

Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 644—674.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(69):644—674.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 556.535(282.247.29)
doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-644-674

Анализ изменчивости гидрологических характеристик на устьевом участке реки Преголи (юго-восточная Балтика)

Руслан Владимирович Боскачѳв¹, Борис Валентинович Чубаренко²

¹ Калининградский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды — филиал ФГБУ «Северо-Западное управление УГМС», г. Калининград, Российская Федерация, combat.130@mail.ru

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе выполнен статистический анализ изменчивости расхода воды в рукавах Нижняя Преголя и Дейма (по данным гидрологического поста (ГП) Преголя-Гвардейск и Дейма-Гвардейск в 1990—2020 гг.) и уровня воды Калининградского / Вислинского¹ залива (ГП Краснофлотское), рукава Нижняя Преголя (ГП Калининград-РП), реки Преголи (ГП Преголя-Гвардейск), рукава Дейма (ГП Дейма-Полесск) и Куршского залива (ГП Открытое) в период 2002—2017 гг. Выявлен положительный тренд, взаимосвязь колебаний уровня, особенности перераспределения стока р. Преголи по рукавам и изменения режима распределения на рубеже 2000 г.

Ключевые слова: расход и уровень воды, корреляция, временной тренд, статистические характеристики, подпор.

Благодарности. Авторы статьи выражают искреннюю благодарность сотрудникам Калининградского ЦГМС — филиала ФГБУ «Северо-Западное УГМС» за оказанную поддержку, О. В. Горелец и П. В. Терскому (ГОИН) за исключительно полезные замечания и советы, позволившие провести более тщательный анализ материала и улучшить рукопись, а также А. В. Килесо (ИОРАН) за помощь в численном анализе критериев KPSS и Дики—Фуллера. Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 19–35–90108 (Р. В. Боскачѳв) и темы № FMWE–2021–0012 государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Б. В. Чубаренко).

Для цитирования: Боскачѳв Р. В., Чубаренко Б. В. Анализ изменчивости гидрологических характеристик на устьевом участке реки Преголи (юго-восточная Балтика) // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 644—674. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-644-674.

¹ На официальных картах северная часть залива, расположенная в границах Российской Федерации, называется Калининградским заливом, южная (польская) часть — Вислинским. Историческое название — Frisches Haff (нем.). В польских источниках весь залив называется Вислинским (Zalew Wiślany), в англоязычных изданиях употребляется этноним Vistula Lagoon. Согласно [1] в работе будет использовано название Калининградский / Вислинский, хотя оно имеет недочет — читается как «или-или», а не «и».

Original article

Analysis of the variability of hydrological characteristics at the mouth section of the Pregolya River (Southeast Baltic)

Ruslan V. Boskachev¹, Boris V. Chubarenko²

¹ Kaliningrad Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring — local branch of the Federal State Budgetary Institution “North-Western Department of the ROSHYDROMET”, Kaliningrad, Russian Federation, combat.130@mail.ru

² Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Summary. Interest in studying the statistical features of the temporal variability of water levels and discharges in the hydrological system the Vistula Lagoon — the Pregolya River — the Curonian Lagoon is closely related to the theoretical possibility of the flow of brackish waters from the Vistula Lagoon up the Downstream Pregolya branch to the town of Gvardeisk and further through the Deyma branch to the Curonian Lagoon. The work includes a statistical analysis of the variability of hydrological characteristics at the mouth section of the Pregolya River: water discharge in the Downstream Pregolya and Deyma branches (according to the Pregolya-Gvardeysk and Deyma-Gvardeysk data in 1990—2020), the water level of the Vistula Lagoon (Krasnoflotskoye), the Downstream Pregolya branch (Kaliningrad-Fishery Port), the Pregolya River (Pregolya-Gvardeysk), the Deyma branch (GP Deima-Polessk) and the Curonian Lagoon (Otkrytoe) in the period 2002—2017. A positive trend for water level was revealed especially for the point of splitting of the Pregolya River into two mouth branches (Downstream Pregolya and Deyma). The relationship of the water level fluctuations showed the influence of lagoons water level oscillations upstream the mouth branches of the Pregolya River. The redistribution of the runoff of the Pregolya River between the two mouth branches depends on the runoff magnitude. The structural change in the runoff redistribution mode was found at the turn of 2000.

Acknowledgements. The authors of the article express their sincere gratitude to the staff of the Kaliningrad Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring — local branch of the Federal State Budgetary Institution “North-Western Department of the ROSHYDROMET” for their support, Gorelets O. V. and Terskiy P. V. (GOIN) for extremely useful remarks and advice, which made it possible to deepen the analysis of the material and improve the manuscript, as well as Kileso A. V. (IORAN) for his help in the numerical analysis of the KPSS and Dickey-Fuller criteria. The study was supported by RFBR grant no. 19–35–90108 (Boskachev R. V.) and the topic No. FMWE–2021–0012 of the State Assignment of the Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences (Chubarenko B. V.).

For citation: Boskachev R. V., Chubarenko B. V. Analysis of the variability of hydrological characteristics at the mouth section of the Pregolya River (Southeast Baltic). *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):644—674. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-644-674. (In Russ.).

1. Введение

Калининградский/Вислинский [1] и Куршский заливы находятся в юго-восточной части Балтийского моря (рис. 1). По аналогии с речной¹ [2] и озерно-речной² [3]

¹ Речная система — совокупность рек, сливающихся вместе и выносящих свои воды в виде общего потока [1].

² Озерно-речная система — природные водные образования, состоящие из соединенных между собой рек и озер [3].

системами эти заливы также рассматриваются как связанная гидрологическая система¹ [4—6].

Связующим звеном для компонентов этой гидрологической системы являются устьевые рукава р. Преголи (рис. 1) — Нижней Преголя² и Деймы [7—8]. Рукав Нижняя Преголя впадает в принимающий водоем — Калининградский залив, а рукав Дейма — в Куршский [9]. То есть в объекте исследования «Калининградский залив — рукав Нижняя Преголя — рукав Дейма — Куршский залив» присутствуют 2 водотока и 2 приемных водоема.

Рукав Нижняя Преголя является более полноводным, доли расходов воды рукавов Нижняя Преголя и Дейма от общего расхода р. Преголи составляют примерно 40—60 % (1901—1956 гг.) [9] и 34—66 % (1936—1942 и 1960—1965 гг.) [10] соответственно. Авторский анализ распределения расходов между рукавами р. Преголи за период 1990—2020 гг. показал соотношение 54—46 % [7]. Поскольку устойчивой тенденции в изменении долей расходов в течение времени не обнаруживается, можно констатировать, что эти доли находятся в пределах 54—66 % и 34—46 % соответственно [7, 9, 11].

Рост уровня моря характерен как для открытого побережья юго-восточной Балтики (скорость роста 1,3—1,5 см/10 лет в XX в.) [12—14], так и для Куршского и Калининградского / Вислинского заливов (увеличение скорости роста уровня до 3,7—4,5 см/10 лет отмечено к концу XX — началу XXI в. [15—18], а для устья р. Преголи в период 1996—2015 гг. даже 6,4 см/10 лет [12]). Это дает основание предполагать, что в рядах уровня воды в изучаемой системе присутствует линейный тренд.

Ранее (за исключением [7]) не проводилось обсуждения гидрологических характеристик рукавов Нижней Преголи и Деймы на согласованных наборах данных (временной изменчивости и корреляции между собой рядов уровня воды, а также перераспределения стока р. Преголи по рукавам). Целью настоящей работы является статистический анализ изменчивости уровней воды на гидрологических постах системы «Калининградский залив — река Преголя — Куршский залив» за 16-летний период 2002—2017 гг. и ежедневных расходов р. Преголи и ее рукавов Нижней Преголи и Деймы за 31-летний (типичный для климатических оценок) период 1990—2020 гг.

Результаты этого анализа имеют не только самостоятельное значение, но также помогут в будущем уточнить характер гидрологической связи [6] между Калининградским и Куршским заливами. Также обсуждаемые вопросы тесно связаны с проблемой проникновения солоноватых вод Калининградского залива в р. Преголю [19] вплоть до места расположения водозаборов городской системы водоснабжения. В 1990-х гг. эта проблема решилась введением резервного водохранилища. Но процесс нагона заливных вод никуда не исчез. Текущие изменения

¹ Система — множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которое образует определенную целостность, единство [5].

² Согласно [9] Нижней Преголей называется участок нижнего течения р. Преголи от точки впадения р. Лавы до устья р. Преголи в Калининградском заливе. В работе это название применяется только к 90 % части этого водотока, т. е. от ответвления рукава Деймы до устья р. Преголи.

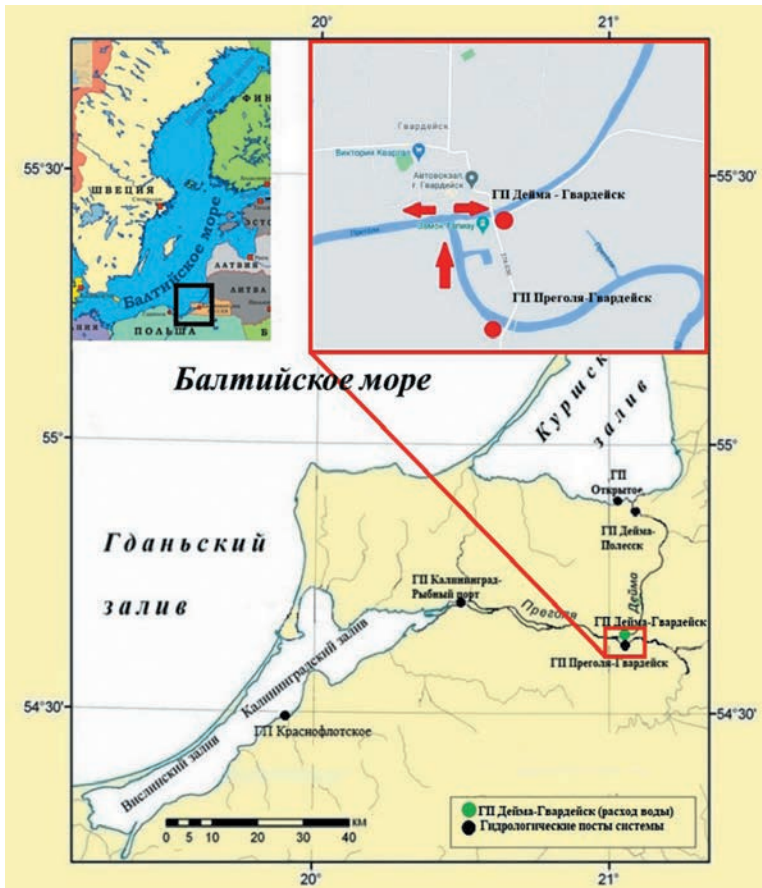


Рис. 1. Расположение гидрологических постов в Калининградском и Куршском заливах, на реке Преголе и ее рукавах Нижней Преголи и Деймы.

Fig. 1. Location of hydrological posts in the Kaliningrad and Curonian Lagoons, on the Pregolya River and its branches of the Downstream Pregolya and Deyma.

локального климата [20], проявляющиеся в подъеме уровня в Балтийском море, и, соответственно, в Калининградском заливе, и на устьевом участке р. Преголи, способствуют учащению случаев, когда язык солоноватых вод будет проникать все глубже вверх по руслу реки, достигать водохранилища и блокировать его на длительное время, большее, чем планируемый срок его расходования.

2. Материалы и методы

В работе использованы данные Роскомгидромета на морских гидрологических постах (далее — МГП) Краснофлотское (Калининградский залив) и Открытое (Куршский залив) и речных гидрологических постах (далее — РГП)

Калининград-Рыбный порт (рукав Нижняя Преголя, далее для краткости Калининград-РП), пара Преголя-Гвардейск (основное русло р. Преголи) и Дейма-Гвардейск, а также Дейма-Полесск (оба — рукав Дейма) (табл. 1, рис. 1). В работе проанализированы данные по уровню воды на всех этих постах за период 2002—2017 гг. (16 лет). Данные по расходу воды на РГП Преголя-Гвардейск (р. Преголя), Дейма-Гвардейск (рукав Дейма) проанализированы для периода 1990—2020 гг. (31 год).

МГП Краснофлотское расположен в пос. Краснофлотское на берегу центральной части Калининградского / Вислинского залива, МГП Калининград-РП — в черте г. Калининграда, на территории Рыбного порта, РГП Преголя-Гвардейск расположен в юго-западной части г. Гвардейск примерно в 500 м выше разделения р. Преголи на два рукава (Нижняя Преголя и Дейма), РГП Дейма-Гвардейск — на восточной окраине г. Гвардейск у шоссе моста, РГП Дейма-Полесск в черте — г. Полесск выше моста Орлиный, МГП Открытое — в поселке Заливино на берегу Куршского залива. В исследуемый период указанные гидрологические посты не переносились.

