

Гидрохимическая динамика речного потока по результатам нейросетевого анализа

О. М. Розенталь¹✉, В. Х. Федотов²

¹Институт водных проблем РАН, Российская Федерация
(119333, г. Москва, ул. Губкина, 3)

²Чувашский госуниверситет им. И. Н. Ульянова, Российская Федерация
(428015, г. Чебоксары, Московский проспект, 15)

Аннотация. Цель – анализ влияния расхода воды на характеристики ее качества.

Материалы и методы. Материалы – результаты ежемесячного мониторинга расхода воды реки Исеть и ее качества. Методы – аппарат искусственных нейронных сетей.

Результаты и обсуждение. Оказалось, что влияние расхода воды на характеристики ее качества имеет статистическую природу и для ряда веществ весьма существенное, причем нередко изменяет свой знак с положительного на отрицательный. Выдвинуто предположение о том, что этот эффект обусловлен нелинейными процессами, протекающими в турбулентной водно-экологической системе, находящейся вдали от термодинамического равновесия.

Выводы. Учет обнаруженного эффекта имеет важное практическое значение при принятии водохозяйственных решений, таких как выбор систем водоподготовки и проектирование воспроизводства объектов аквакультуры.

Ключевые слова: качество воды, гидрохимическая динамика, речной поток, искусственные нейронные сети.

Источник финансирования: Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0002 Государственного задания ИВП РАН, номер государственной регистрации 125030703344-8.

Для цитирования: Розенталь О. М., Федотов В. Х. Гидрохимическая динамика речного потока по результатам нейросетевого анализа // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2026, № 1, с. 124-131. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2026/1/124-131>

ВВЕДЕНИЕ

Формирование состава и свойств природных вод происходит под влиянием физико-географических, геологических, антропогенных факторов и зависит от кислотно-основных и окислительно-восстановительных характеристик водного объекта. Очевидны причины зависимости качества воды от режима рек, например, его снижение в период паводка [3, 5]. Однако, труднее объяснить причину высокочастотной изменчивости качества, например, ежемесячной, ежедневной, часовой и субчасовой [2, 14] на створах гарантированного смешения [6] независимо от наполнения русла или его морфометрических характеристик. Предположительно такую изменчивость могут провоцировать гидравлические процессы водного потока [7, 11]. Впрочем, неочевидно, сохраняется ли такая взаимосвязь в условиях высокой антропогенной нагрузки, испытываемой речным потоком в промышленном регионе. Например, визуальный анализ не позволяет обнаружить причинно-следственные связи между расходом воды и каким-либо показателем ее качества, как это видно из рис. 1.

Новизна работы. Впервые выполнен поиск взаимосвязи расхода и показателей качества речной воды промышленного региона методами искусственных нейронных сетей [8].

Цель работы – выявление возможных причинно-следственных связей расхода воды и ее гидрохимических характеристик в условиях пониженной и повышенной антропогенной нагрузки.

Задачи исследования: 1) анализ причинно-следственных связей расхода и гидрохимических характеристик воды, полученных наблюдательной сетью Росгидромета в 2000-2010 гг. в р. Исеть на створах с пониженной антропогенной нагрузкой (створ 1 на 5,2 км выше Екатеринбурга), с высокой техногенной нагрузкой (створы 2 в черте города и 3 – на 7 км ниже города), а также с сельскохозяйственной нагрузкой (створ 4 – на 19,1 км ниже Екатеринбурга и 5 – на 21,3 км выше г. Каменск-Уральского;

2) оценить прогностические возможности нейросетей.

Учитывалось, что массивы гидрологических данных представляют собой неоднородные и нестационарные временные ряды [2, 14], каждый член которых привязан к конкретному моменту времени [1]. Поэтому предварительно выполнялась их сезонная декомпозиция и корректировка общепринятыми методами [12]. После этой обработки полные массивы временных рядов были исследованы с использованием теста Дики-Фуллера на стационарность, а также (с отсеива-



