

ОЦЕНКА ГЕОХИМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАЛЫХ РЕК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

В.А. Немтинов, Ю.В. Немтинова, А.Б. Борисенко

Тамбовский государственный технический университет

При оценке геохимического состояния малых рек решена задача идентификации математической модели технологических процессов самоочищения реки с малым расходом воды. Разработана схема статистического испытания модели, позволяющая создать на базе имеющихся экспериментальных данных модель, адекватную исследуемому объекту. Область допустимых значений параметров модели определяли в ходе имитационного испытания, основу которого составляет метод Монте-Карло. Достаточная точность оценки количества испытаний получена с помощью интегральной теоремы Лапласа. Иллюстрация предложенной схемы выполнена на примере реки Цны как приемника очищенных сточных вод промышленных предприятий г. Тамбова. В результате исследования выделены процессы аэробного окисления органики, нитрификации, денитрификации, роста и отмирания планктона, деаэрации воды кислородом воздуха, аммонификации белка и мочевины, ионного обмена и другие. На заключительном этапе исследования проведена оценка геохимического состояния воды на исследуемом участке реки, в том числе выполнены прогнозы содержания в воде растворенного кислорода.

Ключевые слова: геохимическое состояние малых рек, теория нечетких множеств, имитационные испытания математической модели, метод Монте-Карло

Assessment of the Geochemical State of Small Rivers Using Fuzzy Set Theory

V.A. Nemtinov, Yu.V. Nemtinova, A.B. Borisenko

Tambov State Technical University, 392000 Tambov, Russia

In this paper, for the assessment the geochemical state of small rivers we have solved the problem of identification of a mathematical model of self-purification processes in the rivers with low water consumption. The scheme of statistical testing of the model, allowing to create an adequate model of the object on the basis of available experimental data was developed. Finding areas of acceptable values of the model parameters is carried out during the simulation test, which is based on the Monte Carlo method. Sufficient estimation accuracy of the number of tests is obtained using the Laplace integral theorem. Approximation of the proposed scheme is done on the example of the river Tsna as a receiver of treated wastewater of industrial enterprises of Tambov. As a result of the study, the following processes occurring in the river were identified: aerobic oxidation of organic matter, nitrification, denitrification, plankton growth and death, deaeration of water with air oxygen, protein and urea ammonification, ion exchange and others. At the final stage of the study, an assessment of the geochemical state of water in the studied section of the river was carried out, including forecasts of the content of dissolved oxygen in the water.

Keywords: geochemical state of small rivers, fuzzy set theory, simulation tests of mathematical model, Monte Carlo method

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-09-54-59

Прогнозирование качества воды [1, 2] в природном водоеме является одним из важнейших аспектов оценки его геохимического состояния. При этом точный прогноз является основой для принятия решений при контроле качества воды [3].

Природный водоем — это открытая, нелинейная, динамичная и сложная система. На качество воды влияют деятельность человека и мно-

гие факторы (химические, биологические, метеорологические), а параметры качества воды являются нелинейными, изменяющимися во времени, случайными и запаздывающими из-за взаимодействия между ними. Таким образом, трудно количественно описать их с помощью точных математических моделей и создать точную, совершенную, нелинейную модель прогнозирования с использо-

ванием традиционных методов [4].

L. Xu и S. Liu [3] объединили вейвлет-преобразование с нейронной сетью для построения краткосрочной модели прогнозирования качества воды в нейронной сети. Предложенная модель была использована для прогнозирования качества воды водоемов интенсивного разведения пресноводных жемчужин в графстве Дучан провинции Цзянси, Китай.

