

УДК 556.53

**К РАСЧЕТУ ВРЕМЕНИ ДОБЕГАНИЯ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА
(НА ПРИМЕРЕ РЕКИ МСТЫ)**

В.А. Наумов

**TO CALCULATE THE RUNNING TIME USING THE CORRELATION ANALYSIS
METHOD (FOR EXAMPLE, THE MSTA RIVER)**

V.A. Naumov

Аннотация. Предложена модификация метода определения времени добегания с помощью корреляционного анализа уровней воды в двух створах реки. Зависимость корреляции между уровнями от временного сдвига аппроксимирована многочленом третьего порядка. Точка максимума функции принималась за время добегания. На участке реки Мсты между селами Опеченский Посад и Бор среднее время добегания за 2017 год составило 1,986 суток, а за межень указанного года – 1,703 суток. Уменьшение времени добегания (увеличение скорости течения) в межень соответствует изменению уклона.

Ключевые слова: река Мста; ежедневные уровни воды; наблюдения; время добегания; коэффициент корреляции; поиск максимума.

Abstract. The modified method for determining of running time using correlation analysis of water levels in two river sashes are proposed in the article. The dependence of the correlation between levels on the time shift is approximated by a third-order polynomial. The maximum point of the function was taken as the running time. The average running time on the section of the Msta River between the villages of Opechenskiy Posad and Bor in 2017 was 1,986 days. It is equal to 1.703 days for the low-water period of the specified year. A decrease in the running time (an increase in the speed of the current) in the low water corresponds to a change in the slope.

Keywords: Msta river; daily water levels; observations; running time; correlation coefficient; search for the maximum.

Введение

Краткосрочные прогнозы по соответственным уровням (или расходам) воды широко применяются в инженерной гидрологии [1-6]. Суть подхода заключается в установлении эмпирических связей между соответственными уровнями воды, наблюдавшимися в верхнем и нижнем створах реки. Соответственными называют однородные по фазе максимумы и минимумы уровней, которые наблюдают в верхнем створе и позже – нижнем в створе. Разработаны различные математические модели, реализующие данный подход, в том числе при наличии боковой приточности (см., например, [1]). Важную роль в таких моделях играет время добегания τ (ВД). Здесь под ВД подразумевается промежуток времени, за который вода в реке проходит участок между двумя заданными створами.

Первоначально для определения времени добегания использовались графические методы. Например, на рис. 1 из [2] построены графики связи соответственных уровней для реки Днестр на слабоприточном участке город Галич – город Могилев-Подольский по характерным точкам. На рис. 1 отмечены характерные точки: максимумы, минимумы, точки перегиба и длительного стояния примерно одинакового уровня воды (эти точки помечены цифрами: для г. Галича 1, 2, 3, ..., для г. Могилева-Подольского Г, 2', 3' ...). По выделенным точкам находят ВД как разность дат наступления соответственных уровней в нижнем и верхнем створах участка реки. Понятно, что такой метод не отличается высокой точностью.

