

Корреляционный анализ ежедневных уровней воды в реках Калининградской области по результатам наблюдений в 2008–2021 годах

Владимир Аркадьевич Наумов, Наталья Равиловна Ахмедова

Калининградский государственный технический университет (КГТУ); г. Калининград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При обосновании проектных решений в гидротехническом строительстве, разработке мероприятий по использованию и охране водных ресурсов практический и научный интерес представляет информация о внутригодовом распределении стока. Представлены итоги корреляционного анализа ежедневных уровней воды в реках Калининградской области по результатам наблюдений в годы разной водности с 2008 по 2021 г.

Материалы и методы. Выполнен статистический анализ массива данных наблюдений за ежедневными уровнями воды в 12 створах рек Калининградской области за период с 2008 по 2021 г. Источник данных — автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. Обработка результатов наблюдений осуществлялась в среде Mathcad.

Результаты. Рассчитаны коэффициенты парной корреляции (КПК) между ежедневными уровнями воды в исследуемых створах рек Калининградской области. Определены средние, наибольшие и наименьшие КПК ежедневных уровней воды в рассматриваемых створах. Установлена зависимость КПК ежедневных уровней воды в двух створах, расположенных в одной речной системе, и для разных речных систем.

Выводы. Выявлено, что наиболее тесная стохастическая связь ежедневных уровней воды наблюдается у р. Неман и рук. Матросовка; в маловодные годы значения КПК ежедневных уровней воды в рассматриваемых створах снижаются; в качестве аналогов для водотоков Калининградской области следует рекомендовать р. Преголю (ГП Гвардейск) и р. Инструч (ГП Ульяново). Полученные результаты могут быть использованы при разработке мероприятий по использованию и охране водных ресурсов региона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: внутригодовое распределение стока, водность реки, гидрологические расчеты, ежедневные уровни воды, Калининградская область, река Анграпа, река Инструч, река Мамоновка, река Писса, река Преголя, рукав Дейма

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Правительства Калининградской области в рамках научного проекта № 22-27-20016.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Наумов В.А., Ахмедова Н.Р. Корреляционный анализ ежедневных уровней воды в реках Калининградской области по результатам наблюдений в 2008–2021 годах // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 8. С. 1343–1355. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1343-1355

Автор, ответственный за переписку: Наталья Равиловна Ахмедова, isfendi@mail.ru.

Correlation analysis of daily water levels in rivers of the Kaliningrad region based on observation results in 2008–2021

Vladimir A. Naumov, Natal'ya R. Ahmedova

Kaliningrad State Technical University (KSTU); Kaliningrad, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When justifying design decisions in hydraulic engineering, developing measures for the use and protection of water resources, information on the intra-annual distribution of runoff is of practical and scientific interest. The paper presents the results of a correlation analysis of daily water levels in the rivers of the Kaliningrad region, based on the results of observations in years with different water content from 2008 to 2021.

Materials and methods. The statistical analysis of the data set of observations of daily water levels in 12 river stations of the Kaliningrad region for the period from 2008 to 2021 was carried out. The data source was the automated information system of state monitoring of water bodies. The observation results were processed in Mathcad environment.

Results. Pair correlation coefficients between daily water levels in the studied river stations of the Kaliningrad region were calculated. The average, maximum and minimum pair correlation coefficients of daily water levels in the considered stations were determined. The dependence of pair correlation coefficients of daily water levels in two stations located in the same

river system (The Angrapa River – Berestovo gauging station – The Pregolya River – Gvardeysk gauging station) and for different river systems (The Mamonovka River – Mamonovo gauging station – The Pregolya River – Chernyakhovsk gauging station) was determined.

Conclusions. It was found that the closest stochastic relationship of daily water levels is observed near the Neman and Matrosovka Rivers; in dry years, the values of the pair correlation coefficients of daily water levels decrease in the studied stations; The Pregolya river (Gvardeysk gauging station) and the Instruch River (Ulyanovo gauging station) should be recommended as analogues for watercourses of the Kaliningrad region. The obtained results can be used for the development of measures for the use and protection of water resources in the region.

KEYWORDS: intra-annual distribution of runoff, river water content, hydrological calculations, daily water levels, Kaliningrad region, Angrapa river, Instruch river, Mamonovka river, Pissa river, Pregolya river, Deyma river

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Science Foundation and the Government of the Kaliningrad Region under the scientific project No. 22-27-20016.

FOR CITATION: Naumov V.A., Ahmedova N.R. Correlation analysis of daily water levels in rivers of the Kaliningrad region based on observation results in 2008–2021. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(8):1343-1355. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1343-1355 (rus.).

Corresponding author: Natal'ya R. Ahmedova, isfendi@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение гидрологических особенностей водотоков Калининградской области является актуальной задачей, поскольку они определяют условия жизни населения, возможности развития сельского хозяйства и промышленности, а также состояние окружающей среды. Кроме того, знание этих особенностей необходимо для разработки мер по охране и рациональному использованию водных ресурсов региона.

Научно обоснованное планирование комплексного использования водных ресурсов бассейна реки требует знания закономерностей внутригодового распределения стока. Этой проблеме посвящено большое количество исследований [1–8].

Так, в статье [1] проанализированы характеристики неравномерности стока (коэффициент естественной зарегулированности и доля объема весеннего половодья в годовом стоке) и влияние на них гидрографических, морфометрических, климатических и ландшафтных факторов. Наблюдается существенное изменение условий формирования стока и увеличение его неравномерности для рек европейской части Российской Федерации. Авторы [1] считают, что установленная неравномерность внутригодового распределения стока служит одним из основных факторов гидроэкологической безопасности территорий.

Рассмотрено распределение годового стока малых водотоков (площадь бассейна не более 7000 км²) [2]. В исследовании определено, что водный режим исследуемых рек южной половины европейской территории России, начиная с 70-х гг. XX в., значительно изменился — произошло перераспределение стока, что привело, по мнению авторов работы, к снижению темпов аккумуляции наносов на поймах малых рек.

Климатические изменения повлияли на характеристики внутригодового стока рек Европы [3]. На реках с преобладающим весенним стоком, сходных по режиму с реками на севере и в средней поло-

се европейской части России, отмечено увеличение стока в осенне-зимний период, связанное с дождями и оттепелями, и сокращение стока весеннего половодья, что также характерно для рек Калининградской области [4].

Исследовалась взаимосвязь гидрологических факторов и основных физико-химических характеристик воды малых водотоков [5]. Авторы [5] указывают на то, что изучение внутригодового стока необходимо для понимания биогеохимических процессов. Влияние внутригодовой изменчивости стока на экосистему фиксируется и в работах [6, 8].

Во многих случаях, в частности при проектировании гидротехнических сооружений, необходимы характерные значения уровня воды. Изучение таких характеристик имеет и самостоятельное значение, учитывая меньшую погрешность их определения (как прямых измерений), в отличие от расхода воды (косвенные измерения). Уровни воды в реках являются важным показателем состояния водных ресурсов региона. Они зависят от множества факторов, включая климатические условия, геологические особенности местности, антропогенную деятельность и другое. Результаты исследования динамики изменения уровня воды в реках представлены во многих публикациях [9–16].

С целью прогнозирования гидрологических характеристик для повышения безопасности судоходства выполнен анализ массива данных наблюдений за уровнями воды в р. Амур, который позволил выявить тенденцию понижения водности [9]. Авторы установили, что динамика характерных уровней воды в р. Амур имеет отрицательный тренд, наиболее интенсивно проявляющийся в летнюю межень. Такая тенденция указывает на неблагоприятную перспективу для судоходства на реке. Также отмечаются значительные изменения в распределении стока на реках России, которые авторы связывают с современными климатическими условиями.