Уровень воды на всех речных постах фиксируется наблюдателями Росгидромета в 06:00 и 18:00 по Гринвичу¹. За эти же сроки брались данные с морских постов. В настоящий момент только на РГП Калининград-РП (после большого перерыва 2008—02.2016 гг.) была установлена автоматическая станция (АМС) с удаленной передачей.

Таблица 1

Характеристики гидрологических постов системы «Калининградский залив — рукав Нижняя Преголя — рукав Дейма – Куршский залив»
Characteristics of hydrological stations of the system «Vistula Lagoon — branch Downstream Pregolya — branch Deyma — Curonian Lagoon»

ГП Краснофлотское	ГП Калининград-РП	ГП Преголя-Гвардейск	ГП Дейма-Полесск	ГП Открытое
Морской ГП	Морской ГП	Речной ГП	Речной ГП	Морской ГП
	Расстояние вдоль русла р. Преголи — 50,5 км	Расстояние вдоль русла р. Дейма — 32 км		
Расстояние по Калининградскому заливу — 53 км			Расстояние вдоль русла р. Дейма между ГП — 6 км	
Уровень воды: 06:00 и 18:00 (GMT), январь 2002 г. — декабрь 2017 г., дискретность 12 ч, до 11 600 наблюдений на каждом посту.				
Рейка ГМ-3	АМС	Рейка ГМ-3		
Расход воды: 06:00 GMT, 1990—2020 гг. (11324 наблюдений на каждом посту):		Преголя-Гвардейск и Дейма-Гвардейск		

Ввиду отсутствия наблюдений за уровнем воды на ГП Калининград-РП в период с января 2008 г. по февраль 2016 г. основные статистические характеристики

¹ В настоящий момент это 08:00 и 20:00 местного времени (по Калининграду). В те годы, когда в России были введены летнее и зимнее время, сроки наблюдений по местному времени менялись соответственно.

изменения уровня воды на всех постах были оценены для трех временных промежутков: полный период 2002—2017 гг. (табл. 2), период 2008—02.2016 гг., когда отсутствовали наблюдения на ГП Калининград-РП (табл. 3) и объединенные данные периодов 2002—2007 гг. и 03.2016—2017 гг., т. е. в тот период, для которых есть данные всех постов (табл. 4).

Анализ изменчивости уровня воды проводился не для абсолютных значений, а их аномалий (отклонений от среднего). Это позволяет избежать сравнения уровней между собой в абсолютных величинах, что в настоящий момент невозможно, т. к. не ясна методическая основа этого сравнения, поскольку не для всех постов Калининградской области известны абсолютные значения высоты их нулевых отметок в единой Балтийской системе высот.

Ряды уровня анализировались на наличие трендовой составляющей. Временные ряды уровня $H(t)$ раскладывались на составляющие: среднее за период (H_{avr}), член линейного тренда по времени для аномалии A_H (k_H — коэффициент линейного тренда для аномалии A_H) и остаточная составляющая $H_r(t)$, которая включала в себя всю изменчивость, вызванную сезонными, синоптическими и суточными вариациями:

$$\begin{aligned} H(t) &= H_{avr} + k_H t + H_r(t), \\ A_H(t) &= H(t) - H_{avr} = k_H t + H_r(t), \end{aligned} \quad (1)$$

Оценка значимости трендов выполнялась по критерию Стьюдента [21]:

$$t = \frac{|r| \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}, \quad (2)$$

где r — коэффициент корреляции между аномалиями уровня и линейным трендом; $(n-2)$ — число степеней свободы (n — количество измерений уровня воды на ГП). Тренд считался значимым, если оценка критерия Стьюдента превышала критическое значение при заданном уровне значимости ($t > T_{кр}$). В нашем случае число измерений было более 5000 (табл. 5), а для чисел свобод от 1000 до бесконечности критическое значение равно 3,3 [21, 22] с вероятностью надежности 99,9 %.

Поскольку линейные тренды дают значительный вклад в повышение корреляции между временными рядами, статистические связи между рядами уровня воды на разных постах анализировались с помощью корреляционного анализа между аномалиями без учета тренда, т. е. между составляющими $H_r(t)$ соответствующих временных рядов.

Согласно предписаниям Роскомгидромета, расходы воды на РГП Преголя-Гвардейск и Дейма-Гвардейск определяются по данным измерения уровня воды на 06:00 по Гринвичу с помощью кривых расхода, имеющихся для профилей расчетных створов. Контрольная оценка расхода по данным прямых измерений скорости потока проводится на расчетных створах механическими вертушками [23] ежедекадно, в периоды высоких или очень низких уровней воды. По этим оценкам находятся учитывающие подпорные явления коэффициенты, с помощью которых проводится корректировка расходов.

Поскольку регулярные данные по расходам имеются только на РГП Преголя-Гвардейск и Дейма-Гвардейск (рис. 1, врезка), расход воды рукава Нижней Преголи в настоящей работе определяется из условия сохранения потока при разветвлении р. Преголи на два рукава:

$$Q_{\Pi} = Q_{\text{нип}} + Q_{\text{д}}, \quad (3)$$

где Q_{Π} — входящий расход р. Преголи ($\text{м}^3/\text{сек}$); $Q_{\text{нип}}$ — расход рукава Нижней Преголи ($\text{м}^3/\text{сек}$); $Q_{\text{д}}$ — расход рукава Деймы ($\text{м}^3/\text{сек}$).

Ряды расходов воды анализировались на наличие трендовой составляющей по схеме (1) с той лишь разницей, что ряд не включал выделение среднего значения.

Оценки рядов по уровню и расходу воды на однородность проводились [22] по десяти критериям Диксона: пять для максимальных (4) и пять для минимальных (5) значений ранжированного по возрастанию ряда (Y_i , $i = 1 \div n$), имеющего n значений. Критические значения, по которым делался вывод о принятии гипотезы однородности (величина критерия должна быть не больше критического значения), при уровне значимости 0,05 составляют для $D1—D5$: 0,26; 0,15; 0,18; 0,16; 0,22 [22]:

$$\begin{aligned} D1^n &= \frac{Y_n - Y_n^{-1}}{Y_n - Y^1}, \\ D2^n &= \frac{Y_n - Y_n^{-1}}{Y_n - Y^2}, \\ D3^n &= \frac{Y_n - Y_n^{-2}}{Y_n - Y^2}, \\ D4^n &= \frac{Y_n - Y_n^{-2}}{Y_n - Y^3}, \\ D5^n &= \frac{Y_n - Y_n^{-2}}{Y_n - Y^1}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} D1^1 &= \frac{Y^1 - Y^2}{Y^1 - Y_n}, \\ D2^1 &= \frac{Y^1 - Y^2}{Y^1 - Y_n^{-1}}, \\ D3^1 &= \frac{Y^1 - Y^3}{Y^1 - Y_n^{-1}}, \\ D4^1 &= \frac{Y^1 - Y^3}{Y^1 - Y_n^{-2}}, \\ D5^1 &= \frac{Y^1 - Y^3}{Y^1 - Y_n}. \end{aligned} \quad (5)$$

Кроме того, оценки на однородность были выполнены по критерию Смирнова—Граббса [24] для максимального (Y_n) и минимального (Y_1) членов ранжированного по возрастанию ряда ($Y_i, i = 1 \div n$), имеющего стандартное отклонение σ :

$$G_n = \frac{Y_n - Y_{cp}}{\sigma}, \quad (6)$$

$$G_1 = \frac{Y_{cp} - Y_1}{\sigma}. \quad (7)$$

Для анализа возможности приведения рядов к однородным за счет исключения экстремальных значений критерий Смирнова—Граббса был применен последовательно для все более и более укороченных (с одной и другой стороны) рядов, отсортированных по возрастанию, т. е. последовательно отбрасывались самое малое и самое большое значения (при этом ряд оставлялся прежним со стороны больших и, соответственно, меньших значений).

Для проверки — не изменяются ли со временем статистические свойства анализируемых временных рядов — была осуществлена оценка их стационарности [24] как визуально, так и с помощью статистических критериев. Причем, поскольку временной тренд, как одна из основных характеристик нестационарности, уже выделялся в анализируемых рядах в явном виде (см. (1)), анализ стационарности проводился для рядов после исключения тренда, т. е. остаточных составляющих $H_r(t)$ в (1).

Использовались два дополняющих друг друга статистических критерия: критерий KPSS (критерий Квятковского—Филлипса—Шмидта—Шина (Kwiatkowski D., Phillips P. C. B., Schmidt P., Shin Y.) — KPSS test, [25]) и расширенный тест Дики—Фуллера (ADF-test, [26, 27]). Критерий KPSS предполагает выдвижение двух конкурирующих гипотез (H_0 — временной ряд является стационарным; H_1 — временной ряд не является стационарным). В расширенном тесте Дики—Фуллера конкурирующие гипотезы выдвигаются в обратном порядке (H_0 — временной ряд содержит единичный корень, т. е. он нестационарный; H_1 — временной ряд не содержит единичный корень, т. е. он стационарный). В качестве расчетного инструмента использовался статистический модуль для задач эконометрики и статистического моделирования на языке программирования Python — “statsmodels” [28].

Также оценка стационарности рядов для остаточных составляющих $H_r(t)$ проводилась на основе сравнения выборочных средних и дисперсий, для этого применялись критерии Стьюдента и Фишера. Ряды данных уровня воды были разделены на две фактически равные части. Первый период (первая выборка) объединял данные для 2002—2007 гг. и марта 2016 — конца 2017 гг. ($m = 5724$ значений). В качестве второго периода (вторая выборка) был взят период с начала 2008 г. по февраль 2016 г. ($n = 5903$ значений), когда отсутствовали данные на ГП Калининград-РП. Методика оценки стационарности на основе критериев Стьюдента и Фишера приводится в [21]. Если эмпирические значения статистик Стьюдента и Фишера больше их критических (пороговых) значений, то выборка считается нестационарной по выборочной средней и выборочной дисперсии. В противоположном случае у нас есть основания полагать, что выборка является стационарной.

3. Результаты

3.1. Временная изменчивость и статистические характеристики колебания уровня воды за 2002—2017 гг.

Прежде всего, по данным прямых измерений по уровню за 2002—2017 гг. выполнен анализ изменчивости характеристик уровня для каждого поста. Временная изменчивость аномалий уровня воды (с трендом и без тренда) на гидрологических постах Краснофлотское, Калининград-РП, Преголя-Гвардейск, Дейма-Полесск и Открытое за период 2002—2017 гг. (16 лет) показана на рисунках 2—6. Временной тренд визуально выделяется фактически для всех постов.

То, что в МГП Калининград-РП наблюдения прерывались, вынуждает рассматривать ряды, разделяя их на отдельные интервалы. Статистические характеристики для полного анализируемого периода 2002—2017 гг. представлены в табл. 2; для двух интервалов: 2008—02.2016 гг. (период отсутствия наблюдений на МГП Калининград-РП) — в табл. 3, а для искусственно объединенного интервала 2002—2007 гг. и 03.2016—2017 гг. — в табл. 4. Представлена информация о пропусках в данных, количестве членов ряда (N , дискретность 12 часов), значениях средних (Avr), медианы (Me), минимального (Min) и максимального (Max)

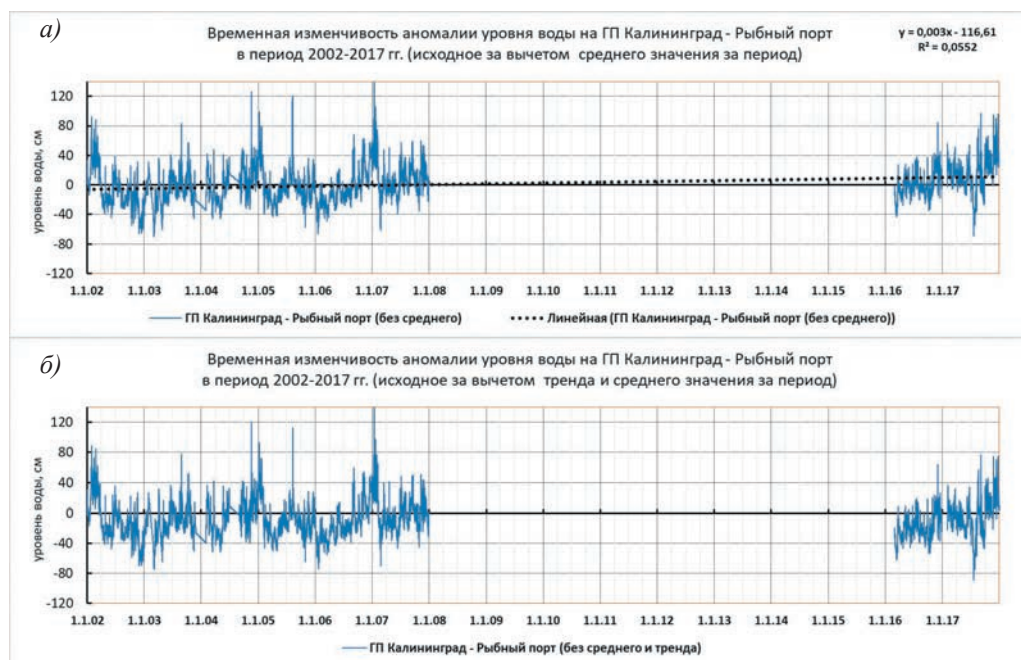


Рис. 2. Временная изменчивость уровня воды на ГП Калининград-РП:

а) аномалия с указанием линии тренда; б) остаточная составляющая $H_r(t)$.