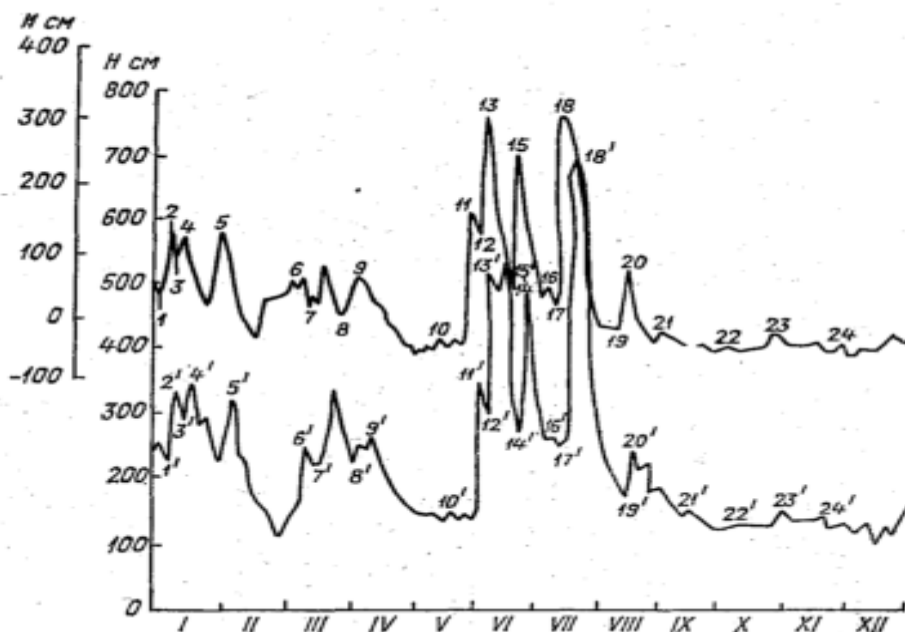


Рисунок 1 – Совмещенный график колебаний уровня реки Днестр у города Галича и у города Могилева-Подольского [2]. Числами обозначены соответственные уровни

Применение статистических методов и обработка больших массивов гидрологической информации позволили повысить точность и надежность определения ВД [3, 4]. В [5, 6] для обнаружения сдвига в рядах данных, соответствующего максимальному значению коэффициента корреляции осуществлялся последовательный сдвиг значений одного ряда относительно другого на шаг, равный суткам. Тем не менее, во всех перечисленных работах ВД определяется с точностью до суток. Цель данной статьи – усовершенствование метода корреляционного анализа для более точного расчета ВД.

Исходные данные

В качестве исходных данных использовались результаты наблюдений [7] за уровнем реки Мста. Река Мста относится к бассейну Невы. Истоком является озеро Мстино, устье находится в северной части озера Ильмень. Протекает по Тверской и Новгородской области. Длина реки 445 км, площадь водосборного бассейна 23300 км² [8]. Общее падение реки составляет 133,4 метра, уклон 0,30 ‰. Средний многолетний расход воды в устье реки примерно 200 м³/сек. Характер питания реки: 60% – снеговое, 30% – грунтовое, 10% – дождевое 10%. Глубина реки на плесах достигает 5 м, на порогах 0,4 м. Дно реки большей усеяно камнями. В верхней части реки преобладают песчаники и известняки. Вода в реке мутная, много взвешенных наносов. В верховье Мста извилистая река с шириной русла 40-50 м. В нижнем течении, после притоков Березайки и Увери ширина реки увеличивается до 70-80 м. В табл. 1 представлены действующие на этой реке гидрологические посты.

Таблица 1 – Действующие гидрологические посты (река Мста) [7]

Код поста	Местоположение	Расстояние от устья, км	Отметка нуля поста, м БС
72265	с. Опеченский Посад	342	118,0
72269	пос. Потерпелицы	312	66,07
72276	с. Бор	221	44,99
72281	д. Девкино	84	21,27

В качестве исследуемого был выбран участок реки между постами в селе Опеченский Посад и в селе Бор (рис. 2). Использовались результаты наблюдений за уровнем воды на

указанных постах за 2008-2018 годы из автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов [7].

