

Ю. А. Спирин

## МЕТОДИКА АНАЛИЗА СВЯЗИ МЕЖДУ РАСХОДАМИ И УРОВНЯМИ ВОДЫ У РЕК ПОСРЕДСТВОМ ВЫЯВЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ

40

В статье собраны все имеющиеся данные о среднемесячных расходах и уровнях воды по рассматриваемым рекам, на основе которых составлены гидрологические ряды этих характеристик. Между полученными рядами найдена тесная стохастическая связь. Получены уравнения линейной регрессии, связывающие среднемесячные расходы и уровни воды у исследуемых рек. На основе полученных уравнений построены графики связи между рассматриваемыми величинами, а также рассчитаны и построены границы их доверительных интервалов. По этим графикам связи можно определять среднемесячные расходы или уровни воды в исследуемых реках, владея только одним рядом характеристик. Также можно сделать вывод о нормальном протекании русловых процессов, поскольку разброс точек на графиках связи в пределах нормы и обусловлен, на наш взгляд, типичными для рек природными процессами.

The article contains all the available data on average monthly discharges and water levels for the rivers under study, that provided the background for the hydrological series of these characteristics which are found to be in a close stochastic connection. Linear regression equations connect the average monthly discharges and water levels in the rivers under study. They also provide for the graphs of the relationship between the considered values, and the boundaries of their confidence intervals were calculated and constructed. From these dependences, it is possible to determine the average monthly discharge or water levels in the studied rivers, owning only one set of characteristics. It can also be a picture of regular channel processes, since the distribution of points on the graphs is within the normal range and is attributed to natural rivers processes.

**Ключевые слова:** среднемесячные расходы воды, среднемесячные уровни воды, метод наименьших квадратов, водотоки Славского района, взаимосвязь гидрологических характеристик.

**Keywords:** monthly average water flow, monthly average water levels, least square method, watercourses of the Slavsky district, interconnection of hydrological characteristics.

### Введение

Калининградская область, а в частности МО «Славский городской округ» (далее Славский район), богата водными ресурсами. Поверхностные водные объекты суши Славского района имеют многоцелевое использование по следующим направлениям: рекреация, сельское и коммунально-бытовое хозяйство, промышленность, осушительная гидротехническая мелиорация и др. Все перечисленные отрасли не могут нормально функционировать без проведения различных гидрологических исследований и наблюдений [1–3].



Славский район имеет следующие водотоки, на которых проводились (а на некоторых проводятся до сих пор) длительные гидрологические наблюдения за расходами и уровнями воды: р. Злая, Матросовка и Немонинка. Данные по этим рекам достаточно разрозненные, и, хотя доступ к ним открытый, их достаточно тяжело получить для ознакомительных и научно-прикладных целей.

Поиск взаимосвязи между различными характеристиками природных компонентов — один из ключевых аспектов научного познания. Благодаря получению и интерпретации различных зависимостей можно решать обширный спектр научно-практических задач и более детально изучать природные процессы. В научной и инженерной практике в области речной гидрологии устоялись взаимосвязи между следующими характеристиками: уровнем и расходом воды; уровнем воды и площадью живого сечения; уровнем воды и средней скоростью течения. При построении подобных зависимостей большую роль играет наличие продолжительных гидрологических наблюдений [4–6].

Наиболее перспективно выглядит обоснование и построение графиков связи между среднемесячными расходами и уровнями воды, поскольку они базируются на наиболее часто используемых характеристиках. Также стоит отметить, что вследствие своей практической значимости эти параметры часто фиксируются различными ведомствами.

Подобные графики (кривые расходов) широко используются на практике при наблюдениях за водотоками. Они упрощают снятие гидрометрических показателей, выражая одну переменную через другую. Для расчета расхода воды в реке необходимо получить два показателя: площадь поперечного сечения и скорость воды. Имея график связи расходов и уровня воды, достаточно определить лишь уровень, что сильно упрощает процесс мониторинга, поскольку уровень воды определяется при помощи прямого измерения, а не косвенного, как расход воды. Также такое упрощение является хорошим дополнением к автономным системам мониторинга, что уменьшает количество затрат на оборудование.