Fig. 2. The water level variations at the HS Kaliningrad-FP:

а) anomaly with indication of trend line; б) residual component $H_r(t)$.

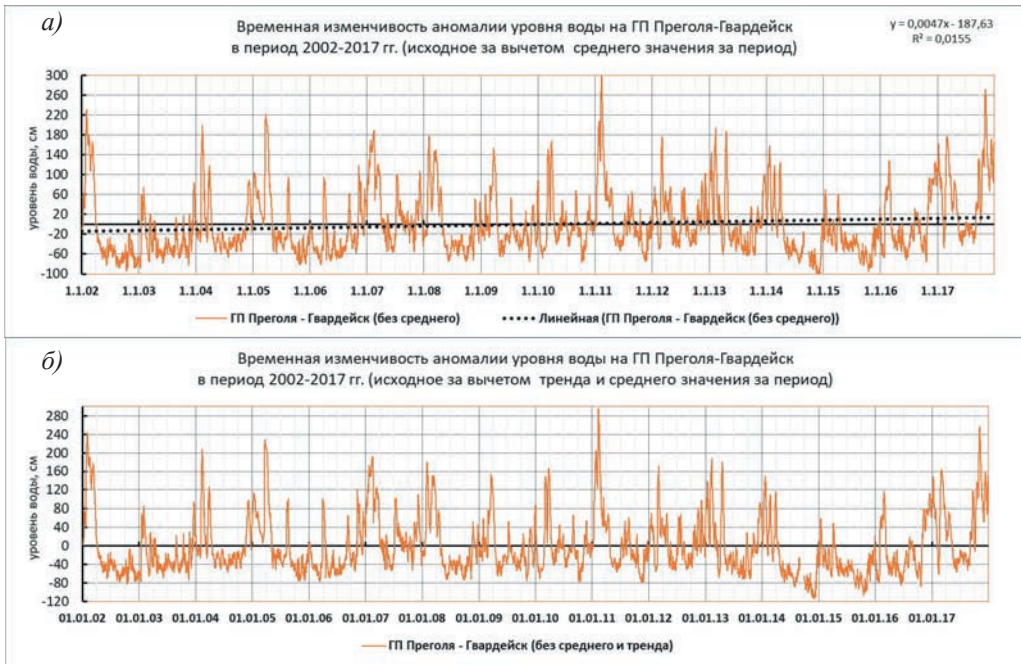


Рис. 3. Временная изменчивость уровня воды на ГП Преголя-Гвардейск:

а) аномалия с указанием линии тренда; б) остаточная составляющая $H_f(t)$.

Fig. 3. The water level variations at the HS Pregolya-Gvardeysk:

а) anomaly with indication of trend line; б) residual component $H_f(t)$.

уровня, среднеквадратического отклонения (σ), размаха (S), квартилей 25, 50 и 75 % (q_{25} , q_{50} , q_{75}), межквартильного расстояния ($q_{75} - q_{25}$), коэффициента асимметрии (As), тренда в мм в год (Tr) и полного изменения по тренду ΔH в см за период.

Таблица 2

Статистические характеристики изменчивости аномалий уровня воды (без тренда) на постах МГП Краснофлотское, МГП Калининград-РП, РГП Преголя-Гвардейск, РГП Дейма-Полесск, МГП Открытое за период 2002—2017 гг.

Statistical characteristics of variability of the water level anomaly (without trend) at the stations of MHS Krasnoflotskoe, MHS Kaliningrad-FP, RHS Pregolya-Gvardeysk, RHS Deyma-Polessk, MHS Otkrytoe for the period 2002—2017.

Гидрологический пост	МГП Калининград-РП	РГП Преголя-Гвардейск	РГП Дейма-Полесск	МГП Краснофлотское	МГП Открытое
Пропуски в данных	01.2008—02.2016	нет	нет	01.2002, 11.2003, 11.2005, 12.2007, 01–10.2008	01.2002, 02.2003, 02.2004, 10.2004, 02–04.2010
N	5662	11668	11668	10952	11248
Avr ; Me (см)	-10; -12	-1; -20	0; -3	1; -1	1; 0

Гидрологический пост	МГП Калининград-РП	РГП Преголя-Гвардейск	РГП Дейма-Полесск	МГП Краснофлотское	МГП Открытое
<i>Min; Max</i> (см)	-88; 141	-114; 296	-60; 106	-79; 115	-59; 106
$\sigma; S$ (см)	24; 229	63; 410	24; 166	20; 194	22; 165
$q_{25}; q_{50}; q_{75}$ (см)	-26; -12; 4	-45; -20; 26	-16; -3; 12	-12; -1; 13	-13; 0; 13
$q_{75} - q_{25}$ (см)	30	71	26	25	26
<i>As</i> (б/р)	0,7	1,3	0,8	0,4	0,7
<i>Tr</i> (мм/год)	10,95	17,16	6,57	5,48	2,92
ΔH (см)	17,5	27,5	10,5	8,8	4,7

Если для всех постов средние значения вариаций аномалий без тренда близки к нулю (независимо от периода), то для МГП Калининград-РП эта величина порядка 5 % от размаха, что обусловлено погрешностью при построении линии тренда из-за наличия пропуска в данных. Величины размаха и среднего квадратичного отклонения для всех постов сравнимы между собой на разных временных интервалах.

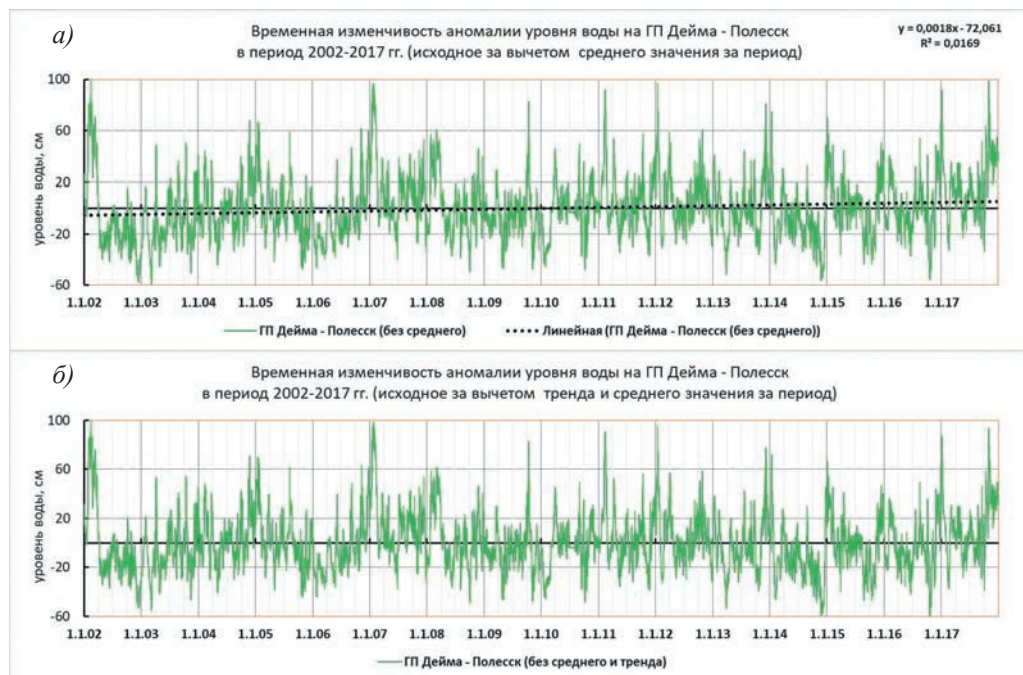


Рис. 4. Временная изменчивость уровня воды на ГП Дейма-Полесск: а) аномалия с указанием линии тренда; б) остаточная составляющая $H_r(t)$.

Fig. 4. The water level variations at the HS Deyma-Polesk: а) anomaly with indication of trend line.; б) residual component $H_r(t)$.

Таблица 3

Статистические характеристики изменчивости аномалий уровня воды (без тренда) на постах МГП Краснофлотское, РГП Преголя-Гвардейск, РГП Дейма-Полесск, МГП Открытое за период 2008—02.2016 гг. (в период отсутствия наблюдений на МГП Калининград-РП).

Statistical characteristics of variability of the water level anomaly (without trend) at the stations of MHS Krasnoflotskoe, RHS Pregolya-Gvardeysk, RHS Deyma-Polessk, MHS Otkrytoe for the period 2008—02.2016 (during the absence of observations at the MHS Kaliningrad-FP).

Параметр	РГП Преголя-Гвардейск	РГП Дейма-Полесск	МГП Краснофлотское	МГП Открытое
Пропуски	нет	нет	01—10.2008	02—04.2010
N	5964	5964	5352	5763
$Avr; Me$ (см)	-6; -21	-2; -4	-1; -2	-1; -1
$Min; Max$ (см)	-114; 296	-60; 95	-79; 115	-57; 106
$\sigma; S$ (см)	59; 410	21; 155	21; 194	20; 163
$q_{25}; q_{50}; q_{75}$ (см)	-46; -21; 19	-16; -4; 10	-13; -2; 11	-13; -1; 10
As (б/р)	1,3	0,6	0,3	0,4

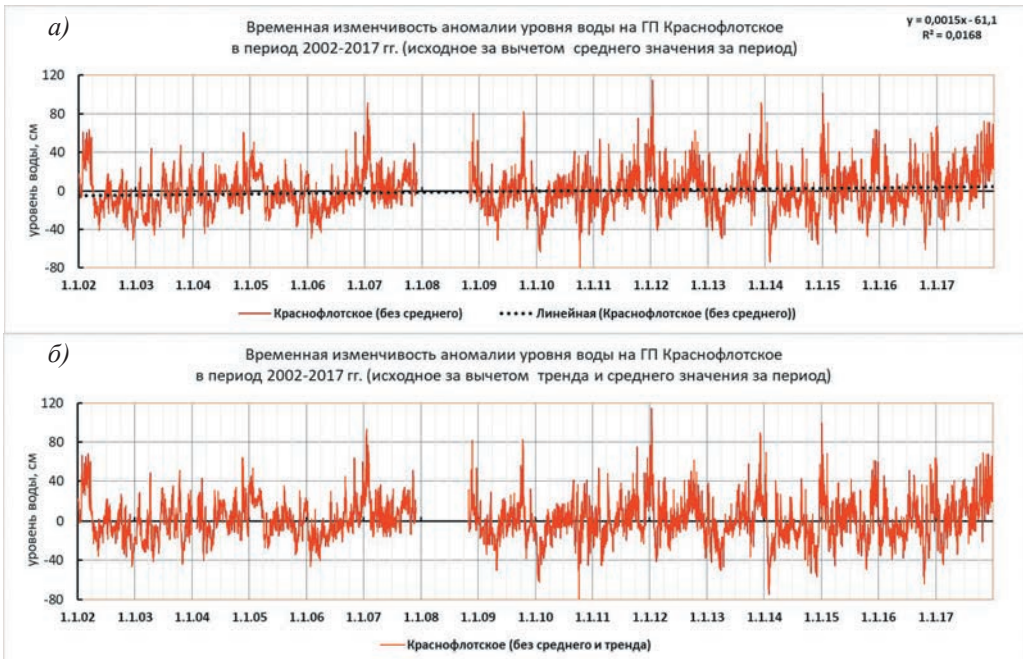


Рис. 5. Временная изменчивость уровня воды на ГП Краснофлотское:

а) аномалия с указанием линии тренда; б) остаточная составляющая $H_r(t)$.

