

УДК 681.51, 614.7

ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В ЦЕЛЯХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ ВОДНОГО ОБЪЕКТА

Ширяева М.А.¹, Науменко Н.О.², Карпенко Н.П.²

¹ФБУН «Федеральный научный центр гигиены ФНЦГ имени Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, г. Мытищи, Россия

²ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова», Москва, Россия

Сбросы должны соответствовать действующему законодательству и нормативам для каждого водопользователя. При сбросах учитываются гидрологические характеристики водотока для определения допустимой интенсивности сбросов. Целью является минимизация антропогенного воздействия на водный объект. Для контроля сбросов на источниках водосбросов устанавливаются датчики, фиксирующие факты наличия загрязнения.

Цель исследования – разработка программного продукта для гидрологического мониторинга в целях контроля сбросов загрязняющих веществ в водный объект.

Материалы и методы. В ходе работы использовались программы Google Earth Pro, Microsoft Excel, датчик расхода воды на базе платы Arduino UNO с авторской доработкой (хвостовым оперением и встроенным плагином для расчета скорости течения), Python и следующие библиотеки: Pandas, Scikit-learn, Matplotlib и Seaborn для машинного обучения. Прогностические расчеты: использование гидродинамических законов (законы Навье-Стокса и Фика) для прогнозирования распространения загрязняющих веществ.

Результаты. Проведен мониторинг загрязнения воды в реке Ока по химическим и микробиологическим показателям. На основе прогностических расчетов по гидродинамическим законам, законам Навье-Стокса и Фика машина обучена графически представлять уровни загрязнения воды различными элементами и составлять прогнозный сценарий изменения концентрации загрязняющих веществ на период, равный 10 лет. По результатам обучения добились точности 95,91%.

Ограничения исследования. Разработанное оборудование требует поверки и длительного проведения экспериментальной части в целях получения более точных данных. Машина обучена на ограниченном наборе данных и может не быть точной для всех возможных сценариев.

Заключение. Полученные данные свидетельствуют о загрязнении воды в реке Ока. Предложена методика проведения замеров скоростей течения и построение эпюр расходов воды на водотоках с целью поиска источника сбросов загрязняющих веществ посредством беспилотного надводного аппарата. Фиксация превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в водном

объекте указывает на свершившийся факт нарушения. Разработана нейросеть, основанная на машинном обучении с целью ускоренного эффективного прогноза загрязнения водного объекта. Прогнозный сценарий предоставляет ценную информацию о потенциальном изменении концентрации загрязняющих веществ в будущем. Эти результаты могут использоваться для разработки мер по улучшению качества воды в реке Ока и защите экосистемы реки.

Ключевые слова: искусственный интеллект, прогноз качества воды, машинное обучение, анализ данных, программирование, Python.

Для цитирования: Ширяева М.А., Науменко Н.О., Карпенко Н.П. Применение инновационных технологий гидрологического мониторинга в целях прогнозирования качества воды водного объекта. Медицина труда и экология человека. 2024; 2:175-190.

Для корреспонденции: Ширяева Маргарита Александровна, младший научный сотрудник отдела гигиены воды ФБУН ФНЦГ имени Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора, e-mail: Shiryayeva.ma@fncg.ru.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10212>

INNOVATIVE HYDROLOGICAL MONITORING TECHNOLOGIES FOR WATER BODIES QUALITY PROGNOSING

Shiryayeva M.A.¹, Naumenko N.O.², Karpenko N.P.²

¹The Erisman Federal Scientific Center of Hygiene of Rospotrebnadzor, Mytishi, Russia

² The Kostyakov Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Moscow, Russia

Introduction. The discharges must comply with the current legislation and regulations for each water user. Hydrological properties of a stream are taken into account to determine permissible intensity of discharges. The aim is to optimize the anthropogenic effect on the water body. To control discharges, sensors are installed at spillway sources to record contaminants' presence.

The aim of the research is to elaborate a software product for hydrological monitoring in order to control discharges of pollutants into a water body.

Materials and Methods. Google Earth Pro, Microsoft Excel, water flow sensor based on Arduino UNO board with author's modification (tail feathering and built-in plugin for calculation of flow velocity), Python and the following libraries were used: Pandas, Scikit-learn, Matplotlib and Seaborn for machine learning. Prognostic calculations: Using hydrodynamic laws (Navier-Stokes and Fick's laws) to prognose the pollutant

distribution.

