

Оригинальная статья

УДК 502/504:556.16

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-95-100

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА БАСЕЙНА ТРАНСГРАНИЧНОЙ РЕКИ АНГРАПЫ

НАУМОВ ВЛАДИМИР АРКАДЬЕВИЧ, д-р техн. наук, профессор

van-old@mail.ru

НЕЛЮБИНА ЕЛЕНА АНДРЕЕВНА ✉, канд. техн. наук, доцент

e.nelubina@gmail.com

Калининградский государственный технический университет; 236022, г. Калининград, Советский пр., 1, Россия

Цель исследований – оценка межгодовой изменчивости элементов водного баланса рек Калининградской области за период 1953-2020 гг. на примере реки Анграпы. Средняя годовая температура воздуха и сумма осадков были определены методом средневзвешенного по семи метеостанциям на территории бассейна. В качестве базовой была принята метеостанция Озерск (из российских пунктов) с наибольшим коэффициентом корреляции ($r = 0,983$). Данные о средних годовых расходах воды были взяты по гидропосту реки Анграпы в деревне Берестово. Отсутствующие значения расхода восстановлены по рекам-аналогам. По линейному тренду отмечается снижение среднегодового стока на 20 мм за 120 лет. За рассматриваемый период (1953-2020 гг.) линейный тренд годовых сумм осадков показал рост на 21 мм, слой годового испарения увеличился на 82 мм. Величины годового слоя стока, слоя суммарного испарения и влагозапасы в бассейне синхронно следуют за изменением слоя осадков как во влажные, так и в засушливые периоды. Расчеты водного баланса бассейна за последние 10 лет показали уменьшение среднегодовых расходов на фоне увеличения осадков и суммарного испарения.

Ключевые слова: река Анграпа, элементы водного баланса, речной сток, атмосферные осадки, бассейновые влагозапасы, суммарное испарение

Формат цитирования: Наумов В.А., Нелюбина Е.А. Межгодовая изменчивость элементов водного баланса бассейна трансграничной реки Анграпы // Природообустройство. – 2022. – № 3. – С. 95-100. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-95-100.

© Наумов В.А., Нелюбина Е.А., 2022

Original article

INTERANNUAL VARIABILITY OF ELEMENTS OF THE WATER BALANCE OF THE BASIN OF THE TRANSBOUNDARY RIVER ANGRAPA

NAUMOV VLADIMIR ARKADYEVICH, Doctor of Technical Sciences, Professor

van-old@mail.ru

NELYUBINA ELENA ANDREEVNA ✉, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

e.nelubina@gmail.com

Kaliningrad State Technical University; 236022, Kaliningrad, Sovetsky ave., 1. Russia

The purpose of this article is to assess the interannual variability of the elements of the water balance of the rivers of the Kaliningrad region for the period 1953-2020 using the example of the Angrapa River. The average annual air temperature and precipitation were determined by the weighted average method for 7 weather stations in the basin. The Ozersk weather station (from Russian points) with the highest correlation coefficient ($r = 0,983$) was taken as the base station. Data on average annual water consumption were taken from the Angrapa River hydropost in the village of Berestovo. The missing flow values have been restored by analogous rivers. According to the linear trend, there is a decrease in the average annual runoff, by 20 mm over 120 years. For the period under review (1953-2020.), the linear trend of annual

precipitation showed an increase of 21 mm, the annual evaporation layer increased by 82 mm. The values of the annual runoff layer, the total evaporation layer and the moisture reserves in the basin synchronously follow the change in the precipitation layer, both in wet and dry periods. Calculations of the basin's water balance over the past 10 years have shown a tendency to decrease average annual expenditures against the background of increased precipitation and total evaporation.

Keywords: the Angrapa River, water balance elements, river runoff, atmospheric precipitation, basin moisture reserves, total evaporation

Format of citation: Naumov V.A., Nelyubina E.A. Interannual variability of elements of the water balance of the basin of the transboundary river Angrapa // Prirodoobustroystvo. – 2022. – № 3. – P. 95-100. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-95-100.