Нами были собраны все имеющиеся данные о среднемесячных расходах и уровнях воды по рассматриваемым рекам, на основе которых были составлены гидрологические ряды этих характеристик. Затем были построены графики связи между среднемесячными расходами и уровнями воды изучаемых водотоков. На наш взгляд, полученные зависимости могут считаться одними из самых полных, поскольку они основаны на достаточно продолжительных периодах наблюдений. Полученные графики могут иметь широкое практическое применение в отраслях водопользования, мониторинга водных объектов, научно-прикладных исследований.

Цель работы: установить связь между среднемесячными расходами и уровнями воды р. Злой, Матросовки и Немонинки.

Задачи исследования: 1) статистическая обработка данных наблюдений; 2) получение уравнений линейной регрессии, связывающих среднемесячные расходы и уровни воды рассматриваемых рек; 3) поиск границ доверительных интервалов для уравнений линейной регрессии; 4) построение графиков уравнений линейной регрессии и их доверительных интервалов.

Объект исследования: р. Злая, Матросовка и Немонинка.

Предмет исследования: гидрологические ряды среднемесячных расходов и уровней воды в водотоках.

### Исследуемая территория

Исследуемые реки протекают по территории Славского района (дельтовая низменность р. Неман), который имеет достаточно большое количество поверхностных водных объектов, представленных в основном естественными поверхностными водотоками, существенно модифицированными поверхностными водотоками, открытыми осушительными мелиоративными каналами, озерами и болотами. Рельеф местности представлен в основном плоскими озерными и болотными низинными равнинами, а также плоскими морскими и аллювиально-морскими равнинами.

Река Злая берет свое начало из р. Луговой, в окрестностях с. Калужского, а в своем конце сливается с р. Прямой в районе пос. Гастеллово, образуя р. Ржевку. Длина реки составляет 62 км, водосборная площадь — 292 км<sup>2</sup>. Средний многолетний расход, по имеющимся данным, составляет 1,48 м<sup>3</sup>/с.

Исток р. Матросовки берет свое начало из р. Неман — в 48 км от ее устья ниже Советска, а впадает в Куршский залив. Длина реки — 43 км. Средний многолетний расход, по имеющимся данным, — 125,32 м<sup>3</sup>/с.

Исток р. Немонинки находится неподалеку от ответвления р. Матросовки от р. Неман, а устье находится в Куршском заливе. Длина реки составляет 46 км, водосборная площадь — 1380 км<sup>2</sup>. Средний многолетний расход, по имеющимся данным, — 0,53 м<sup>3</sup>/с.

На рисунках 1 и 2 представлено местоположение исследуемых водных объектов и их гидропостов.