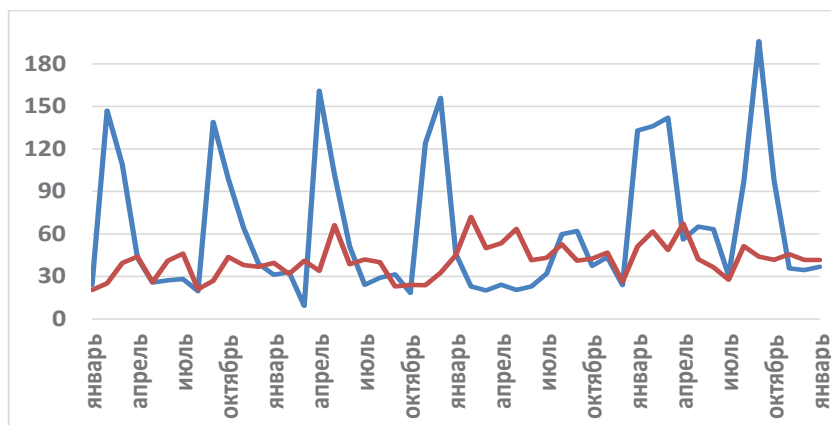


Рис. 1. Концентрация железа общего (мг/дм³, красная линия) и расход воды (м³/с синяя) в Екатеринбурге на створе реки Исеть в 2000-2004 гг.

[Fig. 1. Total iron concentration (mg/dm³, red line) and water consumption (m³/s blue) in Yekaterinburg on the Iset River in 2000-2004]

нием грубых погрешностей результатов измерений) с помощью критерия проверки на однородность Смирнова-Граббса [12]. Как оказалось, при заданном уровне значимости 10 % эти массивы данных оказались однородными и стационарными.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования использовался нейросетевой анализ, преимуществами которого перед классическими статистическими методами являются высокая точность и скорость исследования даже в условиях множественности неструктурированных данных, а также автоматизация исследования и оптимизация выводов.

Согласно методике искусственных нейронных сетей (ИНС) исходные данные разбивались на три множества:

обучающее (*Train*) – основное ($\approx 75\%$), проверочное (*Verify*) – дополнительное ($\approx 20\%$) и тестовое (*Test* $\approx 5\%$).

Выбиралась одна из сетевых архитектур, предназначенная для задач регрессии и прогнозирования: линейная сеть (Linear), многослойный перцептрон (MLP) и сеть с радиальными базисными функциями (RBF). Обучающее и проверочное множества использовались для обучения ИНС различными стандартными для нейросетевых приложений оптимизационными методами: псевдообратных (*Pseudoinvert*), обратного распространения ошибки (*BackPropagation*) и др. Определялась сеть с минимальными ошибками обучения и максимальной корреляцией. В качестве обобщающего показателя рассчитывались веса связей нейросети, которые

Таблица 1

Исследованные на створе 1 сети для массива исходных данных, разбитых на три множества: обучающее – 200, проверочное – 50 и тестовое – 9

[Table 1. Networks studied at section 1 for the array of initial data, divided into three sets: training – 200, verification – 50 and test – 9]

Type	Inputs	Hidden	Outputs	TError	VError	TeError	Training
Linear	1	0	8	0,5313	0,5138	0,4371	PI
RBF	1	4	8	0,2048	0,2338	0,1368	KM, KN, PI
RBF	1	1	8	0,2176	0,2323	0,1880	KM, KN, PI
RBF	1	3	8	0,2076	0,2260	0,1672	KM, KN, PI
RBF	1	2	8	0,2142	0,2154	0,1945	KM, KN, PI
MLP	1	1	8	0,8471	0,6062	0,7226	BP1000, BP982b

Примечание. Type – тип архитектуры сети (Linear – линейная, MLP – многослойный перцептрон RBF – радиальная); Inputs – число нейронов на входе сети; Hidden – число нейронов в промежуточном (Hidden – скрытом) слое сети; Outputs – число нейронов на выходе сети; TError – ошибка на обучающем множестве; VError – ошибка на проверочном множестве; TeError – ошибка на тестовом множестве (ошибка прогноза); Training – алгоритмы обучения (PI – Pseudoinvert, BP – BackPropagation, KN – KvasiNuton и т.д.)

[Note. Type – network architecture type (Linear, MLP – multilayer perceptron, RBF – radial); Inputs – number of neurons at the network input; Hidden – number of neurons in the intermediate (Hidden) layer of the network; Outputs – number of neurons at the network output; TError – error on the training set; VError – error on the validation set; TeError – error on the test set (prediction error); Training – training algorithms (PI – Pseudoinvert, BP – BackPropagation, KN – KvasiNuton, etc)]

Нейрорегрессионная статистика выходных показателей нейросети «Linear 1-0-8» на обучающем (Train), проверочном (Verify) и тестовом множествах (Test) – фрагмент
 [Table 2. Neuroregression statistics of the output indicators of the neural network «Linear 1-0-8» on the training (Train), verification (Verify) and test sets (Test) – fragment]