Results. Monitoring of water pollution in the Oka River by chemical and microbiological indicators was carried out. On the basis of prognostic calculations according to hydrodynamic, Navier-Stokes and Fick's laws, the machine was trained to graphically represent the levels of water pollution by various elements and to make a prognostic scenario of changes in the concentration of pollutants for a period of 10 years. The machine was trained and achieved an accuracy result of 95.91%.

Research limitations. The developed machine requires verification and a long experimental part in order to obtain more accurate data. The machine is trained on a limited data set and may not be accurate for all possible scenarios.

Conclusion. The obtained data indicate water pollution in the Oka River. The methodology of measuring flow velocities and plotting water discharge patterns in watercourses in order to find the source of pollutant discharges by means of an unmanned surface vehicle is proposed. Fixation of exceeding the maximum permissible concentrations (MPC) of pollutants in a water body indicates a fait accompli. A neural network based on machine learning has been developed for accelerated efficient prognosis of water body pollution. The prognosis scenario provides valuable information about the potential change in pollutant concentration in the future. These results can be used to develop measures to improve water quality in the Oka River and protect the river ecosystem.

Keywords: artificial intelligence, water quality prediction, machine learning, data analysis, programming, Python

Citation: Shiryayeva M.A., Naumenko N.O., Karpenko N.P. Innovative hydrological monitoring technologies for water bodies quality prognosing. Occupational health and human ecology. 2024; 2:175-190.

Correspondence: Margarita A. Shiryayeva, junior researcher at the Department of water hygiene of the Erisman Federal Scientific Center of Hygiene of Rospotrebnadzor, e-mail: Shiryayeva.ma@fncg.ru

Financing: *The study had no financial support.*

Conflict of interest: *The authors declare no conflict of interest.*

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10212>

Сбросы загрязняющих веществ в водотоки осуществляются в рамках действующего экологического законодательства и нормативных актов для каждого отдельного водопользователя [1]. В период сбросов должны учитываться гидрологические характеристики водотока с целью определения коэффициента

смешивания, т.е. выявляется допустимая интенсивность сбросов загрязняющих веществ, при которой на водный объект будет оказано минимальное антропогенное воздействие [2, 3]. В целях контроля сбросов загрязняющих веществ на источниках водосбросов надзорными органами устанавливаются датчики, фиксирующие факты наличия стоков загрязнения в конкретный момент времени [4, 5]. В случае возникновения чрезвычайной ситуации (ЧС) в виде превышения допустимых значений концентраций загрязняющих веществ в воде надзорными органами в первую очередь отмечаются факты стоков загрязнений в предполагаемый период от водопользователей, в том числе путем сопоставления перечней обнаруженных веществ с данными о сбросах водопользователей [6]. Таким образом, на практике фиксируется нарушитель, после чего против водопользователя применяются штрафные санкции. Однако при отсутствии данных о сбросах загрязняющих веществ водопользователями (отсутствие фактов сбросов загрязняющих веществ до и в период ЧС) возникают вопросы по поиску нарушителя [7,8]. Если водоток оборудован большой сетью гидрологических постов, то найти нарушителя по данным изменения расходов воды в реке не составит труда. В противном случае поиск нарушителя (возможно, официально не зарегистрированного водопользователя) существенно осложняется, так как необходимо привлекать большой объем сил и средств для исследования не только водотока, но и водосборной территории в целом. Объект исследования: река Ока. Река берет свое начало на Среднерусской возвышенности, а ее устье расположено в Нижнем Новгороде. Длина Оки составляет около 1500 км, а площадь бассейна - 245 000 км². Ока имеет порядка 120 больших и малых притоков, самым крупным из них является Москва-река, которая играет ключевую роль в экологическом состоянии водного объекта [9].

Материалы и методы. Предварительно для прогнозирования проводится мониторинг на водном объекте. Немаловажную роль в эффективности мониторинга занимает расположение контрольных точек для сбора данных [10]. На рисунке обозначена предложенная авторами, примерная схема установки модульных метеостанций, где красные кружки – это приборы, зеленый сектор составляет как раз 400 км², а голубой – зона пересечения наблюдений 2 станций (рис.1). Схему расположения именно таким способом было принято решение рассмотреть с целью экономии средств, при минимальных потерях в эффективности. Выполнив математические расчеты, можно точно определить необходимое число приборов для всей водосборной территории [11].

