

УДК 556.53

**ОЦЕНКА СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ В РЕКЕ НЕМАН МЕЖДУ ГОРОДАМИ
СМАЛИНИНКАЙ И СОВЕТСК МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА**

В.А. Наумов

**ESTIMATION OF THE WATER MOVEMENT SPEED IN THE NEMAN RIVER
BETWEEN THE CITIES OF SMALININKAI AND SOVETSK BY THE METHOD OF
CORRELATION ANALYSIS**

V.A. Naumov

Аннотация. Ранее автором был разработан метод расчета времени добегания по данным наблюдений на двух гидрологических постах с помощью корреляционного анализа. В данной статье предложена модификация указанного метода, предназначенная для оценки средней скорости движения воды в реке. Метод был протестирован по данным наблюдений за уровнями воды в реке Неман в городах Смалининкай (Литва) и Советск (Россия, Калининградская область). В исследованные годы наибольшая скорость 0,835 м/с была в 2014 году, наименьшая 0,655 м/с – в 1960 году. Коэффициент корреляции между уровнями воды в указанных створах оказался весьма высоким и медленно спадал с ростом сдвига по времени. Исключение составили результаты обработки данных наблюдений за 2014 год. Скорее всего, это связано с ошибками измерений, не прошедших контрольную обработку.

Ключевые слова: река Неман; Советск; Смалининкай; ежедневные уровни воды; наблюдения; скорость; коэффициент корреляции; поиск максимума.

Abstract. The method of calculating the running time based on observations at two hydrological posts using correlation analysis was previously developed by the author. In this article, the modification of this method is proposed in this article, designed to estimate the average speed of water movement in the river. The method was tested based on observations of water levels in the Neman River in the cities of Smalininkai (Lithuania) and Sovetsk (Russia, Kaliningrad region). In the years studied, the highest speed of 0.835 m/s was in 2014, the lowest 0.655 m/s was in 1960. The correlation coefficient between the water levels in the indicated openings turned out to be very high and slowly decreased with the increase in the time shift. The exception was the results of processing observation data for 2014. Most likely, this is due to measurement errors that have not passed the control processing.

Keywords: Neman River; Sovetsk; Smalininkai; daily water levels; observations; speed; correlation coefficient; maximum search.

Введение

Краткосрочные прогнозы по соответствующим уровням (или расходам) воды широко применяются в инженерной гидрологии. Важную роль в них играет время добегания τ . Первоначально для определения времени добегания использовались графические методы, отличающиеся очень низкой точностью. Применение статистических методов и компьютерных технологий позволили повысить точность и надежность определения τ . Так в [1-3] для обнаружения сдвига в рядах данных, соответствующего максимальному значению коэффициента корреляции осуществлялся последовательный сдвиг значений одного ряда относительно другого на шаг, равный суткам. В [4] был предложен усовершенствованный метода корреляционного анализа для более точного расчета времени добегания. Для многих гидрологических расчетов важным параметром является средняя скорость движения воды. Зная время добегания, можно оценить среднюю скорость движения воды на участке между створами.

Цель данной статьи – используя ранее разработанный метод корреляционного анализа, оценить скорость движения воды в нижнем течении реки Неман между городами Смалининкай и Советск (рис. 1), в которых действуют гидрологические посты.

Река Неман имеет длину 937 км, площадь водосборного бассейна – 98200 км². Река протекает по территории Белоруссии и Литвы. Она является пограничной рекой между Литвой и Россией (Калининградская область). Соответственно, указанные гидрологические посты в настоящее время находятся в разных странах.



Рисунок 1 – Расположение действующих гидрологических постов в нижнем течении реки Неман: 1 – город Смалининкай (Литва), 2 – город Советск. За основу взята карта из [5]

Исходные данные

В качестве исходных использовались данные наблюдений за уровнем реки Неман на двух гидрологических постах в городах Смалининкай и Советск, показанных на рис. 1. Оба поста были открыты в 1811 году. Как следует из табл. 1, расстояние между ними по реке $L = 53$ км.