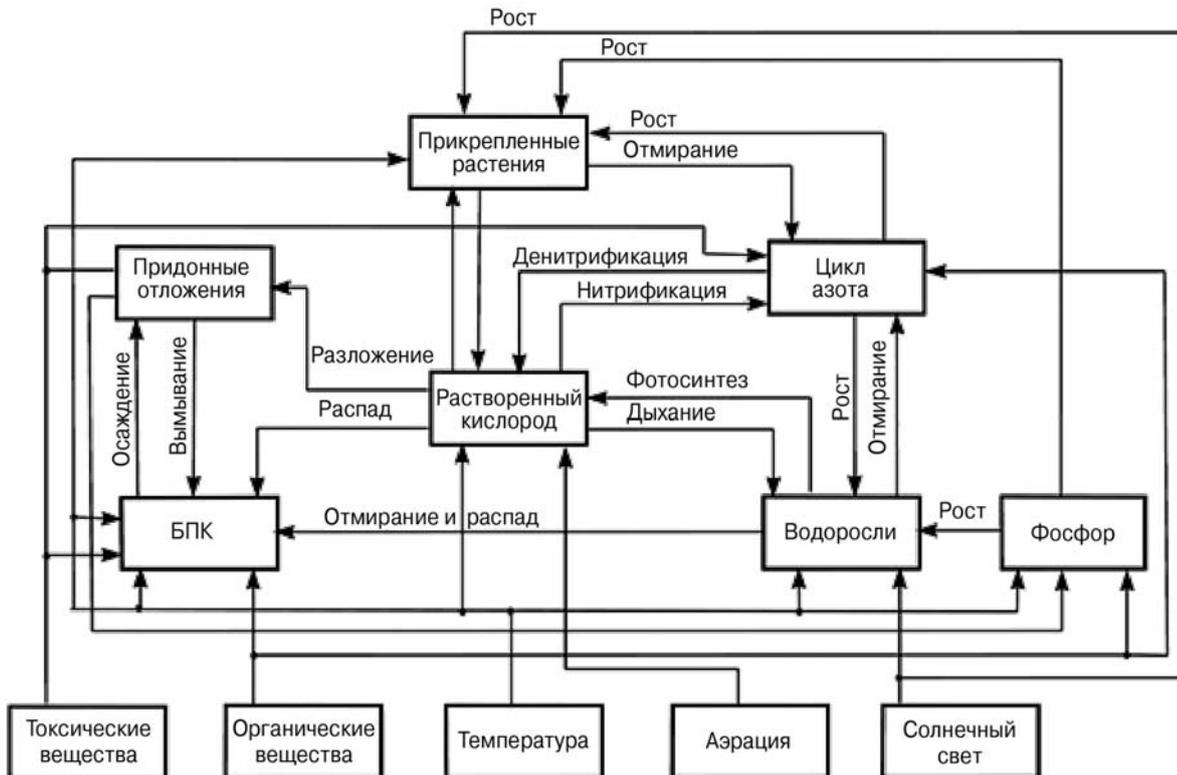


Рис. 1. Примерная схема взаимодействия основных компонент математической модели реки с малым расходом воды

Fig. 1. An approximate scheme of interaction of the main components of the mathematical model of the river with a low water flow

Из-за нелинейности и нестационарности ряда показателей качества воды точность используемых традиционных методов, включая регрессионный анализ и нейронные сети, ограничена. В работе [4] представлен гибридный подход, известный как регрессия вектора поддержки генетического алгоритма реального значения, который ищет оптимальные параметры с использованием генетических алгоритмов реального значения, а затем принимает оптимальные параметры для построения моделей.

В работе С.С. Махапатра и др. [5] рассмотрен эмпирический подход для классификации проб воды на основе 10 параметров качества воды. Для оценки качества воды были собраны пробы воды из 10 источников за три разных года и сезона. Предложенный непараметрический метод эффективно оценивает показатель качества воды. Модель может также использоваться для оценки качества воды в режиме он-лайн, но точность

модели зависит от разумного выбора параметров.