Расстояния между модульными станциями составят:

$$l_1 = 21,6\sqrt{2} = 30,5 \text{ км}; \quad \text{и} \quad l_2 = 21,6 \cdot 2 = 43,2 \text{ км}.$$

Теперь можно определить площадь пересечения наблюдений 2 станций:

$$F = 2 \cdot \left(\frac{21,6^2 \cdot \Pi}{4} - \frac{21,6^2}{2} \right) = \frac{21,6^2 \cdot \Pi}{2} - \frac{2 \cdot 21,6^2}{2} = \frac{21,6^2(\Pi - 2)}{2} \approx 266 \text{ км}^2.$$

По рисунку видно, что каждые 2 станции имеют одно общее пересечение, 3 станции имеют 2 общих пересечения и так далее. Исходя из этого, можно найти необходимое количество метеостанций для всей водосборной территории. Для этого составлено уравнение [12]. За n возьмем число оборудований на 400 км^2 , значит количество пересечений между станциями площадью 266 км^2 будет $n-1$.

Отсюда получается уравнение:

$$400n + 266(n - 1) = 245\,000 \text{ км}^2,$$

$$n \approx 368 \text{ единиц}.$$

Значит, для покрытия всей территории бассейна реки Оки и ведения эффективного мониторинга за климатическими, гидрохимическими и микробиологическими характеристиками потребуется 368 единиц модульных станций.

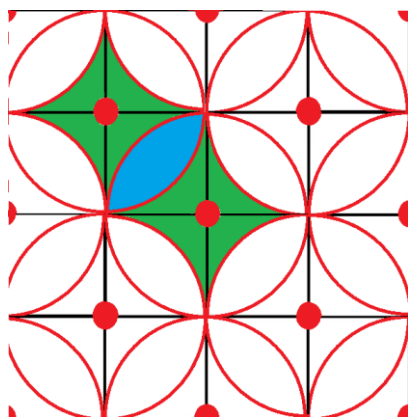


Рис. 1. Схема расположения модульных метеостанций

Figure 1. Location scheme of module meteorological stations

Для машинного обучения прогноза химического и микробиологического анализа воды был выбран участок у города Рязань.

Для машинного обучения необходимо:

- данные – результаты испытаний по метеорологическим, химическим и микробиологическим показателям (в качестве примера взяты показатели БПК₅, ХПК, аммиак, КОЕ);
- признаки – результаты прошлых исследований;

- алгоритм – подбор и применение методов машинного обучения, от которого зависит точность и скорость работы.
- разработанная модель – будет помогать в первую очередь прогнозировать состояние поверхностных вод как поверхностного источника водоснабжения по гигиеническим и экологическим показателям, а также рекомендовать предприятиям и иным источникам загрязнения меры по снижению попадания веществ в водный объект [13,14].

В ходе работы использовались программы *Google Earth Pro*, *Microsoft Excel*, надводный беспилотный аппарат авторской разработки, эхолот *Garmin Striker Cast GPS*, датчик расхода воды на базе платы *Arduino UNO* с авторской доработкой (хвостовым оперением и встроенным плагином для расчета скорости течения).

Для написания плагина для датчика расхода воды на базе платы *Arduino UNO* выведена формула преобразования данных расходов в скорость течения. Определен диаметр входного и выходного отверстия датчика, который составил 11,9 мм. Соответственно для определения скорости течения (м/с) из расхода воды (л/с) в плагин преобразования данных прописана следующими формулами:

$$V = \frac{4W}{\pi \times D^2 \times 1000}, \quad (1)$$
$$V = \frac{4W}{\pi \times 0,0119^2 \times 1000},$$

где $\pi = 3,14$, W – исходные данные датчика расхода воды в (л/с), D – диаметр сечения входного и выходного отверстия датчика.