В статье [11] предпринята попытка анализа динамики ежедневных уровней воды в реке. Предложен метод моделирования ежедневных уровней воды

по фазам изменения гидрологического режима. Для р. Угрюмой (гидрологический пост (ГП) Горное) выделено шесть фаз: от зимней межени до начала весеннего половодья; от начала весеннего половодья (включая весенний ледоход) до летней межени; от летней межени до начала осени; от начала осени до начала осеннего ледохода; от начала осеннего ледохода до начала ледостава; от начала ледостава до зимней межени. Были использованы результаты наблюдений за ежедневными уровнями воды 1975 г. в указанном створе для построения математической модели каждой фазы. Например, для ежедневных уровней воды y в первой фазе (до начала весеннего половодья) формула имеет следующий вид:

$$y = 10,9790 \cdot \exp(0,04917t) - 2,1833 \cdot 10^{-9} t^{6,7638} \exp(-0,002242t) - 0,004739 t^{2,3820} \cos(\pi t / 16,7560), \quad (1)$$

где t — время от начала фазы 6 января.

Автор [11] считает, что первое слагаемое формулы (1) обусловлено экспоненциальным ростом уровня реки на этом этапе. Второе и третье слагаемые вычитаются из первого. Второе слагаемое описывает стрессовое возбуждение реки, третье — волновой характер изменения ежедневных уровней воды (с периодом 33,5 дня). Полагается [11], что структура предложенных формул останется такой же и в другие годы, изменятся лишь численные значения эмпирических коэффициентов. Но подтверждения этой гипотезы отсутствуют. По сути описана лишь одна реализация случайного процесса.

Исследованы водные объекты в верховьях бассейна Вислы (на территории Республики Польша), которые имеют различные параметры и функции [12]. Для получения полной картины динамики стока с применением статистических методов обрабатывались ряды данных наблюдений до изменений антропогенного характера (строительство водохранилищ) и после них. Анализировалась информация по пяти гидропостам на р. Раба и трем ГП — на р. Дунаец.

Статистический анализ для исследования уровней некоторых рек Калининградской области приведен в трудах [14, 15]. Установлено, что уклон водной поверхности р. Преголи между Гвардейском и Калининградом весьма мал, а в отдельные дни он был отрицательным, что обусловлено сильными нагонными явлениями в устье р. Преголи. Из-за этого стохастическая связь между ежедневными уровнями реки в указанных створах слабая, тогда как коэффициент парной корреляции ежедневных уровней воды в Черняховске и Гвардейске в исследованные годы наблюдался больше порогового значения 0,7.

После рекордно большого стока рек Калининградской области в 2017 г. (например, у р. Преголи, ГП Гвардейск средний годовой расход составил $Q = 167 \text{ м}^3/\text{с}$) последующие четыре года были маловодными (у р. Преголи в 2018 г. $Q = 77,1 \text{ м}^3/\text{с}$; 2019 —

$Q = 71,3 \text{ м}^3/\text{с}$; 2020 — $Q = 57,7 \text{ м}^3/\text{с}$; 2021 — $Q = 50,1 \text{ м}^3/\text{с}$), тогда как средний многолетний расход за 120 лет наблюдений составляет $86,4 \text{ м}^3/\text{с}$.

В последнее время число гидрологических постов сети Росгидромет на территории Калининградской области уменьшается, есть пропуски в наблюдениях на действующих постах. С 2014 г. закрыты посты на р. Голубой — ГП Угрюмово (открыт 01.10.1983), р. Нельме — ГП Кострово (открыт 27.09.1963). В связи с этим в целях восстановления данных гидрологических рядов необходима информация о степени (тесноте) стохастической связи. Изучение корреляционных связей между уровнями воды в различных реках может помочь лучше понять процессы формирования водного режима и выявить потенциальные риски для окружающей среды и населения.

Цель исследования — выполнить корреляционный анализ ежедневных уровней воды в реках Калининградской области по результатам наблюдений в годы разной водности с 2008 по 2021.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- собраны данные об уровнях воды в реках региона за период с 2008 по 2021 г.;
- проведен статистический анализ данных;
- выявлены корреляционные связи между уровнями воды в разных реках;
- проанализированы полученные результаты и сделаны выводы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходным материалом для анализа послужили данные ежедневных уровней в 12 створах рек Калининградской области: р. Неман — ГП Советск; р. Преголя — ГП Гвардейск, ГП Черняховск; р. Лава — ГП Родники; р. Шешупе — ГП Долгое; р. Анграпа — ГП Берестово; р. Писса — ГП Зеленый Бор; р. Инструч — ГП Ульяновово; р. Мамоновка — ГП Мамоново; р. Злая — ГП Приозерье; рук. Матросовка — ГП Мостовое; рук. Дейма — ГП Полесск (рис. 1).

Неман — крупнейшая река Калининградской области. Ее длина составляет 937 км, площадь бассейна — 98,2 тыс. км². Река берет начало от Минской возвышенности и впадает в Куршский залив Балтийского моря.

Преголя — одна из самых длинных рек Калининградской области, ее длина составляет 123 км, площадь водосбора — 15 500 км². Она берет свое начало от слияния р. Инструч и р. Анграпы (на территории Калининградской области) и впадает в Калининградский (Вислинский) залив Балтийского моря. Преголя является важной транспортной артерией и источником водоснабжения в регионе.

Река Лава — приток р. Преголи. Длина реки Лавы — 289 км, площадь бассейна — 7130 км². Река берет начало в Мазурских озерах на территории