	БПК ₅ (Train)	БПК ₅ (Verify)	БПК ₅ (Test)	NH ₄ (Train)	NH ₄ (Verify)	NH ₄ (Test)	Fe (Train)	Fe (Verify)	Fe (Test)
Data Mean	7,42	5,69	7,29	2,94	2,00	2,97	1,11	0,83	1,16
Data S.D.	4,64	1,60	4,42	2,70	1,57	2,91	1,06	0,75	0,92
Error Mean	-0,73	0,93	-0,62	-0,34	0,56	-0,38	0,36	0,58	0,28
Error S.D.	4,59	1,49	4,51	2,66	1,51	2,89	0,84	0,64	0,78
Abs E. Mean	2,61	1,39	2,31	1,77	1,24	1,93	0,70	0,68	0,62
S.D. Ratio	0,98	0,93	1,01	0,98	0,96	0,99	0,79	0,86	0,85
Correlation	0,15	0,36	-0,04	0,15	0,28	0,13	0,60	0,58	0,56

Примечание. Data Mean – среднее значение концентрации на створе. Data Standard Deviation (S.D.) – стандартное отклонение (от среднего значения Data Mean) концентрации на створе. ErrorMean – средняя ошибка (средняя остаточная разность между измеренными и расчетными (по нейросети) концентрациями на створе. Error S.D. – стандартное отклонения исходных данных от расчетных по нейросети. Abs E. Mean – абсолютная средняя ошибка (среднее арифметическое модулей разностей между исходным и расчетным значениями на створе). S.D. Ratio = Error S.D./Data S.D – относительная ошибка нейрорегрессии. Correlation – коэффициенты корреляции (для разных веществ на обучающем, проверочном и тестовом множествах).

[Note. Data Mean is the average value of the cross-section concentration. Data Standard Deviation (S.D.) is the standard deviation (from the average value of Data Mean) of the cross-section concentration. ErrorMean is the average error (the average residual difference between the measured and calculated (by the neural network) concentrations at the cross-section. Error S.D. is the standard deviation of the original data from the calculated ones by the neural network. Abs E. Mean is the absolute average error (the arithmetic mean of the absolute values of the differences between the original and calculated values at the cross-section). S.D. Ratio = Error S.D./Data S.D is the relative error of neural regression. Correlation is the correlation coefficients (for different substances on the training, validation and test sets)]

интерпретировались как коэффициенты нейрорегрессии (для линейных сетей и двухслойного персептрона). На основе полученной модели выполнялось нейропрогнозирование на данных тестового множества, которые не участвовали в обучении и контроле. Результаты прогнозирования сравнивались с тестовыми данными для оценки достоверности прогноза, т.к. именно эти данные не участвовали в обучении сети.

Общие параметры ИНС разной архитектуры:

– входной слой включал один показатель – расход воды, м³/с;

– выходной слой включал восемь показателей – сезонно-скорректированные концентрации: БПК₅, NH₄⁺, железо общее, Cu²⁺, Zn²⁺, Ni²⁺, Mn²⁺, АПАВ (все в мг/дм³ кроме БПК₅ в мгО/дм³ и меди, для которой мкг/дм³) в 2000-2010 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Опишем результат исследования на примере створа 1. В таблице 1 приведены использованные ИНС разной архитектуры с минимальными ошибками обучения (TError), верификации (VError) и тестирования (TeError).

Как видно из таблицы 1, линейная сеть показывает средние по сравнению с нелинейными сетями ошибки обучения и может использоваться для дальнейшего анализа без существенной потери точности (табл. 2).

Из таблицы 2 видно, что наилучшим образом сеть воспроизводит зависимости между расчетными и исходными концентрациями Fe (максимальная корреляция на всех множествах).

Обобщающим показателем структуры сети являются веса связей ИНС. Число таких связей для сети «Linear 1-0-8» равно (1+1)× 8 = 16 (один входной нейрон, один скрытый нейрон и восемь выходных нейронов) (табл. 3).