Fig. 5. The water level variations at the HS Krasnoflotskoe:

а) anomaly with indication of trend line; б) residual component $H_r(t)$.

Таблица 4

Статистические характеристики изменчивости аномалий уровня воды (без тренда) на постах МГП Краснофлотское, МГП Калининград – РП, РГП Преголя-Гвардейск, РГП Дейма-Полесск, МГП Открытое за периоды 2002—2007 гг. и 03.2016—2017 гг. (период, когда проводились наблюдения на МГП Калининград-РП).

Statistical characteristics of variability of the water level anomaly (without trend) at the stations of MHS Krasnoflotskoe, MHS Kaliningrad-FP, RHS Pregolya-Gvardeysk, RHS Deyma-Polessk, MHS Otkrytoe for the periods 2002—2007 and 03.2016—2017 (period of observation at the MHS Kaliningrad-FP).

Параметр	МГП Калининград-РП	РГП Преголя-Гвардейск	РГП Дейма-Полесск	МГП Краснофлотское	МГП Открытое
Пропуски	01.2017	нет	нет	01.2002, 11.2003, 11.2005, 12.2007	01.2002, 02.2003, 02.2004, 07.2017
N	5662	5724	5724	5722	5486
$Avr; Me$ (см)	-10; -12	4; -19	2; -2	2; 0	3; 0
$Min; Max$ (см)	-88; 141	-89; 257	-60; 106	-64; 93	-59; 104
$\sigma; S$ (см)	24; 229	66; 345	25; 166	20; 157	23; 163
$q_{25}; q_{50}; q_{75}$ (см)	-26; -12; 4	-45; -20; 26	-16; -3; 12	-12; -1; 13	-13; 0; 12
As (б/п)	0,7	1,3	0,9	0,5	0,8

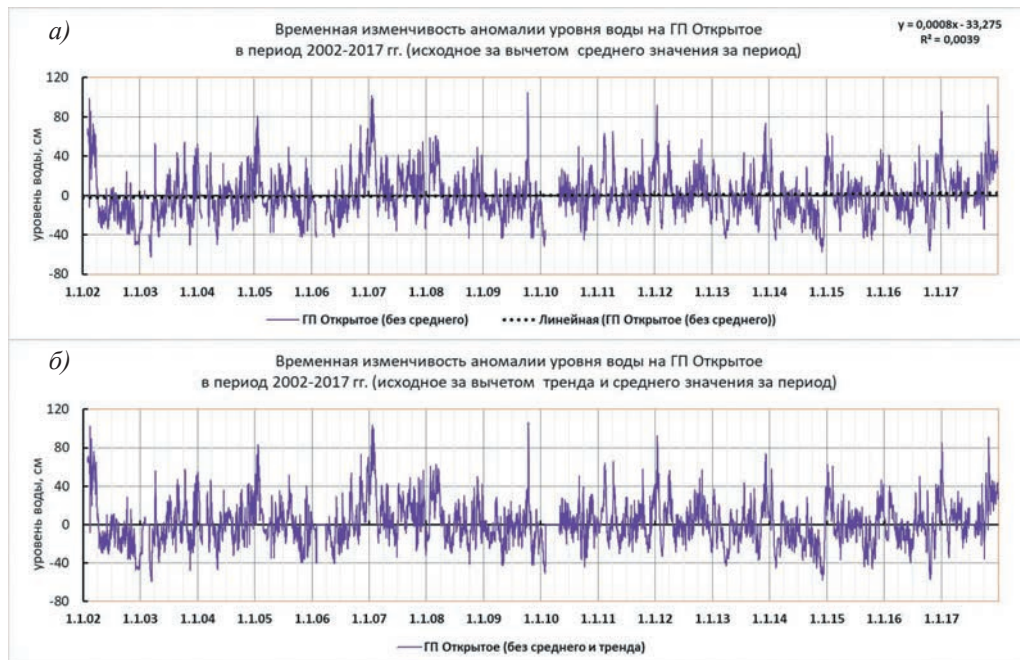


Рис. 6. Временная изменчивость уровня воды на ГП Открытое: а) аномалия с указанием линии тренда; б) остаточная составляющая $H_r(t)$.

Fig. 6. The water level variations at the HS Otkrytoe: а) anomaly with indication of trend line; б) residual component $H_r(t)$.

3.2. Корреляции временного хода уровня воды на разных постах

Для всех пар постов гидрологической системы был рассчитан коэффициент корреляции [29] (и его качественный аналог по шкале Шедока, табл. 5) между временными рядами аномалий уровня воды (без тренда) для полного периода (2002—2017 гг., правая верхняя половина табл. 5) и периода, когда были данные всех потоков (2002—2007 гг., левая нижняя половина табл. 5).

Связь между колебаниями аномалий уровня воды (без тренда) на всех постах существует и положительна. Коэффициенты корреляции лежат в пределах 0,36—0,95 для периода 2002—2017 гг. и 0,46—0,93 для 2002—2007 гг., что соответствует связи по шкале Шедока от весьма умеренной до высокой. Корреляции за оба периода оказались сопоставимыми. Практически всегда корреляционная связь между изменчивостью уровня воды на гидропостах оказалась выше за период 2002—2017 гг., чем за 2002—2007 гг.

Таблица 5

Попарные корреляции временного хода аномалий уровня воды (без тренда) на гидрологических постах в период 2002—2017 гг. (правая верхняя половина таблицы) и 2002—2007 гг. (левая нижняя половина таблицы).

Pairwise correlations of the time variations of the water level anomaly at hydrological stations for the period 2002—2017 (upper right half of the table) and 2002—2007 (lower left half of the table).

	Краснофлотское	Калининград-РП	Преголя-Гвардейск	Дейма-Полесск	Открытое
Краснофлотское	1	0,62	0,36	0,79	0,79
Калининград-РП	0,74	1	0,42	0,65	0,62
Преголя-Гвардейск	0,54	0,46	1	0,69	0,61
Дейма-Полесск	0,8	0,76	0,76	1	0,95
Открытое	0,78	0,71	0,67	0,93	1

Примечание. Выделены уровни корреляции по шкале Шедока: полужирный — весьма высокая, полужирный курсив — высокая, серая заливка — заметная, курсив — умеренная.

3.3. Временная изменчивость и статистический анализ расхода воды реки Преголи и ее рукавов Нижней Преголи и Деймы по данным гидрологических наблюдений за период 1990—2020 гг.

Выполнен расчет стандартных статистических характеристик расхода воды (табл. 6), характеризующих гидрологический режим р. Преголи и рукавов Нижней Преголи и Деймы. В табл. 6 представлена информация о тех же переменных, что и в таблицах 2—4. В течение периода 1990—2020 гг. расход воды р. Преголи и ее рукавов (Нижняя Преголя и Дейма) изменялся более чем в 100 раз в пределах: 7—830 м³/с, (–12)—675 м³/с и 1—185 м³/с соответственно. Высокая временная изменчивость расхода воды непосредственно связана с сезонным паводками и половодьями, которые хорошо просматриваются на графике приходящего расхода р. Преголи в виде пиковых для каждого года значений (рис. 7).

Арифметические средние величины всех измеренных значений расхода воды р. Преголи и рукава Деймы за весь исследуемый период составили 81 и 35 м³/с соответственно. Рассчитанное среднее значение за весь исследуемый период для рукава Нижней Преголи составило 47 м³/с. Стоит обратить внимание, что коэффициент асимметрии (*As*), который отражает расход воды рукава Нижней Преголи, является максимальным (4,5) — он в 1,5 раза превышает этот параметр для расхода р. Преголи (3,0) и в 3 раза превышает коэффициент асимметрии рукава Деймы.

В соответствии с (3) расходы рукавов Нижней Преголи и Деймы в сумме составляют 100 % от приходящего расхода р. Преголи (рис. 8). Среднее значение расхода воды рукава Нижней Преголи за исследуемый период в процентах составило 54,2 %, а рукава Деймы — 45,8 % от общего водотока р. Преголи. Отрицательные значения доли расхода рукава Нижней Преголи соответствуют межрукавным перетокам вод (из Нижней Преголи в Дейму) в связи с нагонными явлениями и критически малым расходом р. Преголи.



Рис. 7. Временной ход расхода воды реки Преголи (по данным РГП Преголя-Гвардейск за период 1990—2020 гг., исходные данные без вычитания трендовой составляющей).

Fig. 7. Water flow of the Pregolya River (according to the data of the RHS Pregolya-Gvardeysk for the period 1990—2020, the initial data without subtracting the trend component).

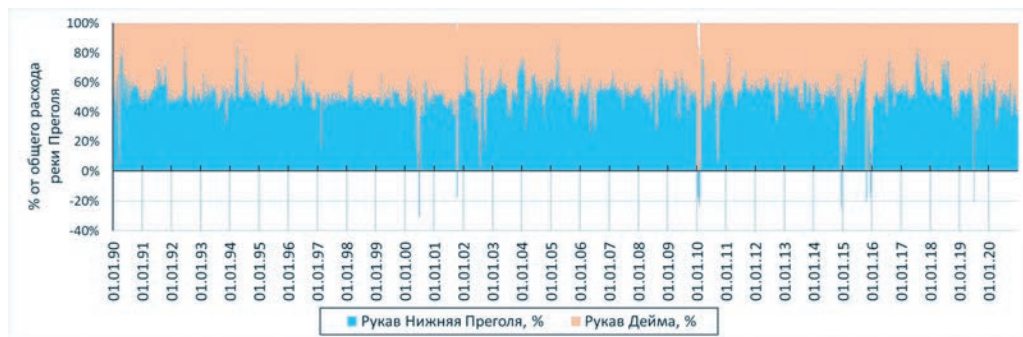


Рис. 8. Временной ход процентного соотношения расходов воды в рукавах реки Преголи (Нижняя Преголя и Дейма) за период 1990—2020 гг.

Fig. 8. Percentage ratio of water flow in the branches of the Pregolya River (Downstream Pregolya and Deyma) for the period 1990—2020.

Таблица 6

Статистические характеристики для расходов воды реки Преголи (до разделения на рукава в г. Гвардейск) и ее рукавов — Деймы (г. Гвардейск) и Нижней Преголи (после разделения реки Преголи на два рукава) за период 1990—2020 гг.

Statistical characteristics for the water flow of the Pregolya River (before the separation into branch in the Gvardeysk) and its branches — Deymy (Gvardeysk) and Downstream Pregoli (after the separation of the Pregolya River into two branches) for the period 1990—2020.

Параметр	Измеренные		Расчетные
	Река Преголя (до разделения на рукава)	Рукав Дейма	Рукав Нижняя Преголя
Дискретность, число значений (N)	1 раз в сутки, 11323		
Доля стока (%)	100	45,8	54,2
$Avr; Me$ (m^3/c)	81; 52	35; 24	47; 28
$Min; Max$ (m^3/c)	7,3; 841	1,3; 185	-11,6; 665
$Min; Max$ (%)	100; 100	7,6; 187,2	-87,2; 92,4
$\sigma; S$ (m^3/c)	83; 833	29; 184	58; 677
Мода Mo (m^3/c)	104	17	17
$q_{25}; q_{50}; q_{75}$ (m^3/c)	30; 52; 101	14; 24; 46	16; 28; 55
$q_{75} - q_{25}$ (m^3/c)	71	32	39
As (б/р)	3,0	1,5	4,5
Тренд ($m^3/c/год$)	-0,55	-0,18	-0,29
ΔQ (m^3/c)	-17	-5,7	-9,1

3.4. Оценка значимости временных трендов уровня и расхода воды

Для всех постов данные показывают наличие положительного тренда уровня воды и наличие отрицательного тренда для приходящего расхода воды р. Преголи и расхода воды в рукаве Дейме (табл. 7). Значения критерия Стьюдента (t) для всех рядов данных больше $T_{кр} = 3,3$, и следовательно, полученные величины тренда статистически значимы на уровне значимости $\alpha < 0,01$.

Таблица 7

Характеристики тренда для роста аномалии уровня на гидрологических постах за период 2002—2017 гг. и падения расхода воды реки Преголи и рукавов Нижней Преголи и Деймы в период 1990—2020 гг.