Введение. Оценка межгодовой изменчивости элементов водного баланса рек является весьма важной для решения различных задач природообустройства, поэтому в научных публикациях этой проблеме уделяется большое внимание [1-3]. Формирование стока рек Калининградской области наряду с закономерностями, присущими водотокам Северо-Западного федерального округа России, имеет свои особенности. Среди них – высокая густота речной сети, самый большой в России процент мелиорированных (осушаемых) земель, спрямленная и канализованная часть водоприемников.

Значительная часть водосборного бассейна находится за границей России. Так, у притока Преголи – реки Лавы – 80,8% площади бассейна находится на территории Польши, а у другого притока – реки Анграпы – 54,5%. Проведенные в последние годы исследования опирались лишь на региональные климатические характеристики, чаще всего по метеостанции Калининград [4], что может привести к заметной погрешности расчетов.

В схеме комплексного использования и охраны водных объектов (СКИВО) [5], с опорой на данные наблюдений до 2009 г. и результаты моделирования, утверждается, что водность калининградских рек в ближайшие 10-20 лет возрастет от 9 до 12%. Наблюдения последних 10 лет позволяют оценить справедливость данного прогноза.

Цель исследований: оценка на примере реки Анграпы межгодовой изменчивости элементов водного баланса рек Калининградской области.

Река Анграпа относится к бассейну Балтийского моря. Исток реки – озеро Мамры в Польше, вблизи г. Венгожево. На территории Польши река носит название Венгорапа (Węgora). У города Черняховска Калининградской области Анграпа сливается с рекой Инструч, образуя реку Преголю. Длина реки Анграпы составляет 169 км, площадь водосборного бассейна – 3960 км², в том числе на территории

Польши – 2160 км² [5]. Карта бассейна реки Анграпы представлена на рисунке 1.

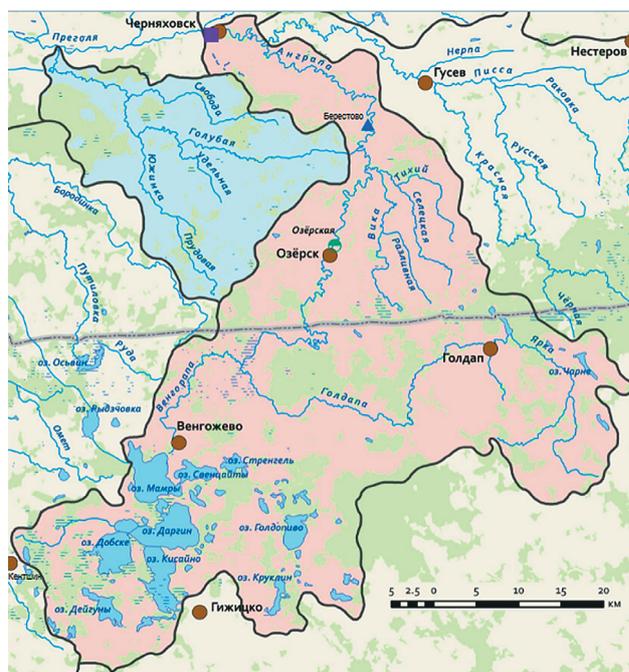


Рис. 1. Карта бассейна реки Анграпы [6]

Fig. 1. Map of the Angrapa River Basin [6]

Материалы и методы исследований. Долина реки Анграпы пойменная. Речная долина сформирована плоской и гривистой поймой с песчано-гравийными и заторфованными под ивнякаами, черноольшанниками лугами на перегнойно-глеевых, иловато-глеевых и торфяноглеевых почвах. Особенностью водосбора является наличие большого количества озер в его южной части (на территории Польши).

