

УДК 543.3; 543.08

НЕЙРО-НЕЧЕТКИЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕЧНОГО ПОТОКА

© 2024 г. О. М. Розенталь^{а,*}, В. Х. Федотов^б

^аИнститут водных проблем Российской академии наук

ул. Губкина, 36, Москва, 119333, Россия

^бЧувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова

Московский просп., 15, Чебоксары, Чувашская Республика, 428015, Россия

*E-mail: omro3@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.03.2024 г.

После доработки 30.05.2024 г.

Принята к публикации 09.06.2024 г.

Производственные и социально-экологические требования, предъявляемые к качеству вод суши, определили необходимость создания сети гидрохимических постов наблюдения, а вариабельность контролируемых показателей – потребность выполнения режимных химико-аналитических исследований. Распространенные в аналитической химии стандартные (жесткие) статистические методы обработки результатов измерений, как правило, недоучитывают специфику исследования зашумленных (нечетких) экспериментальных данных, каковыми являются ряды значений концентрации примеси речного потока в пространстве и во времени. Показано, что в этом случае целесообразны альтернативные средства мягких вычислений, предназначенные для обработки именно таких данных, на основе нейро-нечетких гибридных алгоритмических структур, относящихся к архитектуре ANFIS. Проанализированные таким способом массивы химико-аналитических данных по меди и цинку на р. Волга в зависимости от расхода воды на разных удалениях от берега и глубинах позволили идентифицировать сложно-колебательный характер поведения концентраций обоих веществ в водном потоке. Сделан вывод о том, что нейро-нечеткая схема обработки результатов мониторинга обеспечивает возможность углубленного исследования малоизученных процессов гидрохимической динамики в далеких от термодинамического равновесия системах, к числу которых относятся природные водотоки.

Ключевые слова: результаты химико-аналитических исследований, распределение микропримесей в створе реки, нелинейная динамическая система, нейро-нечеткий метод анализа гидрохимических данных.

DOI: 10.31857/S0044450224110126, EDN: swiwfu

Аналитическая служба как система определения химического состава и свойств веществ исключительно важна при изучении природных объектов [1], в которых на поведение контролируемых показателей влияет окружающая среда [2–4]. В частности, не вызывает сомнений значение аналитического контроля речной воды для принятия водохозяйственных решений, управления водоснабжением промышленности и населения, орошения и рыболовства [5–7]. Впрочем, здесь своевременная и полная расшифровка химико-аналитической информации затрудняется из-за непрерывного пространственно-временного перераспределения химических веществ, предположительно обусловленного

нелинейными русловыми процессами в водных потоках [8, 9]. Свою роль играют и внешние факторы (климат, погода, процессы выветривания и выщелачивания и пр.), однако даже на створах (поверхностях условного поперечного сечения водотока, используемых для оценок качества воды) так называемого полного смешения [10] вариабельность состава и свойств воды обычно не снижается [11, 12]. Несмотря на это, формируются более и менее загрязненные слои (струи), занимающие определенные части сечения водного потока [13] – в его центре, у берегов или на разных глубинах (официальные термины – вертикали и горизонты на каждую вертикаль в створе пункта наблюдений [14]).

Контроль такого распределение микропримесей в створе реки в зависимости от морфометрических (глубина, ширина) и гидрометрических (расход воды) показателей позволяет правильно локализовать области повышенного загрязнения и регулирования техногенной нагрузки на водный объект. В связи с этим гидрохимические посты Росгидромета периодически определяют качество воды, по возможности одновременно в нескольких точках поперечного профиля реки. Водохозяйственное использование получаемой информации недостаточно полное, поскольку расшифровка пространственно-временных массивов результатов измерений затруднительна. В этом нетрудно убедиться на примере данных Астраханского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды на р. Волге, приведенных на рис. 1. Как видно, повышенная вариабельность контролируемых показателей не позволяет различить их распределение в струях воды. Можно лишь сделать вывод о полном отсутствии здесь седиментационно-диффузионного равновесия, но не о повышенном содержании одного из веществ в поверхностной или донной частях речного потока. Даже тренды изменения концентрации в разные моменты времени на поверхности и в глубине потока могут быть однотипными (цинк на рис. 1) или различающимися (там же, медь). Между тем для управления водными ресурсами и водопользованием необходимо знание профиля концентрации загрязняющих веществ в зависимости от таких факторов стратификации, как концентрация контролируемых показателей в вертикальном и горизонтальном разрезе речного русла реки при разном количестве (расходе) воды, протекающей через живое сечение потока за единицу времени.

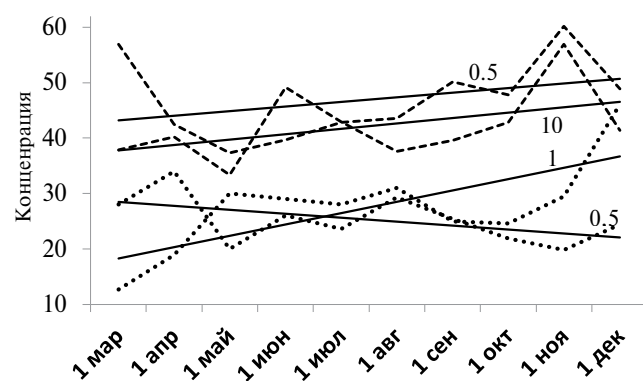


Рис. 1. Концентрации в 2021 г. (за исключением двух первых месяцев) меди (увеличенные в 10 раз, пунктирные линии) и цинка (штриховые линии), а также их линейные тренды (здесь и далее мкг/л, точечные линии) на глубинах, указанных на рисунке в метрах.

