения, антропогенные изменения, статистические расчеты.

Для цитирования: Болгов М.В., Косолапов А.Е., Бубер В.Б., Ильинич В.В., Бубер А.Л. Выбор периода гидрологического ряда наблюдений для разработки эффективных правил регулирования стока водохранилищем в условиях климатических и антропогенных изменений на водосборе // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 5–20. DOI: 10.35567/19994508-2024-3-5-20.

Дата поступления 27.04.2024.

© Болгов М.В., Косолапов А.Е., Бубер В.Б., Ильинич В.В., Бубер А.Л., 2024

A CHOICE OF HYDROLOGICAL OBSERVATIONS SERIES PERIOD FOR THE DEVELOPMENT OF EFFECTIVE RULES FOR THE RESERVOIR CONTROL DURING CLIMATIC AND ANTHROPOGENIC CHANGES IN THE CATCHMENT AREA

Mikhail V. Bolgov¹  , Aleksey E. Kosolapov² , Vladimir B. Buber³, Vitaly V. Ilinich³, Alexander L. Buber³

 bolgovmv@mail.ru

¹*Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Russian Information-Analytical and Scientific Research Water Management Center, Rostov-on-Don, Russia,*

³*A.N. Kostyakov Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Moscow, Russia*

ANNOTATION

Relevance. The article is devoted to the revealing of river runoff changes caused by climatic and anthropogenic changes at the Tsimlyansk reservoir catchment. The main objective of the work is to choose the designed period from the long series of observations in order to obtain effective rules for regulating the reservoir runoff. **Methods.** We have justified the methodical approach to identifying a period from a long-time series of observations based on statistical methods used in hydro/meteorology. Within the frames of methodological approach to solution of the preset problems, we have chosen a tool of difference integral curve of runoff applied to the observation series from 1881 to 2022. We have assessed the main statistical characteristics of annual and seasonal runoff, including quartiles of their distribution and corresponding statistical errors obtained for different observation periods. **Results.** Based on the obtained digital values for the runoff characteristics and factors that influence their regime, we have chosen a representative runoff observation period, which enables to develop sufficiently objective and effective management rules:

Keywords: river flow, watershed, reservoir, flow regulation, climate change, anthropogenic changes, statistical calculations.

For citation: Bolgov M.V., Kosolapov A.E., Buber V.B., Ilinich V.V., Buber A.L. A choice of hydrological observations series period for the development of effective rules for the reservoir control during climatic and anthropogenic changes in the catchment area. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 3. P. 5–20. DOI: 10.35567/19994508-2024-3-5-20.

Received 27.04.2024.

ВВЕДЕНИЕ

Уже более полувека фиксируются значительные признаки потепления климата, которые выходят за рамки обычных колебаний температуры воздуха, водных объектов, почв и других объектов техносферы [1, 2], что не может не влиять на процессы формирования поверхностного и подземного стоков на водосборе. Изменение антропогенных характеристик речных бассейнов во времени не оспариваются, они также влияют на процессы формирования стока [3–5]. Одним из элементов техносферы, изменяющим естественный сток рек, является водохранилище, при этом оно само требует довольно строгой оценки происходящих на его водосборе изменений естественного стока [6].

Изменения во времени климатических характеристик, ландшафтов водосбора, степени использования его водных ресурсов в различных пунктах

речного бассейна из поверхностных и подземных источников и, в целом, характера антропогенной нагрузки обуславливают необходимость решения задачи о выборе хронологического периода наблюдений за стоком, что позволит получить достаточно объективные вероятностные характеристики регулирования речного стока, на которые опираются правила использования водных ресурсов водохранилища (ПИВР). В большинстве случаев при проведении водохозяйственных расчетов для различных типов водохранилищ и согласно российским требованиям выполнения расчетов по актуализации ПИВР¹ необходимы численные значения располагаемых водных ресурсов для расчетных обеспеченностей (P, %): 5 %, 25 %, 50 %, 75 %, 90 %, 95 %, которые должны определяться согласно². Следует особо отметить, что правила трансформации катастрофических половодий и паводков регламентируются особыми разделами документа. Относительно перечисленных обеспеченностей определяются контролируемые элементы водохозяйственных балансов, такие как плановая и реальная водоотдача водопользователям, характерные объемы и уровни водохранилища и др. Соответственно, именно для этих обеспеченностей необходимо иметь реальные и точные значения годовых и сезонных величин стока в современных условиях его формирования, что требует объективного выбора продолжительности ряда наблюдений.

Следует отметить, что два действующих российских инструктивных документа^{1,3} имеют в этом плане противоречия. В первом требования сводятся к выбору наиболее длинного ряда – не менее 40 лет – для моделирования функционирования водохранилища, во втором рекомендован ряд с 1991 по 2020 гг., как наиболее адекватно отражающий климатические изменения последних десятилетий.

Одним из наиболее подверженных климатическим изменениям и антропогенным нагрузкам можно считать водные ресурсы бассейна р. Дон [3, 4, 7] и, в частности, водосбора Цимлянского водохранилища. Соответственно, основной целью представленной работы является выбор периода наблюдений из длительного временного ряда данных для получения объективных и эффективных правил регулирования стока водохранилищем. Решались следующие основные задачи:

- обоснование методического подхода к выделению периода из длительного временного ряда наблюдений на основе статистических методов, используемых в гидрометеорологии;

- выявление характерных периодов по наблюдаемым значениям годового и сезонного стоков по их тенденциям во времени;

- оценка основных статистических характеристик годового и сезонного стоков, квантилей распределения и их статистических ошибок, полученных за разные периоды наблюдений;

¹ Методические указания по разработке правил использования водохранилищ», утверждены приказом МПР РФ от 26.01.2011 г. № 17 (зарег. в Минюсте РФ 04.05.2011 г. № 20655)

² СП 529.1325800.2023. Определение основных расчётных гидрологических характеристик, Москва, 2023, С. 103.