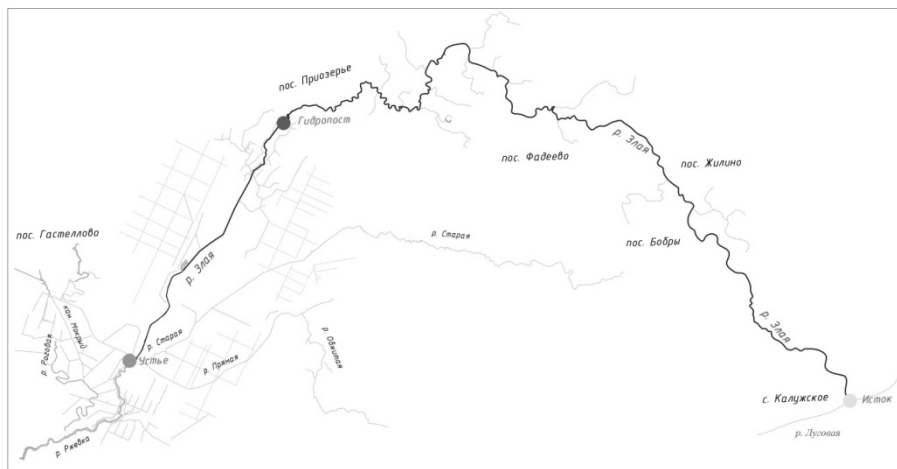


Рис. 1. Схема расположения р. Злой, а также пункта наблюдения за ней

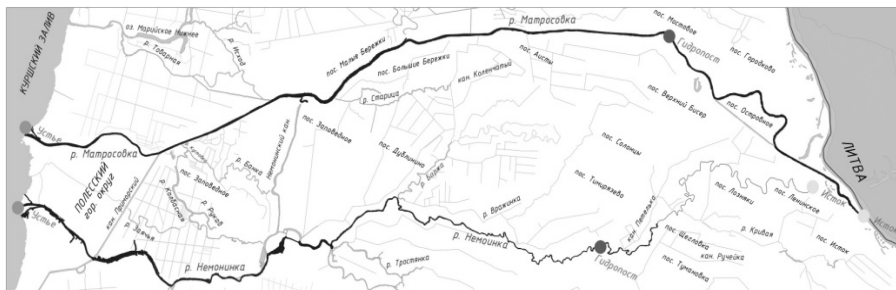


Рис. 2. Схема расположения р. Матросовки и Немонинки, а также пунктов наблюдения за ними

## Материалы и методы

Гидрологические ряды среднемесячных расходов и уровней воды р. Злой – с. Приозерье за 1961–1986 гг.; р. Матросовки – дер. Мостовое за 1969–1986 гг.; р. Немонинки – с. Тимирязево за 1963–1986 гг. были составлены из данных Гидрологических ежегодников [7–10]. Гидрологические ежегодники были предоставлены Государственным гидрологическим институтом [11], Институтом водных проблем РАН [12] и Калининградской областной научной библиотекой [13]. Также была получена информация о среднемесячных расходах и уровнях воды из отчетов об Ежегодных данных о режиме и ресурсах поверхностных вод суши [14] по р. Злой за периоды 1990–1991 гг., 1993–2004 гг. и по р. Матросовке за период 1990–2004 гг. Отчеты были предоставлены Государственным гидрологическим институтом. Из Автоматизированной системы государственного мониторинга водных объектов [15] были получены гидрологические данные за период с 2008 по 2017 г. для р. Злой и Матросовки.

В работе были использованы различные методы статистической обработки информации, основополагающим выступил метод наименьших квадратов для поиска уравнений линейной регрессии [16–19].

## Результаты и обсуждения

Все дальнейшие расчеты производились в среде *MathCAD*, поэтому для более лаконичного повествования некоторые формулы буду представлены ее операторами.

В работе будет рассмотрено наличие связи между уровнями воды в реках и их расходами. Данные о среднемесячных расходах ( $Q_g$ , м<sup>3</sup>/с) и уровнях воды ( $H_g$ , м) в р. Злой, Матросовке и Немонинке представлены на рисунках 3–5.

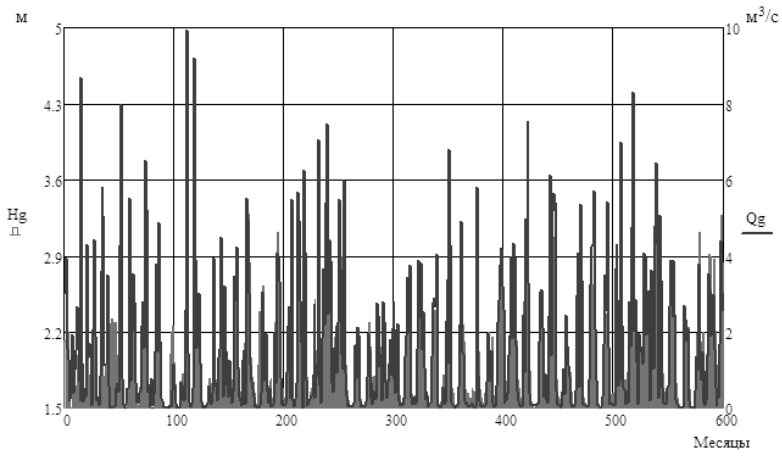


Рис. 3. Среднемесячные расходы ( $Q_g, \text{м}^3/\text{с}$ ) и уровни воды ( $H_g, \text{м}$ ) в р. Злой – с. Приозерье (1961 – 1986 гг., 1990 – 1991 гг., 1993 – 2004 гг., 2008 – 2017 гг.)