Цель настоящей работы — апробация нейро-нечеткого (гибридного) метода определения и прогноза пространственно-временных (панельных) закономерностей распределения микропримесей воды в каждой точке поперечного профиля речного потока на основе данных гидромониторинга, полученных на заданных глубинах и расстояниях от берега.

НЕЙРО-НЕЧЕТКИЙ МЕТОД МНОГОМЕРНОГО ГИДРОХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Решение сформулированной химико-аналитической задачи требует выбора из многочисленных возможных вариантов заключений о составе и свойствах воды наиболее достоверного в условиях высокой вариабельности каждого контролируемого показателя и погрешности измерений, приписанные характеристики которой для упомянутых выше цинка и меди в воде составляют (на уровне норматива качества) ± 20 и $\pm 25\%$ соответственно [15]. Поскольку с приведенными значениями погрешностей соизмерима также и ошибка репрезентативности (расхождения между значениями концентраций, полученными по ежемесячной выборке, и соответствующими параметрами генеральной совокупности) [16], зависимости на рис. 1 уже не будут столь определенными (рис. 2), что еще больше затруднит задачу интерпретации результатов химико-аналитических измерений.

Решение задач, аналогичных поставленной, обычно осуществляется распространенными в аналитической химии стандартными (жесткими) многомерными статистическими методами обработки результатов измерений, которые не учитывают в достаточной мере специфику исследования зашумленных (нечетких) экспериментальных данных. Как следствие, полученные выводы могут оказаться недостаточно достоверными. В связи

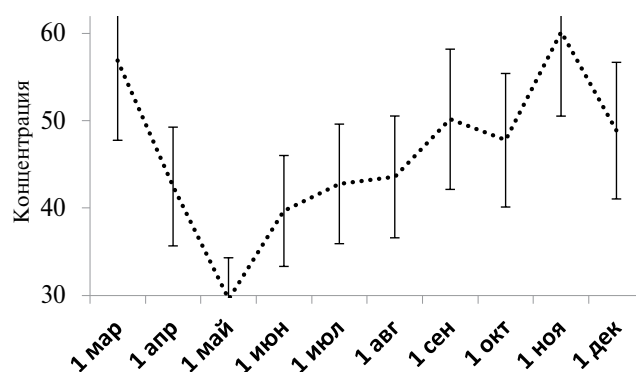


Рис. 2. Найденная концентрация и погрешность измерения (вертикальные отрезки) цинка на глубине 0.5 м в 2021 г.

с этим представляет интерес использование альтернативных средств мягких вычислений на основе нейросетевых и нечетких моделей, построенных на нестандартных эвристических алгоритмах, аналогичных процессам живой природы. Комбинации этих моделей позволяют конструировать гибридные сетевые структуры, связывающие (достаточно точно для аналитической практики) входные и выходные показатели [17–21], количество которых определяется экспертно на основе объема и качества данных гидромониторинга. Математическим обоснованием этих структур является так называемая теорема FAT (Fuzzy Approximation Theorem), в которой доказано, что такие нейро-нечеткие гибридные алгоритмические структуры могут с хорошей точностью аппроксимировать различные природные закономерности и делать достоверные выводы [17, 18].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе нами использовалась нейро-нечеткая система, относящаяся к архитектуре ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), входящая в состав комплекса программ нечеткой логики Matlab Fuzzy Logic Toolbox [20, 21] и уже показавшая свою эффективность при поиске скрытых зависимостей между исследуемыми наборами гидрологических данных [8–11]. Сформирована адаптивная экспертная система построения нечетких выводов, основанная на нейро-нечетком (гибридном) методе обучения моделей типа Сугэно [19]. Результатом обучения является алгоритмическая структура, которая не описывается формальными математическими уравнениями, но может быть представлена в графической или табличной форме практически с любой необходимой точностью.

Общая схема построения гибридной водно-экологической модели:

- выбор числа и типа функций принадлежности для описания значений входных переменных (точек отбора проб, расхода воды), влияющих на найденную концентрацию загрязняющих воду веществ;
- выбор числа и типа функций принадлежности для описания значений выходных переменных, соответствующих значениям входных переменных;
- обучение модели на экспериментальных данных (определение параметров функций принадлежности);
- построение нейро-нечетких логических выводов с помощью обученной модели (прогнозирование);
- приведение нечетких выводов к четкой форме (дефаззификация методом взвешенного среднего (центроидным) [20, 21]).

Использовали результаты химико-аналитических измерений, выполненных в 2021 г. общим

объемом 114 данных по каждому контролируемому показателю (рис. 1). В качестве входных переменных принимали следующие: удаление от берега точки пробоотбора (“Ширина”), глубина (“Глубина”) и текущий расход воды (“Расход”). Свойства каждой входной переменной описывали с помощью экспертно-задаваемого числа нечетких аналогов нормальных функций распределения вероятности (принадлежности):

$$f(x) = \exp(-(x - \mu_x)^2 / 2\sigma_x^2) / (\sigma_x \sqrt{2\pi}), \quad (1)$$

где $f = (f_1, f_2, \dots)$ – вектор функций принадлежности входных переменных; $x = (x_1, x_2, \dots)$ – вектор значений входных переменных; σ_x – вектор стандартных отклонений входных переменных; μ_x – вектор средних значений входных переменных (математических ожиданий). Свойства выходных переменных (меди и цинка) описывались нечеткими аналогами линейных функций принадлежности:

$$g(y) = \sum \alpha x + \beta, \quad (2)$$

где $g = (g_1, g_2, \dots)$ – вектор функций принадлежности выходных переменных; $y = (y_1, y_2, \dots)$ – вектор значений выходных переменных; α, β – вектора коэффициентов нейро-нечеткой линейной регрессии.