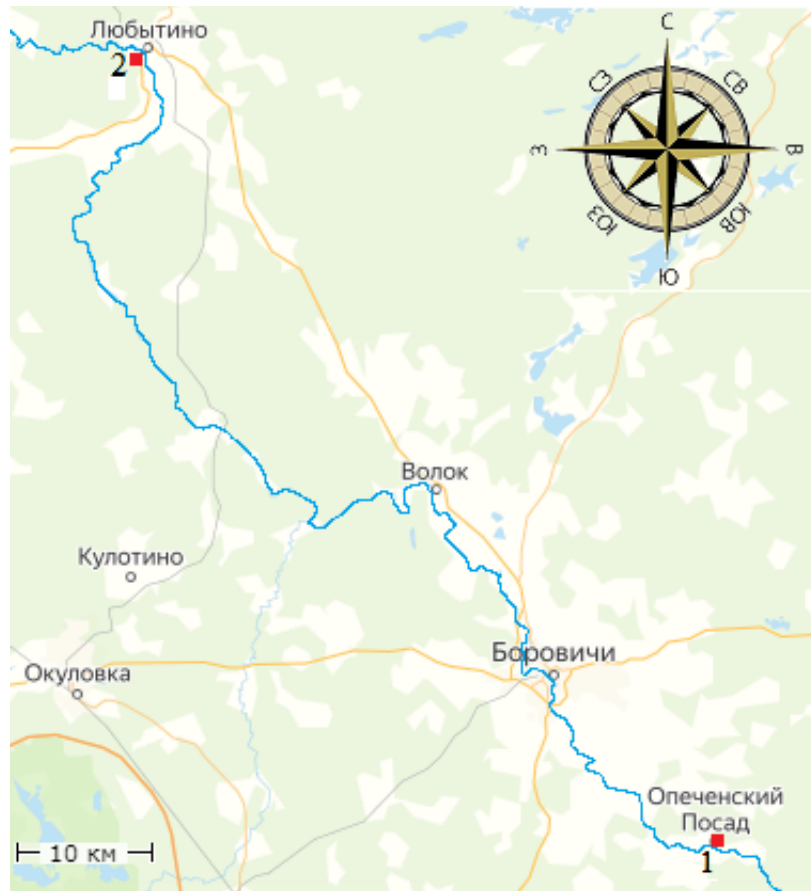


Рисунок 2 – Карта исследуемого участка реки Мсты:
1 – пост 72265 (село Опеченский посад), 2 – пост 72276 (село Бор)

Метод расчета

В [7] хранятся массивы уровней H'_O, H'_B , отсчитываемых в сантиметрах от условного нуля поста (см. табл. 1). Переведем их в метры Балтийской системы (м БС):

$$H_O = 0,01 \cdot H'_O + 118; \quad H_B = 0,01 \cdot H'_B + 44,99. \quad (1)$$

На рис. 2 приведено изменение уровне реки Мсты в течение 2017 года. Можно отметить соответственные уровни, как на рис. 1, но найти по ним ВД будет весьма затруднительно.

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

$$I = \frac{H_O - H_B}{L}, \quad (2)$$

где L – расстояние между постами, по табл. 1: $L = 121$ км.

Рассчитанный по формуле (2) уклон в течение года изменялся в узком диапазоне (0,583; 0,603). Среднее значение за 2017 год – $I_S = 0,598$.