Программа моделирования анализа качества воды (WASP) использовалась в исследовании [6] для прогнозирования суточных изменений таких параметров качества воды, как концентрация растворенного кислорода, нитратов, фосфатов и биохимическая потребность в кислороде в тропической озерной системе. Озеро было разделено на восемь сегментов с соответствующими морфологическими, экологическими и проточными деталями, входящими в модель. Результатом моделирования явилось пространственно-временное изменение 476 дней. Это исследование также показало, что выпадение осадков играет важную роль в определении качества воды тропического озера.

В работе [7] предложена вероятностная нечеткая гибридная модель для оценки качества речной воды. Нечеткие

логические рассуждения были использованы для вычисления интегрального индекса качества воды. С помощью метода Монте-Карло, основанного на непараметрических вероятностных распределениях, была оценена случайность входных данных модели. Годовые гистограммы девяти переменных качества воды были построены на основе данных мониторинга, систематически собираемых в реке Каука в Колумбии. В течение ряда лет были оценены и проанализированы речные сектора вверх и вниз по течению реки около большого города Сантьяго-де-Кали, имеющего централизованную очистку сточных вод и отличающегося высокой промышленной активностью. Результаты этого исследования показывают, что системы нечеткого вывода, интегрированные со стохастическими непараметрическими методами, могут использоваться в качестве дополнительных инструментов в методологиях индексации качества воды.

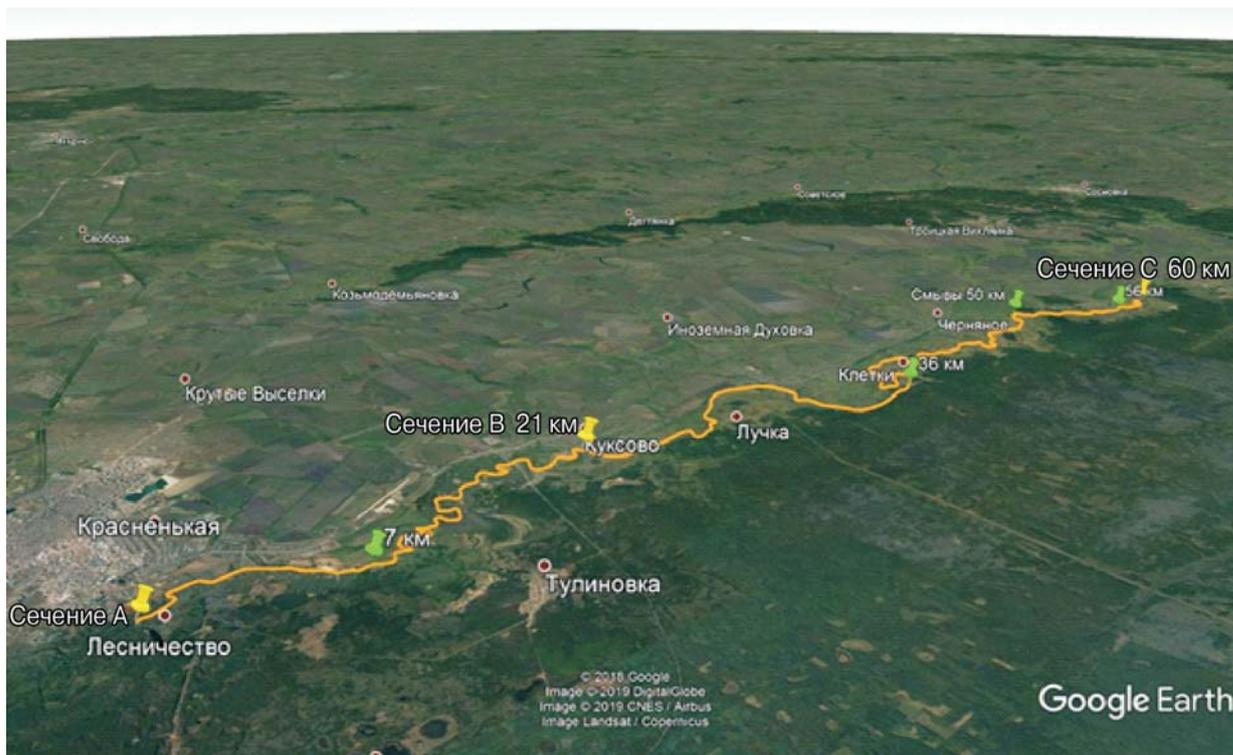


Рис. 2. Участок р. Цна с постами контроля качества воды
Fig. 2. The plot of the river Tsna with water quality control posts