Параметры приведенных функций определялись по алгоритму гибридного (hybrid) обучения модели в соответствии с набором нечетких продукционных правил вывода Сугэно [19] и некоторым количеством условий (комбинаций значений входных переменных x и нечетких операций, результат которых в дальнейшем подвергался дефаззификации – приведению к четкости), после чего устанавливались значения выходной переменной y .

В данной работе по данным гидрохимических измерений определяли структуру обучающей выборки, выполняли выбор числа и вида функций распределения для входных и выходных переменных, осуществляли обучение модели и тестирование ее качества (точности воспроизведения учебных данных). Это обеспечивало достаточно достоверное прогнозирование значений выходной переменной для промежуточных данных, отсутствующих в экспериментальной выборке (нечеткая интерполяция).

Объем данных для обоих веществ, загрязняющих воду, образовывал 113 наблюдений, которые делили на группы: обучающие (1–0), тестовые (101–0) и остальные проверочные. При этом в соответствии с химико-аналитическими данными Росгидромета входной переменной “Ширина” являлась точка пробоотбора, удаленная от правого берега (линии уреза) на расстояние, отнесенное к ширине реки на величину 0.2, 0.5 и 0.8, переменной “Глубина” – точка на глубинах 0.5, 5 и 10 м, а точка “Расход” принимала множество

дискретных значений в интервале 2080–7300 м³/с. Число и вид функций принадлежности для входных переменных принимали равными 3, 3, 8. Параметры функций принадлежности входных переменных (1), найденные в результате гибридного обучения, приведены ниже:

$$f(A) = \exp(-(A - \mu_A)^2 / 2\sigma_A^2) / (\sigma_A \sqrt{2\pi}), \quad (3)$$

$$f(B) = \exp(-(B - \mu_B)^2 / 2\sigma_B^2) / (\sigma_B \sqrt{2\pi}), \quad (4)$$

$$f(C) = \exp(-(C - \mu_C)^2 / 2\sigma_C^2) / (\sigma_C \sqrt{2\pi}), \quad (5)$$

где A – “Ширина”, B – “Глубина”, C – “Расход”; $\sigma_A = [0.1034, 0.0681, 0.1033]$, $\mu_A = [0.1909, 0.4828, 0.8091]$ – вектора стандартных отклонений и математических ожиданий трех функций принадлежности переменной A ; $\sigma_B = [2.0086, 1.8388, 2.0369]$, $\mu_B = [0.5076, 5.3349, 9.9916]$ – вектора стандартных отклонений и математических ожиданий трех функций принадлежности B ; $\sigma_C = [316.7060, 316.7060, 316.6750, 316.7017, 316.6765, 316.6748, 316.6757, 316.6769]$, $\mu_C = [2080.0325, 2825.7075, 3571.4090, 4317.1320, 5062.8599, 5808.5711, 6554.2855, 7299.9995]$ – векторы стандартных отклонений и математических ожиданий восьми функций принадлежности C . В результате гибридного обучения построили $3 \times 3 \times 8 = 72$ функции принадлежности вида (2) для выходных переменных “Cu” и “Zn”, изменяющихся в диапазонах [1.27–5.00] и [19.4–86.8], параметры следующие (для краткости приведены только первые пять): $\alpha(\text{Cu}) = 0$, $\beta(\text{Cu}) = [1.6466, 2.3948, 2.2357, 2.6254, 2.0990, \dots]$, $\alpha(\text{Zn}) = 0$, $\beta(\text{Zn}) = [96.0779, 60.7890, 60.6234, 49.7463, 1.4608, \dots]$.

Тестирование синтезированной нейро-нечеткой сети показало, что исходные данные и результаты, полученные для гибридной модели при использовании каждого выходного показателя, хорошо коррелируют (среднеквадратическая погрешность обучения составила ~%), так что качество обучения – приемлемое.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Трехмерные поверхности отклика гибридной модели для меди, в зависимости от сочетания двух выбранных влияющих факторов из их общего числа три, приведены на рис. 3 при указанных в подписи к рисунку значениях третьего фактора. Как видно из рис. 3а, концентрация загрязняющего вещества максимальна в центральной части потока реки и снижается с глубиной при приближении к берегам реки, где также снижается и расход воды согласно рис. 3б. В соответствии же с рис. 3в концентрация меди повышена при расходе ~ 00 м³/с. Таковы частные заключения, свидетельствующие

о сложно-колебательном характере содержания данного загрязняющего воду вещества. При необходимости получить полное представление о влиянии любых сочетаний значений расхода воды, удаленности от берега и глубины водного потока на содержание меди в воде использованная модель расчета позволяет сформировать атлас графиков приведенного вида. Частную же информацию о роли каждого влияющего показателя можно получить, рассматривая двумерные сечения этих графиков при фиксированных значениях двух других влияющих показателей. Таковы примеры, приведенные на рис. 4. Видно, что здесь распределение концентрации меди по ширине близко к нормальному (рис. 4а), по глубине – к линейно убывающему (рис. 4б), а по расходу – к колебательно-затухающему (рис. 4в).