Гидропост на реке Анграпе был открыт в 1894 г. в деревне Берестово (тогда этот населенный пункт назывался Шлапшакен) и действует по настоящее время. Площадь бассейна реки до указанного поста составляет 2460 км², расстояние до устья – 30 км.

Средние годовые расходы воды с 1901 по 1985 гг. приведены в Гидрологических ежегодниках. Данные 1986-2009 гг. отражены

в источнике [5], за последние годы – в источнике [7]. Имеются пропуски за некоторые военные и послевоенные годы: 1914-1917 гг., 1940 г., 1944-1952 гг. За указанные годы используются значения расхода, восстановленные в источнике [4] по рекам-аналогам. На рисунке 2 представлены значения слоя стока, рассчитанные по средним годовым расходам.

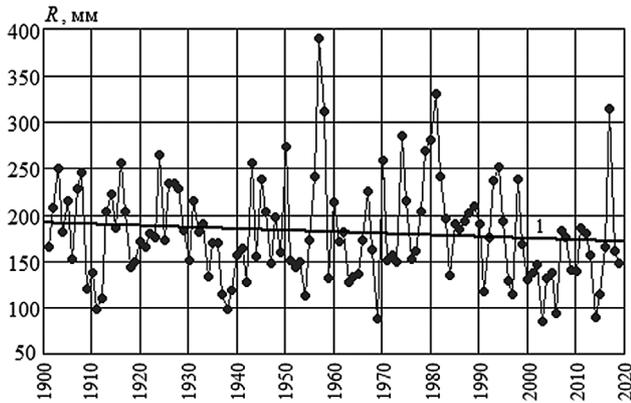


Рис. 2. Динамика годового слоя стока реки Анграпы (Берестово):

точки – данные наблюдений; 1 – линейный тренд

Fig. 2. Dynamics of the annual runoff layer of the Angrapa River (Berestovo):

points – observational data, 1 – linear trend

Отмечается небольшое снижение годового стока: по линейному тренду – всего на 20 мм за 120 лет, или на 0,17 мм/год. Проверка по критериям Стюдента и Фишера при уровне значимости 2,5% не противоречит гипотезе однородности по времени (стационарности), хотя дисперсия заметно увеличивается после 1956 г.

Для оценки элементов водного баланса необходимы данные наблюдений за температурой и суммы осадков в бассейне реки. Средневзвешенные значения указанных величин будем искать известным методом [8], для чего

необходимы данные наблюдений в пунктах на территории бассейна. По российским пунктам метеонаблюдений (Черняховск, Гусев, Озерск) среднегодовые температуры и суммы осадков за 1953-1965 гг. были взяты из справочника [9]. С 1966 г. по настоящее время данные наблюдений на калининградских метеостанциях были получены из Специализированных массивов данных для климатических исследований [10]. Данные наблюдений за температурой и суммы годовых осадков в пунктах на территории Польши (рис. 1) имеются в открытом доступе на интернет-ресурсе [11] – с 1979 г. по настоящее время.

Используем четырехчленное уравнение водного баланса речного бассейна в i -том году [1, 2], мм:

$$P_i + \Delta V_i = R_i + E_i, \quad (1)$$

где P – сумма атмосферных осадков за год; R – слой годового речного стока; E – суммарное испарение за год; ΔV_i – изменение бассейновых влагозапасов (положительное или отрицательное).

Суммарное испарение за год [1] оцениваем по формуле:

$$E = E_0 \cdot \text{th}(P/E_0), \quad (2)$$

где E_0 – испаряемость (максимально возможное испарение), рассчитываемая по среднегодовой температуре воздуха T :

$$E_0 = f_0(T; a_0, a_1, a_2) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2. \quad (3)$$

В источнике [1] приведены такие значения коэффициентов: $a_0 = 329$; $a_1 = 62$; $a_2 = 2,14$.

Результаты и их обсуждение. Найденные значения весовых коэффициентов s_j для семи пунктов наблюдения (три в России и четыре в Польше) представлены в таблице, где также приведены средние многолетние (1979-2021 гг.) значения суммы осадков P_s и температур T_s .