³ Приказ Росгидромета от 18.02.2022г № 64 «О внедрении актуализированных климатических норм в оперативно-производственную практику подведомственных учреждений Росгидромета».

– выбор репрезентативного периода из серии наблюдений за величинами речного стока для получения объективных и эффективных правил управления водохранилищем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходными данными для исследований послужили многолетние наблюдения за стоком р. Дон относительно створа Цимлянского водохранилища, представленные годовыми объемами (W_i [млн м³], i – годы). Гидрологический ряд был переформирован относительно начала водохозяйственного года (III месяц), принятого согласно балансовым соотношениям между стоком и плановой водоотдачей при проектировании водохранилища. В рамках ряда наблюдений выделены внутригодовые интервалы половодья (III–V месяцы), летне-осенней межени (ЛОМ: VI–IX месяцы) и зимней межени (ЗМ: XII–II месяцы). Их хронологические значения в виде объемов стока за выделенные сезоны и в целом годовые представлены на рис. 1.

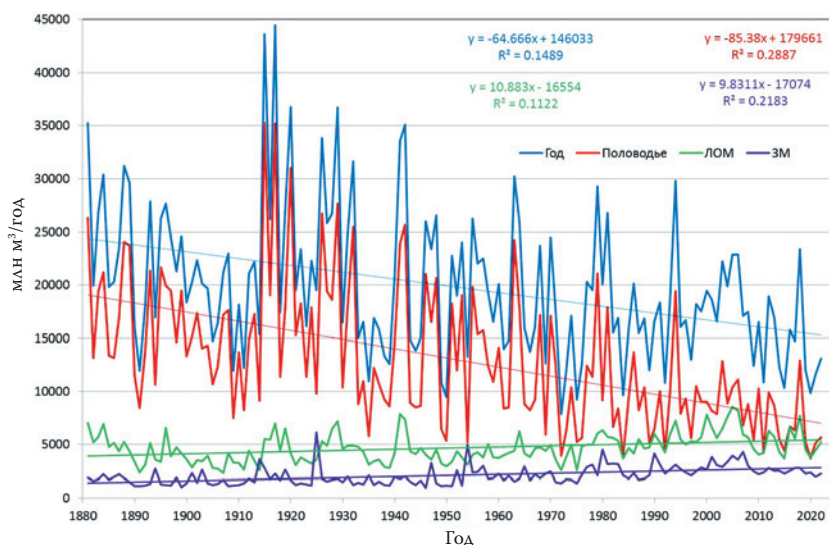


Рис. 1. Гидрографы объемов стока в период 1881–2022 гг.: годовых, за половодья, летне-осеннюю межень (ЛОМ), зимнюю межень (ЗМ).

Fig.1. Hydrographs of runoff volumes in the period 1881-2022: annual, for floods, for summer-autumn low-water (LOM), for winter low-water (WL).

Из совокупности графически представленных хронологических рядов и их линейных трендов нетрудно сделать заключение об общем уменьшении стока за годовые интервалы и половодья и об увеличении стока зимней и летне-осенней межени.

Для оценки различий тенденций хронологических значений стока в рамках всего периода наблюдений в мировой практике использовались различные подходы [8–13 и др.]. Как правило, тенденции выявлялись путем расчета наклона линии Тейла–Сена [14], при этом теоретической основой был математически обоснованный метод Манна-Кэндала [15], в котором для получения

оценки качества трендов ряда из чисел W_i применяется количественная оценка следующих после каждого хронологически наблюдаемого значения – значений меньших, чем само рассматриваемое хронологическое значение W_i .

В целом можно заключить, что на территории Европы в северных регионах чаще преобладает небольшая положительная динамика годового стока, а в средних и южных широтах Европы – снижение годовых объемов речного стока началось в 1965 г., а с начала 1980-х годов объемы постоянно были ниже среднего показателя за 1950–2013 гг. Также отмечено, что динамика годового объема речного стока, по-видимому, согласуется с данными метеорологических наблюдений континентального масштаба в ответ на факторы изменения климата. [12].

В настоящем исследовании выбран инструмент разностной интегральной кривой стока [16, 17 и др.] для выделения трендов, ординатами которых (R_i) в данном варианте являются ежегодно накапливающиеся разности ($K_i - I$), где K_i – модульный коэффициент ($K_i = W_i / W_0$, где i – годы наблюдаемого ряда, а W_0 – средняя многолетняя величина по всему ряду W). Такой подход позволяет выявить периоды с различными тенденциями стока относительно его средней многолетней величины (рис. 2).

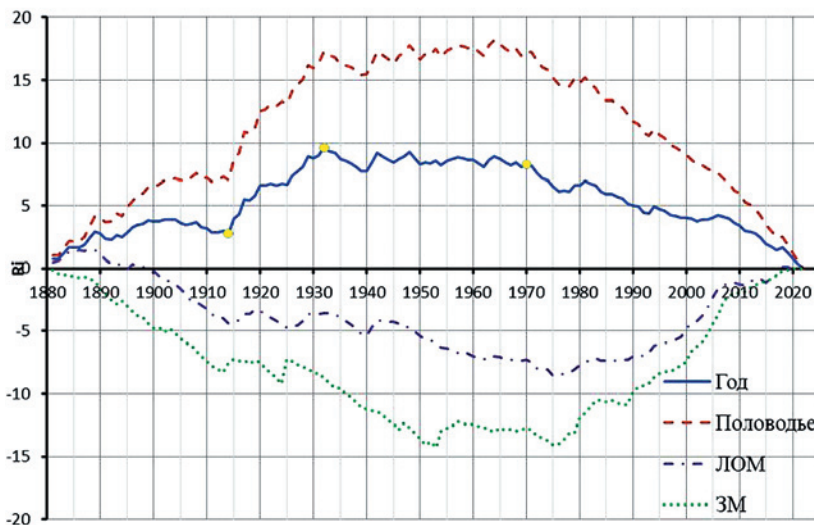


Рис. 2. Разностные интегральные кривые стока для годовых значений, половодья, летне-осенней межени (ЛОМ) и зимней межени (ЗМ).