Для цинка зависимость отклика от сочетаний пар входных факторов также носит колебательный характер (рис. 5). Частные выводы снова нетрудно сделать по двумерным сечениям. Например, из рис. 6 следует, что при указанных в подписи

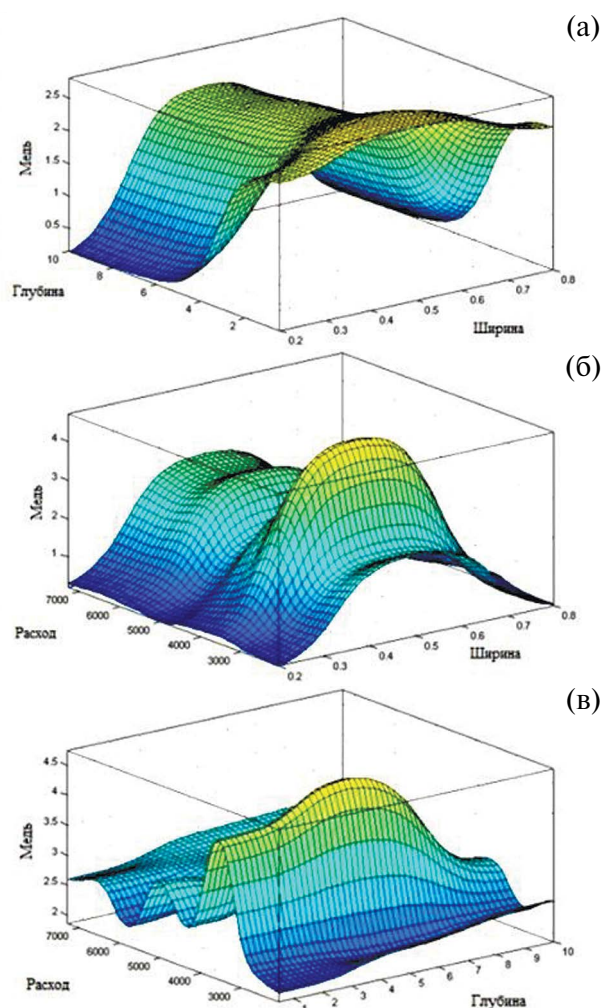


Рис. 3. Концентрация меди в зависимости от влияющих факторов: (а) – расход 4690 м³/с; (б) – глубина 6.80 м; (в) – ширина 0.5 (доля ширины).

значениях сечений распределение концентрации вещества по ширине близко к нормальному (рис. 6а), по глубине — к линейному убывающему (рис. 6б), а по расходу — к колебательно-затухающему (рис. 6в). В целом изменение концентрации загрязняющих воду веществ не является стохастическим, а обладает отдельными свойствами нормального распределения и колебательного поведения.

В табл. 1 в рамках разработанной гибридной модели нейро-нечеткого вывода приведены прогнозные (апостериорные) значения концентраций. Табл. 1 позволяет оценить ожидаемую, а при необходимости также априорную концентрацию загрязняющих воду веществ в различных слоях речного потока и с учетом этого

Таблица 1. Прогноз концентраций Cu и Zn в зависимости от влияющих факторов

Номер прогноза	Ширина	Глубина	Расход	Cu	Zn
1	0.2	0.5	5000	2.1	42.5
2	0.2	0.5	4000	2.34	4.53
3	0.2	0.5	3000	2.55	52.7
4	0.2	0.5	2080	1.33	89
5	0.2	5	5000	0.277	7.04
6	0.2	5	4000	0.425	0.72
7	0.2	5	3000	0.354	8.38
8	0.2	5	2080	0.25	14.3
9	0.2	10	5000	0.131	1.5
10	0.2	10	4000	0.192	0.15
11	0.2	10	3000	0.161	1.16
12	0.2	10	2080	0.175	2.74
13	0.5	0.5	5000	3.11	40.3
14	0.5	0.5	4000	3.19	26.8
15	0.5	0.5	3000	2.57	24.1
16	0.5	0.5	2080	2.02	15.3
17	0.5	5	5000	1.95	45.6
18	0.5	5	3000	2.52	42.7
19	0.5	5	4000	3.84	6.91
20	0.5	5	2080	2.31	71.8
21	0.5	10	4000	2.78	3.96
22	0.5	10	5000	1.89	40.20
23	0.5	10	3000	2.33	29.00
24	0.5	10	2080	2.54	71.80
25	0.8	0.5	5000	2.17	47.30
26	0.8	0.5	4500	2.5	41.30
27	0.8	0.5	3000	2.8	27.00
28	0.8	0.5	2080	1.97	57.50
29	0.8	5	5000	0.282	7.61
30	0.8	5	4000	0.463	6.74
31	0.8	5	3000	0.371	4.87
32	0.8	5	2080	0.296	9.92
33	0.8	10	5000	0.129	1.44
34	0.8	10	4000	0.19	2.94
35	0.8	10	3000	0.159	1.02
36	0.8	10	2080	0.174	2.49