Некоторые исследователи применяют искусственные нейронные сети для построения моделей качества воды, поскольку существует сложная нелинейная связь между прогнозируемыми переменными и измеряемыми входными параметрами. В работе [8] для прогнозирования концентрации загрязняющих веществ в воде создана новая нейросетевая модель обратного распространения на основе фильтра Калмана. Результаты исследования, которые проводили в Грузии в водохранилище на реке Юндин, показывают, что предложенный метод может эффективно повысить точность прогноза, а улучшенная модель оказалась более эффективным методом при прогнозировании качества воды.

Для достижения цели исследования использованы искусственная нейронная сеть и марковский цепной подход для разработки новой гибридной методологии прогнозирования биохимической потребности в кислороде, являющейся основным показателем качества воды [9]. Авторы используют 27-

летний набор данных о качестве воды в гавани Толо, который имеет только 439 образцов для тестирования предложенного метода. Результаты подтверждены, и высокая точность прогнозирования новой методологии цепи Маркова продемонстрирована с помощью трех критериев.

В различных литературных источниках описано большое количество математических моделей распространения примесей в потоке воды с учетом процессов аэробного окисления органических соединений, роста и отмирания планктона и др. Все эти модели предназначены для конкретных объектов исследования. Их применение к другим подобным объектам связано с рядом осложнений, поскольку традиционные методы идентификации требуют большого количества экспериментов. Кроме того, большинство известных моделей относятся к классу детерминированных моделей, в то время как природные водоемы являются термодинамически открытыми системами, на которые влияют многие неуправ-

ляемые внешние воздействия, а происходящие в них процессы являются вероятностными. Кроме того, векторы входных воздействий и выходных реакций модели имеют очень большую размерность, что затрудняет использование известных моделей для конкретных ситуаций.

Между тем зачастую имеется различная, хотя и не систематическая, качественная информация о состоянии водной среды рассматриваемых объектов, а также количественные данные для разных сечений объекта. Использование такой информации для моделирования стало возможным только с помощью теории нечетких множеств [9, 10].

Моделирование процессов самоочищения воды

Для большинства речных потоков характерны следующие процессы [11–13]: аэробного окисления органики, нитрификации, денитрификации, роста и отмирания планктона, реаэрации воды кислородом воздуха, аммонификации белка и мочевины, ионного об-

мена, фотосинтеза, сорбции и другие. При математическом моделировании этих процессов можно установить связь между компонентами, среди которых в первую очередь выделим концентрации растворенного кислорода, БПК₅, азота органических соединений, аммонийного и нитратного азота, фосфора, ионов тяжелых металлов (например, ионов шестивалентного хрома) и т.п. На рис. 1 приведена примерная схема взаимодействия основных процессов в реке с малым расходом воды.

Гидродинамическая структура потоков в реке чаще всего представляется моделью идеального вытеснения. Однако для некоторых участков может быть предложена ячеечная модель. Конкретный вид гидродинамической структуры определяется в ходе проведения трассерного эксперимента и решения задачи параметрической идентификации.

В результате анализа существующих типов моделей реки в качестве "кандидата" конструктивной модели авторами использована модель, в которой функциональные зависимости для отдельных процессов представлены в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений [13].