Trend characteristics for anomaly level growth at hydrological stations for the period 2002—2017 and flow decrease in the Pregolya River and its branches for the period 1990—2020

Гидрологический пост	Тренд (мм/год)	Прирост аномалии уровня по тренду (см)	$V = n - 2$	r	t
Калининград-РП	11	17,5	5660	0,24	18,2
Преголя-Гвардейск	17,3	27,7	11666	0,12	13,6
Дейма-Полесск	6,6	10,6	11666	0,13	14,2
Краснофлотское	5,5	8,8	10950	0,13	13,7
Открытое	2,9	4,7	11246	0,06	6,6

Водоток	Тренд (м ³ /с/год)	Прирост расхода воды по тренду (м ³ /с)	$V = n - 2$	r	t
Река Преголя	-0,55	-17	11323	0,05	5,7
Рукав Нижняя Преголя	-0,29	-9,1	11323	0,06	6,2
Рукав Дейма	-0,18	-5,7	11323	0,04	4,5

Примечания. V — число степеней свободы; n — количество измерений; r — коэффициент корреляции между аномалией и ее линейным трендом; t — критерий Стьюдента.

3.5. Оценка однородности рядов для уровня и расхода воды

Результаты оценки однородности рядов уровня и расходов представлены в табл. 8 в виде выводов для групп критерия Диксона как для максимальных, так и минимальных значений. Знаком «+» обозначена ситуация о принятии гипотезы однородности, а знаком «-» — отклонение этой гипотезы.

Оценки показывают, что со стороны минимальных значений ряды уровня воды вполне однородны, а вот со стороны максимальных значений критерий Диксона превышает критические значения (значительная неоднородность выявлена для ГП Калининград-РП) на всех гидрологических постах, кроме ГП Открытое. Расходы воды, напротив, оказались однородными по данному критерию.

Критерий Смирнова—Граббса указал на неоднородность рядов аномалий уровня воды как со стороны максимальных, так и минимальных значений (см. первую и последнюю точки в диаграмме на рисунках 9 и 10, значения в которых превышают критический уровень, равный 2,9).

Можно ли путем исключения экстремальных (минимальных и максимальных) значений добиться однородности рядов данных? Результат последовательного применения критерия Смирнова—Граббса для более укороченных (с одной и другой стороны) рядов уровня и расходов воды представлен на диаграммах (рисунки 9 и 10), где каждая точка соответствует значению критерия Смирнова—Граббса для текущего максимального (правый набор точек) или минимального (левый набор точек) значения анализируемого ряда. Эти наборы хорошо визуальны разделяются скачком именно в окрестности среднего значения для анализируемого ряда.

Диаграммы (рисунки 9 и 10) иллюстрируют более категоричный (по сравнению с критерием Диксона) результат — ряды уровня не являются однородными ни со стороны минимальных, ни со стороны максимальных значений. Слишком много членов ряда нужно отбросить, чтобы оставшиеся ряды образовали однородную последовательность, для которой критерий Смирнова—Граббса окажется меньше своей критической величины, равной 2,9 (рисунки 9 и 10). Ряды измеряемых расходов воды для р. Преголи и рукава Деймы, напротив, являются однородными со стороны минимальных и неоднородными со стороны максимальных значений.

Таким образом, оценки по критериям Диксона и Смирнова—Граббса показали, что анализируемые ряды уровня и расходов воды (без линейного тренда) не являются полностью однородными. Ряды содержат данные без случайных выбросов,

все данные иллюстрируют реальные процессы, но только с той важной оговоркой, что этих процессов, действующих одновременно и дающих значительные вариации значений, несколько. Исключение нескольких (даже десятков) экстремальных значений не имеет смысла, т. к. это не превращает ряды в однородные.

Таблица 8

Результаты оценки критерия Диксона и выводы, полученные после его сравнения с критическими значениями для D1-D5 (0,26; 0,15; 0,18; 0,16; 0,22 [25]), для рядов уровня и расходов воды на ГП Калининград-РП, Преголя-Гвардейск (и Дейма-Гвардейск), Дейма-Полесск, Открытое, Краснофлотское в период 2002—2017 гг.

Estimations of the Dickson criterion and conclusions after the comparison with the thresholds for the D1-D5 (0,26; 0,15; 0,18; 0,16; 0,22 [25]) for the water level and discharge in MHS Krasnoflotskoe, MHS Kaliningrad-FP, RHS Pregolya-Gvardeysk, RHS Deyma-Polessk, MHS Otkrytoe for the period 2002—2017

ГП (уровень) / Водоток (расход)	Величины критерия Диксона и выводы для:			
	максимумов		минимумов	
Калининград-РП	0,28—0,35	-----	0,04—0,06	+++++
Преголя-Гвардейск	0,12—0,22	++----	0,002—0,005	+++++
Дейма-Полесск	0,05—0,27	++----	0,004—0,012	+++++
Открытое	0,01—0,01	+++++	0,004—0,007	+++++
Краснофлотское	0,13—0,29	++----	0,015—0,022	+++++
Река Преголя	0,011—0,012	+++++	0,0002—0,002	+++++
Рукав Дейма	0,005—0,027	+++++	0,0005—0,001	+++++
Рукав Нижняя Преголя	0,01—0,02	+++++	0,001—0,003	+++++

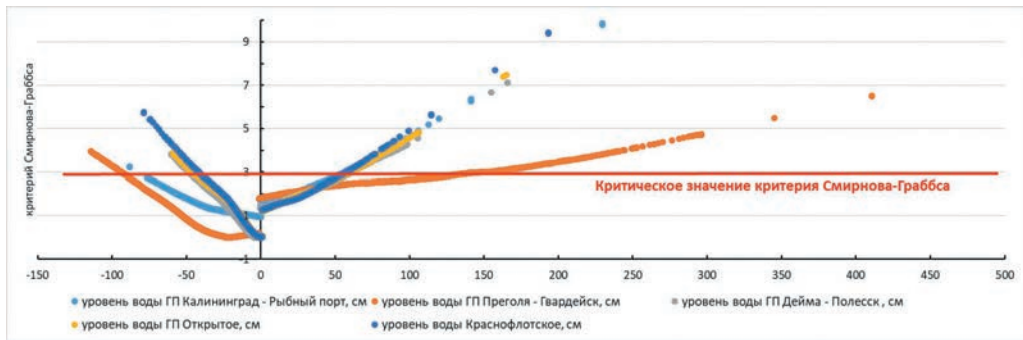


Рис. 9. Величины критерия Смирнова—Грabbса для аномалий уровня воды на гидрологических постах системы Калининградский залив — река Преголя — Куршский залив в период 2002—2017 гг. при последовательном исключении самых больших и самых маленьких величин ряда.

Fig. 8. The values of the Smirnov-Grubbs criterion for water level anomalies at the hydrological stations of the Kaliningrad Lagoon — Pregolya River — Curonian Lagoon system in the period 2002—2017 with the sequential rejection of the largest and smallest values of the series.

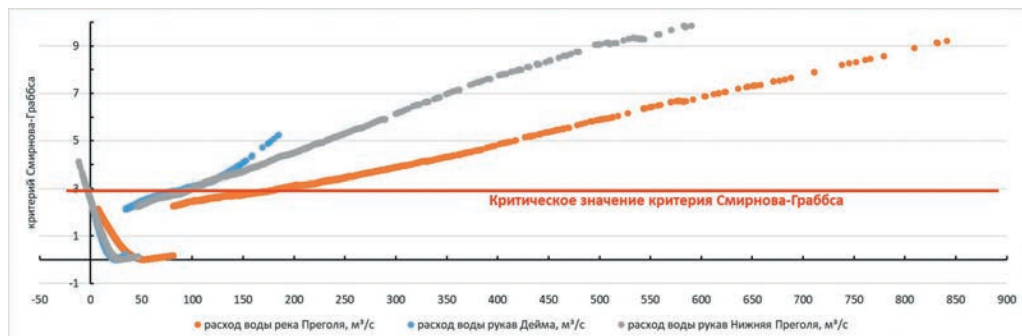


Рис. 10. Величины критерия Смирнова—Грubbса для приходящего расхода воды реки Преголя и расходов рукавов Дейма и Нижняя Преголя в период 1990—2020 гг. при последовательном исключении самых больших и самых маленьких величин ряда.

Fig. 10. The values of the Smirnov-Grubbs criterion for the incoming flow of water of the Pregolya River and the flow of water of the Deyma and Downstream Pregolya branches in the period 1990—2020 when the largest and smallest values of the series are consistently discarded.

3.6. Оценка стационарности рядов уровня и расхода воды

Нестационарность рядов уровня и расхода воды в связи с наличием линейного тренда нами уже была выделена в разделе 3.4. Остается вопрос — стационарны ли аномалии для уровня и расходов воды, т. е. все ли факторы, обеспечивающие нестационарность, убраны за счет исключения линейного тренда?

Применение критериев KPSS [26] и Дики—Фуллера для рядов с вычтенным временным трендом показало (табл. 9), что для всех рассмотренных временных рядов выполняется условие стационарности. Причем стационарность подтверждается обоими критериями.

Таблица 9

Величины оценки тестов KPSS и Дики-Фуллера для рядов без линейного тренда и результаты («+» — нулевая гипотеза не отвергается, «-» — отвергается) сравнения с критическими значениями для уровня значимости 0,05: 0,46 для KPSS и -2,86 для Дики—Фуллера

Scores for the KPSS and Dickey—Fuller tests for series without a linear trend and results («+» — null hypothesis is accepted, «-» — null hypothesis is rejected) of the comparisons with critical values for a significance level of 0,05: 0,46 for KPSS and -2,86 for Dickey-Fuller

	Критерий KPSS		Критерий Дики—Фуллера		Вывод
	Значение	Результат	Значение	Результат	
<i>Уровни воды</i>					
ГП Калининград-РП	0,17	+	-9,43	-	Ряды стационарны
ГП Преголя-Гвардейск	0,14	+	-7,64	-	
ГП Дейма-Полесск	0,12	+	-13	-	
ГП Открытое	0,15	+	-10,34	-	
ГП Краснофлотское	0,09	+	-11,39	-	

Окончание табл. 9

	Критерий KPSS		Критерий Дики—Фуллера		Вывод
	Значение	Результат	Значение	Результат	
<i>Расходы воды</i>					
р. Преголя	0,05	+	-9,56	-	Ряды стационарные
Рукав Дейма	0,09	+	-8,27	-	
Рукав Нижняя Преголя	0,03	+	-10,89	-	
Доля Нижней Преголи	0,15	+	-16,57	-	
Доля Деймы	0,15	+	-16,57	-	

При проверке рядов с помощью KPSS теста, рассчитанные значения критерия теста меньше критического значения 0,46 при уровне значимости 0,05. Данный факт приводит к принятию нулевой гипотезы о стационарности ряда. Значения критерия для теста Дики—Фуллера принимали значения меньше критического (-2,86) при уровне значимости 0,05. Таким образом, гипотеза о наличии в ряде единичного корня отвергается, и, следовательно, ряд можно рассматривать как стационарный.

3.7. Оценка нестационарности средних значений и дисперсий.

Насколько ряды уровня и расхода стационарны с точки зрения выборочных средних и дисперсии, т. е. можно ли оценивать средние значения и дисперсии, пользуясь только половиной этих рядов?

Для ответа был проведен анализ стационарности выборочных средних и дисперсии на основе использования критериев Стьюдента и Фишера [21, с. 84—90] для двух частей рядов аномалий уровня без тренда $H_i(t)$ для всех анализируемых гидропостов (табл. 10): первый период включал 2002—2007 гг. и март 2016 — конец 2017 гг. ($m = 5724$ значений), второй период — с начала 2008 г. по февраль 2016 гг. ($n = 5903$ значений), когда измерения на ГП Преголя-РП отсутствовали.

Величины критерия Стьюдента (табл. 10) для всех гидропостов больше его критического значения ($T_{кр} = 1,96$). Это означает, что ряды нестационарны по средним значениям. Напротив, анализ критерия Фишера (табл. 10) показал, что величины критерия меньше критического значения ($F_{кр} = 1,32$). Поэтому мы можем полагать, что данные ряды являются стационарными по дисперсии.

Таблица 10

Величины критериев Стьюдента (T , стационарность по среднему значению) и Фишера (F , стационарность по дисперсии) для уровней воды на ГП-ах Преголя-Гвардейск, Дейма-Полесск, Открытое, Краснофлотское

The values of the Student's (T , mean stationary) and Fisher's (F , dispersion stationary) criteria for the water levels in HS Pregolya-Gvardeysk, Deyma-Polessk, Otkrytoe, Krasnoflotskoe

Критерий	Преголя-Гвардейск		Дейма-Полесск		Открытое		Краснофлотское	
	T	F	T	F	T	F	T	F
	8,63	1,24	9,40	1,32	9,98	1,36	7,84	1,11

Примечание. Случаи стационарности отмечены жирным шрифтом.