Таблица

Результаты расчета по пунктам метеонаблюдений

Table

Results of calculation by points of meteorological observations

j	Пункт / Point	s_j	P_s , мм	T_s , °C	r_{Pj}
1	Черняховск / Chernyakhovsk	0,041	768,3	7,90	0,889
2	Озерск / Ozersk	0,187	760,1	7,63	0,983
3	Гусев / Gusev	0,056	746,1	7,55	0,976
4	Голдап / Goldap	0,233	773,9	7,27	0,989
5	Венгожево / Vengozhevo	0,190	742,0	7,70	0,996
6	Гижицко / Gizhitsko	0,236	720,3	7,72	0,985
7	Кентшин / Kentshin	0,057	726,2	7,73	0,980

Были рассчитаны средневзвешенные значения по бассейну сумм годовых осадков и среднегодовых температур:

$$P_i = \sum_{j=1}^7 s_j \cdot P_{i,j}; \quad T_i = \sum_{j=1}^7 s_j \cdot T_{i,j}, \quad (4)$$

где $P_{i,j}$, $T_{i,j}$ – соответственно сумма осадков и температура i -го года в j -том пункте.

Оценим тесноту стохастической связи рассчитанных рядов с рядами в отдельных пунктах с помощью коэффициентов парной корреляции:

$$r_{Pj} = \text{corr}(P_{i,j}, P_i); \quad r_{Tj} = \text{corr}(T_{i,j}, T_i).$$

Значения r_{Pj} занесены в таблицу, из которой следует, что ближе всего к средневзвешенным по бассейну осадкам находится ряд наблюдений в г. Венгожево ($r_{P5} = 0,996$). Однако длинные ряды наблюдений имеются в российских пунктах. Из российских пунктов наибольший коэффициент корреляции – в г. Озерске ($r_{P2} = 0,983$). Этот ряд ($j = 2$) и был принят в качестве базового. Члены ряда средневзвешенных осадков в бассейне Анграпы с 1953 по 1978 гг. были восстановлены по уравнению линейной регрессии:

$$P_i = \varphi(P_{i,2}) = 15,66 + 0,946 \cdot P_{i,2}.$$

Все значения коэффициентов корреляции температурных рядов $r_{Tj} > 0,99$. Поэтому в качестве базового ряда среднегодовых температур можно использовать любой из них. При выборе значения Озерска уравнение линейной регрессии представлено как

$$T_i = \psi(T_{i,2}) = -0,05 + 1,00 \cdot T_{i,2}.$$

В формуле (3) в первом приближении величину коэффициентов a_1 и a_2 оставим такой же, как в источнике [1]. Значение a_0 определим следующим образом. Просуммируем уравнение (3) за $n = 68$ лет (1953-2020 гг.). Сумма изменений бассейновых влагозапасов за многолетний период – $\Sigma \Delta V_i \approx 0$. В полученное уравнение вставим формулы (2), (3):

$$\sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n R_i + \sum_{i=1}^n \left[f_0(T_i, a_0) \cdot \text{th} \left(\frac{P_i}{f_0(T_i, a_0)} \right) \right]. \quad (5)$$

Уравнение (5) было решено численным методом, найденное значение $a_0 = 199$ мм. Теперь можно рассчитать ежегодное испарение по формулам (2), (3) и оценку изменения влагозапасов:

$$\Delta V_i = R_i + E_i - P_i.$$

Динамика средних годовых сумм осадков, слоя испарения и изменения влагозапасов

в бассейне реки Анграпы представлена на рисунке 3.