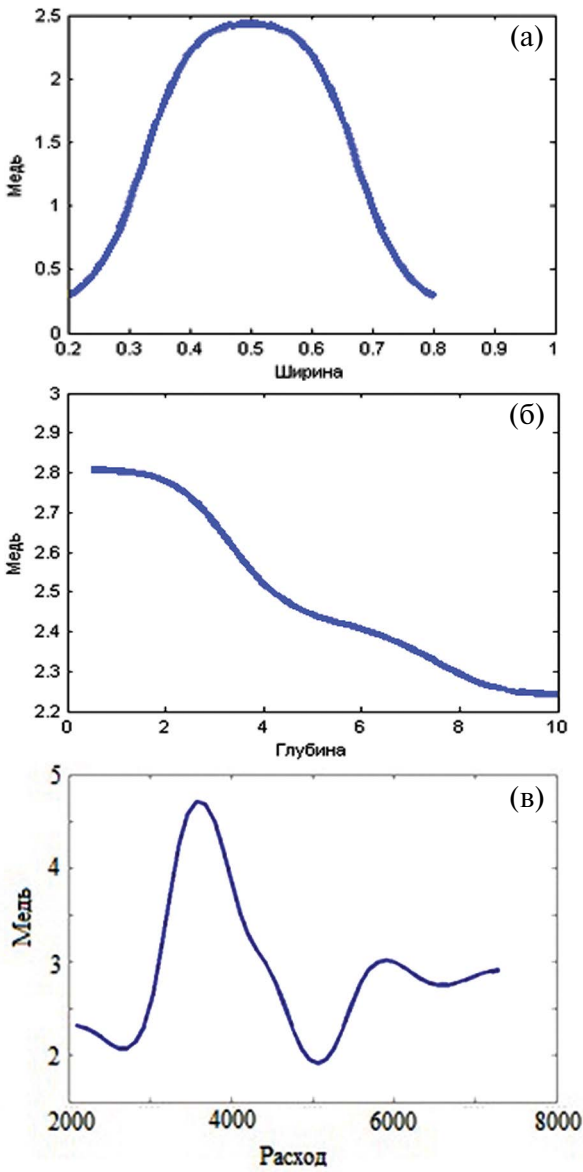


Рис. 4. Концентрация меди в зависимости от влияющих факторов: (а) – глубина 5.25 м, расход 4690 м³/с; (б) – ширина 0.5 (доля ширины), расход 4690 м³/с; (в) – ширина 0.5 (доля ширины), глубина 5.25 м.

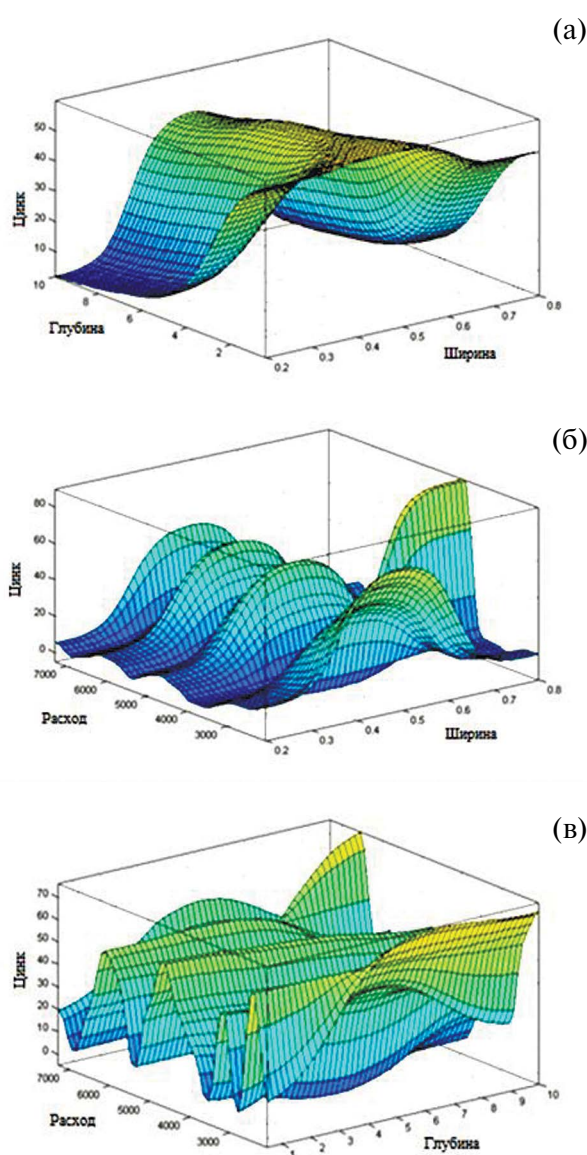


Рис. 5. Концентрация цинка в зависимости от влияющих факторов: (а) – расход 4690 м³/с; (б) – глубина 6.80 м; (в) – ширина 0.5 (доля ширины).

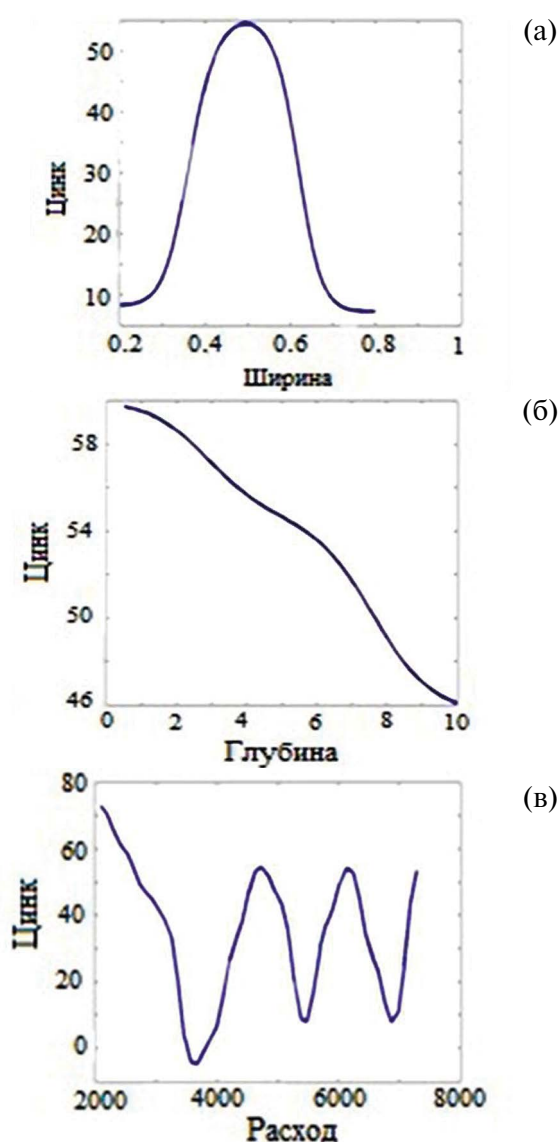


Рис. 6. Концентрация цинка в зависимости от влияющих факторов: (а) – глубина 5.25 м, расход 4690 м³/с; (б) – ширина 0.5 (доля ширины), расход 4690 м³/с; (в) – ширина 0.5 (доля ширины), глубина 5.25 м.