При решении задачи идентификации математической модели процессов самоочищения воды реки в большинстве случаев используется неполная экспериментальная информация детерминированного и вероятностного характера по объекту исследования. В связи с этим авторами разработана схема статистического испытания модели, позволяющая создать на базе имеющихся экспериментальных данных модель, адекватную исследуемому объекту [13].

Определение областей допустимых значений параметров модели осуществляется в ходе имитационного испытания, основу которого составляет метод Монте-Карло. Исходя из известных или правдоподоб-

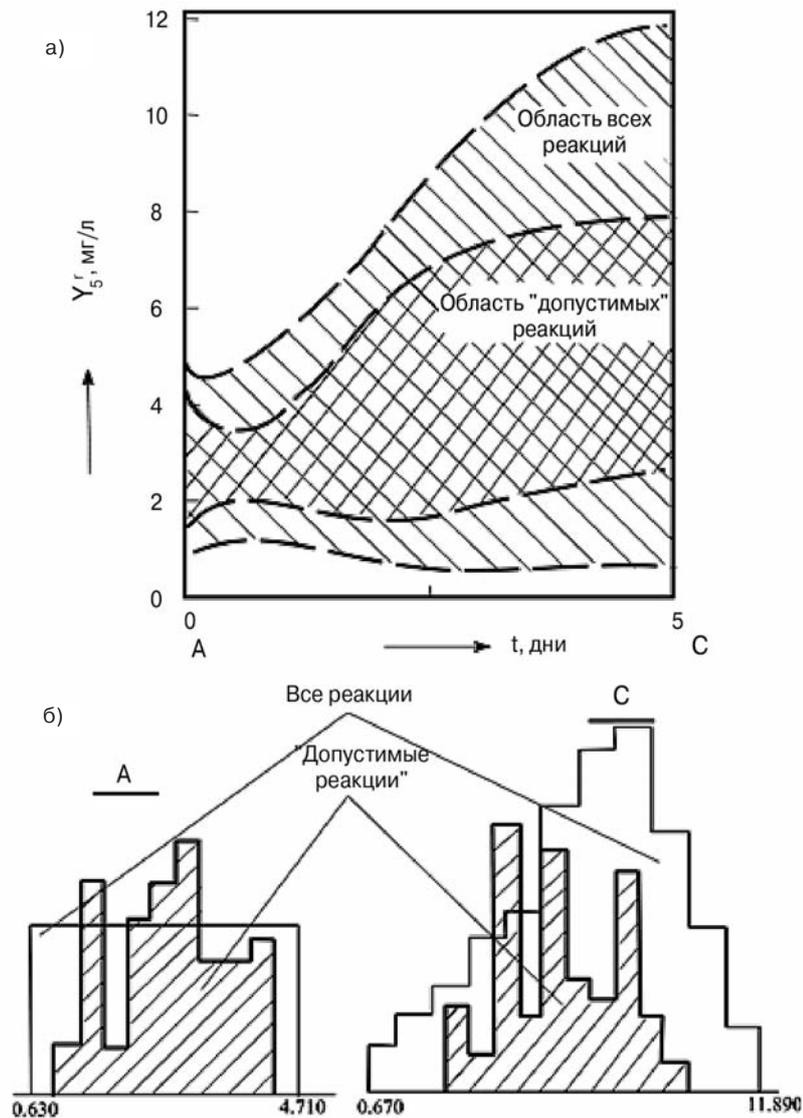


Рис. 3. Области изменения (а) и гистограммы концентраций (б) растворенного кислорода в сечениях А и С р. Цны

Fig. 3. The area of change (a) and the histogram of the concentration (b) of dissolved oxygen in sections A and C of the river Tsna

ных диапазонов изменения начальных состояний, параметров и входных переменных с помощью датчиков случайных чисел генерируются их комбинации. Решение уравнений модели с этими значениями позволяет вычислить реакцию модели и проверить выполнение ограничений, известных на основе экспериментальных данных. Достаточная точность оценки количества испытаний получена с помощью интегральной теоремы Лапласа [2].