Таблица 1 – Гидрологические посты в нижнем течении реки Неман [6]

Расположение (город)	Страна	Расстояние (км) от		Площадь водосбора, км ²	Отметка нуля поста, м БС	Год (открыт)
		устья	истока			
Смалининкай	Литва	825	112	81200	7,21	1811
Советск	Россия	878	59	91800	1,90	1811

До 1985 года данные об уровнях воды реки Неман на указанных постах содержатся в гидрологических ежегодниках [7-9]. Часть из них показана на рис. 2. В Автоматизированной информационной системе государственного мониторинга водных объектов [10] приведены уровни воды в реке Неман, с 2009 года, но только в городе Советске. Информация по уровням воды у города Смалининкай отсутствует. Такая информация содержится на другом Интернет-ресурсе Росгидромета: ГИС-портал Центра регистра и кадастра [5]. Информация

на указанном ресурсе накапливается с 2001 года по настоящее время. Но данные наблюдений у города Смалининкай только по 2014 год, причем эти данные весьма неполные: за первые 3-4 месяца, и последние два месяца каждого года. На рис. 3 – за 88 суток с начала года. Есть еще один существенный недостаток [5]: «Используются оперативные данные Росгидромета, не прошедшие контрольную обработку. Могут содержаться ошибки».

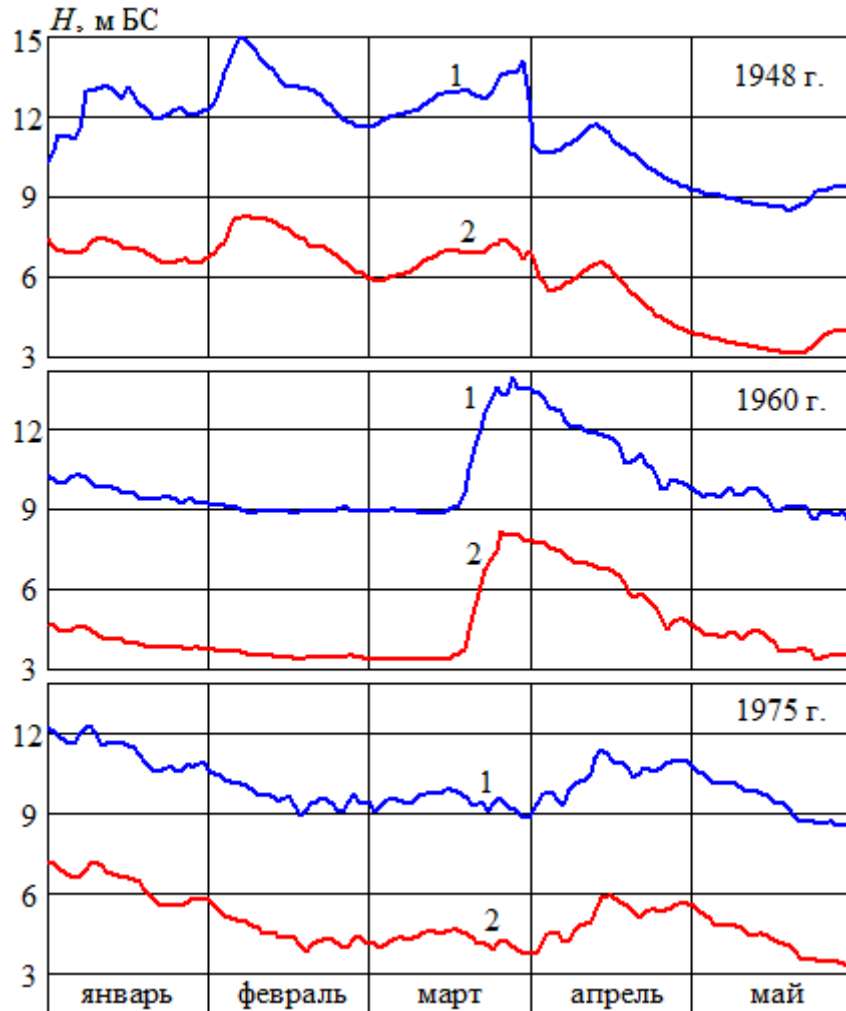


Рисунок 2 – Уровни реки Неман в первые 5 месяцев года [7-9]:
1 – город Смалининкай, 2 – город Советск