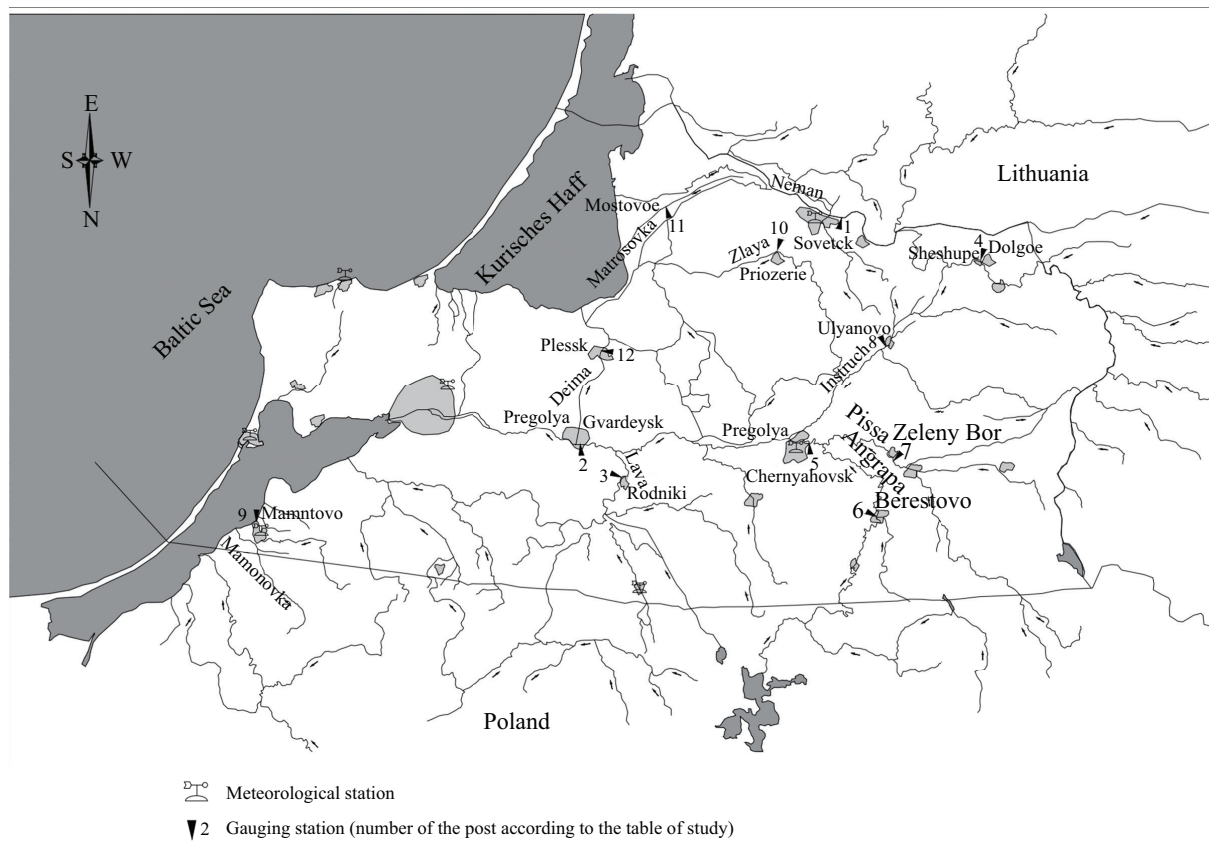
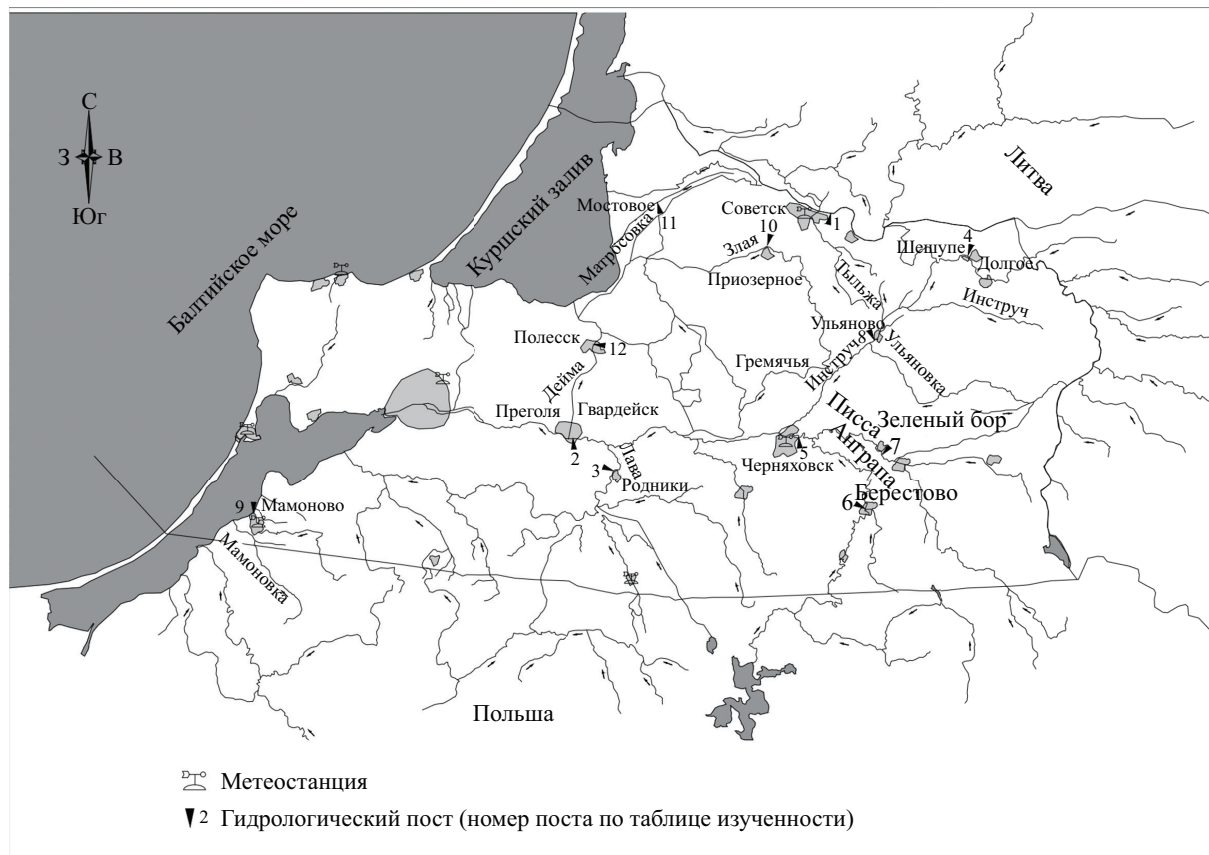


Рис. 1. Обзорная схема расположения гидропостов на территории Калининградской области

Fig. 1. Overview diagram of the location of gauging stations of the Kaliningrad region

Польшы и впадает в Преголю у поселка Знаменска (Калининградская область).

Река Шешупе является левым притоком р. Неман. Общая длина реки составляет 298 км, площадь бассейна — 6104,8 км². Река берет начало на Балтийской гряде и впадает в р. Неман.

Анграпа — приток р. Преголи, длина реки — 169 км, площадь водосборного бассейна — 3960 км². Анграпа берет начало из оз. Мамры в районе польского г. Венгожево, в Черняховском районе р. Анграпа сливается с р. Инструч, образуя р. Преголю.

Река Писса расположена на востоке Калининградской области, ее длина — 98 км, площадь водосборного бассейна — 1440 км². Река берет начало из Виштынецкого озера и впадает в р. Анграпу.

Инструч — один из основных притоков р. Преголи в Калининградской области, берет начало на востоке области в районе г. Черняховска, сливается с р. Анграпой и образует начало р. Преголи. Длина р. Инструч составляет 101 км, площадь водосборного бассейна — 1250 км².

Река Мамоновка берет начало на территории Польши, недалеко от г. Ольштынек и впадает в Калининградский (Вислинский) залив. Длина реки составляет 51 км, площадь водосборного бассейна — 311 км².

Реки Матросовка и Дейма — рукава рек Неман и Преголи соответственно, относятся к существенно модифицированным водным объектам¹.

¹ Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Неман и рек бассейна Балтийского моря (российская часть в Калининградской области) : утв. приказом Невско-Ладожского БВУ Федерального агентства водных ресурсов от 09.12.2014 № 171.

К категории больших рек (согласно ГОСТ²) относится только р. Неман, которая протекает по территории Республики Беларусь, Литовской Республики и Российской Федерации (Калининградская область). Остальные водные объекты относятся к категории средних (р. Преголя, р. Лава, р. Шешупе, р. Анграпа) и малых рек (р. Инструч, р. Мамоновка, р. Злая).

Трансграничными водотоками также являются р. Мамоновка, р. Лава, р. Анграпа (протекают по территории двух стран — Республики Польши, РФ) и р. Шешупе (протекает, как и р. Неман, по территории Республики Беларусь, Литовской Республики, РФ и является ее притоком). Реки Инструч и Писса не являются трансграничными, протекают только в пределах Калининградской области.

Исследуемые водотоки располагаются в различных частях региона — это реки равнинного типа. Следует выделить р. Мамоновку, р. Анграпу и р. Писсу, которые в верховье имеют несколько другой характер течения, поскольку берут начало с Вармийской (р. Мамоновка) и Виштынецкой возвышенностей (р. Анграпа, р. Писса).

В табл. 1 представлены данные о действующих гидропостах на исследуемых водотоках. Нумерация гидропостов на рис. 1 соответствует нумерации в табл. 1.

В данной статье выполнен анализ массива данных ежедневных уровней в 12 створах рек Калининградской области за 2008–2021 гг. Для проведения исследования использованы методы математической статистики, в частности корреляционный анализ.

² ГОСТ 19179–73. Гидрология суши. Термины и определения.