Оценка геохимического состояния воды

Иллюстрация предложенной схемы идентификации

математической модели выполнена на примере моделирования процессов самоочищения воды р. Цны как приемника очищенных сточных вод промышленных предприятий г. Тамбова. Анализ процессов самоочищения воды реки проводился на участке длиной 60 км, начиная от точки сброса очищенных сточных вод с очистных сооружений ПАО "Пигмент" до Троицко-Дубравского гидроузла. Река по классификации Огиевского относится к 3-й категории и имеет хозяйственно-питьевое назначение. Для исследуемого участка характерно следующее: средне-

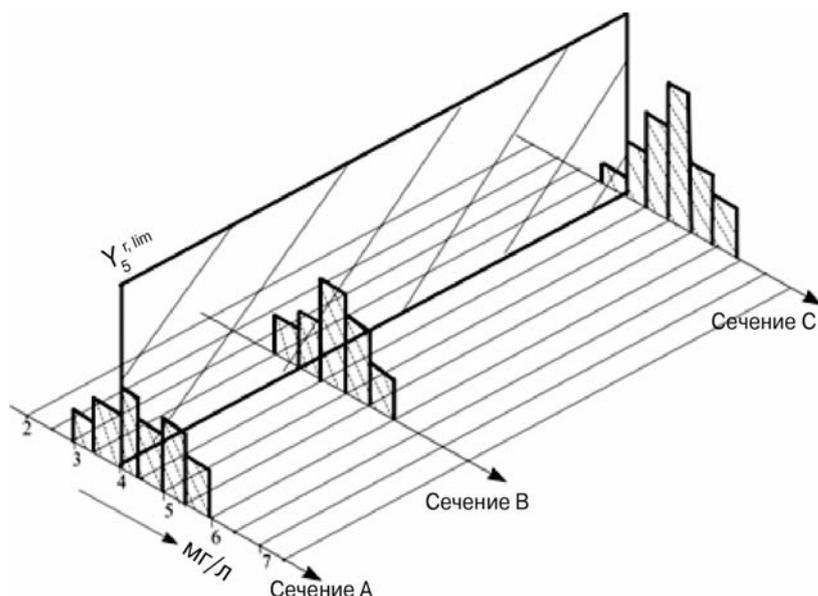


Рис. 4. Гистограммы прогнозируемых значений концентрации растворенного кислорода

Fig. 4. Histograms of predicted dissolved oxygen concentrations

годовой расход — 12,3 м³/с; русло умеренно извилистое шириной 45–60 м, песчано-илистое, деформирующееся и незначительно заросшее водной растительностью. Прилегающая местность — наклонная равнина, по левобережью открытая, а по правобережью поросшая лесом. По берегам реки расположены населенные пункты, местные водозаборы, садово-огородные общества, использующие воду и зоны отдыха трудящихся. В связи с тем, что на участке имеются два гидроузла и несколько притоков, при моделировании разобьем его на 6 участков с относительно постоянными гидрохимическими параметрами (рис. 2).

В результате исследования процессов, протекающих в реке, были выделены процессы аэробного окисления органики, нитрификации, денитрификации, роста и отмирания планктона, деаэрации воды кислородом воздуха, аммонификации белка и мочевины, ионного обмена и другие.

Формирование ограниченной на выходные переменные модели и определение диапазонов изменения начальных состояний и внешних воздействий (смывы органики с по-

лей) осуществлялось на основе информации Центрально-Черноземной региональной и городской гидрохимических лабораторий с учетом полевых измерений концентраций аммонийного и нитратного азота, а также растворенного кислорода в сечениях А, В и С, выполненных с помощью передвижной лаборатории контроля качества поверхностных вод.