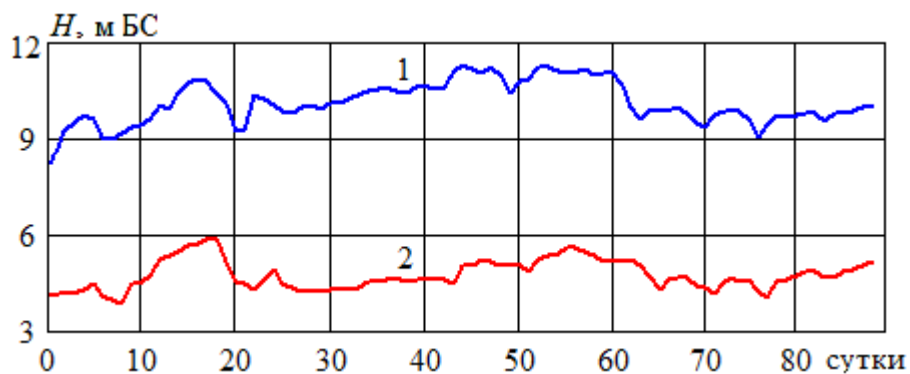


Рисунок 3 – Уровни реки Неман в начале 2014 года [5]. Обозначения, как на рис. 2

Из отобранных наблюдений самые высокие уровни были отмечены в 1948 году, самые низкие – в 2014 году.

Метод расчета

В гидрологических ежегодниках [7-9] опубликованы массивы уровней реки Неман у городов Смалининкай H_{Sm-y} и Советск H_{Sov-y} отсчитываемых в сантиметрах от условного нуля поста (см. табл. 1). Переведем их в метры Балтийской системы (м БС):

$$H_{Sm} = 0,01 \cdot H_{Sm-y} + 7,21; H_{Sov} = 0,01 \cdot H_{Sov-y} + 1,90. \quad (1)$$

На рис. 2 приведены уровни, рассчитанные по формулам (1). На ресурсе [6] приводятся уровни воды, переведенные в м БС.

Найдем уклон водной поверхности на исследуемом участке (в промиле, ‰):

$$I = (H_{Sm} - H_{Sov})/L. \quad (2)$$

На рис. 4 показано, как рассчитанный по формуле (2) уклон изменялся с начала года. Среднее значение за 5 месяцев 1948 года – $I_S = 0,104$ ‰, минимальное – $0,054$ ‰, максимальное – $0,140$. Соответственно, в 1960 году: $0,102$ ‰; $0,086$ ‰; $0,116$ ‰; в 1975 году: $0,098$ ‰; $0,085$ ‰; $0,110$ ‰.