Табл. 1. Действующие ГП на реках Калининградской области в 2020–2021 гг.³

Table 1. Operating gauging stations on the rivers of the Kaliningrad region in 2020–2021³

Номер Number	Название водотока Watercourse name	Гидрологический пост Hydrological post	Расстояние, км, от Distance, km, from		Площадь <i>A</i> , км ² Area <i>A</i> , km ²	Отметка нуля поста, м, БС Gauge datum, m, BS
			истока the river head	устья the mouth		
1	р. Неман Neman	Советск Sovetsk	878	59,0	91 800	1,90
2	р. Преголя Pregolya	Гвардейск Gvardeysk	67,0	56,0	13 600	–5,17
3	р. Лава Lava	Родники Rodniki	271	18,0	7020	1,15
4	р. Шешупе Sheshupe	Долгое Dolgoe	265	43,0	5830	8,32
5	р. Преголя Pregolya	Черняховск Chernyakhovsk	1,00	122	5210	3,21
6	р. Анграпа Angrapa	Берестово Berestovo	139	30,0	2460	23,85
7	р. Писса Pissa	Зеленый Бор Zeleny Bor	87,0	11,0	1360	20,90
8	р. Инструч Instruch	Ульяново Ulyanovo	51,0	50,0	587	13,23

Номер Number	Название водотока Watercourse name	Гидрологический пост Hydrological post	Расстояние, км, от Distance, km, from		Площадь A , км ² Area A , km ²	Отметка нуля поста, м, БС Gauge datum, m, BS
			истока the river head	устья the mouth		
9	р. Мамоновка Mamonovka	Мамоново Mamonovo	45,0	6,20	300	5,50
10	р. Злая Zlaya	Приозерье Priozerie	50,0	12,0	142	-2,31
11	рук. Матросовка Matrosovka	Мостовое Mostovoe	19,0	24,0	–	-2,00
12	рук. Дейма Deyma	Полесск Polessk	32,0	5,00	–	-5,18

Сведения об уровнях воды получены из открытых источников — автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов³.

За исследуемый период наибольшая водность в регионе наблюдалась в 2017 г., наименьшая — в 2015 г. Для выделения рек по водности были построены кривые обеспеченности, в качестве теоретического принимали трехпараметрическое гамма-распределение. Массив рядов исходных данных прошел проверку на однородность (использовался критерий Стьюдента). Все вычисления выполнялись в среде Mathcad.

Примеры ежедневных уровней воды приведены на рис. 2–5. Видно, что некоторые графики еже-

дневных уровней воды весьма схожи, как в 2020 г. у рек Инструч и Преголя (Черняховск) на рис. 2. Другие отличаются, как в 2021 г. у р. Мамоновки и рук. Деймы (Полесск) на рис. 5.

Следует обратить внимание на особенности гидрографов рек Калининградской области: частые паводки холодного времени года и несколько пиков весеннего половодья, во время которого могут наблюдаться затяжные дожди.

По гидрографам рек Калининградской области в декабре и январе наблюдается заметное повышение уровня воды в реках, вызванное таянием снега и льда во время зимних оттепелей. За зимний период может произойти несколько таких оттепелей, чередующихся с понижением температуры. Также во время весеннего половодья часто бывают затяжные дожди.

Разделение стока на половодье и паводки, за редким исключением, не представляется возможным. Ярким подтверждением этого служат паводковые

³ Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/>

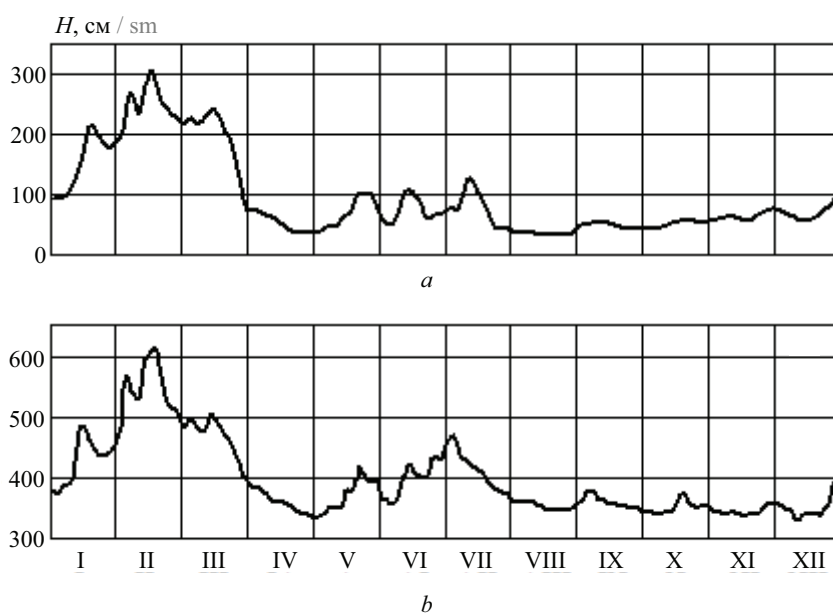


Рис. 2. Ежедневные уровни воды (2020) р. Инструч (а) и р. Преголя (Черняховск) (b)

Fig. 2. Daily water levels (2020) of the Instruch River (a) and the Pregolya River (Chernyakhovsk) (b)

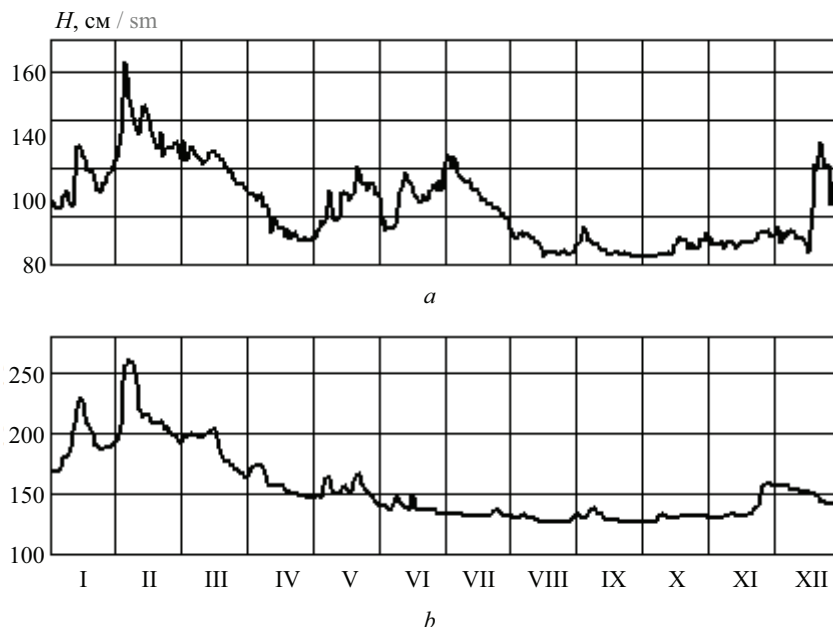


Рис. 3. Ежедневные уровни воды (2020) р. Анграпы (а) и р. Мамоновки (b)

Fig. 3. Daily water levels (2020) of the Angrapa River (a) and the Mamonovka River (b)