принимать водно-экологические решения. Кроме того, полученные химико-аналитические результаты дают возможность делать заключения о степени согласованности вариабельности контролируемых показателей. Так, например, результаты выполненного нейро-нечеткого исследования показывают, что в течение всего 2021 г. коэффициенты парной корреляции меди и цинка составили не менее 0.9 вблизи левого берега на максимальной глубине и при наименьшем учетном расходе воды (рис. 7, данные за год).

С учетом приведенных в табл. 1 результатов нейро-нечеткого анализа прослеживается связь концентрации меди с расходом, впрочем, несколько ослабевающая на наибольшей глубине (рис. 8), а также снижение концентрации обоих

веществ к концу года при приближении значения оси абсцисс к 12, 24 и 36 у берегов (рис. 9).

Полученные результаты показывают, что нейро-нечеткие методы обработки гидрохимических данных для речного потока могут быть полезны для решения практических задач водоохраны и водопользования. Природа же обнаруженных взаимосвязей между относительными движениями двух загрязняющих воду веществ, а также между концентрацией примеси и расходом воды или расстоянием до берега речного потока в настоящее время изучена недостаточно и не входит в задачу данного исследования. Можно лишь предположить, что таков результат распространения в реках нелинейных русловых колебательных процессов [7, 8]. Во всяком случае, в работах [12,

22, 23] отмечено, что прохождение вихрей разных размеров в струях создает многомасштабные связи фаза—амплитуда, которые могут приводить к разбросу примесей, обеспечивающих обнаруженные корреляции и распределение микропримесей воды в составе речных потоков.

Химико-аналитические исследования природной воды, распределения ее состава и свойств в вертикальном и горизонтальном разрезе речного русла представляют значительный хозяйственный интерес. При этом затруднительно непосредственное использование полученной по данным измерений информации для суждения о контролируемых показателях, поскольку каждое единичное измерение является случайной величиной, сформированной под влиянием неопределенного числа влияющих факторов, а совокупность измерений, менее подверженная такому влиянию, не может быть исследована иначе, чем средствами многомерного статистического анализа. В работе показано, что на практике для получения статистически значимого результата в этом случае