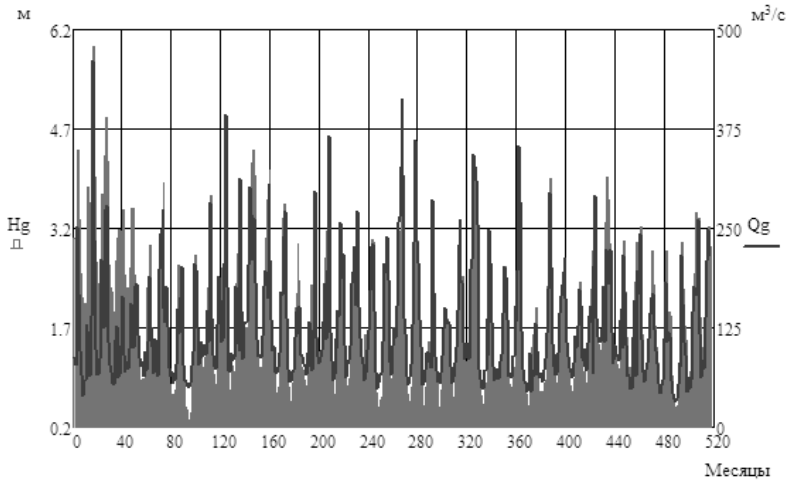


Рис. 4. Среднемесячные расходы ( $Q_g, \text{м}^3/\text{с}$ ) и уровни воды ( $H_g, \text{м}$ ) в р. Матросовке – дер. Мостовое (1969 – 1986 гг., 1990 – 2004 гг., 2008 – 2017 гг.)

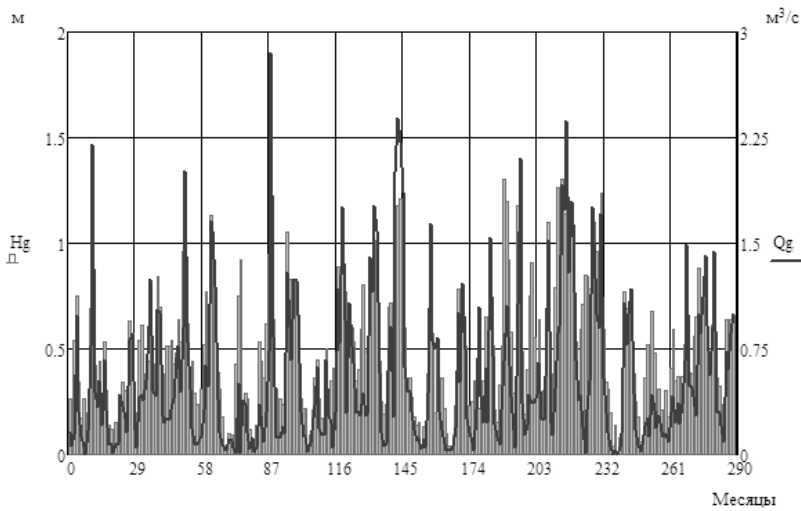


Рис. 5. Среднемесячные расходы ( $Q_g$ ,  $m^3/c$ ) и уровни воды ( $H_g$ , м) в р. Немонинке – с. Тимирязево (1963–1986 гг.)

Из данных, представленных на графиках, находим средние, максимальные и минимальные расходы ( $avQ_g$ ,  $maxQ_g$ ,  $minQ_g$ ,  $m^3/c$ ) и уровни ( $avH_g$ ,  $maxH_g$ ,  $minH_g$ , м) воды, средние квадратические отклонения в рядах среднемесячных расходов ( $\sigma Q_g$ ,  $m^3/c$ ) и уровней ( $\sigma H_g$ , м) воды, коэффициенты парной корреляции между среднемесячными расходами и уровнями воды ( $r_{qh}$ ) в исследуемых реках. Полученную информацию вносим в таблицу 1.