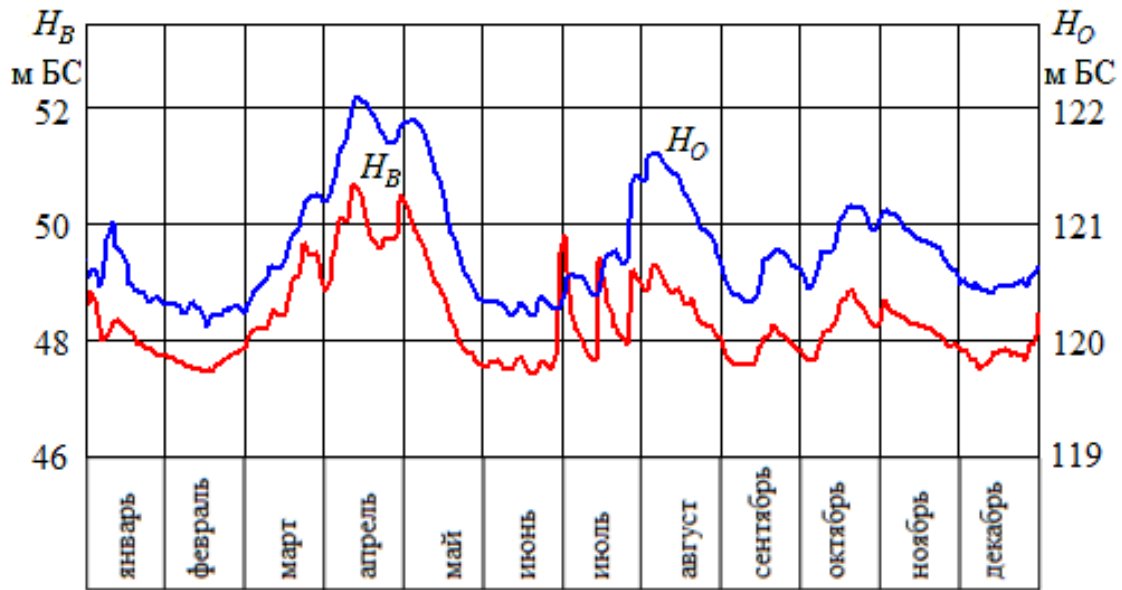


Рисунок 3 – Колебания уровня реки Мсты в 2017 году на двух постах:
 H_O – с. Опеченский Посад, H_B – с. Бор

Рассчитаем отклонение уклона водной поверхности от среднего за год значения

$$\Theta = \frac{I - I_S}{I_S} \cdot 100\% . \quad (3)$$

По рис. 4 видно, что отклонение величины I от I_S менее трех процентов. Причем уклон водной поверхности реки Мсты падает во время весеннего половодья и дождевых паводков. Это связано с характером поймы реки. На рассматриваемом участке большая часть берегов низкая, во многих местах поросшая деревьями (см. рис. 5).

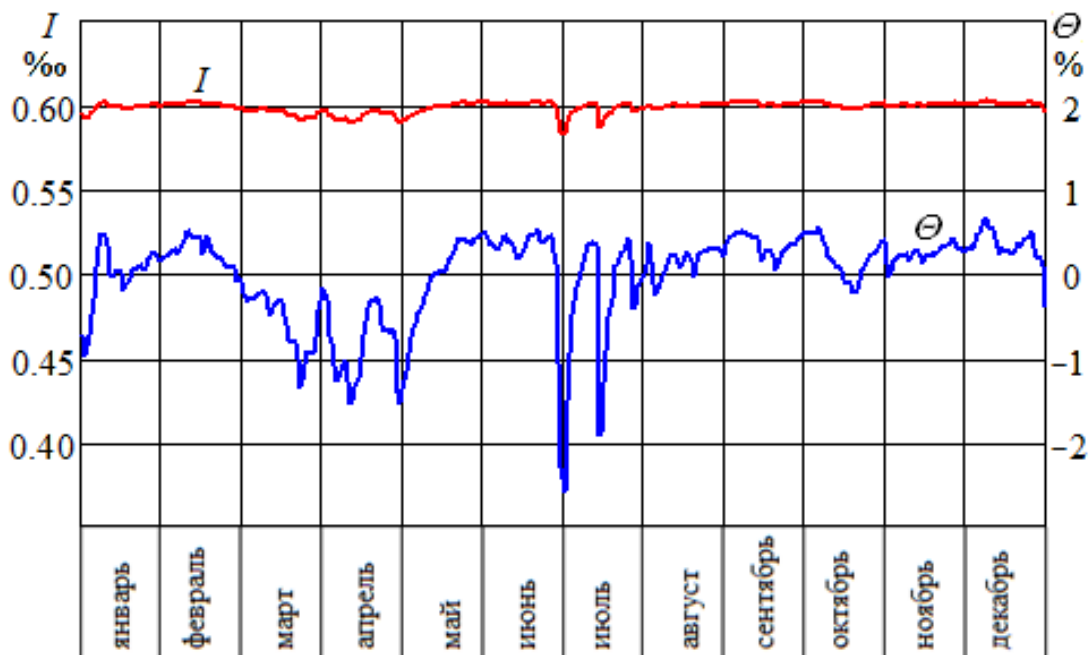


Рисунок 4 – Уклон водной поверхности реки Мсты в 2017 году на исследуемом участке



Рисунок 5 – Река Мста ниже по течению села Опеченский Посад.
Фотография А. Пашкевича, 2011 год [9]