Fig.2. Difference integral runoff curves for annual values, high water, summer-autumn low water (LOM) and winter low water (WL).

Исходя из данных рис. 2, можно выявить многоводные периоды (кривая поднимается), соответствующие малым колебаниям относительно средне-многолетнего значения (примерно горизонтальная линия) и маловодные (кривая понижается). В целом, анализ тенденций разностных интегральных кривых стока р. Дон в створе Цимлянского водохранилища дает основания выделить следующие характерные периоды.

Для годовых значений:

1881–1932 гг. – многоводный период, поскольку кривая в целом имеет достаточно выраженный подъем, т. е. годовые значения преимущественно выше среднемноголетнего, этот период можно назвать условно многоводным;

1933–1970 гг. – примерно средний по водности период;

1971–2022 гг. – маловодный период, поскольку наклон кривой идет вниз.

Для половодья:

1881–1932 гг. – период с большими половодьями;

1933–1964 гг. – период примерно средних по водности половодий;

1965–2022 гг. – период половодий ниже их среднего объема.

Для летне-осенней межени:

1881–1974 гг. – период летне-осенней межени ниже их среднего объема;

1975–2022 гг. – период летне-осенней межени выше их среднего объема.

Для зимней межени:

1881–1951 гг. – период зимней межени ниже их среднего объема;

1952–1974 гг. – период примерно средних по водности объемов зимней межени;

1975–2022 гг. – период зимней межени выше их среднего объема.

Для каждого ряда годовых и сезонных величин стока из выше выделенных рядов наблюдений последних десятилетий и всего ряда наблюдений, а также для ряда с рекомендованной инструктивным письмом Росгидромета продолжительностью (1991–2020 гг.)³ были определены традиционные статистические характеристики: среднее (W_o), коэффициенты вариации и асимметрии. Их оценки получены как методом моментов (C_v , C_s , C_s/C_v), так и методом приближенного наибольшего правдоподобия (C_v^* , C_s/C_v^*) согласно² [18], исходя из априори принятой гипотезы, что численные величины стока каждого выделенного ряда наблюдений соответствуют трехпараметрическому закону гамма-распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля. В таблицах (1–4) также приведена как наиболее строго определенная величина среднеквадратических ошибок ($\sigma_{1881-2022}$) по ряду в 142 года: для нормы стока (W_o) – согласно² и для C_v , C_s [19].

Таблица 1. Статистические параметры рядов наблюдений за годовым стоком
Table 1. Statistical parameters of the observation series over the annual runoff

Год	1881–2022	1881–1932	1933–1970	1971–2022	1991–2020	$\sigma_{1881-2022}$
Число лет	142	52	38	63	30	142
W_o , млн м ³	19 837	23 507	19 158	16 668	17 021	578
C_v	0,35	0,31	0,32	0,29	0,27	0,02
C_v^*	0,35	0,31	0,34	0,29	0,27	0,02
C_s	0,95	0,91	0,79	0,62	0,89	0,29
C_s/C_v	2,71	2,9	2,44	2,13	3,37	х
C_s/C_v^*	3	3	3	2,5	2,5	х

Таблица 2. Статистические параметры рядов наблюдений за стоком половодья
Table 2. Statistical parameters of the observation series over the high-water period runoff

Год	1881–2022	1965–2022	1991–2020	$\sigma_{1881-2022}$
Число лет	142	58	30	142
Среднее	13 042	8 950	8 446	547
C_v	0,5	0,44	0,39	0,05
C_v^*	0,5	0,44	0,4	0,05
C_s	0,968	1,17	1,19	0,4
C_s/C_v	1,93	2,67	3,09	x
C_s/C_v^*	3	3	3	x

Таблица 3. Статистические параметры рядов наблюдений за стоком лета-осени
Table 3. Statistical parameters of the observation series over the summer-fall runoff

Год	1881–2022	1975–2022	1991–2020	$\sigma_{1881-2022}$
Число лет	142	48	30	142
Среднее	4 684	5 470	5 766	114
C_v	0,29	0,23	0,23	0,02
C_v^*	0,29	0,23	0,23	0,02
C_s	0,644	0,459	0,415	0,29
C_s/C_v	2,26	2,01	1,79	x
C_s/C_v^*	3	2	2	x

Таблица 4. Статистические параметры рядов наблюдений за стоком зимы
Table 4. Statistical parameters of the observation series over the winter runoff

Год	1881–2022	1975–2022	1991–2020	$\sigma_{1881-2022}$
Число лет	142	48	30	142
Среднее	2 111	2 715	2 810	73
C_v	0,41	0,25	0,19	0,045
C_v^*	0,41	0,25	0,19	0,045
C_s	1,45	0,77	1,2	0,52
C_s/C_v	3,54	3,07	6,17	x
C_s/C_v^*	4	3	6	x

Из полученных таким образом статистических характеристик выбирали экспертным образом окончательно принятые значения среднего коэффициента вариации и соотношения между коэффициентами асимметрии и вариации, согласно которым строили аналитические кривые обеспеченности.

Кроме вышеперечисленных операций по многолетним суточным данным метеостанции г. Воронежа, находящейся примерно в зоне центра тяжести водосбора, для косвенной оценки влияния зимних оттепелей на водность зимней межени были проанализированы длительность годовых периодов с отрицательными температурами, а также количество и длительность глубоких оттепелей с повышением температур зимой выше 2,5 °С. При таких оттепелях

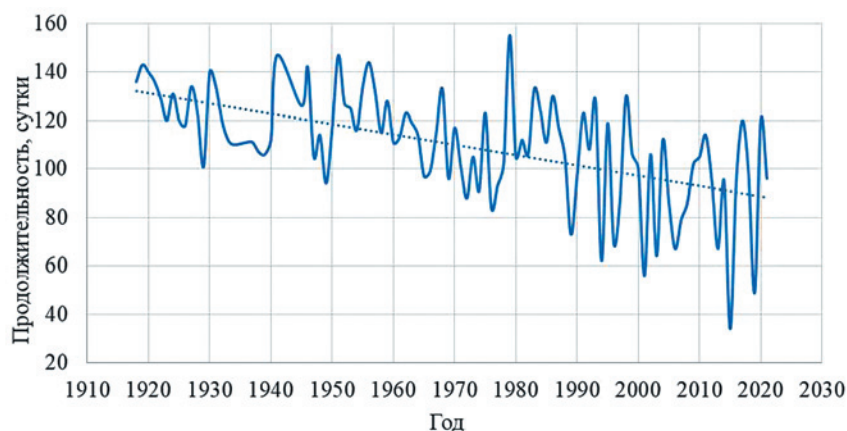


Рис. 3. Продолжительность периода с отрицательными температурами.
Fig.3. Duration of the period with negative temperatures.