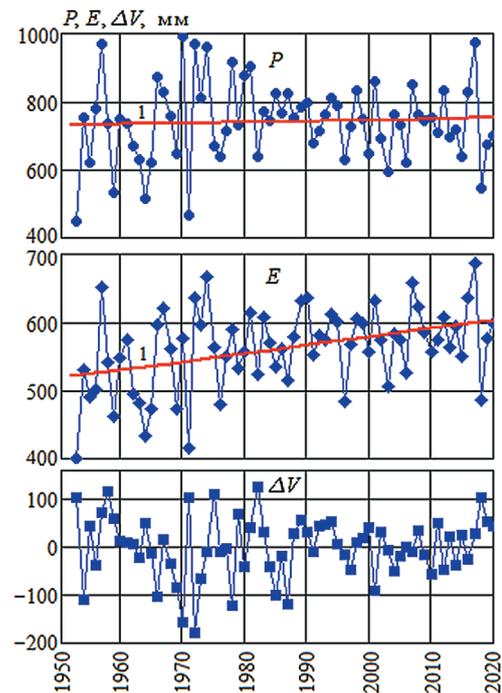


Рис. 3. Динамика годовых сумм осадков, слоя испарения и изменения влагозапасов в бассейне реки Анграпы:

1 – линейный тренд

Fig. 3. Dynamics of annual sums of precipitation, evaporation layer and changes of moisture reserves in the basin of the Angrapa River:

1 – linear trend

Из представленных данных следует, что за рассматриваемый период (1953-2020 гг.) линейный тренд годовых сумм осадков показал рост на 21 мм, слой годового испарения увеличился на 82 мм.

Следует иметь в виду, что на величину влагозапасов и испарение могут влиять большое количество озер и (или) хозяйственная деятельность в бассейне.

В данный метод расчета может внести погрешность допущение того, что в конце рассматриваемого периода сумма изменений влагозапасов равна нулю ($\Sigma \Delta V = 0$). Была рассмотрена динамика суммы изменений влагозапасов $\Sigma \Delta V_i$. В период (1953-2020 гг.) текущая сумма $\Sigma \Delta V_i$ в отдельные годы могла достигать ± 300 мм, если в течение нескольких лет подряд запасы увеличивались или уменьшались. Был произведен расчет в предположении того, что в конце периода сумма изменений влагозапасов принимала одно из указанных предельных значений. При $\Sigma \Delta V = -300$ мм из уравнения (5) следует, что $a_0 = 186,6$ мм, при $\Sigma \Delta V = +300$ мм, $a_0 = 212,8$ мм. Перерасчет элементов водного

баланса показал, что указанное изменение параметра a_0 вносит погрешность менее 1%.

На рисунке 4 представлены нормированные интегрально-разностные кривые составляющих водного баланса:

$$IR = \Sigma(R_i - R_s) / \sigma_R; \quad IP = \Sigma(P_i - P_s) / \sigma_P;$$

$$IE = \Sigma(E_i - E_s) / \sigma_E; \quad IV = \Sigma \Delta V_i / \sigma_V,$$

где точечные оценки средних квадратичных отклонений составляют:

$$\sigma_R = 60,9 \text{ мм}; \quad \sigma_P = 117,2 \text{ мм};$$

$$\sigma_E = 59,9 \text{ мм}; \quad \sigma_V = 64,1 \text{ мм}.$$

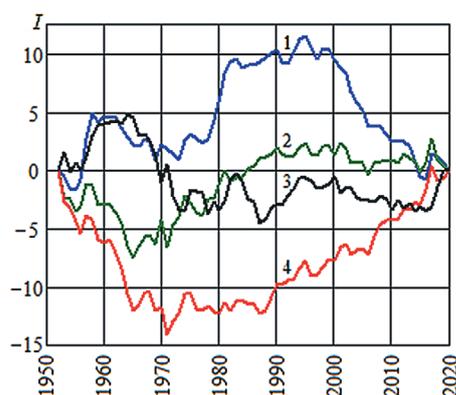


Рис. 4. Интегрально-разностные кривые в бассейне реки Анграпы (1953-2020 гг.):

- 1 – слой стока; 2 – сумма осадков;
3 – изменение влагозапасов; 4 – слой испарения
- Fig. 4. Integral-difference curves in the basin of the Angrapa River (1953-2020):
- 1 – runoff layer; 2 – the sum of precipitation;
3 – change of moisture reserves; 4 – evaporation layer

По данным рисунка 4 видим, что величины годового слоя стока, слоя суммарного испарения и влагозапасы в бассейне синхронно следуют за изменением слоя осадков как во влажные (1956-1971 гг.), так и в засушливые периоды (1972-1995 гг.).