Обработка результатов наблюдений была выполнена в среде Mathcad по методике [5] с учетом замечаний [10]. Точечная оценка зависимости коэффициента корреляции уровней в двух створах от сдвига по времени Δt рассчитывалась по формуле:

$$\overline{r(\Delta t)} = \frac{1}{(n-1) \cdot \overline{s_O} \cdot \overline{s_B}} \cdot \sum_{i=1}^n (H_O(t_i) - \overline{H_O}) \cdot (H_B(t_i + \Delta t) - \overline{H_B}), \quad (4)$$

где $\overline{H_O}$, $\overline{H_B}$ – среднее значение уровня реки за n дней в створе Опеченский Посад и Бор, соответственно; $\overline{s_O}$, $\overline{s_B}$ – точечная оценка среднего квадратичного отклонения уровня реки в створе Опеченский Посад и Бор, соответственно. Имеются ежедневные данные об уровнях, поэтому величина Δt может принимать целые значения ($\dots, -2, -1, 0, +1, +2, \dots$).

В результате сдвига столбцов наблюдений в створах друг относительно друга на Δt количество обрабатываемых уровней уменьшается:

$$n = N - |\Delta t|, \quad (5)$$

где N – объем исходного массива, например, количество дней в году, если рассчитывается среднее ВД за год.

Результаты расчета по формуле (4) для 2017 года занесем в табл. 2. В [5, 6] за ВД τ принималось значение Δt , при котором r было наибольшим. Приемлемая точность получается при больших τ . Если τ один-два дня, погрешность может достигать 50%.

Таблица 2 – Точечная оценка коэффициента корреляции уровней в 2-х створах

Δt	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
r	0,881	0,901	0,913	0,916	0,912	0,903	0,893	0,880

По таблице 2 найдем уравнение степенной регрессии порядка m :

$$rt(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_mt^m. \quad (6)$$

По рис. 6 видно, что расчет по многочлену 3-го порядка дает хорошее согласие с экспериментальными точками. Расчеты, выполненные по массиву данных других лет, подтверждают этот вывод.

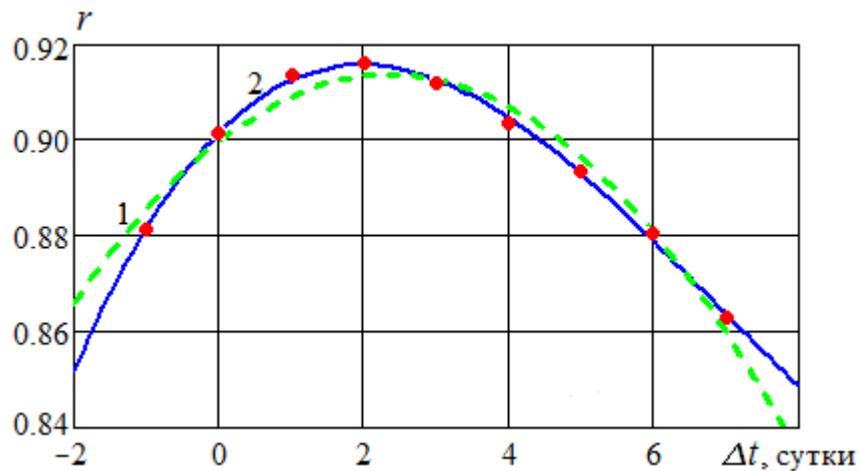


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента корреляции между уровнями в двух створах от сдвига по времени. Точки получены по данным наблюдений; линии – результаты расчета по формуле (6): 1 – при $m = 2$; 2 – при $m = 3$

Производную многочлена 3-го порядка приравняем к нулю:

$$a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 = 0. \quad (7)$$

Решая квадратное уравнение (7), найдем точку максимума, это и есть ВД:

$$\tau = \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 - 3a_1a_3}}{-3a_3}. \quad (8)$$

Среднее время добегания за 2017 год получается $\tau = 1,986$ суток. Можно использовать предложенный метод для определения ВД и за меньший период. Например, за 120 дней межени в 2017 году получим $\tau = 1,703$ суток. Правда, для периода меньше 20-30 суток точность расчета заметно снизится.