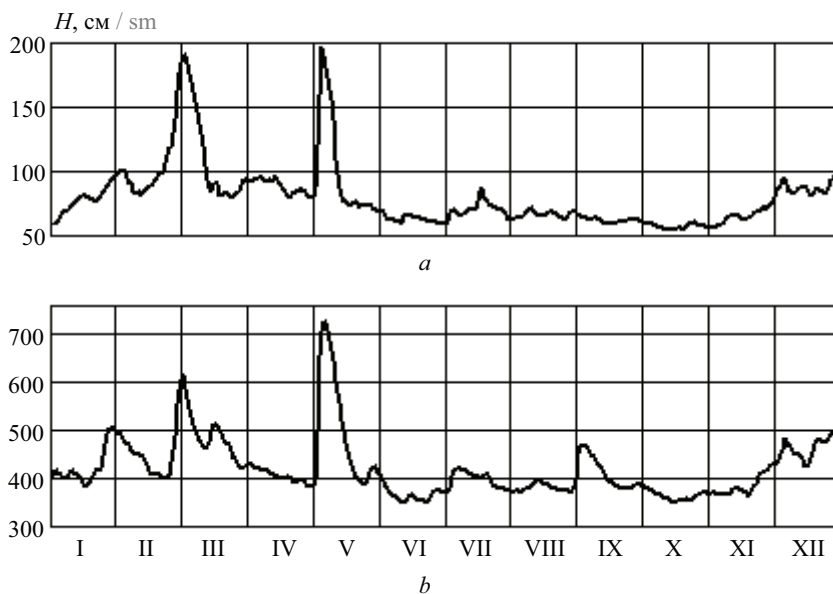
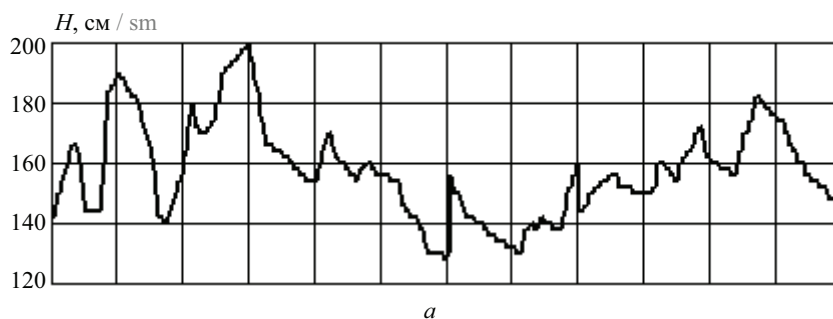


Рис. 4. Ежедневные уровни воды (2021) р. Писсы (а) и р. Преголи (Черняховск) (b)

Fig. 4. Daily water levels (2021) of the Pissa River (a) and the Pregolya River (Chernyakhovsk) (b)



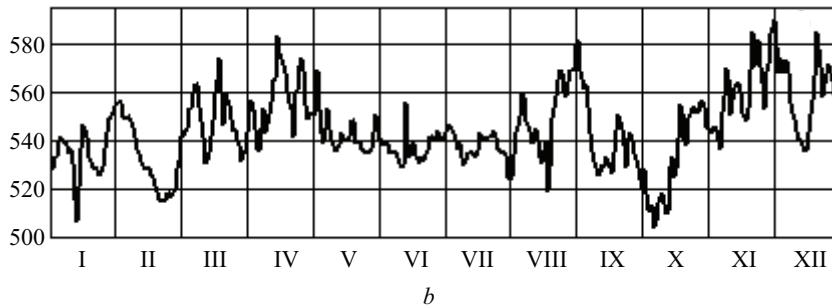


Рис. 5. Ежедневные уровни воды (2021) р. Мамоновки (а) и рук. Деймы (Полесск) (b)

Fig. 5. Daily water levels (2021) of the Mamonovka River (a) and the Deyma River (Polesk) (b)

явления в январе-марте 2020 г. Снежный покров на территории Калининградской области отсутствовал. Возрастание расхода в этот период было вызвано осадками в виде дождя. Высокие пики расходов в первые три месяца 2020 г. обусловлены низкой интенсивностью испарения из-за температур воздуха, немногим выше нуля, и слабой проницаемостью почвогрунтов. Тогда как в мае-июне более интенсивные осадки при достаточно высоких температурах привели лишь к незначительным паводкам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчитаны коэффициенты парной корреляции (КПК) между ежедневными уровнями воды разных рек Калининградской области r_{ij} . Для примера в табл. 2 приведены результаты расчета для двух лет средней водности, в табл. 3 — малой (2020) и большой (2017) водности.

В исследуемый период наблюдалось семь лет средней водности: 2008, 2011, 2012, 2013, 2016, 2018 и 2021. В табл. 2 и 3 номера водотока и ГП такие же, как на рис. 1, в табл. 1.

КПК рассчитывались в среде Mathcad для каждого года наблюдений гидрологического поста:

$$r_{ij,k} = \text{corr} (Q_{i,k}, Q_{j,k}), \tag{2}$$

где $r_{ij,k}$ — коэффициент корреляции между ежедневными уровнями воды i -го и j -го гидрологических постов в k -м году.

Были отобраны наименьшие и наибольшие КПК за каждый год; рассчитаны средние значения КПК в каждом створе относительно остальных створов за год (см. табл. 4) по следующей формуле:

$$\bar{r}_j = \frac{1}{11} \cdot \left(\sum_{i=1}^{12} r_{i,j} - 1 \right). \tag{3}$$

За рассматриваемый период стабильно выше среднего значения за год КПК ежедневных уровней воды наблюдались на р. Преголе, р. Инструч, р. Шешепе, ниже среднего значения за все годы — у рук. Деймы.

Также можно отметить, что средний коэффициент корреляции в маловодный 2020 г. ($r = 0,786$) ниже, чем в многоводный 2017 г. ($r = 0,824$).

Общая тенденция — значения КПК ежедневных уровней воды в разных створах в маловодные годы снижаются. Наибольшую тесноту стохастической связи в годы различной водности продемонстрировали ежедневные уровни воды р. Неман и ее рукава — р. Матросовки (во все годы $r_{1,11} > 0,94$).

Табл. 2. Коэффициенты парной корреляции ежедневных уровней воды (выше главной диагонали 2008 г., ниже — 2012 г.)

Table 2. Pair correlation coefficients of daily water levels (above the main diagonal in 2008, below in 2012)

Номер Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0,883	0,809	0,902	0,941	0,915	0,903	0,907	0,696	0,880	0,988	0,593
2	0,665	1	0,802	0,901	0,964	0,926	0,922	0,934	0,827	0,873	0,907	0,834
3	0,632	0,733	1	0,834	0,820	0,774	0,780	0,841	0,776	0,824	0,828	0,637
4	0,851	0,832	0,756	1	0,946	0,934	0,948	0,924	0,701	0,907	0,918	0,704
5	0,797	0,913	0,720	0,875	1	0,969	0,970	0,942	0,764	0,908	0,947	0,726
6	0,611	0,757	0,770	0,734	0,801	1	0,959	0,897	0,731	0,863	0,918	0,687
7	0,813	0,786	0,758	0,898	0,852	0,847	1	0,893	0,684	0,870	0,903	0,707
8	0,552	0,828	0,554	0,722	0,854	0,530	0,621	1	0,817	0,922	0,926	0,753
9	0,508	0,781	0,652	0,734	0,732	0,570	0,675	0,763	1	0,776	0,738	0,754
10	0,478	0,758	0,533	0,703	0,773	0,449	0,592	0,876	0,803	1	0,899	0,681
11	0,943	0,592	0,593	0,794	0,706	0,582	0,791	0,446	0,433	0,335	1	0,646
12	0,193	0,483	0,102	0,340	0,376	0,147	0,205	0,478	0,406	0,394	0,199	1

Табл. 3. Коэффициенты парной корреляции ежедневных уровней воды (выше главной диагонали 2020 г., ниже — 2017 г.)