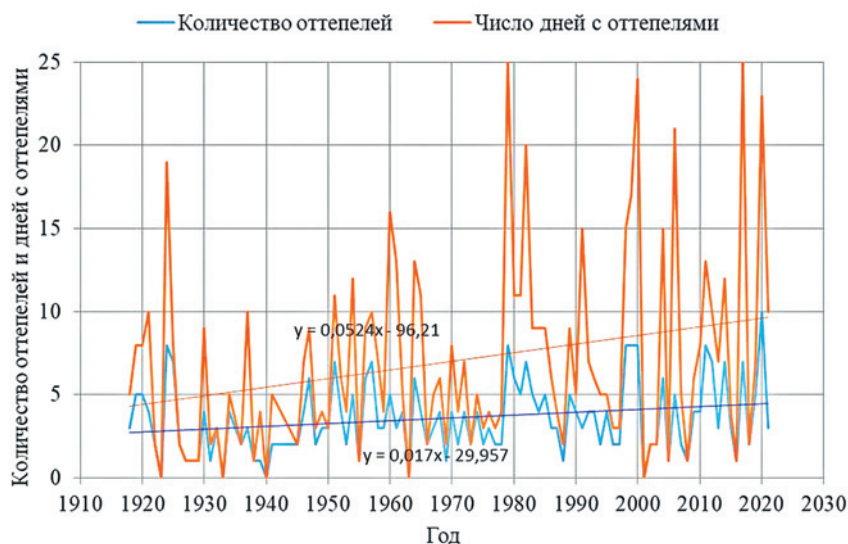


Рис. 4. Количество глубоких оттепелей и дней с оттепелями по годам наблюдений.
Fig.4. Number of deep thaws and days with thaws by year of observation

обычно наблюдается чувствительная фильтрация стаявшего снега в почвенные и грунтовые воды. Результаты представлены на рис. 3 и рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из представленных данных таблиц 1–4 следует, что значения статистических характеристик, определенных для разных периодов, имеют чувствительные различия и во многих случаях их различия по модулю превышают численные значения среднеквадратической ошибки, особенно это касается средних значений стока. При этом нетрудно заметить, что для годовых и половодных значений два последних периода имеют меньшие значения, что является численным подтверждением уменьшения годового и половодного стока с течением времени, выявленного по разностным интегральным кривым.

Установленные тенденции изменений статистических параметров сезонного стока также численно подтверждаются результатами, приведенными в табл. 3 и табл. 4, однако для летне-осеннего и зимнего сезонов наблюдается другая направленность, соответствующая тенденциям их разностных интегральных кривых стока.

Исходя из полученных значений в табл. 5, согласно рекомендациям², были определены критерии однородности Фишера и Стьюдента для стока годовых и сезонных периодов относительно выделенных гидрологических рядов (1 – ряд 1881–2022 гг.; 2 – ряд 1971–2022 гг.; 3 – ряд 1991–2020 гг.) относительно уровня значимости $\alpha=0,05$ (табл. 5). Из численных значений таблицы можно заметить, что различия средних значений стока в указанных периодах являются статистически значимыми для всех внутригодовых сезонов за исключением пары рядов последних десятилетий (1971–2022 гг. и 1991–2020 гг.). Для них средние значения стока можно считать практически одинаковыми для всех сезонов. Что же касается дисперсий, можно утверждать, что они значительно различаются в основном для половодного и годового стока в парах 1–2 и 1–3 указанных гидрологических рядов. Следовательно гидрологические ряды 1971–2022 гг. и 1991–2020 гг. могут считаться статистически однородными и взаимозаменяемыми в статистическом смысле.

Таблица 5. Значения критерия Фишера (F) и Стьюдента (t) и соответствующие критические значения (F_т и t_т)

Table 5. Values of Fisher (F) and Student (S) criteria and the corresponding critical values (F_t and t_t)

F между рядами	Годовой сток		Половодье		Лето-осень		Зима	
	Критерий Фишера							
	F	F _т	F	F _т	F	F _т	F	F _т
F _{1/2}	2,0	1,5	3,0	1,5	1,0	1,5	1,4	1,5
F _{1/3}	2,3	1,7	4,0	1,7	1,0	1,55	2,5	1,7
F _{2/3}	1,1	1,8	1,4	1,8	1,05	1,69	1,75	1,77
t между рядами	Критерий Стьюдента							
	t	t _т	t	t _т	t	t _т	t	t _т
	t _{1/2}	3,59	1,98	5,7	1,98	3,0	1,97	4,2
t _{1/3}	2,8	2,0	5,7	1,99	4,0	2,0	5,7	2,00
t _{2/3}	0,3	2,0	0,3	2,0	1,42	1,99	1,3	2,0

Изменение традиционных статистических параметров (среднее, C_v и C_s) не считается окончательным критерием изменения характеристик стока, поскольку при разработке ПИВР и их актуализации составляются водохозяйственные балансы, основой которых являются объемы стока обеспеченности 5 %, 25 %, 50 %, 75 %, 90 % и 95 %. Для их оценки и общего заключения о вероятностных колебаниях стока были построены аналитические кривые обеспеченности, отражающие перечисленные квантили распределения. Объективность этих значений определяется объективностью ряда наблюдений, на