Столбцы таблицы 3 можно интерпретировать как пары коэффициентов уравнения нейрорегрессии для каждого постороннего вещества в воде. В строке RASHOD приведены коэффициенты нейрорегрессии для каждого из восьми входных показателей, а в строке Threshold – свободные коэффициенты, характеризующие влияние неучтенных на входе сети факторов. Данные таблицы 3, описывают 8 линейных уравнений ней-

Веса связей линейной сети «Linear 1-0-8»
 [Table 3. Weights of links of the linear network «Linear 1-0-8»]

	БПК ₅	NH ₄	Fe	Cu	Zn	Ni	Mn	АПАВ
Threshold	-0,11	-0,10	0,05	-0,29	-0,09	-0,04	-0,14	-0,05
RASHOD	0,12	0,16	0,55	0,29	0,42	0,53	0,56	0,37

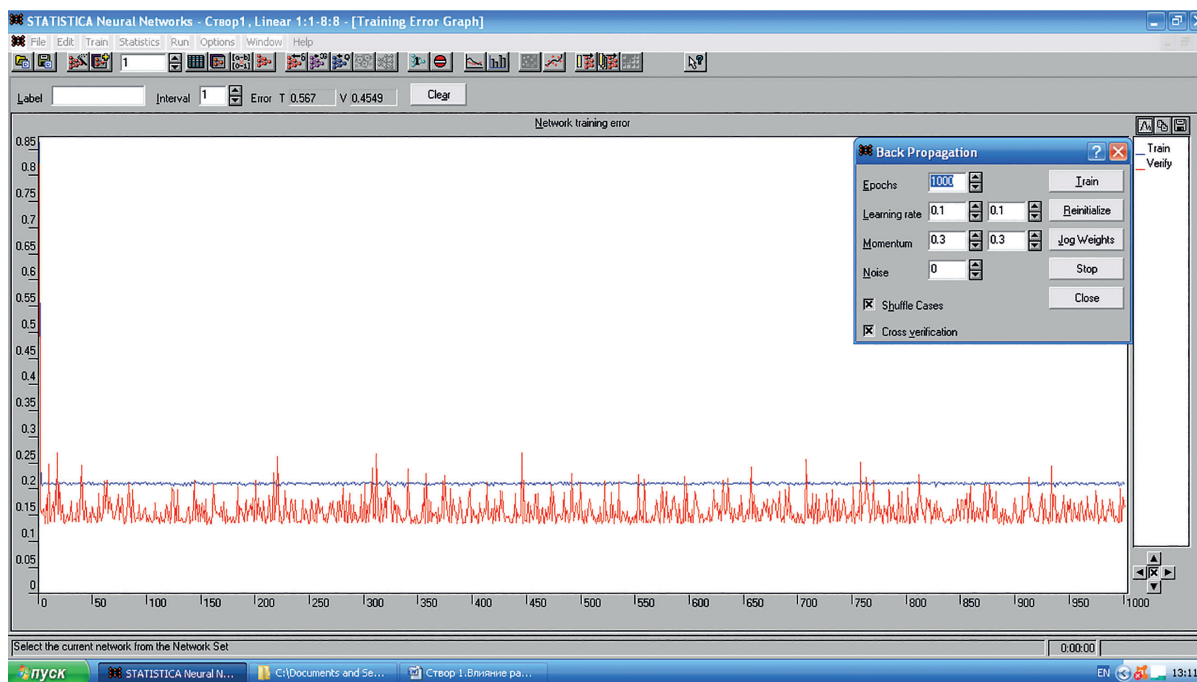


Рис. 2. Обучение нейросети методом ВР в программе Statistica Neural Network
 [Fig. 2. Training a neural network using the BP method in Statistica Neural Network]

рорегрессии вида: $BPK_5 = 0,12 \times RASHOD - 0,11$, $NH_4 = 0,16 \times RASHOD - 0,10$ и т.д. Они свидетельствуют о положительном влиянии расхода воды на концентрацию всех посторонних веществ, т.е., с ростом расхода растут и их концентрация. Видно, что наиболее сильное влияние (вес $> 0,5$) оказывается на концентрации Fe, Ni и Mn. Неучтенные факторы (Threshold) слабо влияют на содержание всех посторонних веществ, кроме Cu.

На рисунке 2 в правом верхнем углу показаны параметры обучения по алгоритму ВР: максимальное число эпох обучения (*Epoches*) = 1000, скорость обучения (*Learningrate*), коэффициент инерции (*Momentum* = 0,3), величина шума (*Noise* = 0). Наиболее важными управляющими параметрами являются скорость обучения, инерция и перемешивание наблюдений в процессе обучения (*ShuffleCases*) – их значения выбраны стандартными (по умолчанию), т.к. окончательных рекомендаций здесь

не существует и «оптимальное» значение подбирается опытным путем интуитивно. Качество работы сети проверялось на каждой эпохе (этот термин применяется в нейросетях для обозначения вычислительных итераций) с помощью контрольного множества (*Crossverification*). Внизу показан график ошибки обучения (*Training Error Graph*), где отображаются среднеквадратичная ошибка обучающего множества (синяя линия) и среднеквадратичная ошибка проверочного множества (красная линия) и их значения на данной эпохе (0,567 и 0,4549 соответственно). Эти ошибки колебались, но в среднем оставались примерно постоянными.