Таблица 1

**Средние, максимальные и минимальные расходы и уровни воды, средние квадратические отклонения в рядах среднемесячных расходов и уровней воды, коэффициенты парной корреляции между среднемесячными расходами и уровнями воды в исследуемых реках**

Река	$avQ_g$	$maxQ_g$	$minQ_g$	$avH_g$	$maxH_g$	$minH_g$	$\sigma Q_g$	$\sigma H_g$	$r_{qh}$
Злая	1,48	9,92	0,01	1,97	3,44	1,43	1,78	0,45	0,89
Матросовка	125,32	460,00	32,30	1,84	5,95	0,20	69,14	1,01	0,84
Немонинка	0,53	2,85	0,00	0,49	1,51	0,00	0,54	0,32	0,85

Максимальные и минимальные значения необходимы для выбора шага аппроксимации и, как следствие, выставления корректно отображаемого диапазона на графиках связи. Средние значения используются как в формулах, так и наряду со среднеквадратическим отклонением, что позволяет увидеть, как распределяются значения в рассматриваемом ряде. Коэффициенты парной корреляции между среднемесячными расходами и уровнями воды в исследуемых реках покажет тесноту стохастической связи между этими величинами. Чем ближе полученное значение к 1 или -1, тем теснее связь.



Найдем уравнение линейной регрессии, связывающее величины. Поиск будем осуществлять в виде многочлена  $k$ -ой степени. Выбираем шаг аппроксимации ( $h$ ) и вносим его в таблицу 2.

Таблица 2

## Шаг аппроксимации

Река	Злая	Матросовка	Немнинка
Шаг аппроксимации ( $h$ )	0, 0,1... 10	0, 0,1... 480	0, 0,1... 8

Введем необходимые для расчетов функции при помощи встроенных операторов *MathCAD*:

$$vs_k = \text{regress}(Qg, Hg, k), \quad (1)$$

$$R1(h) = \text{in terp}(vs_1, Qg, Hg, k), \quad (2)$$

$$R2(h) = \text{in terp}(vs_2, Qg, Hg, k), \quad (3)$$

$$R3(h) = \text{in terp}(vs_3, Qg, Hg, k), \quad (4)$$

$$R4(h) = \text{in terp}(vs_4, Qg, Hg, k), \quad (5)$$

где  $k$  – порядок аппроксимации.

Найдем средние квадратические значения относительных отклонений экспериментальных данных (данных наблюдений) от сглаживающей функции (многочлен аппроксимации), %:

$$\varepsilon_k = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1-k} \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{Hg_i}{R(Qg_i)} - 1 \right)^2}, \quad (6)$$

где  $n$  – число членов гидрологического ряда.

Полученные данные внесем в таблицу 3.

Таблица 3

**Средние квадратические значения относительных отклонений экспериментальных данных (данных наблюдений) от сглаживающей функции (многочлен аппроксимации), %**

Река	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	$\varepsilon_4$
Злая	9,77	9,28	9,29	9,30
Матросовка	39,45	40,73	41,48	41,03
Немнинка	46,52	51,78	57,37	59,59

Из таблицы 3 выберем порядки сглаживающих функций  $Qg$  и  $Hg$ , обеспечивающие наименьшие значения средних квадратических отклонений экспериментальных данных, и построим уравнения линейной регрессии для каждой реки (табл. 4). В данной работе порядок полинома определяется наименьшим значением, полученным по формуле 6, а в таблице 3 эти значения отмечены курсивом. Для р. Злой это полином 2-го порядка, для р. Матросовки и Немнинки – 1-го порядка.