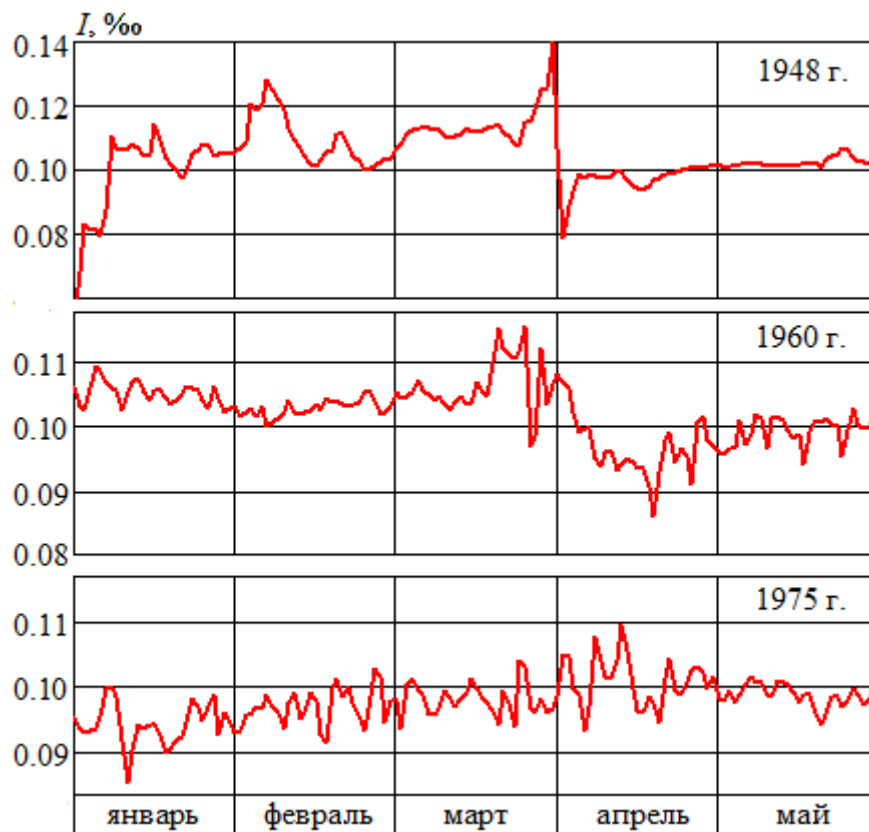


Рисунок 4 – Средний уклон водной поверхности реки Неман между городами Смалининкай и Советск в годы разной водности

Обработка результатов наблюдений была выполнена в среде Mathcad по методике [4]. Зависимость коэффициента корреляции уровней в двух створах от сдвига по времени Δt рассчитывалась по формуле:

$$\overline{r(\Delta t)} = \frac{1}{(n-1) \cdot s_{Sm} \cdot s_{Sov}} \cdot \sum_{i=1}^n (H_{Sm}(t_i) - \overline{H_{Sm}}) \cdot (H_{Sov}(t_i + \Delta t) - \overline{H_{Sov}}), \quad (4)$$

где $\overline{H_{Sm}}$, $\overline{H_{Sov}}$ – среднее значение уровня реки за n дней в створе городов Смалнинкай и Советск, соответственно; $\overline{s_{Sm}}$, $\overline{s_{Sov}}$ – точечная оценка среднего квадратичного отклонения уровня реки в створе в указанных створах. Величина Δt может принимать следующие целые значения $(-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6)$. Их общее количество $N = 10$.

Как в [4], зависимость коэффициента корреляции от сдвига по времени степенным аппроксимируем многочленом порядка m :

$$rt_m(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots + a_m \cdot t^m. \quad (5)$$

где коэффициенты $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ находятся методом наименьших квадратов.

Так как объем выборки невелик, для оценки погрешности аппроксимации (5) рассчитываем исправленный индекс детерминации (ИИД) Ru^2 [11]:

$$Ru^2 = 1 - (Sm/So) \cdot (N - 1)/(N - m - 1), \quad (6)$$

$$So = \sum (r_i - rs)^2, \quad Sm = \sum (r_i - rt_m(\Delta t_i))^2, \quad (7)$$

где rs – среднее значение коэффициента корреляции в каждом году.

Находим производную многочлена (5) и приравняем ее к нулю:

$$a_1 + 2a_2 \cdot t + 3a_3 \cdot t^2 + \dots + m \cdot a_m \cdot t^{m-1} = 0. \quad (8)$$

В общем случае корень уравнения (8) может быть найден численным методом. Его и принимаем за оценку времени добегания τ . После чего можно оценить среднюю скорость движения воды на участке между створами $V=L/\tau$.

Результаты расчета и обсуждение

Значения коэффициента корреляции, рассчитанные по формуле (4) для результатов наблюдений разных лет, показаны точками на рис. 5-8.