Table 3. Pair correlation coefficients of daily water levels (above the main diagonal in 2020, below in 2017)

Номер Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0,821	0,766	0,747	0,807	0,809	0,617	0,894	0,890	0,847	0,972	0,602
2	0,846	1	0,849	0,861	0,869	0,784	0,739	0,904	0,847	0,848	0,872	0,846
3	0,805	0,930	1	0,849	0,887	0,836	0,728	0,857	0,792	0,858	0,754	0,560
4	0,812	0,926	0,938	1	0,920	0,765	0,764	0,892	0,714	0,809	0,747	0,584
5	0,829	0,961	0,929	0,945	1	0,877	0,876	0,931	0,797	0,838	0,816	0,626
6	0,809	0,933	0,960	0,929	0,945	1	0,814	0,836	0,793	0,786	0,782	0,536
7	0,741	0,850	0,889	0,893	0,875	0,889	1	0,737	0,631	0,635	0,630	0,529
8	0,806	0,908	0,844	0,889	0,893	0,874	0,889	1	0,868	0,899	0,892	0,653
9	0,830	0,849	0,888	0,820	0,859	0,894	0,785	0,821	1	0,893	0,900	0,642
10	0,794	0,842	0,864	0,877	0,864	0,877	0,805	0,895	0,860	1	0,835	0,580
11	0,985	0,821	0,761	0,771	0,782	0,767	0,719	0,766	0,795	0,756	1	0,708
12	0,540	0,774	0,686	0,734	0,713	0,699	0,635	0,690	0,637	0,654	0,523	1

Табл. 4. Средние, наибольшие и наименьше коэффициенты парной корреляции ежедневных уровней воды

Table 4. Average, maximum and minimum pair correlation coefficients of daily water levels

Номер Number	Река River	Год Year				
		2008	2012	2017	2020	2021
1	р. Неман Neman	0,856	0,640	0,801	0,797	0,598
2	р. Преголя (Гвардейск) Pregolya (Gvardeysk)	0,888	0,739	0,875	0,843	0,636
3	р. Лава Lava	0,793	0,619	0,863	0,794	0,512
4	р. Шешупе Sheshupe	0,874	0,749	0,866	0,786	0,641
5	р. Преголя (Черняховск) Pregolya (Chernyakhovsk)	0,902	0,764	0,876	0,843	0,666
6	р. Анграпа Angrapa	0,870	0,622	0,871	0,783	0,523
7	р. Писса Pissa	0,867	0,713	0,808	0,700	0,631
8	р. Инструч Instruch	0,887	0,657	0,837	0,851	0,671
9	р. Мамоновка Mamonovka	0,751	0,642	0,822	0,797	0,391
10	р. Злая Zlaya	0,855	0,613	0,826	0,802	0,529
11	рук. Матросовка Matrosovka	0,874	0,583	0,768	0,810	0,526
12	рук. Дейма Deyma	0,702	0,302	0,662	0,624	0,165
Среднее значение Average value		0,843	0,637	0,823	0,529	0,541
Наибольшее Maximum value		$r_{1,11} = 0,988$	$r_{1,11} = 0,943$	$r_{2,5} = 0,961$	$r_{1,11} = 0,972$	$r_{1,11} = 0,972$
Наименьшее Minimum value		$r_{1,12} = 0,593$	$r_{3,12} = 0,102$	$r_{11,12} = 0,523$	$r_{7,12} = 0,529$	$r_{6,12} = 0,077$

Наиболее отличающиеся от всех остальных ежедневные уровни воды оказались у рук. Деймы (рукав р. Преголи), в отдельные годы КПК был менее 0,1. Такое отличие ежедневных уровней воды рук. Деймы (Полесск) даже от ежедневных уровней воды основного русла р. Преголи (см. рис. 4, *b*) обусловлено скорее всего подпором со стороны Куршского залива.

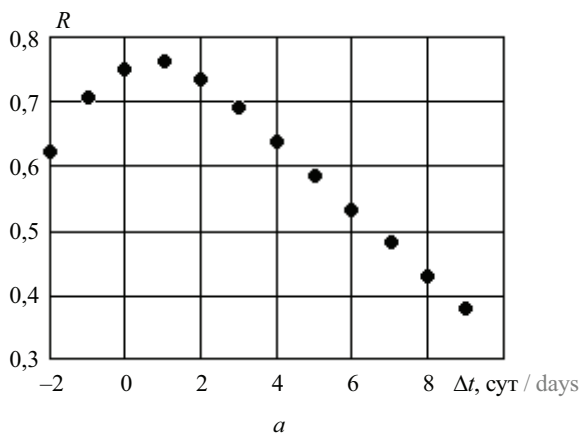
Наименьшие средние значения КПК ежедневных уровней воды ($r > 0,7$) наблюдаются у рук. Деймы (Полесск) и р. Мамоновки (Мамоново). Возможно, это связано с тем, что гидропост на р. Мамоновке расположен в 6,2 км от устья, и так же, как у рук. Деймы (Полесск), может наблюдаться подпор со стороны Калининградского (Вислинского) залива.

По наибольшему среднему значению КПК установлено, что наиболее типичные для региона ежедневные уровни воды в 2008–2021 гг. наблюдались у р. Преголи в створе г. Черняховска. Несколько меньшие средние КПК у р. Преголи (Гвардейск) и у р. Инструч (Ульяново). Именно их следует рекомендовать в качестве аналогов для водотоков Калининградской области. Аналогичный результат был получен в труде [17] при корреляционном анализе ежедневных расходов рек региона.

Известное явление максимума КПК ежедневных уровней воды в двух створах одной реки при интервале времени, за которое вода от верхнего створа приходит в нижний створ, используется для краткосрочного прогнозирования [18–20]. Обработка результатов наблюдений выполнена в среде Mathcad по методике, изложенной в работе [20].

Зависимость коэффициента корреляции уровней в двух створах от сдвига по времени Δt рассчитывалась по формуле:

$$R(\Delta t) = \frac{1}{(n-1) \cdot s_j \cdot s_k} \cdot \sum_{i=1}^n (H_j(t_i) - \overline{H_j}) \times (H_k(t_i + \Delta t) - \overline{H_k}), \quad (4)$$



где $\overline{H_j}, \overline{H_k}$ — среднее значение уровня реки за n дней в j -м и k -м створе соответственно; s_j, s_k — точечная оценка среднего квадратичного отклонения уровня реки в створе в указанных створах. Величина Δt принимала следующие целые значения (–2, –1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6, +7, +8, +9 сут).

Значения КПК, рассчитанные по формуле (4) для результатов наблюдений разных лет, показаны точками на рис. 6, 7.

По рис. 6 видно, что КПК между ежедневными уровнями воды в створах р. Анграпа (Берестово) – р. Преголя (Гвардейск) был с интервалом Δt около суток в 2012 г. и чуть больше суток в 2017 г.

Кроме расчета $R(\Delta t)$ в одной речной системе, как на рис. 6, были рассчитаны значения для разных речных систем, и также обнаружены максимумы КПК. Например, на рис. 7 видно наличие максимума функции $R(\Delta t)$ и в 2008, и в 2017 г. ($\Delta t = 2-3$ сут). Указанное явление можно использовать для краткосрочного прогнозирования, хотя его и не объяснишь приходом воды с запаздыванием в следующий створ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнен корреляционный анализ ежедневных уровней воды на реках Калининградской области по 12 гидрологическим постам за период с 2008 по 2021 г., который позволил сделать следующие выводы:

- наибольшая теснота стохастической связи ежедневных уровней воды наблюдается у р. Неман и ее рукава — р. Магросовки (во все годы $r_{1,11} > 0,94$);
- наиболее отличающиеся ежедневные уровни воды отмечались у рук. Деймы (Полесск), что может быть обусловлено подпором со стороны Куршского залива;
- наиболее типичные для Калининградской области ежедневные уровни воды в 2008–2021 гг. наблюдались у р. Преголи (Черняховск);

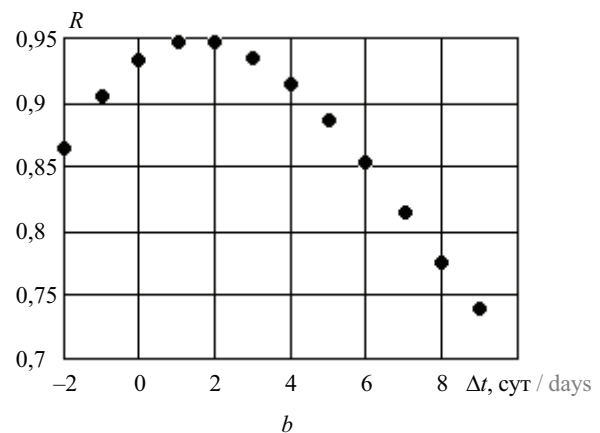


Рис. 6. Зависимость коэффициентов парной корреляции ежедневных уровней воды в двух створах от сдвига по времени: *a* — в 2012 г.; *b* — в 2017 г.