Для оценки адекватности полученной модели сети проведено нейропрогнозирование показателей качества воды (концентраций веществ) в зависимости от ее расхода на данных, не использованных при обучении и проверке (табл. 4).

Таблица 4

Результаты нейропрогнозирования на тестовых данных
 [Table 4. Neuroprognosis results on test data]

RASHOD	Нейропрогноз (результат расчета) / Neuroprognosis (calculation result)			Исходные данные (тестовые) / Initial data (test)			Ошибка нейропрогноза (абсолютная) / Neuroprognosis error (absolute)			Ошибка нейропрогноза (%) / Neuroprognosis error (%)		
	Fe	Ni	Mn	Fe	Ni	Mn	Fe	Ni	Mn	Fe	Ni	Mn
18,05	1,7	23,75	219,3	2,37	27,47	208,79	-0,66	-3,71	10,51	27,85	13,51	5,03
12,78	0,98	16,08	173,77	0,81	14,11	156,36	0,17	1,97	17,41	20,99	13,96	11,13
20,79	2,07	27,74	242,97	2,74	35,11	268,78	-0,66	-7,36	-25,8	24,09	20,96	9,60

Примечание. Ошибка нейропрогноза (%) рассчитывалась по формуле $\{[(C_i - C_i^*)/C_i]^2\}^{1/2} \times 100$, где $(C_i - C_i^*)$ – ошибка нейропрогноза (абсолютная); C_i – исходное значение концентрации.

[Note. The neuroprediction error (%) was calculated using the formula $\{[(C_i - C_i^*)/C_i]^2\}^{1/2} \times 100$, where $(C_i - C_i^*)$ is the neuroprediction error (absolute); C_i is the initial concentration value]

Как видно из таблицы 4, ошибка нейропрогноза не превышает 30 %, что ниже погрешности измерения контролируемых показателей, приписанная норма которой для рассматриваемых металлов достигает 50 % и более¹. Это означает, что сеть неплохо предсказывает по заданному расходу концентрации веществ даже для новых исходных данных, что позволяет использовать ее для оценочного прогноза динамики речного потока.

Детальные выводы по створу 1:

– линейная и нелинейные сети показывают близкие результаты;

– неучтенные факторы слабо влияют на посторонние вещества в воде (это выявлено при анализе таблицы 3);

– заметно преобладающее положительное влияние расхода воды на концентрацию металлов Fe, Ni и Mn (коэффициент нейрорегрессии $0,53 \div 0,56$);

– менее заметно влияние расхода на Zn и АПАВ ($0,37 \div 0,42$) (см. табл. 3).

– слабое влияние расхода на остальные посторонние вещества ($0,12 \div 0,29$).

Аналогичные исследования проведены для остальных створов вблизи Екатеринбурга (табл. 5).

Таблица 5

Результаты исследования уровней влияния расхода воды на концентрацию:
четные строки – коэффициенты нейрорегрессии контролируемых показателей и расхода воды,
нечетные строки – свободные члены (неучтенные факторы)

[Table 5. Results of the study of the levels of influence of water consumption on the concentration:
even lines – coefficients of controlled neuroregression indicators and water consumption,
odd lines – free terms (unaccounted for factors)]

№	Контролируемый показатель / Controlled indicator							
	БПК ₅	NH ₄	Fe	Cu	Zn	Ni	Mn	АПАВ
	Створ 1							
1	-0,10	-0,10	0,01	-0,37	-0,12	-0,09	-0,21	-0,04
2	0,12	0,14	0,62	0,33	0,45	0,58	0,60	0,41
	Створ 2							
3	-0,45	-0,44	-0,32	-0,42	-0,54	-0,36	-0,46	-0,40
4	-0,35	-0,62	0,14	-0,03	-0,25	-0,34	-0,31	-0,44
	Створ 3							
5	-0,73	-0,49	-0,85	-0,67	-0,64	-0,47	-0,39	-0,36
6	-0,77	0,90	-0,95	-0,72	-0,95	-0,75	0,93	0,12
	Створ 4							
7	-0,30	-0,47	-0,02	-0,26	-0,21	-0,08	-0,29	-0,22
8	0,38	-0,24	0,88	0,80	0,56	0,69	0,63	0,79
	Створ 5							
9	-0,52	-0,19	-0,26	-0,83	-0,83	-0,23	-0,49	0,40
10	0,52	0,46	0,56	0,61	-0,78	0,91	-0,89	0,96