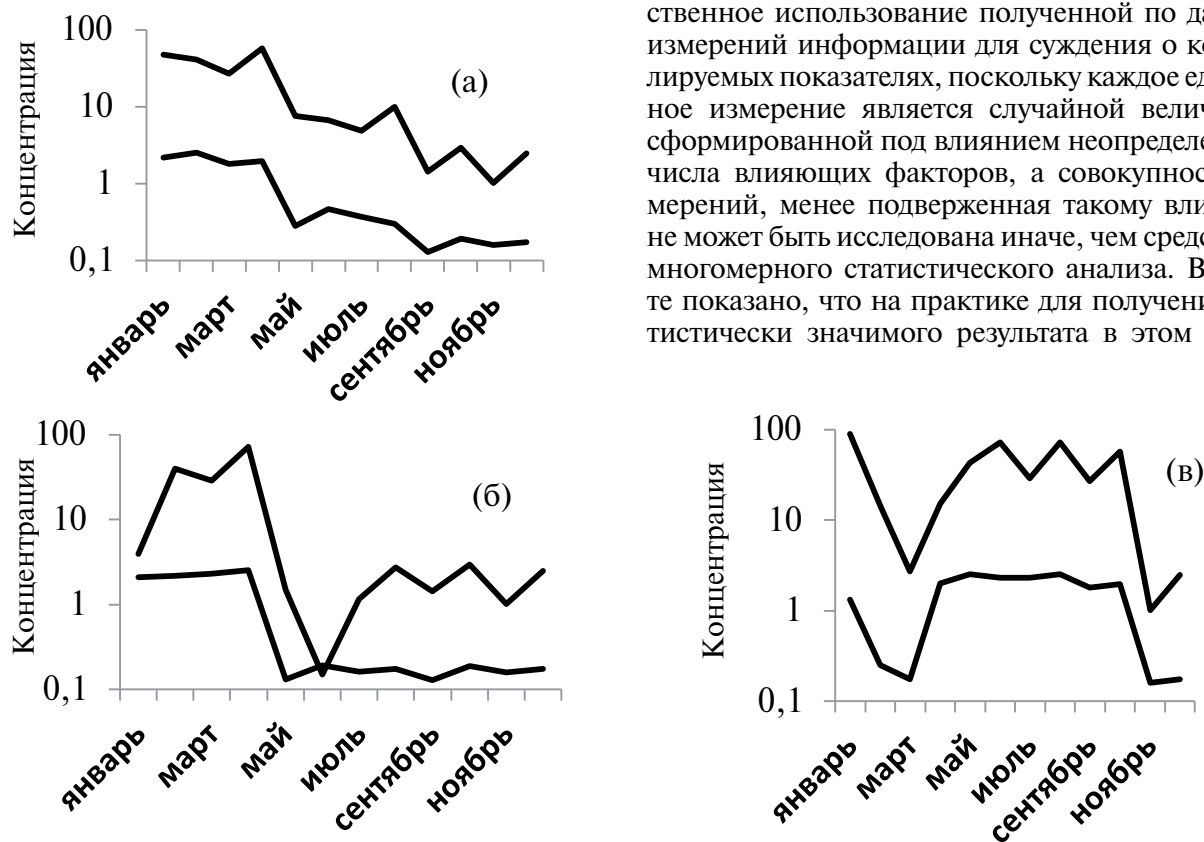


Рис. 7. Полученная по результатам прогноза концентрация меди (нижняя линия) и цинка (верхняя линия) при удалении от берега точки пробоотбора на расстояние 0.8 (доля ширины) по отношению к ширине потока (а), на глубине 10 м (б) и при расходе воды 2080 м³/с (в). Ось ординат дана в логарифмическом масштабе.

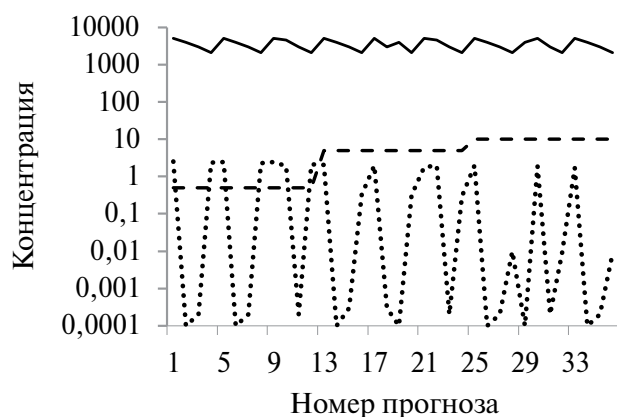


Рис. 8. Зависимость концентрации меди (точечная линия) от расхода воды (сплошная) на разных глубинах (пунктирная): 0.5 м при измерениях № 1–12, 5 м при 13–25, 10 м при 25–36. Масштаб оси ординат логарифмический.

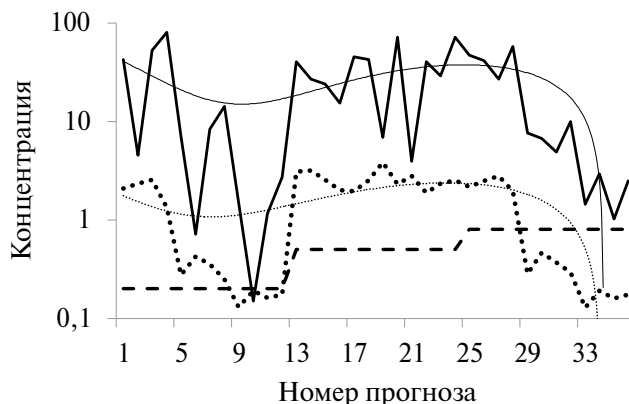


Рис. 9. Концентрации и тренды третьей степени меди (точечные линии) и цинка (сплошные линии) в зависимости от расстояния (в долях ширины) до берега (пунктирная): 0.2 при измерениях № 1–12, 0.5 при 13–25, 0.8 при 25–36. Масштаб оси ординат логарифмический.

целесообразна гибридная нейро-нечеткая схема обработки результатов гидромониторинга, при которой выполняется цепочка действий, учитывающих неопределенность (размытость) измерительной информации, и формируется обоснованный прогноз, применимый на практике в современных системах гидромониторинга.

В результате исследования массивов химико-аналитических данных для р. Волги в зависимости от расхода воды на разных удалениях от берега и глубинах с использованием гибридной нейро-нечеткой системы архитектуры ANFIS показано, что:

- концентрация выбранных загрязняющих веществ, меди и цинка изменяется в вертикальном и горизонтальном разрезе речного русла нередко в десятки или даже сотни раз, в разных случаях повышаясь или понижаясь по мере приближения к берегу;

- трехмерные поверхности отклика гибридной модели в зависимости от сочетания двух выбранных влияющих факторов (из их общего числа три) указывают на сложно-колебательный характер поведения обоих веществ в водном потоке;

- при определенных сочетаниях факторов, влияющих на разброс примеси, обнаружена связь между относительными изменениями контролируемых показателей, характеризующаяся коэффициентом корреляции не менее 0.9;

- для получения полного представления о контролируемых показателях при разных сочетаниях расхода воды, удаленности от берега и глубины водного потока необходимо сформировать атлас графиков, примеры которых приведены в данной работе.