Fig. 6. Dependence of pair correlation coefficients of daily water levels in two stations on the time shift: *a* — in 2012; *b* — in 2017

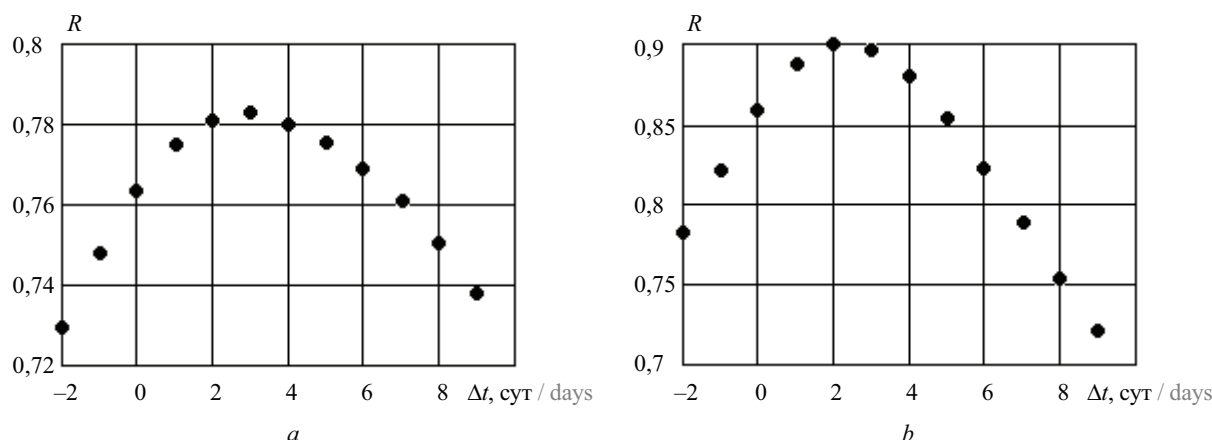


Рис. 7. Зависимость коэффициентов парной корреляции ежедневных уровней воды в двух створах Мамоновка – Преголя (Черняховск) от сдвига по времени: *a* — в 2008 г.; *b* — в 2017 г.

Fig. 7. Dependence of pair correlation coefficients of daily water levels in two stations Mamonovka – Pregolya (Chernyakhovsk) on the time shift: *a* — in 2008; *b* — in 2017

- значения коэффициентов парной корреляции ежедневных уровней воды в рассматриваемых 12 створах в маловодные годы снижаются;

- в качестве аналогов для водотоков Калининградской области следует рекомендовать р. Преголю (Гвардейск) и р. Инструч (Ульяново).

Следует обратить внимание на особенности гидрографов рек Калининградской области, а именно:

на несколько пиков весеннего половодья и частые паводки холодного времени года на всех реках региона.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования полученных результатов при выполнении инженерных изысканий для проектирования гидротехнических сооружений, разработке региональных программ по охране и восстановлению водотоков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фролова Н.Л., Нестеренко Д.П., Шенберг Н.В. Внутригодовое распределение стока рек России // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2010. № 6. С. 8–16. EDN NCSYLB.

2. Сафина Г.Р., Голосов В.Н. Влияние изменений климата на внутригодовое распределение стока малых рек южной половины европейской территории России // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2018. Т. 160. № 1. С. 111–125. EDN XUGKPI.

3. Фролова Н.Л., Павлишников Е.С., Курева М.Б. Классификация и районирование рек по водному режиму: история, методология, перспективы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 2. С. 121–134. DOI: 10.31857/S032105962102005X. EDN PSMUKH.

4. Akhmedova N., Naumov V. Study of floods on the rivers of the Kaliningrad region at the beginning of 2020 in the absence of snow cover and ice // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 463. P. 02009. DOI: 10.1051/e3sconf/202346302009

5. Indivero J., Myers-Pigg A.N., Ward N.D. Seasonal changes in the drivers of water physico-chemistry variability of a small freshwater tidal river // Frontiers in Marine Science. 2022. Vol. 8. DOI: 10.3389/fmars.2021.821316

6. Izquierdo-Ayala K., García-Aragón J.A., Castillo-Uzcanga M.M., Díaz-Delgado C., Carrillo L., Salinas-Tapia H. Flocculation patterns related to intra-annual hydrodynamics variability in the lower grjalva-usumacinta system // Water. 2023. Vol. 15. Issue 2. P. 292. DOI: 10.3390/w15020292

7. Kodirov S., Djumanov Ja. Intra-annual surface runoff distribution of The Chatkal River in different watery years // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 264. P. 01035. DOI: 10.1051/e3sconf/202126401035

8. Xia R., Sun H., Chen Y., Wang Q., Chen X., Hu Q. et al. Ecological flow response analysis to a typical strong hydrological alteration river in China // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. Vol. 20. Issue 3. P. 2609. DOI: 10.3390/ijerph20032609

9. Соколова Г.В. Статистический анализ водного режима реки Амур для целей прогноза // Региональные проблемы. 2022. Т. 25. № 1. С. 49–61. DOI: 10.31433/2618-9593-2022-25-1-49-61. EDN FAOIBK.

10. Бейсембаева М.А., Дубровская Л.И., Земцов В.А. Антропогенные изменения водных ресурсов и максимальных уровней реки Иртыш в равнинной части бассейна в Республике Казахстан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 3. С. 6–15. EDN XVVOST.

11. Мазуркин П.М. Метод поэтапного анализа динамики уровня реки // Современные наукоемкие технологии. 2010. № 7. С. 32–41. EDN MLKPXX.

12. Kędra M. Dam-induced changes in river flow dynamics revealed by RQA // The European Physical Journal Special Topics. 2023. Vol. 232. Issue 1. Pp. 209–215. DOI: 10.1140/epjs/s11734-022-00689-1

13. Giang N.N.H., Quang C.N.X., Long D.T., Ky P.D., Vu N.D., Tran D.D. Statistical and hydrological evaluations of water dynamics in the lower Sai Gon-Dong Nai River, Vietnam // Water. 2022. Vol. 14. Issue 1. P. 130. DOI: 10.3390/w14010130

14. Асатрян М.В., Валл И.В., Варламова А.Д., Жуковская Д.Д., Сивакова О.А. Анализ результатов совместных наблюдений за уровнем воды реки Преголи на разных постах в середине 20-го века // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2022. Т. 8. № 4. С. 58–67. EDN GZBFPX.

15. Кочеткова С.А. Уровни воды и уклоны реки Шешупе на четырех гидропостах // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т. 9. № 3. С. 52–59.