Здесь уравновешивающая роль неучтенных факторов приводит к тому, что с ростом их величины статистические связи расхода воды и показателей ее качества снижаются. Поэтому наиболее убедительно выглядят высокие коэффициенты нейрорегрессии для Fe, Zn, Ni, Mn (створ 1), для Fe, Zn, Ni, Mn, АПАВ (створ 4), где значения Threshold сравнительно невелики ($< 0,25$). В других случаях влияние расхода на состав и свойства воды оказывается менее определенным предположительно из-за интенсивного водопользования в рассматриваемом промышленно-развитом регионе.

Нейрорегрессионный анализ указывает на влияние речной гидравлики (расхода воды) на гидрохимическую динамику. Природа такого влияния не выяснена, однако, можно предположить, что эффект связан с характером гидратации посторонних веществ в водных

растворах [7], с турбулентностью потока воды [10] и рельефом речного русла. Направленность такого влияния, например, положительная для NH₄ и Mn и отрицательная, обнаруженная для БПК, Fe, Cu, Zn и Ni на створе 3, указывает на высокий вклад случайных отклонений концентрации под влиянием антропогенных воздействий, повышенных в зоне этого створа. При этом также можно предположить, что определенное влияние оказывает совокупность таких факторов, как ионно-молекулярные силы в сетке водородных связей воды, микропульсации, а также формирование прямого и обратного каскадов энергии в турбулентной системе речного потока [10, 13]. Физиками, например, в [4], отмечено, что даже малые отклонения, которые «быстро нарастают... и всегда есть в физических, химических системах, в отличие от равновесных процессов, изуча-

¹ ГОСТ 27384-2002. Вода. Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств.

емых классической термодинамикой, определяют всю дальнейшую судьбу нелинейной системы».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные коэффициенты регрессии позволили охарактеризовать уровень влияния, величину и направление изменения состава и свойств воды (зависимых переменных) для единичного изменения расхода (независимой переменной). Из таблицы 5 видно, что изменения в независимой переменной неизменно влияют на зависимую. Абсолютная величина такой причинно-следственной связи практически ни разу не становится незначительной (не снижается до уровня 0,1).

Необходимо отметить:

1) Искомая связь сравнительно велика, а неучтенные факторы незначительны на створе 1, расположенном в дачной зоне, где на воду оказывается минимальная антропогенная нагрузка;

2) На створах 2 и 3, расположенных в зонах высокой техногенной нагрузки, указанная связь также велика, но носит неоднозначный характер. В одних случаях рост или снижение расхода воды сопровождается таким же изменением гидрохимических показателей (БПК₅, Zn, Ni), в других - ситуация обратная, уменьшение расхода вызывает увеличение гидрохимического показателя, а увеличение первого – снижение второго (NH₄⁺, Fe, Mn). Очевидно, что свой вклад в эти взаимосвязи вносят сбросы крупных преимущественно металлургических предприятий, влияние которых необходимо учитывать контрольно-надзорным органам. Впрочем, это – предварительный вывод, требующий уточнения, поскольку из таблицы 5 видно, что в большинстве случаев здесь велика роль неучтенных факторов.

3) Неоднозначно и влияние расхода воды на разные гидрохимические показатели на створах 4,5. Такая прямая связь (БПК₅, Cu, АСПАВ, Fe, Ni), хотя для первых трех показателей она неубедительна из-за высокого влияния неучтенных факторов. Противоположный характер имеет это влияние на Mn и NH₄⁺. Здесь возможно преимущественное влияние подземных водоносных слоев, а для последнего вещества – также и процессов, связанных с перемещением азотных соединений в почве, аммонификацией органических соединений (гумуса, удобрений, растительных остатков, отмерших тел животных и микроорганизмов).

Таким образом, на примере анализа данных наблюдательной сети Росгидромета на реке Исеть показано, что расход воды оказывает заметное влияние на состав и свойства как в случаях слабой, так и повышенной антропогенной нагрузки. Такое влияние не всегда сводится к совместному симбатному увеличению/уменьшению контролируемых показателей. Взаимодействие может быть и антибатным, но в большинстве случаев достоверно фиксируется средствами нейроанализа.