Применению аналогичного анализа для стока рукавов Нижней Преголи и Деймы предшествовала визуальная оценка (рис. 8), которая выявила, что на рубеже 2000 г. перераспределение стока р. Преголи между двумя ее рукавами изменилось — увеличилось число случаев перераспределения стока в пользу рукава Деймы. Учитывая этот факт и то, что анализ стационарности по средним и дисперсиям на основе критериев Стьюдента и Фишера должен проводиться между выборками примерно равного объема [21], весь ряд был разделен на три равные части: 1990—1999 гг. (выборка 1), 2000—2009 гг. (выборка 2) и 2010—2019 гг. (выборка 3). Для каждой этой выборки были рассчитаны среднее значение и дисперсия, а затем величины критериев Стьюдента и Фишера (табл. 11) для каждой пары выборок (согласно [21], с. 84—90).

Сравнение с критическими значениями ($T_{кр} = 1,96$, $F_{кр} = 1,32$, уровень значимости 0,05) показало, что условия стационарности ($t < T_{кр}$ и $f < F_{кр}$) соблюдаются для дисперсий расходов (без тренда), но в большей части случаев не соблюдаются для средних значений этих величин. Это означает, что кроме линейного тренда на временные ряды действует еще какой-то фактор, обеспечивающий нестационарность средних значений, причем, этот фактор может приводить к периодичности, т. к. стационарность по средним выявлена между выборками 1 и 3.

Для доли перераспределения стока между рукавами стационарность наблюдается по средним значениям, а существенная нестационарность — по дисперсиям. Очевидно, на рубеже 2000 г. какой-то процесс повлиял на закономерность перераспределения стока между рукавами.

Таблица 11

Величины критериев Стьюдента (T , стационарность по среднему значению) и Фишера (F , стационарность по дисперсии) для расходов воды (без тренда) в реке Преголе и рукавах Нижняя Преголя и Дейма (в абсолютном выражении и % перераспределения) для трех периодов: 1990—1999 гг. (выборка 1), 2000—2009 гг. (выборка 2) и 2010—2019 гг. (выборка 3)

Values of Student's (T , mean stationary) and Fisher's (F , dispersion stationary) criteria for water discharges (without a trend) in the Pregolya River and the Nizhnyaya Pregolya and Deyma branches (in absolute terms and % of the redistribution) for three periods: 1990—1999. (subseria 1), 2000—2009 (subseria 2) and 2010—2019 (subseria 3)

Критерий	Река Преголя		Нижняя Преголя		Дейма		% Нижней Преголи		% Деймы	
	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F
Выборки 1 и 2	3,01	1,20	6,99	1,29	1,38	1,19	1,87	1,90	1,87	1,90
Выборки 1 и 3	0,60	1,10	1,94	1,06	0,78	1,19	0,54	3,24	0,54	3,24
Выборки 2 и 3	3,71	1,09	5,04	1,22	2,26	1,00	0,92	1,71	0,92	1,71

Примечание. Случаи стационарности отмечены жирным шрифтом.

4. Обсуждение

Обсуждение нормальности распределений величин уровня и расходов воды. Соответствие значений любого временного ряда нормальному распределению является необходимым условием применения статистических оценок, поэтому

ниже обсуждается степень соответствия рядов исходных данных нормальному распределению.

Для статистических распределений уровня воды на всех гидрологических постах величина асимметрии As имеет только положительные значения (табл. 12), и, следовательно, среднее значение Avr больше медианы Me . Все статистические распределения (за исключением РГП Преголя-Гвардейск) имеют оценки асимметрии (As) сравнительно мало отличающиеся от нуля за исследуемые периоды, т. е. можно полагать, что анализируемые выборки значений уровня воды близки к нормальному распределению [21].

Статистическое распределение для РГП Преголя-Гвардейск существенно более ассиметрично. Коэффициент асимметрии (As) для всех трех анализируемых периодов (табл. 12) почти в два раза превышает аналогичные значения для других гидрологических постов. Это говорит о том, что массив измерений уровня включает немногочисленные, но большие по величине положительные отклонения от среднего значения уровня, и более многочисленные, но менее значительные отрицательные отклонения [21].

Статистические распределения для расходов воды р. Преголи и ее рукавов Нижней Преголи и Деймы имеют сравнительно большие оценки асимметрии (As) и разности среднего значения (Avr) и медианы (Me) за период 1990—2020 гг.: As — 3; 4,5 и 1,5, а разность ($Avr - Me$) — 29,5; 18,4 и 10,2 соответственно, что обеспечивает [21] отклонение этих распределений от нормального.

В дополнение, для проверки подчиненности рядов уровня и расходов воды нормальному закону распределения были проведены расчетные, графические и косвенные тесты с использованием программного продукта Statistica. Форма гистограмм при оценках критерия по Колмогорову—Смирнову (KS-тест) [30] близки к теоретически нормальной кривой Гаусса, а критерий Шапиро—Уилка [31] для уровней воды на всех гидрологических постах больше 0,05, что в совокупности подтверждает близость к нормальности и для распределения величин уровня воды на гидрологических постах системы. Для расходов воды критерий Шапиро—Уилка [31] на всех трех водотоках меньше 0,05, что подтверждает плохое соответствие величин расхода воды р. Преголи и ее рукавов нормальному распределению.

Таблица 12

Величины асимметрии (As) и разностей средних значений (Avr) и медиан (Me) для распределений аномалий уровня воды на гидрологических постах за исследуемые периоды

The values of asymmetry (As) and differences of mean values (Avr) and medians (Me) for distributions of water level anomaly at hydrological stations for the studied periods

Гидрологический пост	2002—2017 гг.		2002—2007 гг. и 2016—2017 гг.		2008—2016 гг.	
	$Avr - Me$ (см)	As (б/р)	$Avr - Me$ (см)	As (б/р)	$Avr - Me$ (см)	As (б/р)
МГП Калининград-РП	2	0,7	2	0,7	—	—
РГП Преголя-Гвардейск	19	1,3	23	1,3	15	1,3
РГП Дейма-Полесск	3	0,8	4	0,9	2	0,6
МГП Краснофлотское	2	0,4	2	0,5	1	0,3
МГП Открытое	1	0,7	3	0,8	0	0,4

Оценки тренда. В течение исследуемого периода зафиксирован существенный статистически значимый положительный тренд роста уровня воды на всех гидрологических постах (рисунки 2—6, табл. 5). Добавим, что положительные тренды в уровне отмечаются и для других прибрежных районов Балтики [32, 33]. За исследуемый 16-летний период (2002—2017 гг.) наибольший тренд роста уровня воды был на ГП Преголя-Гвардейск (изменения по тренду составили 27,5 см), а наименьший — на ГП Открытое (изменения по тренду — 4,7 см), т. е. практически шестикратная разница роста уровней. Подобный рост в среднем примерно соответствует результатам (порядка 5—15 мм/год) ранее проведенных исследований роста уровня воды в юго-восточной Балтике [16, 20].

Оценка влияния пропуска в данных ГП Калининград-РП на статистические характеристики временной изменчивости уровня воды. Данные на ГП Калининград-Рыбный порт отсутствуют за большой период (с января 2008 г. по февраль 2016 г.). Возникает вопрос — можно ли оценить базовые статистики (среднее значение и стандартное отклонение относительно трендовой составляющей) для уровня воды на этом гидропосту, основываясь только на данных 2002—2007 гг.?

В разделе 3.4 показано, что статистические характеристики за два рассматриваемые периода для МГП Краснофлотское, Открытое и РГП Полесск (корреляция с которыми у РГП Калининград-РП наиболее высока) имеют достаточно близкие значения. Также в разделе 3.6 на основании применения критериев KPSS и Дики—Фуллера было показано, что ряды данных по аномалиям уровня воды (без тренда) являются стационарными. Очевидно, все статистики, оцененные для периода проведения измерений на РГП Калининград-РП, можно экстраполировать на весь период наблюдений 2002—2017 гг., однако анализ на стационарность рядов по средним и дисперсии (раздел 3.7, критерии Стьюдента и Фишера) показал, что только характеристики дисперсии можно на уровне значимости 0,05 применить для всего периода.

Сравнение статистических характеристик колебаний уровня за период 2007—2017 гг. Если величины размаха (амплитуда) колебания уровня воды на гидрологических постах МГП Калининград-РП, МГП Открытое, МГП Краснофлотское, РГП Дейма-Полесск сопоставимы друг с другом, то размах колебаний значений уровня воды для РГП Преголя-Гвардейск в среднем в 2 раза превышает размахи колебаний для других постов. Такие большие колебания уровня на РГП Преголя-Гвардейск, а также несогласованность с колебаниями уровня в устьевых постах, создают благоприятные условия для возникновения перепадов уровня между Гвардейском (узловой точкой речной системы) и устьями рукавов Нижней Преголи и Деймы. В свою очередь, это может создать условия для перетока вод между Калининградским и Куршским заливами через эти рукава.

Величина размаха колебания дает лишь самое общее представление об изменчивости, так как показывает, насколько отличаются друг от друга крайние значения, но не указывает, насколько велики отклонения отдельных значений внутри ряда [21]. В нашем случае для ГП Преголя-Гвардейск, величина интерквартильного расстояния составляет только 13—20 % относительно размаха для всех

гидрологических постов (табл. 2), и именно в эти пределы по определению входит 50 % измеренных величин уровня [21].

Можно сказать, что для вариаций уровня воды в точке разветвления р. Преголи на два рукава (ГП Преголя-Гвардейск) типичен речной режим: колебания имеют значительный размах по сравнению с дисперсией, отмечается высокий коэффициент асимметрии, в течение каждого года явно выделяются гидрологические фазы (паводок, половодье, межень). Вариации уровня на устьевых постах (Калининград-РП и Дейма-Полесск) имеют значительно меньший размах, хорошо коррелируют (коэффициенты корреляции 0,62 и 0,93 соответственно) с аналогичными значениями уровня в Калининградском / Вислинском и Куршском заливах, имеют временной ход более схожий с колебаниями уровня моря, чем реки (распределение близко к нормальному, со слабо выраженной асимметрией).

Можно высказать предположение, что основное влияние на величину размаха уровня воды на РГП Преголя-Гвардейск оказывает сток р. Преголи, на других же гидрологических постах влияние на изменчивость уровня воды оказывает уровень воды в Калининградском и Куршском заливах, но для его подтверждения требуется отдельный анализ.

Корреляции временного хода уровня воды. Коэффициенты корреляции между временными рядами колебаний уровня воды (без учета тренда) на гидрологических постах за период 2002—2017 гг. лежат в пределах 0,36—0,95 (табл. 7). Это указывает на существование как внешних общих факторов, определяющих некоторую синхронность колебаний, так и на наличие локальных факторов, определяющих индивидуальные черты в поведении уровня.

Почти функциональная корреляционная связь ($r = 0,97$) между МГП Краснофлотское (Калининградский / Вислинский залив) и МГП Открытое (Куршский залив) свидетельствует об одинаковом влиянии Балтийского моря на оба залива на больших масштабах времени, и схожести поведения уровня заливов при местном ветровом воздействии. Эта же причина обуславливает высокую (0,71 и 0,79) и заметную (0,65) связи между всеми морскими и устьевыми постами — МГП Краснофлотское, Калининград-РП, РГП Дейма-Полесск и МГП Открытое).

Корреляционная связь между МГП Калининград-РП и РГП Преголя-Гвардейск является значимой ($r = 0,42$), но она существенно слабее связи между МГП Калининград-РП и МГП Краснофлотское ($r = 0,62$).

Хотя МГП Калининград-РП и МГП Краснофлотское принадлежат акватории Калининградского залива, но на уровень воды в них влияют разные факторы. Колебания уровня воды в МГП Краснофлотское следуют за колебаниями уровня Балтийского моря за счет затоков вод в залив при подъемах уровня Балтики и оттоке вод при падении этого уровня¹ [34]. На уровень в МГП Калининград-РП сильное влияние оказывает денивеляция уровня залива во время локального действия ветра, который нагоняет воды залива в сторону устья Преголи, производя

¹ Эти подъемы и спады уровня моря в районе входа в Калининградский залив могут быть вызваны нагоном, (сгоном) вследствие действия местного ветра, сгонно-нагонными перемещениями вод всей Балтики, действием барических полей и собственными колебаниями Балтийского моря [34].

в то же время сгон на МГП Краснофлотское. Таким образом, на МГП Калининград-РП (устье р. Преголи) проявляется одновременно влияние колебаний уровня в Калининградском заливе, нагонных ветров и речного стока. Эта комбинация факторов обеспечивает существенную индивидуальность для характеристик колебаний уровня воды в устье рукава Нижняя Преголя.