При решении системы уравнений модели в ходе имитационного испытания суммарный интервал времени для всего участка длиной 60 км составил 5 дней. Все семейство кривых изменения переменных модели во времени образует некоторую область. На рис. 3 изображены области изменения концентраций растворенного кислорода для всех реакций модели, полученных в ходе имитационного испытания, и реакций, удовлетворяющих ограничениям.

В результате проведения имитационного испытания была создана математическая модель исследуемого участка р. Цны, удовлетворяющая всем имеющимся экспериментальным данным. Для проверки адекватности в июне 2017 г. были проведены расчеты по

модели и полевые измерения состояния качества воды (концентраций органического, нитратного, аммонийного азота, растворенного кислорода) в сечениях А, В и С исследуемого участка реки. Оказалось, что все концентрации, рассчитанные по модели, попадают в 95 % доверительный интервал. При этом максимальная относительная ошибка по нитратному, аммонийному азоту и растворенному кислороду не превышает 10 %, органическому азоту — 15,8 %.

На заключительном этапе исследования участка р. Цны были выполнены прогнозы содержания в воде растворенного кислорода и примесей в зависимости от степени очистки стоков в сечении А.

Гистограммы прогнозируемых концентраций растворенного в воде кислорода приведены на рис. 4. Качество воды в контрольном створе р. Цны с вероятностью не менее 0,89 отвечает принятым нормам.

Заключение

В работе предложена методика оценки геохимического состояния воды в реке с малым расходом с использованием теории нечетких множеств. Она позволяет для природных водоемов — термодинамически открытых систем, подверженных влиянию многочисленных неконтролируемых внешних воздействий и процессов, протекающих в них, имеющих вероятностный характер, построить математическую модель, адекватную исследуемому объекту.

Нахождение областей допустимых значений параметров модели осуществляется в ходе имитационного испытания, основу которого составляет метод Монте-Карло. Исходя из известных или правдоподобных диапазонов изменения начальных состояний, параметров и входных переменных, с помощью датчиков случайных чисел генерируются их комбинации. Решение уравнений модели с этими значения-

ми позволяет вычислить реакцию модели и проверить выполнение ограничений, известных на основе экспериментальных данных. Достаточная точность оценки количе-

ства испытаний получена с помощью интегральной теоремы Лапласа.

Апробация предложенной методики выполнена на примере моделирования процессов

самоочистения воды р. Цны как приемника очищенных сточных вод промышленных предприятий г. Тамбова, которая показала ее высокую эффективность.

Литература

1. **Beck M.B., van Straten G.** Uncertainty and Forecasting of Water Quality. Berlin, Springer Berlin Heidelberg, 1983. 388 p.
2. **Nemtinov V.A., Nemtinova Y.V., Borisenko A.B., Nemtinov K.V.** Construction of concentration fields of elements in 3D in groundwater of an industrial hub using GIS technologies. *J. Geochemical Explor.* Elsevier. 2014. Vol. 147. P. 46–51.
3. **Xu L., Liu S.** Study of short-term water quality prediction model based on wavelet neural network. *Math. Comput. Model.* Elsevier. 2013. Vol. 58. No. 3–4. P. 807–813.
4. **Liu S. et al.** A hybrid approach of support vector regression with genetic algorithm optimization for aquaculture water quality prediction. *Math. Comput. Model.* Elsevier. 2013. Vol. 58. No. 3–4. P. 458–465.
5. **Mahapatra S.S. et al.** Prediction of Water Quality Using Principal Component Analysis. *Water Qual. Expo. Heal. Scientific Research Publishing.* 2012. Vol. 4. No. 2. P. 93–104.
6. **Moses S.A. et al.** Water quality prediction capabilities of WASP model for a tropical lake system. *Lakes Reserv. Res. Manag.* Wiley Online Library. 2015. Vol. 20. No. 4. P. 285–299.
7. **Ocampo-Duque W. et al.** Water quality analysis in rivers with non-parametric probability distributions and fuzzy inference systems: Application to the Cauca River, Colombia. *Environ. Int.* Elsevier. 2013. Vol. 52. P. 17–28.
8. **Yanfei Zhao, Zhihong Zou, Shenglong Wang.** A Back Propagation Neural Network Model based on kalman filter for water quality prediction. 2015. 11th International Conference on Natural Computation (ICNC). IEEE, 2015. P. 149–153.
9. **Xiu Li, Jingdong Song.** A New ANN-Markov chain methodology for water quality prediction. 2015 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). IEEE, 2015. P. 1–6.
10. **Klir G., Yuan B.** Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications. Prentice hall New Jersey, 1995. 574 p.
11. **Ross T.J.** Fuzzy logic with engineering applications. John Wiley & Sons, 2011. 608 p.
12. **Bedford K.W., Sykes R.M., Libicki C.** Dynamic Advective Water Quality Model for Rivers. *J. Environ. Eng.* American Society of Civil Engineers. 1983. Vol. 109. No. 3. P. 535–554.
13. **Nemtinov V.A.** Methodology of automated decision-making system development for environmental safety solutions. Authors abstract of the dissertations. Doctor of Technical Sciences: 05.25.05 and 05.17.08. Tambov, 2006. 32 p.