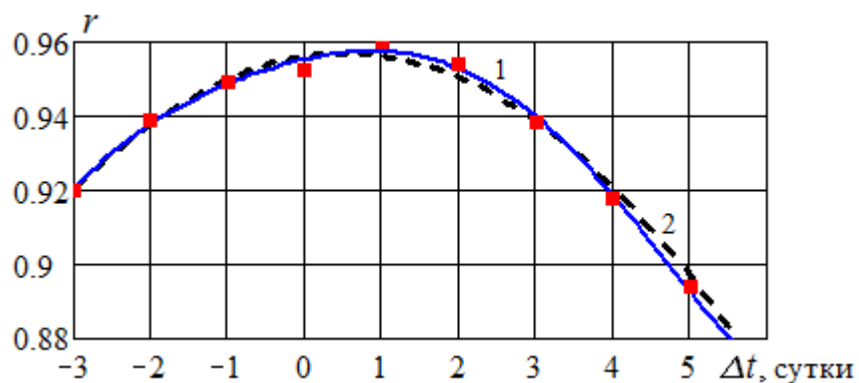


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента корреляции между уровнями в двух створах от сдвига по времени в 1948 году. Точки получены по данным наблюдений; линии – результаты расчета по формуле (5): 1 – при $m = 5$; 2 – при $m = 2$

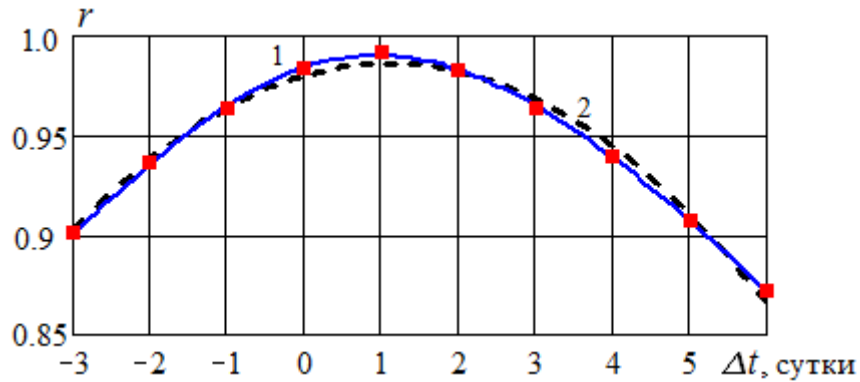


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента корреляции между уровнями в двух створах от сдвига по времени в 1960 году. Обозначения, как на рис. 5

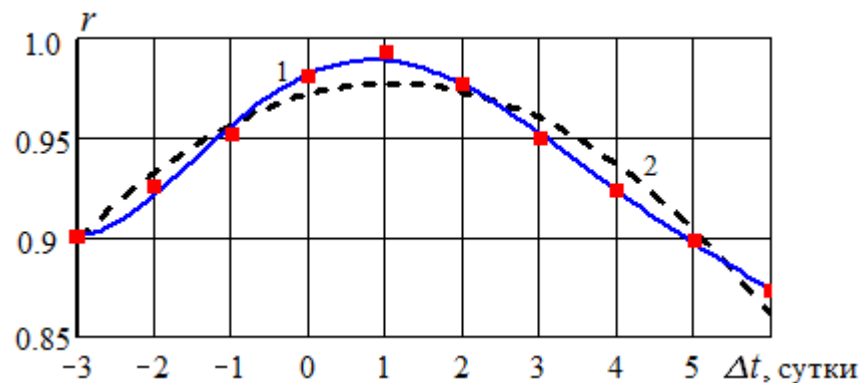


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента корреляции между уровнями в двух створах от сдвига по времени в 1975 году. Обозначения, как на рис. 5

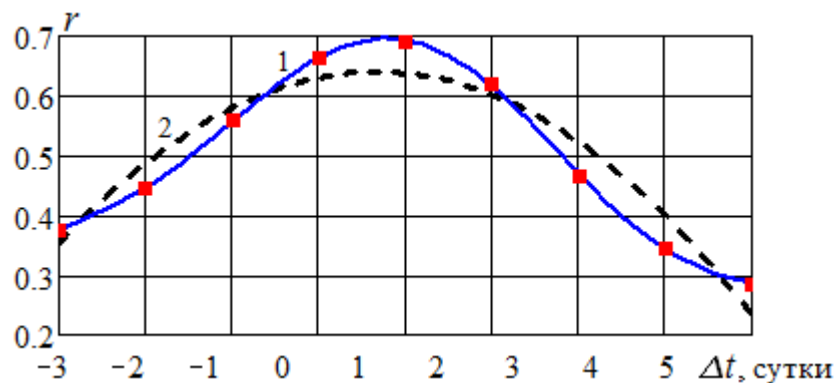


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента корреляции между уровнями в двух створах от сдвига по времени в 2014 году. Обозначения, как на рис. 5

Коэффициент корреляции на рис. 8 заметно меньше, чем на рис. 5-7. К тому же он гораздо быстрее уменьшается с ростом сдвига по времени. Возможно, это связано с ошибками измерений [5], не прошедших контрольную обработку.