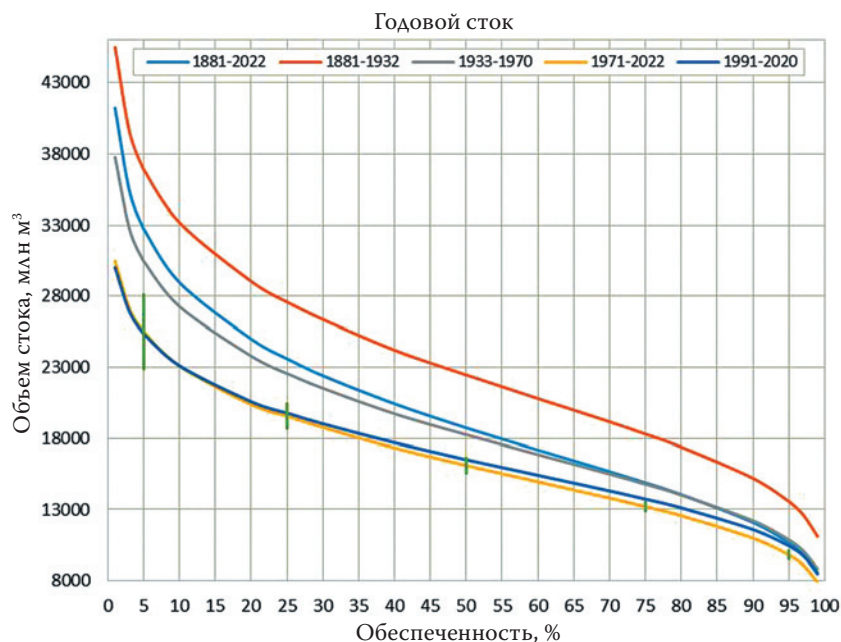


Рис. 5. Кривые обеспеченности годового объема стока за разные периоды наблюдений.
Fig. 5. Probabilistic curves of annual runoff volume for different periods of observation.

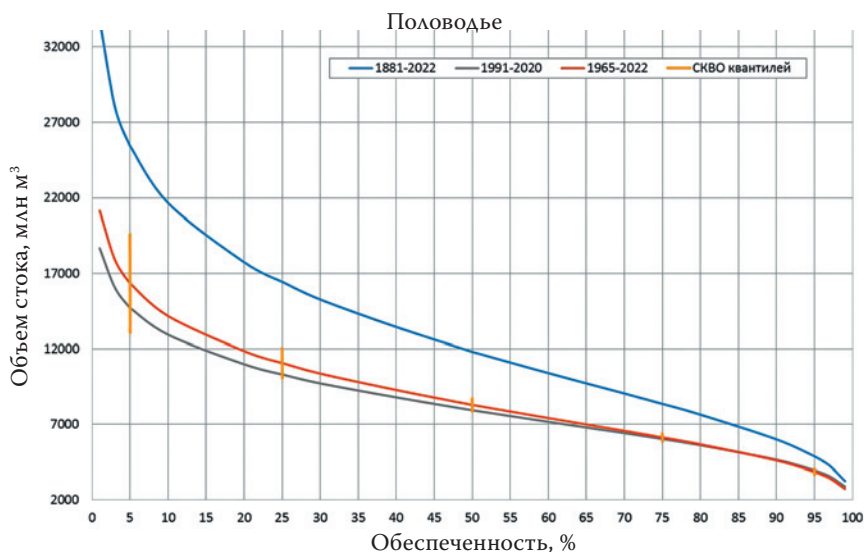


Рис. 6. Кривые обеспеченности объемов половодья за разные периоды наблюдений.
Fig. 6. Probabilistic curves of flood volumes for different observation periods.

основе которых получены основные статистические параметры кривых обеспеченности. В данном случае для выбранных в качестве расчетных периодов наблюдений построены кривые обеспеченности годовых (рис. 5) и сезонных значений стока (рис. 6–8).

Вертикальные отрезки на рис. 5 соответствуют диапазону 2σ – двойной среднеквадратической ошибки ординат 5 %, 25 %, 50 %, 75 %, 95 % относитель-

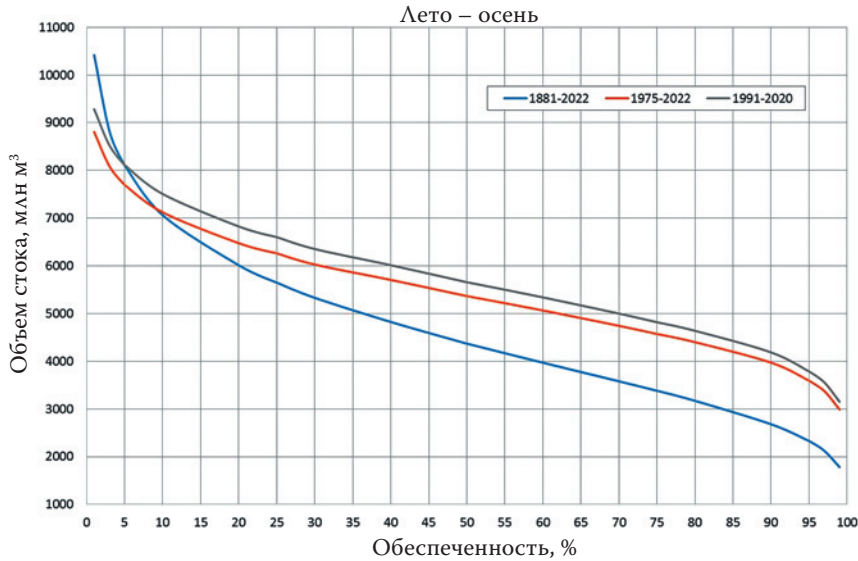


Рис. 7. Кривые обеспеченности объемов стока летне-осенней межени за разные периоды наблюдений.

Fig. 7. Probabilistic curves of runoff volumes during summer-autumn low water periods for different periods of observation.