References

1. **Beck M.B., van Straten G.** Uncertainty and Forecasting of Water Quality. Berlin, Springer Berlin Heidelberg, 1983. 388 p.
2. **Nemtinov V.A., Nemtinova Y.V., Borisenko A.B., Nemtinov K.V.** Construction of concentration fields of elements in 3D in groundwater of an industrial hub using GIS technologies. *J. Geochemical Explor.* Elsevier. 2014. Vol. 147. P. 46–51.
3. **Xu L., Liu S.** Study of short-term water quality prediction model based on wavelet neural network. *Math. Comput. Model.* Elsevier. 2013. Vol. 58. No. 3–4. P. 807–813.
4. **Liu S. et al.** A hybrid approach of support vector regression with genetic algorithm optimization for aquaculture water quality prediction. *Math. Comput. Model.* Elsevier. 2013. Vol. 58. No. 3–4. P. 458–465.
5. **Mahapatra S.S. et al.** Prediction of Water Quality Using Principal Component Analysis. *Water Qual. Expo. Heal. Scientific Research Publishing.* 2012. Vol. 4. No. 2. P. 93–104.
6. **Moses S.A. et al.** Water quality prediction capabilities of WASP model for a tropical lake system. *Lakes Reserv. Res. Manag.* Wiley Online Library. 2015. Vol. 20. No. 4. P. 285–299.
7. **Ocampo-Duque W. et al.** Water quality analysis in rivers with non-parametric probability distributions and fuzzy inference systems: Application to the Cauca River, Colombia. *Environ. Int.* Elsevier. 2013. Vol. 52. P. 17–28.
8. **Yanfei Zhao, Zhihong Zou, Shenglong Wang.** A Back Propagation Neural Network Model based on kalman filter for water quality prediction. 2015. 11th International Conference on Natural Computation (ICNC). IEEE, 2015. P. 149–153.
9. **Xiu Li, Jingdong Song.** A New ANN-Markov chain methodology for water quality prediction. 2015 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). IEEE, 2015. P. 1–6.
10. **Klir G., Yuan B.** Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications. Prentice hall New Jersey, 1995. 574 p.
11. **Ross T.J.** Fuzzy logic with engineering applications. John Wiley & Sons, 2011. 608 p.
12. **Bedford K.W., Sykes R.M., Libicki C.** Dynamic Advective Water Quality Model for Rivers. *J. Environ. Eng.* American Society of Civil Engineers. 1983. Vol. 109. No. 3. P. 535–554.
13. **Nemtinov V.A.** Methodology of automated decision-making system development for environmental safety solutions. Authors abstract of the dissertations. Doctor of Technical Sciences: 05.25.05 and 05.17.08. Tambov, 2006. 32 p.