В отношении испарения такую тенденцию можно объяснить отчасти слабой фильтрующей способностью почвогрунтов бассейна и глубоким расположением грунтовых вод. Испарение в большей степени зависит от количества осадков, чем от температуры воздуха.

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

Библиографический список

1. Исмаилов Г.Х., Федоров В.М. Оценка возможных изменений элементов годового водного баланса бассейна Волги // Природообустройство. – 2010. – № 5. – С. 58-64.

Начиная с 1996 г. и до 2010 г. на величине суммарного испарения сказались повышение температуры воздуха. Снижение годового слоя осадков и увеличение слоя испарения отразились на величине годового стока: наметилась тенденция его снижения.

Расчеты водного баланса бассейна за последние 10 лет выявили снижение среднегодовых расходов на фоне увеличения осадков и суммарного испарения.

Выводы

По линейному тренду отмечается небольшое снижение среднегодового стока: всего на 20 мм за 120 лет, или на 0,17 мм/г.

Динамика составляющих водного баланса показала, что величины годового слоя стока, слоя суммарного испарения и влагозапасы в бассейне синхронно следуют за изменением слоя осадков как во влажные (1956-1971 гг.), так и в засушливые периоды (1972-1995 гг.).

В отношении испарения это можно объяснить отчасти слабой фильтрующей способностью почвогрунтов бассейна и глубоким расположением грунтовых вод. Испарение в большей степени зависит от поступления осадков, чем от температуры воздуха.

Начиная с 1996 г. и до 2010 г. на величине суммарного испарения влияло повышение температуры воздуха. Снижение годового слоя осадков и увеличение слоя испарения сказались на величине годового стока: наметилась тенденция его снижения.

Расчеты водного баланса бассейна за последние 10 лет показали уменьшение среднегодовых расходов на фоне увеличения осадков и суммарного испарения.

На основании исследования можно сделать прогноз изменения ЭВБ в ближайшей перспективе: при сохранении существующей тенденции изменения климата среднегодовые расходы рек Калининградской области в будущем уменьшаться.

Результаты исследований предполагается использовать в рекомендациях для специалистов при составлении прогнозов развития водохозяйственного комплекса Калининградской области.

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and the Government of the Kaliningrad Region within the framework of the scientific project No. 22-27-20016.

References

1. Ismaiyllov G.Kh., Fedorov V.M. Otsenka vozmozhnykh izmenenij elementov godovogo vodnogo balansa reki Volgi // Prirodobustrojstvo. – 2010. – № 5. – S. 58-64.

2. Исмайллов Г.Х., Муращенко Н.В. Межгодовая изменчивость элементов водного баланса реки Дон // Природообустройство. – 2012. – № 1. – С. 52-56.

3. Исмайллов Г.Х., Муращенко Н.В., Исмайллова И.Г. Методика оценки сложноформируемых элементов водного баланса (суммарного испарения и влагозапасов) речного бассейна // Природообустройство. – 2020. – № 5. – С. 88-95.

4. Наумов В.А., Ахмедова Н.Р. Инженерные изыскания в бассейне реки Преголи: Монография. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2017. – 183 с.

5. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Неман и рек бассейна Балтийского моря (российская часть в Калининградской области), утв. приказом Невско-Ладозского БВУ Федерального агентства водных ресурсов от 9 декабря 2014 г. № 171. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.nord-west-water.ru/activities/ndv/page-2/> (дата обращения: 08.03.2022).