Высокая корреляционная связь ($r = 0,95$) между РГП Дейма-Полесск и МГП Открытое связана с географической близостью постов (6 км), вследствие чего один и тот же фактор (уровенный режим Куршского залива) влияет на колебания уровня рукава Деймы в Полесске. Но заметная корреляционная связь ($r = 0,67$) между РГП Дейма-Полесск и РГП Преголя-Гвардейск свидетельствует, что речное влияние в устье рукава Деймы остается достаточно существенным.

Расход воды р. Преголи и ее рукавов Нижней Преголи и Деймы по данным гидрологических наблюдений за период 1990—2020 гг. Средний расход воды на постах р. Преголи (г. Гвардейск) и ее рукава Деймы (г. Гвардейск) за исследуемый период составил 81,1 и 34,6 м³/с соответственно. Рассчитанное среднее значение расхода воды рукава Нижней Преголи (ниже г. Гвардейск) 46,7 м³/с в процентном соотношении от общего водотока р. Преголи (до разветвления в г. Гвардейске) составило: рассчитанный водоток рукава среднего и слабого Преголи (ниже г. Гвардейск) — 54,2 %, а расходы, измеренные на ГП Дейма-Гвардейск, — 45,8 % (табл. 6).

Также важно отметить очень высокую изменчивость расхода воды за указанный период (рис. 7). Величины расхода воды меняются более чем в сто раз (табл. 6): р. Преголя — от 7,3 до 841 м³/с (размах 833,7 м³/с), рукав Нижняя Преголя — от -11,6 до 665 м³/с (размах 676,6 м³/с), рукав Дейма — от 1,3 до 185 м³/с (размах 183,7 м³/с). Пики максимальных значений расходов воды всех трех водотоков возникают в периоды обложных дождей и мощных паводков.

Выявлено, что повторяемости значений расхода воды р. Преголи в период 1990—2020 гг. распределились следующим образом: 48 % — расход ≤ 50 м³/с, 26 % — расход в промежутке 50—100 м³/с, 24 % — расход в промежутке 100—400 м³/с, и только 2 % при расходе ≥ 400 м³/с. Максимумы расхода воды приходятся на периоды весеннего половодья и паводочных дождей.

Перераспределение стока между рукавами Нижняя Преголя и Дейма. Анализ всего массива данных по расходам воды на постах показал (рис. 11), что при высоких расходах р. Преголи, например, ≥ 400 м³/с, основную часть поступающего стока берет на себя рукав Нижняя Преголя, причем, чем более интенсивен поступающий сток, тем больше эта доля в пользу Нижней Преголи. Доля рукава Деймы постепенно в среднем повышается при ослаблении стока р. Преголи.

Для подавляющего большинства случаев среднего и слабого стока р. Преголи (расход ≤ 100 м³/с) перераспределение между рукавами Нижняя Преголя и Дейма не зависит от величины подходящего стока, поэтому определяется другими факторами, возможно, соотношением уровня в приемных водоемах и действием местного ветра на поверхность рукавов.

При очень слабом стоке р. Преголи, условно менее 40—50 м³/с, основной сток реки может преимущественно направляться в один из рукавов почти в равной

степени, но межукавные перетоки также происходят при низких значениях приходящего стока Преголи.

Выявлено (раздел 3.7), что доля перераспределения расхода р. Преголи между рукавами (Нижняя Преголя и Дейма) нестационарна и смена режима произошла где-то на рубеже 2000 г. Возникает предположение, что это могло произойти за счет каких-либо преобразований в руслах. На наш взгляд, таким преобразованием является установка на реке в 2001 г. научно-исследовательского судна «Космонавт Виктор Пацаев» в рамках развития комплекса Музея Мирового океана в г. Калининграде. В настоящий момент проходное сечение реки заужено стоящими у стенки судами на набережной исторического флота Музея Мирового океана примерно на 20—30 % на протяжении примерно 500 м.

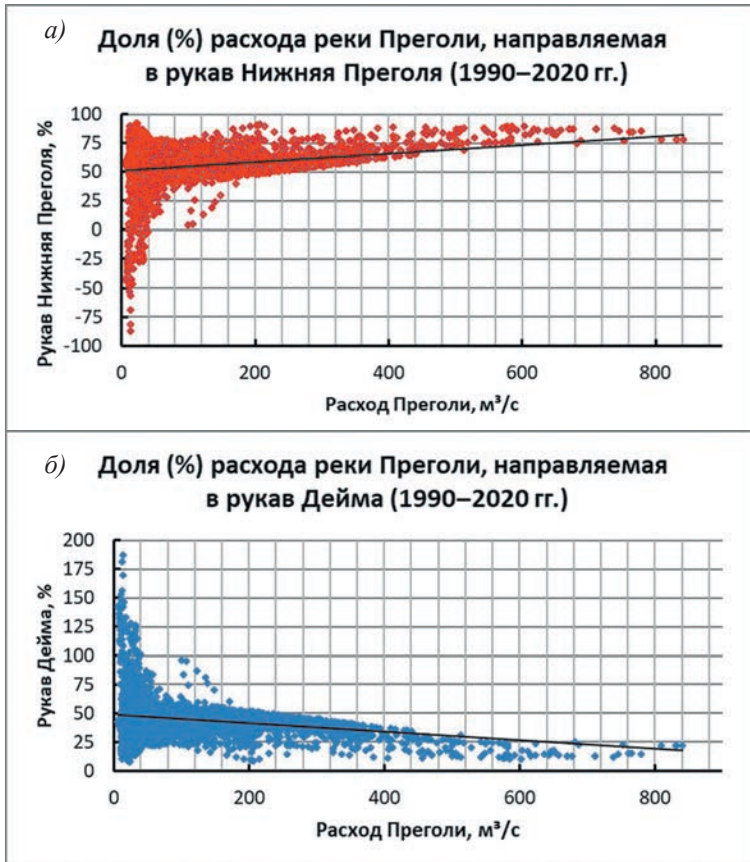


Рис. 11. Доли от общего приходящего расхода р. Преголи, которые берут на себя рукава Нижняя Преголя (а) и Дейма (б) для периода 1990—2020 гг.

Fig. 11. Shares of the total incoming discharge of the Pregolya River, which are taken over by the branches: Downstream Pregolya (a) and Deyma (б), for the period 1990—2020.

Выводы

Устьевая область р. Преголи включает в себя устьевой участок рукава Нижней Преголи, Калининградский залив, устьевой участок рукава Деймы и Куршский залив. В работе впервые рассмотрены характеристики изменчивости уровня (2002—2017 гг.) и расходов воды (1990—2020 гг.) для этих водотоков на основе регулярных данных. Не повторяя полученных в работе количественных оценок, сформулируем следующие качественные выводы об имеющихся наиболее интересных особенностях в динамике этих характеристик.

Для всей рассматриваемой области существует статистически значимый положительный линейный тренд уровня воды (табл. 7), причем, если для устьевых постов и постов в заливах он сравним со значениями для прибрежной зоны юго-восточной Балтики (5—15 мм/год, [15, 16]), то для точки разветвления р. Преголи на два устьевых рукава (рукав Нижняя Преголя — в сторону Калининградского / Вислинского залива, рукав Дейма — в сторону Куршского залива) он в 2—3 раза выше, чем для постов в заливах.

Характер изменчивости уровня воды в точке разветвления р. Преголи на два рукава соответствует речному режиму — существенный размах, высокий коэффициент асимметрии, в течение каждого года явно выделяются гидрологические фазы (паводок, половодье, межень). Вариации уровня на устьевых постах (Калининград-РП и Полесск) имеют значительно меньший размах, сильно зависят от уровня воды в приемных водоемах — Калининградском / Вислинском и Куршском заливах (коэффициенты корреляции 0,62 и 0,93 соответственно), и имеют временной ход более схожий с колебаниями уровня моря, чем реки (распределение близко к нормальному, со слабо выраженной асимметрией).

Несогласованность между колебаниями уровня в точке ветвления р. Преголи на рукава и устьях рукавов Нижней Преголи и Деймы, создают благоприятные условия для возникновения перепадов уровня (как положительных, так и отрицательных) между точкой ветвления и устьями, что в свою очередь может вызвать перетоки вод между заливами через устьевые рукава р. Преголи.

Хотя применение статистических критериев (KPSS и Дики—Фуллера) показало, что ряды данных для аномалий уровня воды (без тренда) являются стационарными, и, соответственно, статистики, оцененные для периода проведения измерений на РГП Калининград-РП (2002—2007 гг.), можно экстраполировать на весь период наблюдений 2002—2017 гг., анализ на стационарность рядов по средним и дисперсии (раздел 3.7, критерии Стьюдента и Фишера) показал, что для всего периода стационарность отмечается только для дисперсии (для уровня значимости 0,05).

Большую часть поступающего стока р. Преголи берет на себя рукав Нижняя Преголя, причем, чем более интенсивен поступающий сток, тем большая доля этого стока попадает в этот рукав. Доля стока, уходящего в рукав Дейма, постепенно (в среднем) повышается при ослаблении стока Преголи.

При очень слабом стоке р. Преголи ее воды могут преимущественно направляться в один из рукавов в зависимости от уровня в приемных водоемах, а межу рукавные перетоки (из Нижней Преголи в Дейму) также происходят только при низких значениях приходящего стока Преголи.

Выявлено, что доля перераспределения стока р. Преголи между рукавами (Нижняя Преголи и Дейма) существенно нестационарна по дисперсии, и смена режима произошла где-то на рубеже 2000 г. На наш взгляд, причиной этого могло послужить сужение проходного сечения рукава Нижней Преголи в г. Калининграде, когда на набережной исторического флота Музея Мирового океана была завершена установка группы судов (2001 г.), которые заузили сечение примерно на 20—30 % на участке длиной около 500 м.

Список источников

1. Кушевки В., Люкс К., Чубаренко Б. В., Гуменюк И. С., Баранова Ю. В., Кошелев В. Н. Возможные сценарии устойчивого развития. // Регион Калининградского / Вислинского залива: современное состояние и сценарий развития. Калининград: БФУ им. И. Канта, 2014. С. 187—195.
2. Великанов Ю. А. Гидрология суши. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1948. 528 с.
3. Малая энциклопедия Забайкалья: Природное наследие. Новосибирск: Наука, 2009. 698 с.
4. Чубаренко Б. В., Боскачёв Р. В. Возможность перетока вод в системе «Калининградский залив – река Преголи – Куршский залив» // Процессы в геосредах. 2018. № 2 (15). С. 911—919.
5. Берталанфи Л. фон. История и статус общей теории систем // Системные исследования. М.: Наука, 1973. С. 22—38.
6. Chubarenko B., Boskachev R. Hydraulic connection between Vistula and Curonian lagoons of the Baltic Sea. // Baltica. 2021. Vol. 34 (1). P. 81—94. doi: 10.5200/baltica.2021.1.7.
7. Боскачёв Р. В., Чубаренко Б. В. Среднегодовые расходы воды в реках Преголи и Дейма в 1990—2020 гг. // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 8(110—1). С. 176—183. doi: 10.23670/IRJ.2021.110.8.030.
8. Домнин Д. А., Чубаренко Б. В. Трансграничные водосборы Юго-восточной Балтики // Геогр. и прир. ресурсы. 2012. № 3. С. 69—76.
9. Маркова Л. Л., Нечай И. Я. Гидрологический очерк устьевых областей рек Немана и Преголи // Труды ГОИН. 1960. Вып. 49. С. 118—187.
10. Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S., Stont Zh., Chechko V., Bobykina V., Pilipchuk V., Karmenov K., Domnina A., Bukanova T., Topchaya V., Kileso A. Transboundary Lagoons of the Baltic Sea (Chapter 6) // The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence, Estuaries of the World (Ed. R. Kosjan). Switzerland: Springer International Publishing, 2017. P. 149—191. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9_6.
11. Силич М. В. Водный баланс залива // Гидрометеорологический режим Вислинского залива. Л.: Гидрометеоздат, 1971. С. 143—172.
12. Навроцкая С. Е., Чубаренко Б. В. О повышении среднегодовых и сезонных значений уровня воды в устьевой части реки Преголи (Балтийское море) по данным 1996—2015 гг. // Известия Русского географического общества. 2017. Т. 149, № 2. С. 16—30.
13. Jensen J., Wahl T., Muddersbach C. Sea level variations at the German North Sea and Baltic Sea coastlines // COPEDEC VII. UAE: Dubai. 2008. No. 99. P. 1—12.
14. Prussak Z., Zavadzka E. Potential implications of sea level rise for Poland // Journal of Coastal Res. 2008. Vol. 24 (2). P. 410—422.
15. Навроцкая С. Е., Чубаренко Б. В. О повышении уровня моря в российской части Вислинского залива // Метеорология и гидрология. 2012. № 1. С. 57—67.
16. Навроцкая С. Е., Чубаренко Б. В. Тенденции изменения уровня моря в лагунах юго-восточной Балтики. // Океанология. 2013. Т. 53 (1). С. 17—28.
17. Павловский А. А., Шамшурин В. И. Влияние повышения уровня Балтийского моря на историко-культурное наследие России // Гидрометеорология и экология. 2021. № 65. С. 681—693.
18. Малинин В. Н. Изменения уровня Мирового океана и климата // Ученые записки РГГМУ. 2015. № 41. С. 100—115.
19. Чубаренко Б. В., Шкуренко В. И. Физические механизмы проникновения соленых вод вверх по реке Преголе с учетом влияния рельефа дна // Физические проблемы экологии (экологическая физика). 2001. Вып. 7. С. 80—88.