но кривой обеспеченности, построенной по данным периода 1971–2022 гг. Как видно из рис. 5, кривые распределений периодов 1971–2022 и 1991–2020 годов являются достаточно близкими. Все остальные рассмотренные периоды существенно отличаются своей большей водностью. Таким образом, можно заключить, что для достаточно объективных расчетов регулирования стока Цимлянским водохранилищем на современном этапе можно принять гидрологический ряд годовых значений из периода с 1971 по 2022 годы.

Из данных рис. 6 также очевидно, что к современному периоду сток половодья существенно сократился, а аналогичные диапазоны 2σ ординат 5 %, 25 %, 50 %, 75 %, и 95 % относительно кривой обеспеченности, построенной по данным периода 1965–2022 гг. свидетельствуют о том, что можно выбрать ряд из этого периода для проведения расчетов в рамках принятых погрешностей.

Данные из рис. 7 позволяют заключить, что летне-осенний сток за весь период характеризуется существенной асимметрией, а сток периода 1975–2022 гг. отличается несущественно (в рамках 2σ) от стока за период 1991–2020 гг. При этом сток обоих этих периодов значительно больше стока всего периода наблюдений в зоне обеспеченности с 20 % до 100 %. Аналогичный вывод можно сделать и относительно стока за зимний сезон по рис. 8.

В целом, из совокупности приведенных разностных интегральных кривых и кривых обеспеченности величины годового и сезонного стоков можно повторить вывод, что величины стока годовых интервалов и половодья в последние десятилетия стали существенно меньше, а величины зимнего и летне-осеннего стока увеличились. Для объективности водохозяйственных расчетов Цимлянского водохранилища необходимо выбирать период последних десятилетий. В данном случае представляется наиболее объективным вы-

брать расчетный хронологический ряд из периода с 1975 по 2022 годы с учетом анализа подробности и качества данных о стоке, водопотреблении и элементах водного баланса как самого водохранилища, так и его водосбора в целом.

Исходя из совокупного анализа осадков и испарения [3, 20, 21] с водосбора в последние десятилетия, можно сделать вывод, что эти основные элементы водного баланса на водосборе не являются статистически значимыми и не могли привести к существенным изменениям стока как относительно его сезонных величин, так и годовых.

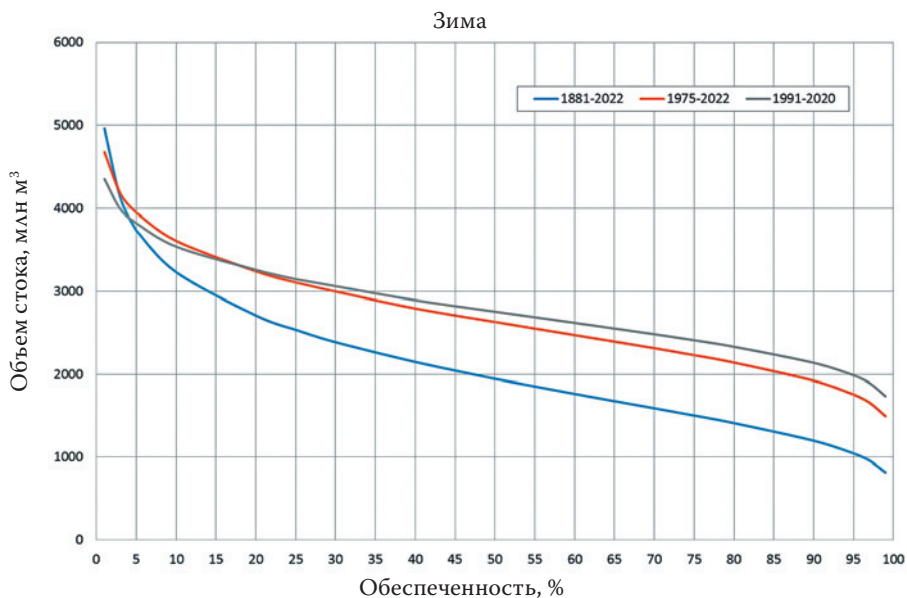


Рис. 8. Кривые обеспеченности объемов стока зимней межени за разные периоды наблюдений.

Fig. 8. Probabilistic curves of winter low-water flow volumes for different observation periods.

В рамках проверки гипотезы о влиянии участвовавших оттепелей на увеличение стока зимней межени проанализированы изменение температурного режима в зимние периоды на основе представленных выше рис. 3 и рис. 4. Исходя из конфигураций их графиков и трендов, однозначно можно констатировать, что длительность периода с отрицательными температурами существенно сократилась. В частности, их средняя продолжительность с 1918 г. по 1979 г. составила 119 суток, с 1980 по 2021 – 97 суток, т. е. в последние десятилетия ряд выпавших осадков перешел из снежного вида в дождевой с немедленной фильтрацией в почвогрунты. Количество глубоких оттепелей увеличилось, как и число суток с температурой выше $2,5^{\circ}\text{C}$, несмотря на сокращение длительности зимнего периода. Соответственно, фильтрация в почвенные и грунтовые воды заведомо возросла, что свидетельствует, по крайней мере, о частичном повышении грунтовых вод и водности зимней межени за счет оттепелей и сокращения периода с отрицательными температурами.

В целом, отмеченные тенденции водности современного периода на рассматриваемом речном бассейне связаны с различными причинами. По всей

видимости, понижение годового и половодного стока, в первую очередь, связаны с интенсивным строительством различного вида гидротехнических сооружений и повышением общего водопользования с начала 1970-х годов.

Причинами повышения водности на реках в меженный период могут быть:

а) зафиксированное на наблюдательных скважинах повышение уровня грунтовых вод [3], которое могло возникнуть ввиду возможного их поступления из-за пределов Донского речного бассейна, а также их пополнения в зимний период во время участвовавших оттепелей;

б) после орошения – возвратные воды, поступившие сначала в грунтовые воды, а затем в речную сеть, а также сбросные воды в нижний бьеф гидроузлов;

в) воды предприятий промышленности, взятые из грунтовых горизонтов, но сброшенные в речную сеть;

г) специальные попуски в нижний бьеф водохранилищ.