6. Domnin D., Chubarenko B., Lewandowski A. Vistula Lagoon Catchment: Atlas of water use. – Moscow: Exlibris Press, 2015. – 106 p.

7. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 08.03.2022).

8. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока: учебник / Под ред. Г.В. Железнякова. – М.: Колос, 1984. – 205 с.

9. Климатологический справочник СССР. – Вып. 6. Литовская ССР и Калининградская область РСФСР. Метеорологические данные за отдельные годы. Ч. 2. Атмосферные осадки. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 168 с.

10. ФГБУ ВНИИ гидрометеорологической информации. Специализированные массивы данных для климатических исследований. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 01.01.2022).

11. Meteoblue. Zmiana klimatu. – [Electronic resource]. – Access mode. – URL: https://www.meteoblue.com/pl/climate-change/węgorzewo_polska_756048 (accessed: 01.01.2022).

Критерии авторства

Наумов В.А., Нелюбина Е.А. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 14.05.2022

Одобрена после рецензирования 15.06.2022

Принята к публикации 24.06.2022

2. Ismaiyllov G.Kh., Murashenko N.V. Mezhdogovaya izmenchivost elementov vodnogo balansa reki Don // Prirodoobustrojstvo. – 2012. – № 1. – S. 52-56.

3. Ismaiyllov G.Kh., Murashenko N.V., Ismaiyllova I.G. Metodika otsenki slozhnoformiruemykh elementov vodnogo balansa (summarnogo isparenija i vlagozapaso) rechnogo bassejna // Prirodoobustrojstvo. – 2020. – № 5. – S. 88-95.

4. Naumov V.A., Akhmedov N.R. Inzhenernye izyskaniya v bassejne reki Pregoli: monografiya. – Kaliningrad: Izd-vo FGBOU VO «KGTU», 2017. – 183 s.

5. Skhema kompleksnogo ispolzovaniya i ohrany vodnykh objektov bassejna reki Neman i rek bassejna Baltijskogo morya (Rossijskaya chast v Kaliningradskoj oblasti). Utverzhdena prikazom Nevsko-Ladozhskogo BVU Federalnogo agentstva vodnykh resursov № 171 ot 09.12.2014 [Elektronny resurs]. URL: <http://www.nord-west-water.ru/activities/ndv/page-2/> (data obrashcheniya: 08.03.2022).

6. Domnin D., Chubarenko B., Lewandowski A. Vistula Lagoon Catchment: Atlas of water use. – Moscow: Exlibris Press, 2015. – 106 p.

7. Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoring vodnykh objektov [Elektronny resurs]. – Rezhim dostupa – po parolyu: <https://gmvo.skniivh.ru/> (data obrashcheniya: 08.03.2022).

8. Gidrologiya, gidrometriya i regulirovanie stoka: uchebnik. / Pod red. G.V. Zheleznyakova. – M.: Kolos, 1984. – 205 s.

9. Klimatologicheskij spravochnik SSSR. Vyp. 6. Litovskaya SSR i Kaliningradskaya oblast RSFSR. Meteorologicheskie dannye za otdelnye gody. Ch. 2. Atmosfernye osadki. – L.: Gidrometeoizdat, 1969. – 168 s.

10. FGBU VNIИ gidrometeorologicheskij informatsii. Spetsializirovannye massivy dannyh dlya klimaticheskikh issledovaniy [Elektronny resurs]. – Rezhim dostupa – po parolyu: <http://meteo.ru/data> (data obrashcheniya: 01.01.2022).

11. Meteoblue. Zmiana klimatu [Electronic resource]. – Access mode – free: https://www.meteoblue.com/pl/climate-change/węgorzewo_polska_756048 (accessed: 01.01.2022).

Criteria of Authorship

Naumov V.A., Nelyubina E.A. carried out theoretical and practical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Naumov V.A., Nelyubina E. A have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 14.05.2022

Approved after reviewing 15.06.2022

Accepted for publication 24.06.2022