Таблица 4

Уравнения линейной регрессии для каждой реки

Река	Уравнение линейной регрессии
Злая	$Qr(h) = 1.574 + 0.338 \cdot h - 0.019 \cdot h^2$
Магросовка	$Qr(h) = 0.308 + 0.012 \cdot h$
Немонинка	$Qr(h) = 0.217 + 0.506 \cdot h$

Вычислим средние квадратические отклонения уровня воды и расхода воды в реке от линейной зависимости  $C(h)$ , м:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (Hg_i - Qr(Qg_i))^2}. \tag{7}$$

Найдем суммы квадратов отклонений результатов измерений расходов воды от среднего выборочного значения,  $m^3/c$ :

$$SO = \sum_{i=1}^n (Qg_i - avQg)^2. \tag{8}$$

Построим нижние и верхние доверительные интервалы для уравнений линейной регрессии ( $t\gamma = 1,96$ ) [20]:

$$f1(h) = C(h) - t\gamma \cdot \sigma_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(h - avQg)^2}{SO}}, \tag{9}$$

$$f2(h) = C(h) + t\gamma \cdot \sigma_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(h - avQg)^2}{SO}}. \tag{10}$$

Далее построим графики связи между среднемесячными расходами ( $Qg, m^3/c$ ) и уровнями ( $Hg, m$ ) воды для каждой реки (рис. 6–8).

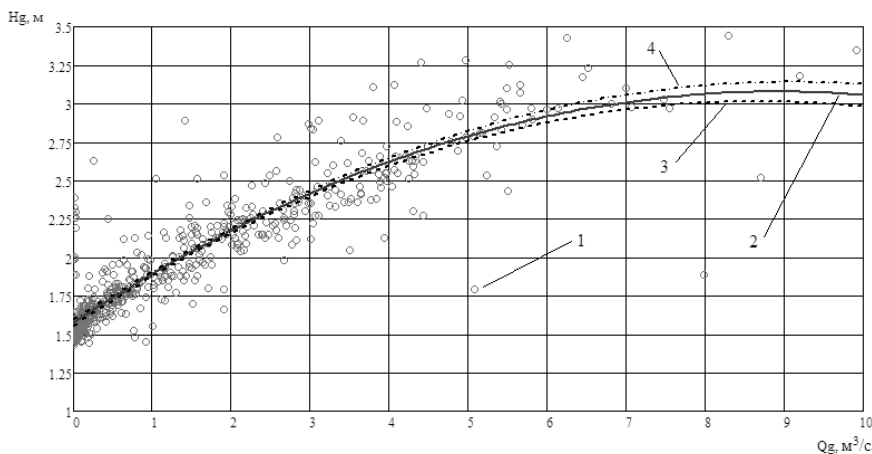


Рис. 6. График связи между среднемесячными расходами ( $Qg, m^3/c$ ) и уровнями ( $Hg, m$ ) воды в р. Злой – с. Приозерье: точки – данные наблюдений; 1 – данные наблюдений; 2 – уравнение линейной регрессии; 3, 4 – нижний и верхний доверительные интервалы



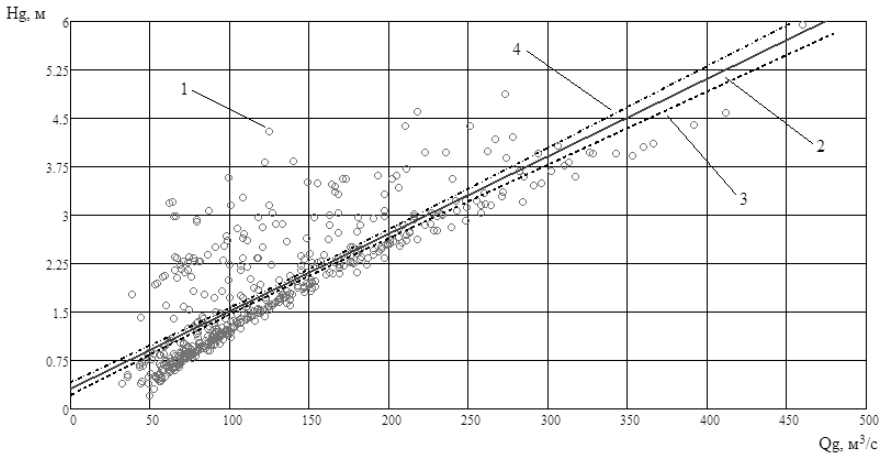


Рис. 7. График связи между среднемесячными расходами ( $Q_g, \text{м}^3/\text{с}$ ) и уровнями ( $H_g, \text{м}$ ) воды в р. Матросовке – дер. Мостовое: точки – данные наблюдений; 1 – данные наблюдений; 2 – уравнение линейной регрессии; 3, 4 – нижний и верхний доверительные интервалы