Заключение

Таким образом, предложенная модификация позволяет рассчитать время добегания за период 30 и более суток с гораздо большей точностью, чем по известному методу. На участке реки Мсты между селами Опеченский Посад и Бор среднее время добегания за 2017 год составило 1,986 суток, а за межень указанного года – 1,703 суток. Уменьшение ВД

(увеличение скорости течения) в межень соответствует изменению уклона в указанный период.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корень В.И., Бельчиков В.А. Методические указания по использованию методов краткосрочных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды для речных систем на основе математических моделей. Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. 176 с.
2. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках / Ред. Е.Э. Булаховская. Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. 245 с.
3. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Краткосрочное прогнозирование уровней воды на реке Амур. Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, 2014. 20 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://method.meteorf.ru/publ/tr/tr353/simon.pdf> (дата обращения: 07.10.2020).
4. 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.
5. Наумов В.А. Методы обработки гидрологической информации. Лабораторный практикум для студентов вузов. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. 115 с.
6. 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.
7. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов [Электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 01.10.2020).
8. Информационный сайт о реках России. Река Мста [Электронный ресурс]. URL: <http://vsereki.ru/atlanticheskij-ocean/bassejn-baltijskogo-morya/bassejn-oz-ilmem/msta> (дата обращения: 05.12.2020).
9. Блог фотографа Андрея Пашкевича. Сплав по реке Мсте в 2011 году [Электронный ресурс]. URL: <https://foto-pashkevich.livejournal.com/42570.html> (дата обращения: 06.10.2020).
10. 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. Koren' V.I., Bel'chikov V.A. *Metodicheskie ukazaniya po ispol'zovaniyu metodov kratkosrochnyh prognozov ezhdnevnyh raskhodov (urovnej) vody dlya rechnyh sistem na osnove matematicheskikh modelej* [Methodological guidelines for using methods of short-term forecasts of daily water consumption (levels) for river systems based on mathematical models]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 176 p.
2. *Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 2. Kratkosrochnyj prognoz raskhoda i urovnya vody na rekah* [Guide to hydrological forecasts. Vol. 2. Short-term forecast flow and water level in the rivers] Ed. E.E. Bulahovskaya. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 245 p.
3. Borshch S.V., Simonov Yu.A., Hristoforov A.V., Yumina N.M. *Kratkosrochnoe prognozirovanie urovnej vody na reke Amur* [Short-term forecasting of water levels on the Amur River]. Gidrometeorologicheskij nauchno-issledovatel'skij centr Rossijskoj Federacii, 2014. 20 p.

[Electronic resource]. URL: <http://method.meteorf.ru/publ/tr/tr353/simon.pdf> (accessed: 07.10.2020).

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. *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: 01.10.2020).

8. *Informacionnyj sayt o rekah Rossii. Reka Msta* [Information site about Russian rivers. The River Msta]. [Electronic resource]. URL: <http://vsereki.ru/atlanticheskij-ocean/bassejn-baltijskogo-morya/bassejn-oz-ilmnen/msta> (accessed: 05.12.2020).

9. *Blog fotografa Andrey Pashkevicha. Splav po reke Mste v 2011 godu* [Blog of photographer Andrey Pashkevich. Rafting on the Msta River in 2011]. [Electronic resource]. URL: <https://foto-pashkevich.livejournal.com/42570.html> (accessed: 06.10.2020).

10. Boyarinova N.A., Kikot A.V., Naumov V.A. *Osobennosti statisticheskoy obrabotki rezul'tatov eksperimental'nyh issledovaniy sluchajnoj funkicii, 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, заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования, действительный член Российской инженерной академии, действительный член Российской академии естественных наук,

E-mail: van-old@rambler.ru

Naumov Vladimir Arkad'evich

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, Chairman of The Water Resources Department, Doctor of Technical Science, Professor, Member of Russian Engineering Academy, Member of Russian Academy of Natural Science,

E-mail: van-old@rambler.ru

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с автором статьи:
236022, Россия, Калининград, Советский пр., 1, КГТУ, ГУК, каб. 372. Наумов В.А.
8(4012)99-53-37