В настоящее время нет достоверной информации о природе обнаруженной динамической причинно-следственной связи. Можно лишь предположить, что таков результат совместного воздействия физико-химических и гидравлических факторов, действующих в нелинейной системе, находящейся вдали от термодинамического равновесия. Вне зависимости от природы эффекта, он имеет научное и практическое значение для принятия водохозяйственных решений при выборе систем водоподготовки и проектировании воспроизводства объектов аквакультуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вентцель Е.С. *Теория вероятностей*. Москва: КноРус, 2010. 658 с.
2. Данилов-Данильян В.И., Розенталь О.М. Закономерности гидрохимической динамики в двумерном турбулентном потоке природной воды // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*, 2023, т. 512, № 1, с. 143-149.
3. Долгоносов Б.М., Корчагин К.А. Статистическая оценка взаимосвязи расхода воды в реке и мутности воды в водозаборных сооружениях // *Водные ресурсы*, 2005, т. 32, № 2, с. 196-204.
4. Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. *Синергетика и прогнозы будущего*. Москва: УРСС, 2019. 286 с.
5. Прожорина Т.И., Куролап С.А., Каверина Н.В. Гидрохимия речных вод Воронежской городской агломерации // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2020, № 3, с. 78-85.
6. РД 52.24.309-2016 *Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши*.
7. Родникова М.Н. *Об упругости пространственной сетки водородных связей в жидкостях и растворах. Структурная самоорганизация в растворах и на границе фаз*. Москва: ЛКИ, 2008, с. 151-198.
8. Розенталь О.М., Федотов В.Х. Нейросетевой анализ как метод водно-экологического регулирования // *Водные ресурсы*, 2023, т. 50, № 3, с. 1-12.
9. Чашечкин Ю.Д., Розенталь О.М. Структура речного потока и ее влияние на распределение загрязняющего воду вещества // *Водные ресурсы*, 2019, т. 46, № 6, с. 582-591.
10. Boffetta G., Ecke R.E. Two-Dimensional Turbulence // *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2012, vol. 44, no. 1, pp. 427-451.
11. Kirchner J.W., Feng X.H., Neal C., Robson A.J. The fine structure of water-quality dynamics: the (high-frequency) wave of the future // *Hydrological Processes*, 2004, no. 18, pp. 1353-1359.
12. McClave J.T., Sincich T. *Statistics*. Pearson Education Inc., 2020. 896 p.
13. Nilsson A., Pettersson L. G. M. Perspective on the structure of liquid water // *Chemical Physics*, 2011, vol. 389, no. 1-3, pp. 1-34.
14. Wilby R., Gilbert J. *Hydrological and hydrochemical dynamics*. In: scientific collection of works «The Fluvial Hydrosystems». Chapman&HallLtd: 1996. pp. 37-67.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 13.03.2025

Принята к публикации: 27.02.2026

Hydrochemical Dynamics of River Flow Based on Neural Network Analysis Results

O. M. Rosenthal¹✉, V. Kh. Fedotov²

¹*Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation
(3, Gubkin Str., Moscow, 119333)*

²*Chuvash State University named after I. N. Ulyanov, Russian Federation
(15, Moskovsky Ave., Cheboksary, 428015)*

Abstract. The purpose is to analyze the impact of water consumption on its quality characteristics.

Materials and methods. The materials are the results of monthly monitoring of water consumption in the Iset River and its quality. **Methods** are the apparatus of artificial neural networks.

Results and discussion. It turned out that the influence of water consumption on its quality characteristics has a statistical nature and is very significant for a number of substances, and often changes its sign from positive to negative. It is suggested that this effect is due to nonlinear processes occurring in a turbulent water-ecological system located far from thermodynamic equilibrium.

Conclusions. Taking into account the discovered effect is of great practical importance when making water management decisions, such as the choice of water treatment systems and the design of reproduction of aquaculture objects.

Key words: water quality, hydrochemical dynamics, river flow, artificial neural networks.

Funding: The work was carried out within the framework of topic No. FMWZ-2025-0002 of the State Assignment of the IWP RAS, State Registration Number 125030703344-8.