В табл. 2 представлены результаты расчета индекса детерминации Ru^2 , времени добегания τ , средней скорости V . В [4] достаточную точность расчетов обеспечивали многочлены (5) порядка $m = 3$. По рис. 6 и табл. 2 для данных 1948 и 1960 года можно ограничиться $m = 2$. Тогда как для 2014 года требуется $m = 4$.

Таблица 2 – Результаты расчета

Год	Исправленный индекс детерминации Ru^2				τ , сут.	V , м/с
	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$		
1948	0,988	0,987	0,991	0,991	0,860	0,713
1960	0,989	0,994	0,998	0,999	0,937	0,655
1975	0,923	0,935	0,981	0,990	0,829	0,740
2014	0,879	0,866	0,996	0,994	0,735	0,835

В табл. 2 несколько большим значением выделяется средняя скорость движения воды в 2014. Видимо, это вновь связано с отмеченными ошибками измерений.

Заключение

Таким образом, предложенная модификация корреляционного метода позволила оценить среднюю скорость движения воды в реке Неман между городами Смалининкай и Советск. В исследованные годы наибольшая скорость 0,835 м/с была в 2014 году, наименьшая 0,655 м/с – в 1960 году. Коэффициент корреляции между уровнями воды в указанных створах оказался весьма высоким и медленно спадал с ростом сдвига по времени. Исключение составили результаты обработки данных наблюдений за 2014 год. Скорее всего, это связано с ошибками измерений, не прошедших контрольную обработку.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Зиновьев А.Т., Галахов В.П., Кошелев К.Б. О результатах прогнозирования весеннего половодья на Верхней Оби в 2015 г. // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. 2016. № 3. С. 58-68.
2. Наумов В.А. Методы обработки гидрологической информации. Лабораторный практикум для студентов вузов. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. 115 с.
3. Кошелева Е.Д., Кудишин А.В. Краткосрочное прогнозирование уровней воды реки Обь у города Барнаула во время половодья 2018 года // Известия АО РГО. 2018. № 3 (50). С. 27-37.
4. Наумов В.А. К расчету времени добегаания методом корреляционного анализа (на примере реки Мсты) // Вестник науки и образования Северо-Запада России: электронный журнал. 2020. Т. 6, № 4. С. 24-31. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2020/12/2020-N4-Naumov.pdf>.
5. ГИС-портал Центра регистра и кадастра [Электронный ресурс]. URL: <http://gis.vodinfo.ru> (дата обращения: 01.04.2022).
6. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Неман и рек бассейна Балтийского моря (Российская часть в Калининградской области). Утверждена приказом Невско-Ладужского БУ Федерального агентства водных ресурсов от 09.12.2014, № 171 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nord-west-water.ru/activities/ndv/page-2/> (дата обращения: 08.03.2022).
7. Гидрологический ежегодник 1948 г. Т. 1. Бассейн Балтийского моря / Под ред. Ю.П. Либровского. Вып. 4-6. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 228 с.
8. Гидрологический ежегодник 1960 г. Т. 1. Бассейн Балтийского моря / Под ред. Л.М. Жвирздинене. Вып. 5,6. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 262 с.
9. Гидрологический ежегодник 1975 г. Т. 1. Бассейн Балтийского моря / Под ред. О.Д. Жукаускаене. Вып. 5, 6. Вильнюс: Гидрометеиздат, 1977. 214 с.

10. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов [Электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 01.04.2022).
11. Бояринова Н.А., Кикот А.В., Наумов В.А. Особенности статистической обработки результатов экспериментальных исследований случайной функции, полученных разными авторами // Известия КГТУ. 2015. № 37. С. 199-206.