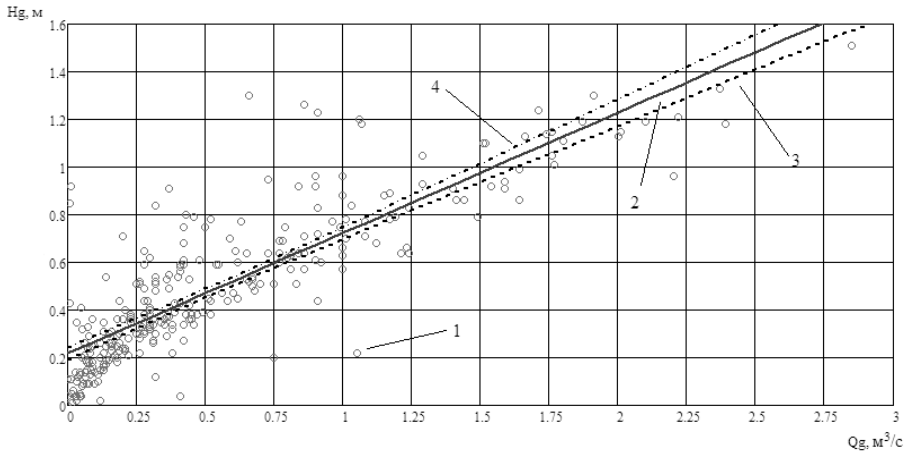


Рис. 8. График связи между среднемесячными расходами ( $Q_g, \text{м}^3/\text{с}$ ) и уровнями ( $H_g, \text{м}$ ) воды в р. Немонинке – с. Тимирязево: точки – данные наблюдений; 1 – данные наблюдений; 2 – уравнение линейной регрессии; 3, 4 – нижний и верхний доверительные интервалы

Небольшой разброс точек относительно графиков уравнения линейной регрессии, помимо неизбежно допускаемых погрешностей при измерении рассматриваемых величин, свидетельствует о протекании различных природных процессов: неустойчивость русла реки, изменчивость уклона водной поверхности в течение года, заторы, вызванные бобрами, и др. Из построенных графиков можно сделать вывод, что р. Злая и Немонинка в равной степени подвергаются таким русловым процессам, как размыв и заиление (зарастание), в то время как русло



р. Матросовки склонно больше к заилению, а размыва фактически не происходит. Это связано с тем, что практически по всей длине р. Матросовки возведены укрепленные дамбы.

### Заключение

Коэффициент парной корреляции между среднемесячными расходами и уровнями воды достаточно высокий, что говорит о тесной стохастической связи. Получены уравнения линейной регрессии, связывающие среднемесячные расходы и уровни воды у исследуемых рек. На основе этих уравнений были построены графики связи между рассматриваемыми величинами, а также рассчитаны и построены границы их доверительных интервалов.

По полученным графикам связи можно определять среднемесячные расходы или уровни воды в исследуемых реках, владея только одним рядом характеристик. Это сильно упрощает гидрологический мониторинг водотоков: через уровень воды можно выразить расход воды, что избавляет от надобности измерять площадь поперечного сечения водотока и его скорость для расчета расхода воды. Подобное упрощение может стать существенным дополнением для потенциальных автоматизированных систем мониторинга рассматриваемых рек.