Некоторые элементы из представленных выводов могут быть скорее гипотезами, чем утверждениями, поскольку они должны проверяться, в т. ч. с помощью новых исследований и критериев.

Несмотря на то, что выбор периода гидрологического ряда наблюдений для разработки эффективных правил регулирования стока зависит от условий формирования стока, климатических и антропогенных изменений на водосборе, для речных бассейнов водохранилищ Европейской территории России можно рекомендовать предложенный подход, который опирается на инструмент разностной интегральной кривой стока, выделению из анализа этой кривой характерных периодов водности, оценки однородности таких периодов, сравнение квантилей построенных кривых обеспеченности стока за выбранные периоды с их статистическими погрешностями.

ВЫВОДЫ

Предложенный подход к выбору репрезентативного гидрологического ряда наблюдений для получения достаточно объективных водохозяйственных характеристик регулирования стока Цимлянским водохранилищем на современном этапе может считаться приемлемым и на его основе могут разрабатываться и актуализироваться правила использования водных ресурсов (ПИВР).

Для объективных водохозяйственных расчетов Цимлянского водохранилища и актуализации ПИВР рекомендуется выбирать период последних десятилетий с 1975 по 2022 годы с учетом анализа подробности и качества данных о стоке, водопотреблении и элементах водного баланса как самого водохранилища, так и его водосбора в целом. В этом плане предпочтителен период с 1981 года по 2022 год, для которого имеются выверенные суточные данные притока к Цимлянскому водохранилищу.

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что подход к выбору репрезентативного гидрологического ряда наблюдений для разработки ПИВР и их актуализации должен иметь индивидуальную направленность по отношению к каждому водохранилищу и опираться на конкретные условия формирования стока на водосборе с учетом климатических изменений.

На современном этапе очевидна необходимость разработки критериев к выявлению причин изменения водности р. Дон на основе детальных исследований условий формирования стока реки с учетом изменения климатических характеристик, степени взаимодействия поверхностных и грунтовых вод, ландшафтных изменений речного бассейна, степени водопользования его водными ресурсами и других антропогенных воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научное издание технологий, 2022. 124 с. Режим доступа: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf (дата обращения 15.04.2024).
2. State of the Global Climate. WMO-No 1347. World Meteorological Organization, 2024, P. 48. URL: https://library.wmo.int/viewer/68835/download?file=1347_Statement_2023_en.pdf&type=pdf&navigator=1 (дата обращения 15.04.2024).
3. Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.А. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 204 с.
4. Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Ландшафтно-гидрологические изменения в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 674–685.
5. Milliman JD, Farnsworth KL, Jones PD, et al. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000. *Global Planetary Change*. 2008. 62. P. 187–194. DOI:10.1016/j.gloplacha.2008.03.001.
6. Добровольский С.Г., Лебедева И.П., Истомина М.Н., Соломонова И.В. Водохранилища мира: анализ количественных параметров и воздействия на структуру многолетних изменений стока регулируемых рек // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 1. С. 3–15.
7. Киреева М.Б., Фролова Н.А. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 1. С. 60–76. DOI: 10.35567/1999-4508-2013-1-4.
8. Bard A., Renard B., Lang M. et al. Trends in the hydrologic regime of Alpine rivers. // *Journal of Hydrology*. 2015. 529. P. 1823–1837. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.07.052.
9. Bormann H. and Pinter N. Trends in low flows of German rivers since 1950: comparability of different low-flow indicators and their spatial patterns // *River Resources Application*. 2017. 33. P. 1191–1204. DOI:10.1002/rra.3152.
10. Durocher M., Requena A.I., Burn D.H. and Pellerin J. Analysis of trends in annual streamflow to the Arctic Ocean // *Hydrological Processes*. 2019. 33. P. 1143–1151.
11. Gosling S.N., Taylor R.G., Arnell N.W. and Todd M. C. A comparative analysis of projected impacts of climate change on river runoff from global and catchment-scale hydrological models // *Hydrological Earth System Science*. 2011. 15. P. 279–294. DOI:10.5194/hess-15-279-2011.
12. Gudmundsson L., Seneviratne S.I., and Zhang X. Anthropogenic climate change detected in European renewable freshwater resources // *Natural Climate Change*. 2017. 7. P. 813–816. DOI:10.1038/nclimate3416.
13. Masseroni D., Camici S., Cislighi A. et al. The 63-year changes in annual streamflow volumes across Europe with a focus on the Mediterranean basin // *Hydrological Earth System Science*. 2021. 25. P. 5589–560. DOI:10.5194/hess-25-5589-2021.
14. Sen P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau // *Journal of American Statistic Association*. 1968;63:1379–1389.
15. Mann H.B. Nonparametric tests against trend // *Econometrica*. 1945. 13. P. 245–259.
16. Дроздов О.А. О свойствах интегрально-разностных кривых // Труды Главной геофизической обсерватории. 1962. Вып. 162. С. 3–6.
17. Belolubtsev A.I., Ilinich V.V., Dronova E.A., Asaulyak I.F. and Kuznetsov I.A. Assessment of Trends of Air Temperature Based on 140-year Observations of V.A. Mikhelson Meteorological Observatory // *Caspian Journal of Environment Science*. 2021. 5(19). P. 909–914, DOI:10.22124/cjes.2021.5265.

18. Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO-№168. Geneva, 2009. 738 p.
19. Рождественский А.В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик. Л.: Гидрометиздат, 1977. 270 с.
20. Многолетние изменения испарения на Европейской территории России по данным водоиспарительной сети: научно-прикладной справочник / под ред. В.С. Вуглинского. СПб., 2021. 64 с.
21. Ташилова А.А. Изменения в распределении региональных осадков в ответ на глобальное потепление // Наука. Инновации. Технологии. 2021. № 3. С. 73–90.