REFERENCES

1. Zinov'ev A.T., Galahov V.P., Koshelev K.B. *O rezul'tatah prognozirovaniya vesennego polovod'ya na Verhnej Obi v 2015 g.* [On the results of forecasting the spring flood on the Upper Ob' in 2015]. *Vodnoe hozyajstvo Rossii. Problemy, tekhnologii, upravlenie*. 2016. No. 3, pp. 58-68.
2. Naumov V.A. *Metody obrabotki gidrologicheskoy informacii. Laboratornyj praktikum dlya studentov vuzov* [Methods of processing hydrological information. Laboratory practice for University students]. Kaliningrad: KGTU Publ., 2014. 115 p.
3. Kosheleva E.D., Kudishin A.V. *Kratkosrochnoe prognozirovanie urovnej vody reki Ob' u goroda Barnaula vo vremya polovod'ya 2018 goda* [Short-Term forecasting of water levels of the Ob' River near the city of Barnaul during the flood of 2018]. *Izvestiya AO RGO*. 2018. No. 3 (50), pp. 27-37.
4. Naumov V.A. *K raschetu vremeni dobeganiya metodom korrelyacionnogo analiza (na primere reki Msty)* [To the calculation of the time of reaching by the method of correlation analysis (on the example of the Msta River)]. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii: elektronnyj zhurnal*. 2020. Vol. 6, No. 4, pp. 24-31. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2020/12/2020-N4-Naumov.pdf>.
5. *GIS-portal Centra registra i kadastra* [GIS portal of the Registry and Cadastre Center] [Electronic resource]. URL: <http://gis.vodinfo.ru> (accessed: 01.04.2022).
6. *Skhema kompleksnogo ispol'zovaniya i ohrany vodnyh ob'ektov bassejna reki Neman i rek bassejna Baltijskogo morya (Rossijskaya chast' v Kaliningradskoj oblasti)* [Scheme of integrated use and protection of water bodies of the Neman River basin and the rivers of the Baltic Sea basin (the Russian part in the Kaliningrad region)]. Utverzhdena prikazom Nevsko-Ladozhskogo BVU Federal'nogo agentstva vodnyh resursov ot 09.12.2014, No. 171 [Electronic resource]. URL: <http://www.nord-west-water.ru/activities/ndv/page-2> (accessed: 08.03.2022).
7. *Gidrologicheskij ezhegodnik 1948 g. T. 1. Bassejn Baltijskogo morya / Pod red. Yu.P. Librovskogo* [Hydrological Yearbook 1948. Vol. 1. Baltic Sea basin / Edited by Yu.P. Librovsky]. Issue 4-6. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1954. 228 p.
8. *Gidrologicheskij ezhegodnik 1960 g. T. 1. Bassejn Baltijskogo morya / Pod red. L.M. Zhvirzdinene* [Hydrological Yearbook 1960. Vol. 1. Baltic Sea basin / Edited by L.M. Zhvirzdinene]. Issue 4-6. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1953. 262 p.
9. *Gidrologicheskij ezhegodnik 1975 g. T. 1. Bassejn Baltijskogo morya / Pod red. O.D. Zhukauskene* [Hydrological Yearbook 1975. Vol. 1. Baltic Sea basin / Edited by O.D. Zhukauskene]. Issue 4-6. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1977. 214 p.
10. *Avtomatizirovannaya informacionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnyh ob'ektov* [Automated information system of state monitoring of water objects] [Electronic resource]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (accessed: 01.04.2022).
11. Boyarinova N.A., Kikot A.V., Naumov V.A. *Osobennosti statisticheskoy obrabotki rezul'tatov eksperimental'nyh issledovaniy sluchajnoj funkcii, poluchennyh raznymi avtorami* [Features of statistical processing of experimental results of random function obtained by different authors]. *Izvestiya KGTU*. 2015. No. 37, p. 199-206.



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Наумов Владимир Аркадьевич

Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия, доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности и природообустройства, действительный член Российской инженерной академии,

E-mail: van-old@rambler.ru

Naumov Vladimir Arkad'evich

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, Doctor of Technical Science, Professor of The Technosphere Safety and Environmental Engineering Department, Member of Russian Engineering Academy,

E-mail: van-old@rambler.ru