Также можно сделать вывод о нормальном протекании русловых процессов, поскольку разброс точек на графиках связи в пределах нормы, и обусловлен, на наш взгляд, типичными для рек природными процессами. Более значимые отклонения, выраженные разбросом большего количества точек, сконцентрированных в одной области, говорили бы о серьезном природном или антропогенном воздействии. Такими воздействиями можно считать возведение водохранилища, существенную модификацию водотока, продолжительные засухи или холодные зимы и т. д.

### Список литературы

1. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Маркова Л.В., Смирнова А.А. Результаты натурных исследований малых водотоков на мелиорированных землях региона // Вода: химия и экология. 2013. №7. С. 18–26.
2. Спириин Ю.А., Зотов С.И. Проблемы геоэкологического состояния и использования поверхностных вод Калининградской области // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле. 2019. Т. 29, №2. С. 221–227.
3. Нелюбина Е.А. Некоторые особенности формирования расходов весеннего половодья 2008–2015 годов на реке Инструч // Развитие инженерно-технических методов природообустройства и водопользования. Калининград, 2018.
4. Qiang Z., Chong Yu. Xu., Yongqin D. C. Variability of water levels and impacts of streamflow changes and human activity within the Pearl River Delta, China // Hydrological Sciences Journal. 2010. Vol. 55. P. 518–523.
5. Jian J., Ryu D., Costelloe J.F., Su C.-H. Towards hydrological model calibration using river level measurements // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2017. Vol. 10. P. 95–96.



6. Двинских С.А., Девяткова Т.П., Китаев А.Б., Тереханова Т.А. Динамика кривых расходов воды как индикатор русловых процессов // Географический вестник. 2012. №4. С. 30–40.

7. Гидрологический ежегодник 1961–1964 г. Т. 1, вып. 5, 6 : Бассейны рек Немана, Преголи и Вислы. Л., 1963–1966.

8. Гидрологический ежегодник 1965–1980 г. Т. 1, вып. 5, 6 : Бассейны рек Нямунас, Преголи и Вислы. Вильнюс, 1967–1982.

9. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши 1981–1984 г. Ч. 1 : Реки и каналы. Ч. 2 : Озера и водохранилища. Т. 8, вып. 4 : Бассейны рек Калининградской области. Вильнюс, 1983–1986.

10. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши 1985–1986 г. Ч. 1 : Реки и каналы. Ч. 2 : Озера и водохранилища. Т. 8, вып. 4 : Бассейны рек Калининградской области. Обнинск, 1987–1988.

11. Государственный гидрологический институт : [сайт]. URL: <http://www.hydrology.ru> (дата обращения: 28.01.2020).

12. Институт водных проблем РАН : [сайт]. URL: <http://www.iwp.ru> (дата обращения: 28.01.2020).

13. Калининградская областная научная библиотека : [сайт]. URL: <http://www.lib39.ru> (дата обращения: 28.01.2020).

14. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши 1990–2004 г. Ч. 1 : Реки и каналы. Т. 1, вып. 4 : Бассейны рек Калининградской области. СПб., 2012.

15. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов : [сайт]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 28.01.2020).

16. Спирин Ю.А., Пунтусов В.Г. Особенности формирования уровня грунтовых вод на польдере насосной станции №20а в Славском районе Калининградской области // Мелиорация и водное хозяйство. 2018. №2. С. 27–30.

17. Иванов Е.Г. Об особенностях формирования и способах описания статистических зависимостей в гидрологии // Водное хозяйство России. 2007. №2. С. 22–26.

18. Мойса А.В., Наумов В.А. Ряд максимальных годовых уровней воды малой реки // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2017. Т. 3, №1. С. 15–20.

19. Наумов В.А. Методы обработки гидрологической информации : учебник. Калининград, 2014. С. 125–131.

20. Электронный учебник по статистике : [сайт]. URL: <http://statsoft.ru> (дата обращения: 28.01.2020).

### Об авторе

Юрий Александрович Спирин – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: [spirin1234567890@rambler.ru](mailto:spirin1234567890@rambler.ru)

### The author

Yuri A. Spirin, PhD Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: [spirin1234567890@rambler.ru](mailto:spirin1234567890@rambler.ru)