REFERENCES

1. Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary. St. Petersburg: High technology, 2022.: Available from: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf/ (In Russ.).
2. State of the Global Climate. WMO-No 1347. World Meteorological Organization, 2024. Available from: : https://library.wmo.int/viewer/68835/download?file=1347_Statement_2023_en.pdf&type=pdf&navigator=1.
3. Dzhamalov RG, Kireeva MB, Kosolapov AE, Frolova NL. Water resources of the Don basin and their ecological state. M.: GEOS, 2017 (In Russ.).
4. Dolgov SV, Koronkevich N.I, Barabanova EA. Landscape and hydrological changes in the Don basin. *Water Resources*. 2020; 47(6): 674–685 (In Russ.).
5. Milliman JD, Farnsworth KL, Jones PD, et al. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000. *Global Planet. Change*. 2008; 62:187–194. DOI:10.1016/j.gloplacha.2008.03.001
6. Dobrovolsky SG, Lebedeva IP, Istomina MN, Solomonova IV. Reservoirs of the world: analysis of quantitative parameters and the impact on the structure of long-term changes in the flow of regulated rivers. *Water Resources*. 2020;47(1):3-15 (In Russ.).
7. Kireeva MB, Frolova NL. Modern features of the spring flood of rivers in the Don basin. *Water Management of Russia*. 2013;1:60–76 (In Russ.).
8. Bard A, Renard B, Lang M, et al. Trends in the hydrologic regime of Alpine rivers. *Journal of Hydrology*. 2015; 529:1823–1837. DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.07.052
9. Bormann H and Pinter N. Trends in low flows of German rivers since 1950: comparability of different low-flow indicators and their spatial patterns. *River Resources Application*. 2017; 33:1191–1204. DOI:10.1002/rra.3152.
10. Durocher M, Requena AI, Burn DH and Pellerin J. Analysis of trends in annual streamflow to the Arctic Ocean. *Hydrological Processes*. 2019. 33:1143–1151.
11. Gosling SN, Taylor R G, Arnell NW and Todd M C. A comparative analysis of projected impacts of climate change on river runoff from global and catchment-scale hydrological models. *Hydrological Earth System Sciences*. 2011;1 5:279–294. DOI:10.5194/hess-15-279-2011.
12. Gudmundsson L, Seneviratne S.I, and Zhang X. Anthropogenic climate change detected in European renewable freshwater resources. *Natural Climate Change*. 2017; 7:8 13–816. DOI:10.1038/nclimate3416.
13. Masseroni D, Camici S, Cislighi A, et al. The 63-year changes in annual streamflow volumes across Europe with a focus on the Mediterranean basin. *Hydrological Earth System Science*. 2021; 25:5589–5601. DOI:10.5194/hess-25-5589-2021.
14. Sen PK. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of American Statistical Association*. 1968;63:1379–1389.
15. Mann H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. 1945;13:245–259.
16. Drozdov O.A. On the properties of integral-difference curves. *Proceedings of the Main Geophysical Observatory*. 1962; 162:3-6.
17. Belolubtsev A.I., Ilinich V.V., Dronova E.A., Asulyak I.F. and Kuznetsov I.A. Assessment of Trends of Air Temperature Based on 140-year Observations of V.A. Mikhelson Meteorological Observatory. *Caspian Journal of Environment Sciences*. 2021;5(19):909-914. DOI:10.22124/cjes.2021.5265
18. Guide to Hydrological Practices. Vol. II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO-No. 168. Geneva, 2009.

19. Rozhdestvensky A.V. Assessing the accuracy of distribution curves of hydrological characteristics. L.: Gidrometizdat, 1977 (In Russ.).
20. Long-term changes in evaporation in the European territory of Russia according to water evaporation network data. Scientific and applied reference book edited by V.S. Vuglinsky. St. Petersburg, 2021 (In Russ.).
21. Tashilova A.A. Changes in the distribution of regional precipitation in response to global warming. *Science. Innovation. Technologies*. 2021;3:73–90 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Болгов Михаил Васильевич, д-р техн. наук, заведующий лабораторией моделирования поверхностных вод, главный научный сотрудник, Институт водных проблем Российской академии наук, 119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 3; ORCID: 0000-0003-3193-6488; e-mail: bolgovmv@mail.ru

Косолапов Алексей Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, директор ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; ORCID: 0000-0001-2345-6789; e-mail: akosol@mail.ru

Бубер Владимир Борисович, канд. физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова», 127550, Россия, Москва, ул. Большая Академическая, д. 44, корп. 2; e-mail: bvb2010@mail.ru

Ильинич Виталий Витальевич, канд. техн. наук, профессор, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова», 127550, Россия, г. Москва, ул. Большая Академическая, д. 44, корп. 2; e-mail: vilinitch@gmail.com

Бубер Александр Леонидович, заведующий отделом мелиоративного водохозяйственного комплекса, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова», 127550, Россия, Москва, ул. Большая Академическая, д. 44, корп. 2; e-mail: buber49@yandex.ru

About the authors

Mikhail V. Bolgov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Surface Water Modeling Laboratory, Chief Researcher, Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina, 3, 119333, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0003-3193-6488, bolgovmv@mail.ru

Aleksey E. Kosolapov, Professor, Doctor of Technical Sciences, Director, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul. Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, 344037, Russia; ORCID: 0000-0001-2345-6789; e-mail: akosol@mail.ru

Vladimir B. Buber, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, A.N. Kostyakov Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation ul. Bolshaya Akademicheskaya, 44, bldg. 2, Moscow, 127550 Russia; bvb2010@mail.ru

Vitaly V. Ilyinich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, A.N. Kostyakov Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation ul. Bolshaya Akademicheskaya, 44, bldg. 2, Moscow, 127550 Russia; vilinitch@gmail.com

Alexander L. Buber, Head, Department of water reclamation complex, Leading Researcher, A.N. Kostyakov Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation ul. Bolshaya Akademicheskaya, 44, bldg. 2, Moscow, 127550 Russia; buber49@yandex.ru