16. Nguyen H.Q., Tran Q.V., Ha N.Th., Nguyen T.D.H. Long-term water level dynamics in the Red

River basin in response to anthropogenic activities and climate change // Science of The Total Environment. 2024. Vol. 912. P. 168985. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168985

17. Наумов В.А. Корреляционный анализ ежедневных расходов рек региона // Вестник Научно-методического совета по природообустройству и водопользованию. 2020. № 20. С. 48–54. DOI: 10.26897/2618-8732-2020-48-54. EDN RQNAMP.

18. Зиновьев А.Т., Галахов В.П., Кошелев К.Б. О результатах прогнозирования весеннего половодья на Верхней Оби в 2015 году // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 3. С. 58–68. EDN WAWIVL.

19. Кошелева Е.Д., Кудышин А.В. Краткосрочное прогнозирование уровней воды реки Обь у города Барнаула во время половодья 2018 года // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2018. № 3 (50). С. 27–37. EDN VNOPEM.

20. Наумов В.А. Оценка скорости движения воды в реке Неман между городами Смалининкай и Советск методом корреляционного анализа // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2022. Т. 8. № 2. С. 41–49. EDN WCBUVR.

Поступила в редакцию 19 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 26 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 21 мая 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Аркадьевич Наумов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности и природообустройства, **Калининградский государственный технический университет (КГТУ)**; 236022, г. Калининград, Советский пр-т, д. 1; SPIN-код: 1788-8843, Scopus: 16441812200, ResearcherID: T-2380-2017, ORCID: 0000-0003-0560-5933; van-old@mail.ru;

Наталья Равиловна Ахмедова — кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры техносферной безопасности и природообустройства, **Калининградский государственный технический университет (КГТУ)**; 236022, г. Калининград, Советский пр-т, д. 1; SPIN-код: 5896-2408, ORCID: 0000-0003-3483-3580; isfendi@mail.ru.

Вклад авторов:

Наумов В.А. — научное руководство, концепция исследования, написание исходного текста.

Ахмедова Н.Р. — сбор материала, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Frolova N.L., Nesterenko D.P., Shenberg N.V. Intra-annual flow regime of rivers in Russia. *Lomonosov Geography Journal*. 2010; 6:8-16. EDN NCSYLB. (rus.).

2. Safina G.R., Golosov V.N. The effect of climate change on the annual flow distribution of small rivers in the southern half of the European territory of Russia. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*. 2018; 160(1):111-125. EDN XUGKPI. (rus.).

3. Frolova N.L., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B. Classification and zoning of rivers by their water regime: history, methodology, and perspectives. *Water Resour-*

es. 2021; 48(2):121-134. DOI: 10.31857/S032105962-102005X. EDN PSMUKH. (rus.).

4. Akhmedova N., Naumov V. Study of floods on the rivers of the Kaliningrad region at the beginning of 2020 in the absence of snow cover and ice. *E3S Web of Conferences*. 2023; 463:02009. DOI: 10.1051/e3s-conf/202346302009

5. Indivero J., Myers-Pigg A.N., Ward N.D. Seasonal changes in the drivers of water physico-chemistry variability of a small freshwater tidal river. *Frontiers in Marine Science*. 2022; 8. DOI: 10.3389/fmars.2021.821316

6. Izquierdo-Ayala K., García-Aragón J.A., Castillo-Uzcanga M.M., Díaz-Delgado C., Carrillo L., Salinas-Tapia H. Flocculation patterns related to intra-annual hydrodynamics variability in the lower Grijalva-Usumacinta system. *Water*. 2023; 15(2):292. DOI: 10.3390/w15020292
7. Kodirov S., Djumanov Ja. Intra-annual surface runoff distribution of the Chatkal River in different water years. *E3S Web of Conferences*. 2021; 264:01035. DOI: 10.1051/e3sconf/202126401035
8. Xia R., Sun H., Chen Y., Wang Q., Chen X., Hu Q. et al. Ecological flow response analysis to a typical strong hydrological alteration river in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023; 20(3):2609. DOI: 10.3390/ijerph20032609
9. Sokolova G.V. Statistical analysis of the Amur river water regime forecast. *Regional Problems*. 2022; 25(1):49-61. DOI: 10.31433/2618-9593-2022-25-1-49-61. EDN FAOIBK. (rus.).
10. Beysembaeva M.A., Dubrovskaya L.I., Zemtsov V.A. Anthropogenic transformations of water resources and maximum water levels of the Irtysh river in the lowland part of the basin in the republic of Kazakhstan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018; 329(3):6-15. EDN XVVOST. (rus.).
11. Mazurkin P.M. Method of step-by-step analysis of river level dynamics. *Modern Science-Intensive Technologies*. 2010; 7:32-41. EDN MLKPXX. (rus.).
12. Kędra M. Dam-induced changes in river flow dynamics revealed by RQA. *The European Physical Journal Special Topics*. 2023; 232(1):209-215. DOI: 10.1140/epjs/s11734-022-00689-1
13. Giang N.N.H., Quang C.N.X., Long D.T., Ky P.D., Vu N.D., Tran D.D. Statistical and hydrological evaluations of water dynamics in the lower Sai Gon-Dong Nai River, Vietnam. *Water*. 2022; 14(1):130. DOI: 10.3390/w14010130
14. Asatrian M.V., Vall I.V., Varlamova A.D., Zhukovskaia D.D., Sivakova O.A. Analysis of the results of the Pregel river joint water level observations at different posts in the middle of the 20th century. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2022; 8(4):58-67. EDN GZBFPX. (rus.).
15. Kochetkova S.A. Water levels and slopes of the Sheshupe river at four hydroposts. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2023; 9(3):52-59. (rus.).
16. Nguyen H.Q., Tran Q.V., Ha N.Th., Nguyen T.D.H. Long-term water level dynamics in the Red River basin in response to anthropogenic activities and climate change. *Science of The Total Environment*. 2024; 912:168985. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168985
17. Naumov V.A. Correlation analysis of daily river flows in the region. *Bulletin of the Scientific and Methodological Council for Environmental Engineering and Water Use*. 2020; 20:48-54. DOI: 10.26897/2618-8732-2020-48-54. EDN RQNAMP. (rus.).
18. Zinovyev A.T., Galakhov V.P., Koshelev K.B. On results of forecasting of spring high-water at the Verkhnyaya Ob river in 2015. *Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 2016; 3:58-68. EDN WAWIVL. (rus.).
19. Kosheleva E.D., Kudishin A.V. Short-term forecast of Ob river water level near Barnaul city during flood 2018. *Bulletin of the Altay Branch of the Russian Geographical Society*. 2018; 3(50):27-37. EDN VNOPEM. (rus.).
20. Naumov V.A. Estimation of the water movement speed in the Neman river between the cities of Smalininkai and Sovetsk by the method of correlation analysis. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2022; 8(2):41-49. EDN WCBUVR. (rus.).

Received March 19, 2024.

Adopted in revised form on March 26, 2024.

Approved for publication on May 21, 2024.

BIODOTES: **Vladimir A. Naumov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technosphere Safety and Environmental Management; **Kaliningrad State Technical University (KSTU)**; 1 Sovetsky prospekt, Kaliningrad, 236022, Russian Federation; SPIN-code: 1788-8843, Scopus: 16441812200, ResearcherID: T-2380-2017, ORCID: 0000-0003-0560-5933; van-old@mail.ru;

Natal'ya R. Ahmedova — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety and Environmental Management; **Kaliningrad State Technical University (KSTU)**; 1 Sovetsky prospekt, Kaliningrad, 236022, Russian Federation; SPIN-code: 5896-2408, ORCID: 0000-0003-3483-3580; isfendi@mail.ru.

Contribution of the authors:

Vladimir A. Naumov — scientific guidance, research concept, writing the source text.

Natal'ya R. Ahmedova — collection of material, revision of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.