Научная значимость нейро-нечеткой схемы обработки результатов гидромониторинга заключается в возможности углубленного исследования малоизученных в настоящее время нелинейных процессов гидрохимической динамики, протекающих в далеких от термодинамического равновесия системах, к числу которых относятся природные водотоки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института водных проблем Российской академии наук Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотов Ю.А. Основы аналитической химии. Кн. 1. Общие вопросы. М.: Высшая школа, 2002. 351 с.
2. Tsakovski S.L., Venelinov T. Environmental analytical chemistry // *Molecules*. 2024. V. 29. № 2. P. 450. <https://doi.org/10.3390/molecules29020450>.
3. Конференции “Экоаналитика” // Журн. аналит. химии. 2020. Т. 75. № 9. С. 855. <https://doi.org/10.31857/S0044450220090200>.
4. Wilkinson K.J., Lead J.R. Environmental Colloids and Particles: Behaviour, Separation and Characterisation. San Francisco: John Wiley & Sons, 2007. 702 p.
5. Шевцов М.Н. Водно-экологические проблемы и использование водных ресурсов. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. 197 с.
6. Kailash B.G., Bisht P.S. The role of water resources in socio-economic development // *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 2017. V. 5. № 12. P. 1669.
7. Malov A.I., Sidkina E.S., Ershova D.D., Cherkasova E.V., Druzhinin S.V. Time regularities of strontium concentration in drinking groundwater distant from the sea coast // *Environ. Geochem. Health*. 2023. V. 45. № 11. P. 8097. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01710-9>
8. Wilcox B.P., Seyfried M.S., Matison T.H. Searching for chaotic dynamics in Snowmelt runoff // *Water Resour.* 1991. V. 27. № 6. P. 1005. <https://doi.org/10.1029/91WR00225>.
9. Швейкина В.И., Кожевникова И.А. Нелинейная модель колебаний речного стока с хаотическими режимами // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 6. С. 4.
10. РД 52.24.634-2002. Руководящий документ. Методические указания. Уточнение местоположения створов (пунктов) наблюдений и режимов отбора проб на основе использования трассерных методов изучения гидродинамических характеристик водных объектов (утв. и введен в действие Росгидрометом 16.05.2002). 20 с.
11. Розенталь О.М., Александровская Л.Н. Оценка степени соответствия воды нормативным требованиям // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 3. С. 289. <https://doi.org/10.7868/S0321059618030070> (Rosental O.M., Aleksandrovskaia L.N. Assessment of the degree of compliance of water to regulatory requirements // *Water Resour.* 2018. V. 45. № 3. P. 379. <https://doi.org/10.1134/S0097807818030132>).
12. Thomas L., Ferrari R. Friction, frontogenesis, and the stratification of the surface mixed layer // *J. Phys. Oceanogr.* 2008. V. 38. № 38. P. 2501.
13. 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. <https://doi.org/10.31857/S0321-0596466582-591> (Chashechkin Yu.D., Rozental O.M. River flow

- structure and its effect on pollutant distribution // *Water Resour.* 2019. V. 46. № 6. P. 910. <https://doi.org/10.1134/S0097807819060022>).
14. РД 52.24.309-2011. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. Ростов-на-Дону, 2011. 109 с.
 15. ГОСТ 27384-2002. Вода. Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств. М.: Стандартинформ, 2010.
 16. Розенталь О.М., Авербух А.И. Введение в квалиметрию воды // *Водные ресурсы.* 2013. Т. 40. № 4. С. 418. <https://doi.org/10.7868/S0321059613040111> (Rozental O.M., Averbukh A.I. Introduction to water qualimetry // *Water Resour.* 2013. V. 40. P. 447. <https://doi.org/10.1134/S0097807813040118>)
 17. Кудинов Ю.И., Келина А.Ю., Кудинов И.Ю., Пащенко А.Ф., Пащенко Ф.Ф. Нечеткие модели и системы управления. М.: ЛЕНАНД, 2017. 328 с.
 18. Федотов В.Х. Мягкое описание фундаментальных законов природы и общества для экспертных систем // *European Researcher* (Европейский исследователь). 2012. № 2 (17). С. 110. EDN: OUIINYP.
 19. Терано Т., Асаи К., Сугэно М. Прикладные нечеткие системы. М.: Мир, 1993. 368 р.
 20. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 288 с.
 21. Леонов А.С. Решение некорректно поставленных обратных задач: очерк теории, практические алгоритмы и демонстрации в МАТЛАБ. М.: Либроком, 2015. 336 с.
 22. Kuhn K.M., Neubauer E., Hofmann T., von der Kammer F., Aiken G.R., Maurice P.A. Concentrations and distributions of metals associated with dissolved organic matter from the Suwannee River // *Environ. Eng. Sci.* 2015. V. 32. № 1. P. 54. <https://doi.org/10.1089/ees.2014.0298>
 23. Danilov-Danilyan V.I., Rosenthal O.M. Dynamic model of water quality evolution // *J. Water Chem. Technol.* 2022. V. 44. № 2. P. 132. <https://doi.org/10.3103/S1063455X22020035>

NEURO-FUZZY METHOD OF PROCESSING HYDROCHEMICAL DATA FOR RIVER FLOW

O. M. Rosenthal^{a,*}, V. Kh. Fedotov^b

^a*Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

^b*Chuvash State University named after I.N. Ulyanov,
Cheboksary, Russia*

*E-mail: omro3@yandex.ru

Abstract. Production and socio-environmental requirements for the quality of land waters have determined the need to create a network of hydrochemical observation posts, and the variability of controlled indicators – the need to perform routine chemical analytical studies. The standard (rigid) statistical methods of processing measurement results common in analytical chemistry, as a rule, underestimate the specifics of studying noisy (fuzzy) experimental data, which are the series of values of the impurity concentration of a river stream in space and time. It is shown that in this case, alternative soft computing tools designed to process exactly such data based on neuro-fuzzy hybrid algorithmic structures related to the ANFIS architecture are appropriate. The arrays of chemical analytical data on copper and zinc analyzed in this way on the Volga River, depending on water flow at different distances from the shore and depths, made it possible to identify the complex oscillatory behavior of concentrations of both substances in the water stream. It is concluded that the neuro-fuzzy scheme for processing monitoring results provides an opportunity for in-depth study of poorly understood processes of hydrochemical dynamics in systems far from thermodynamic equilibrium, which include natural watercourses.

Keywords: results of chemical and analytical studies, distribution of micro-impurities in the riverbed, nonlinear dynamic system, neuro-fuzzy method of hydrochemical data analysis.