20. Стонт Ж. И., Навроцкая С. Е., Чубаренко Б. В. Многолетние тенденции изменчивости гидрометеорологических характеристик в Калининградском регионе // *Океанологические исследования*. 2020. Т. 48, № 1. С. 45—61.
21. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
22. Таблица критических значений t-критерия Стьюдента. URL: <https://statpsy.ru/t-student/t-test-tablica> (дата обращения: 20.08.2022).
23. МИ 1759-87. Государственная система обеспечения единства измерений. Расход воды на реках и каналах. Методика выполнения измерений методом скорость—площадь. М.: Издательство стандартов, 1987. 28 с.
24. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: ГГИ, 2010. 162 с.
25. Dickey D. A. Stationarity Issues in Time Series Models. // Proc. SUG1-30. Paper 192-30. URL: <https://pdf4pro.com/amp/view/192-30-stationarity-issues-in-time-series-models-1db2b6.html> (дата обращения: 21.09.2022).
26. Kwiatkowski D., Phillips P. C. B., Schmidt P., Shin Y. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root? // *Journal of Econometrics*. 1992. Vol. 54 (1–3), P. 159—178. doi: 0.1016/0304-4076(92)90104-Y.
27. Fuller W. A. Introduction to Statistical Time Series (2nd edition). New York: John Wiley and Sons, 1995. URL: <https://www.wiley.com/enus/Introduction+to+Statistical+Time+Series+%2C+2nd+Edition-p-9780471552390#description-section> (дата обращения: 20.08.2022).
28. Seabold S., Perktold J. Statsmodels: Econometric and statistical modeling with Python // Proc. 9th Python in Science Conference (SCIPY 2010). 2010. Vol. 92-96. doi: 10.25080/Majora-92bf1922-011.
29. Алиева И. С. Пространственно-временные закономерности поверхностного стока рек Большого Кавказа // *Гидрометеорология и экология*. 2020. № 58. С. 41—48.
30. Daniel W. W. Kolmogorov—Smirnov test with one sample // *Applied Nonparametric Statistics* (2nd ed.). Boston: PWS-Kent, 1990. P. 319—330.
31. Shapiro S. S., Wilk M. B. Analysis of variance test for normality (complete samples) // *Biometrika*. 1965. Vol. 52(3-4). P. 591—611.
32. Малинин В. Н., Гордеева С. М., Митина Ю. В., Шевчук О. И. Результаты исследований уровня моря в РГГМУ // *Гидрометеорология и экология*. 2020. № 60. С. 269—305.
33. Гордеева С. М., Малинин В. Н. Изменчивость морского уровня Финского залива. СПб.: РГГМУ, 2014. 180 с.
34. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula Lagoon. [In] *Ecology of Baltic Coastal Waters*. U. Schiewer (Ed.) *Ecological studies* (analysis and synthesis). Issue 197. Berlin: Springer, 2008. P. 167—195.

References

1. Kushevski V., Lyuks K., Chubarenko B. V., Gumenyuk I. S., Baranova Yu. V., Koshelev V. N. Possible scenarios of sustainable development. *Region Kaliningradskogo / Vislinskogo zaliva: sovremennoe sostoyanie i scenarij razvitiya = Kaliningrad / Vislinsky Bay Region: current state and development scenario*. Kaliningrad: BFU im. I. Kanta, 2014:187—195. (In Russ.)
2. Velikanov M. A. *Gidrologiya sushi = Hydrology of the land*. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House, 1948: 528 p. (In Russ.)
3. *Malaya enciklopediya Zabajkal'ya: Prirodnoe nasledie = Small Encyclopedia of Transbaikalia: Natural Heritage*. Novosibirsk: Science. 2009: 698 p. (In Russ.)
4. Chubarenko B. V., Boskachev R. V. The possibility of water flow in the system “Kaliningrad Lagoon – Pregolya River – Curonian Lagoon”. *Processy v geosredah = Processes in geomedia*. 2018;2(15):911—919. (In Russ.)
5. Bertalanffy L. History and status of the general theory of systems. *System research. Science*. 1973:20—38.
6. Chubarenko B. V., Boskachev R. V. Hydraulic connection between Vistula and Curonian lagoons of the Baltic Sea. *Baltica*. 2021;1(34):81—94. doi: 10.5200/baltica.2021.1.7.

7. Boskachev R. V., Chubarenko B. V. Average annual water flow in the Pregolya and Deyma rivers in 1990—2020. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International Scientific Research Journal*. 2021;8(110-1):176—183. doi: 10.23670/IRJ.2021.110.8.030. (In Russ.).
8. Domnin D. A., Chubarenko B. V. Transboundary catchments of the South-eastern Baltic. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2012;(3):69—76. (In Russ.).
9. Markova L. L., Nechay I. Y. Hydrological essay of the mouth areas of the Neman and Pregolya Rivers. *Trudy GOIN = Proceedings of the RSOI*. 1960;(49):118—187. (In Russ.).
10. Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S., Stont Zh., Chechko V., Bobykina V., Pilipchuk V., Karmanov K., Domnina A., Bukanova T., Topchaya V., Kileso A. Transboundary Lagoons of the Baltic Sea (Chapter 6). *The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence, Estuaries of the World* (Ed. R. Kosjan). Springer International Publishing. Switzerland, 2017:149—191. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9_6.
11. Silich M. V. Water balance of the lagoon. *Gidrometeorologicheskij rezhim Vislinskogo zaliva = Hydro-meteorological regime of the Vistula Lagoon*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1971:143—172. (In Russ.).
12. Navrotskaya S. E., Chubarenko B. V. On the increase in the average annual and seasonal values of the water level in the estuary of the Pregolya River (Baltic Sea) according to the data of 1996—2015. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva = Izvestiya Russian Geographical Society*. 2017;149(2):6—30. (In Russ.).
13. Jensen J., Wahl T., Mudersbach C. Sea level variations at the German North Sea and Baltic Sea coastlines. *COPEDEC VII. UAE: Dubai*. 2008;(99):1—12.
14. Prussak Z., Zawadzka E. Potential implications of sea level rise for Poland. *Journal of Coastal Res.* 2008;24(2):410—422.
15. Navrotskaya S. E., Chubarenko B. V. Sea level rise in the Russian part of the Vistula Lagoon. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 2012;(1):57—67. (In Russ.).
16. Navrotskaya S. E., Chubarenko B. V. Trends in sea level changes in the lagoons of the Southeastern Baltic. *Okeanologiya = Oceanology*. 2013;53(1):17—28. (In Russ.).
17. Pavlovskij A.A., SHamshurin V.I. The impact of the Baltic Sea level rise on the historical and cultural heritage of Russia. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2021;(65):681—693. (In Russ.).
18. Malinin V. N. Changes in the level of the world ocean and climate. *Uchenye zapiski RGGMU = Scientific notes of RSHU*. 2015;(41):100—115. (In Russ.).
19. Chubarenko B. V., Shkurenko V. I. Physical mechanisms of salt water penetration up the Pregole River taking into account the influence of the bottom relief. *Fizicheskie problemy ekologii (ekologicheskaya fizika) = Physical problems of ecology (ecological physics)*. 2001;(7):80—88. (In Russ.).
20. Stont J. I., Navrotskaya S. E., Chubarenko B. V. Long-term trends in the variability of hydrometeorological characteristics in the Kaliningrad region. *Okeanologicheskie issledovaniya = Oceanological Research*. 2020;48 (1):45—61. (In Russ.).
21. Malinin V. N. *Statisticheskiye metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii = Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information*. St. Petersburg: RSHU, 2008: 408 p. (In Russ.).
22. *Tablitsa kriticheskikh znachenij t-kriteriya St'udenta = Table of critical values of the Student's t-test*. Available at: <https://statpsy.ru/t-student/t-test-tablica> (accessed: 30.07.2022).
23. *MI 1759-87. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij. Raskhod vody na rekah i kanalah. Metodika vypolneniya izmerenij metodom sskorost' — ploshchad' = The state system of ensuring the uniformity of measurements of water flow on rivers and canals. The methods of performing measurements by the speed — area method*. Moscow: Publishing House of Standards, 1987: 28 p. (In Russ.).
24. *Metodicheskie rekomendacii po ocenke odnorodnosti gidrologicheskikh harakteristik i opredeleniyu ih raschetnyh znachenij po neodnorodnym dannym = Methodological recommendations for assessing the homogeneity of hydrological characteristics and determining their calculated values from heterogeneous data*. St. Petersburg: State Hydrological Institute, 2010: 162 p. (In Russ.).
25. Dickey D. A. Stationarity Issues in Time Series Models. Proc. SUGI-30: 192-30. Available at: <https://pdf4pro.com/amp/view/192-30-stationarity-issues-in-time-series-models-1db2b6.html> (accessed: 30.09.2022).

26. Kwiatkowski D., Phillips P. C. B., Schmidt P., Shin Y. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root? *Journal of Econometrics*. 1992;(54):159—178. doi: 0.1016/0304-4076(92)90104-Y.
27. Fuller W. A. Introduction to Statistical Time Series (2nd edition). New York: John Wiley and Sons. Available at: [https://www.wiley.com/en-us/Introduction+to+Statistical+Time+Series %2C +2nd +Edition-p-9780471552390#description-section](https://www.wiley.com/en-us/Introduction+to+Statistical+Time+Series+%2C+%2nd+Edition-p-9780471552390#description-section) (accessed: 30.07.2022).
28. Seabold S., Perktold J. Statsmodels: Econometric and statistical modeling with python. *Proc. 9th Python in Science Conference (SCIPY 2010)*. 2010;(92-96). doi: 10.25080/Majora-92bf1922-011.
29. Alieva I. S. Spatio-temporal regularities of the surface runoff of the rivers of the Greater Caucasus. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2020;(58):41—48. (In Russ.).
30. Daniel W. W. Kolmogorov-Smirnov test with one sample. *Applied Nonparametric Statistics (2nd ed.)*. Boston: PWS-Kent. 1990:319—330.
31. Shapiro S. S., Wilkes M. B. Test of variance analysis for normality (complete samples). *Biometrics*. 1965;52(3—4):591—611. doi: 10.1093/biomet/52.3—4.591.
32. Malinin V. N., Gordeeva S. M., Mitina Yu. V., Shevchuk O. I. Results of sea level studies at RSMU. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and ecology*. 2020;(60):269—305. (In Russ.).
33. Gordeeva S. M., Malinin V. N. *Izmenchivost' morskogo urovnya Finskogo zaliva = Gulf of Finland sea level variability*. St. Peterburg: RSHU, 2014: 180 p. (In Russ.).
34. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula Lagoon. *Ecology of Baltic Coastal Waters. Ecological studies (analysis and synthesis)*. Berlin: Springer, 2008;(197):167—195.

Информация об авторах

Руслан Владимирович Боскачѳв, соискатель на ученую степень кандидата географических наук, Калининградский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды — филиал ФГБУ «Северо-Западное управление УГМС», Калининград, 236000, ул. Пугачѳва 16, Российская Федерация, combat.130@mail.ru.

Борис Валентинович Чубаренко, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. прибрежных систем, Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН), г. Москва, 117997, Нахимовский пр., д. 36, Российская Федерация, chuboris@mail.ru.

Information about authors

Ruslan V. Boskachev, Kaliningrad Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of the Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Pugacheva, 16, 236000, Kaliningrad, Russia.

Boris V. Chubarenko, PhD, Head of Laboratory for Coastal Systems Study, Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences (IO RAS), 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 19.08.2022

Принята к публикации после доработки 27.11.2022

The article was received on 19.08.2022

The article was accepted after revision on 27.11.2022