For citation: Rosenthal O. M., Fedotov V. Kh. Hydrochemical Dynamics of River Flow Based on Neural Network Analysis Results. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografija. Geoekologiya*, 2026, no. 1, pp. 124-131. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2026/1/124-131>

REFERENCES

1. Ventcel' E. S. *Teorija verojatnostej* [Probability theory]. Moscow: KnoRus, 2010. 658 p. (In Russ.)
2. Danilov-Danil'jan V. I., Rosenthal' O. M. Zakonomernosti gidrohimičeskoj dinamiki v dvumernom turbulentnom potoke prirodnoj vody [Patterns of hydrochemical dynamics in a two-dimensional turbulent flow of natural water]. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle*, 2023, vol. 512, no. 1, pp. 143-149. (In Russ.)
3. Dolgonosov B. M., Korchagin K. A. Statističeskaja ocenka vzaimosvjazi rashoda vody v reke i mutnosti vody v vodozabornyh sooruzhenijah [Statistical assessment of the relationship between river water flow and turbidity in water intake facilities]. *Vodnye resursy*, 2005, vol. 32, no. 2, pp. 196-204. (In Russ.)
4. Kapica S. P., Kurdjumov S. P., Malineckij G. G. *Sinergitika i prognozy budushhego* [Synergetics and future forecasts]. Moscow: URSS, 2019. 286 p. (In Russ.)
5. Prozhorina T. I., Kurolap S. A., Kaverina N. V. Gidrokhi-miya rečnykh vod Voronezhskoy gorodskoy aglomeratsii [Hydrochemistry of River Waters in the Voronezh Urban Agglomeration]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografija. Geoekologiya*, 2020, no. 3, pp. 78-85. (In Russ.)
6. RD 52.24.309-2016 *Organizacija i provedenie rezhimnyh nabljudenij za sostojanijem i zagriznieniem poverhnostnyh vod su-shi* [RD 52.24.309-2016 Organization and conduct of routine monitoring of the state and pollution of land surface waters]. (In Russ.)
7. Rodnikova M. N. *Ob uprugosti prostranstvennoj setki vodnorodnyh svyazej v zhidkostjah i rastvorah. Strukturnaja samo-organizacija v rastvorah i na granice faz* [On the elasticity of the spatial network of hydrogen bonds in liquids and solutions. Structural self-organization in solutions and at the phase boundary, 2008, pp. 151-198.]. Moscow: LKI, pp. 151-198. (In Russ.)
8. Rosenthal' O. M., Fedotov V. H. Nejrosetevoj analiz kak metod vodno-jekologičeskogo regulirovanija [Neural network analysis as a method of water and environmental regulation]. *Vodnye resursy*, 2023, vol. 50, no. 3, pp. 1-12. (In Russ.)
9. Chashechkin Ju. D., Rosenthal' O. M. Struktura rečnogo potoka i ee vlijanie na raspredelenie zagriznjajushhego vodu veshhestva [The structure of the river stream and its effect on the distribution of water pollutants]. *Vodnye resursy*, 2019, vol. 46, no. 6, pp. 582-591. (In Russ.)
10. Boffetta G., Ecke R. E. Two-Dimensional Turbulence. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2012, vol. 44, no. 1, pp. 427-451.
11. Kirchner J. W., Feng X. H., Neal C., Robson A. J. The fine structure of water-quality dynamics: the (high-frequency) wave of the future. *Hydrological Processes*, 2004, no. 18, pp. 1353-1359.
12. McClave J. T., Sincich T. *Statistics. Pearson Education Inc.*, 2020. 896 p.
13. Nilsson A., Pettersson L. G. M. Perspective on the structure of liquid water. *Chemical Physics*, 2011, vol. 389, no. 1-3, pp. 1-34.
14. Wilby R., Gilbert J. *Hydrological and hydrochemical dynamics*. In: scientific collection of works «The Fluvial Hydrosystems». Chapman&HallLtd: 1996. pp. 37-67.

© Rosenthal O. M., Fedotov V. Kh., 2026

✉ Oleg M. Rosenthal, e-mail: omro3@yandex.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 13.03.2025

Accepted: 27.02.2026

Розенталь Олег Моисеевич

Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института водных проблем РАН, г. Москва, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-6261-6060, e-mail: omro3@yandex.ru

Федотов Владислав Харитонович

Кандидат химических наук, доцент кафедры информационных систем Чувашского государственного университета, г. Чебоксары, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-8395-6849, e-mail: fvh@inbox.ru

Oleg M. Rosenthal

Dr. Sci. (Engin.), Professor, Chief Researcher at the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-6261-6060, e-mail: omro3@yandex.ru

Vladislav Kh. Fedotov

Cand. Sci. (Chem.), Assoc. Prof. at the Department of Information Systems, Chuvash State University, Cheboksary, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-8395-6849b, e-mail: fvh@inbox.ru