Датчик расхода воды, интегрированный для замеров скоростей течения в работе, оборудован хвостовым оперением для инерциального изменения своего направления в зависимости от направления течения воды в толще и на поверхности. Предполагается свободное крепление датчика с помощью кольца или хомута к якорному тросу беспилотника в целях его устойчивости на определенной вертикали и глубине так, как показано на рисунке 2 [15,16,17].

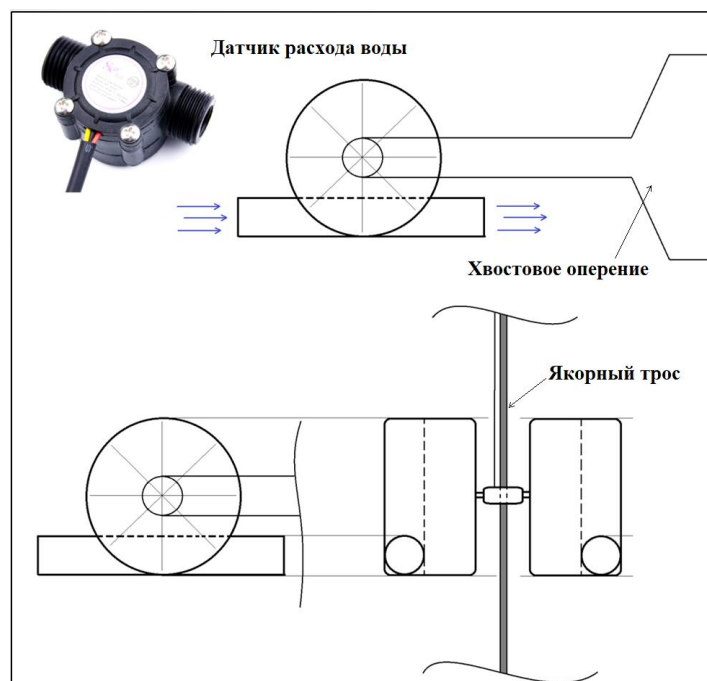


Рис. 2. Устройство датчика расхода воды

Figure 2. Device of the water flow sensor

Хвостовое оперение для готового датчика скоростей течения в открытом русле изготовлено из экологически чистого и устойчивого к физическим нагрузкам пластика поливинилхлорида (ПВХ пластик).

В ходе тестовых испытаний определено, что указанный датчик рекомендуется использовать только при замерах скоростей течения, не превышающих 5,5 м/с, в противном случае произойдет некорректная передача данных. Датчик расхода воды выдает погрешность при скоростях течения выше 5,5 м/с, так как плата не может передавать сигнал на данной частоте вращения лопасти, затрудняется считывание сигнала материнской платы. Однако проблема может быть решена установкой более дорогостоящего датчика.

Результаты. Проведена сравнительная оценка качества воды реки Ока как поверхностного источника водоснабжения. Оценка основана на средних многолетних значениях 52 контрольных показателей (органолептических, микробиологических, химических). Дополнительно оценен процент проб, не соответствующих гигиеническим нормативам, в створах трех водозаборов г. Рязани за 2012-2019 гг. Вода, взятая с водозабора Соколовского, имела меньшую среднюю многолетнюю концентрацию аммиака в размере 0,48 мг/л, что оказалось значительно ниже, чем в водозаборах Окского и Борковского - в 1,6 и 2,1 раза соответственно ($p < 0,05$). При этом почти в каждой пятой пробе, отобранной в створе Борковского водозабора, регистрировались концентрации

аммиака, превышающие ПДК, тогда как аналогичный показатель для Окского водозабора был в 2,8 раза меньше и составил 7,5%. Ни в одной разовой пробе воды в контрольной точке Соколовского водозабора превышений ПДК ионов аммония не регистрировалось. Статистически значимых различий в средних многолетних значениях ХПК и БПК₅ в водах рассматриваемых водозаборов выявлено не было, а процент разовых проб, в которых указанные показатели не соответствовали гигиеническим требованиям, находился в пределах 22,7–32,5% и 61,8–75,0%. Исследование показало, что среднее содержание ОКБ в водах Окского и Борковского водозаборов составило соответственно 813,3 КОЕ/100 мл и 818,9 КОЕ/100 мл и было в 1,5 раза выше аналогичного показателя в контрольном створе Соколовского водозабора ($p < 0,05$) (рис.3).

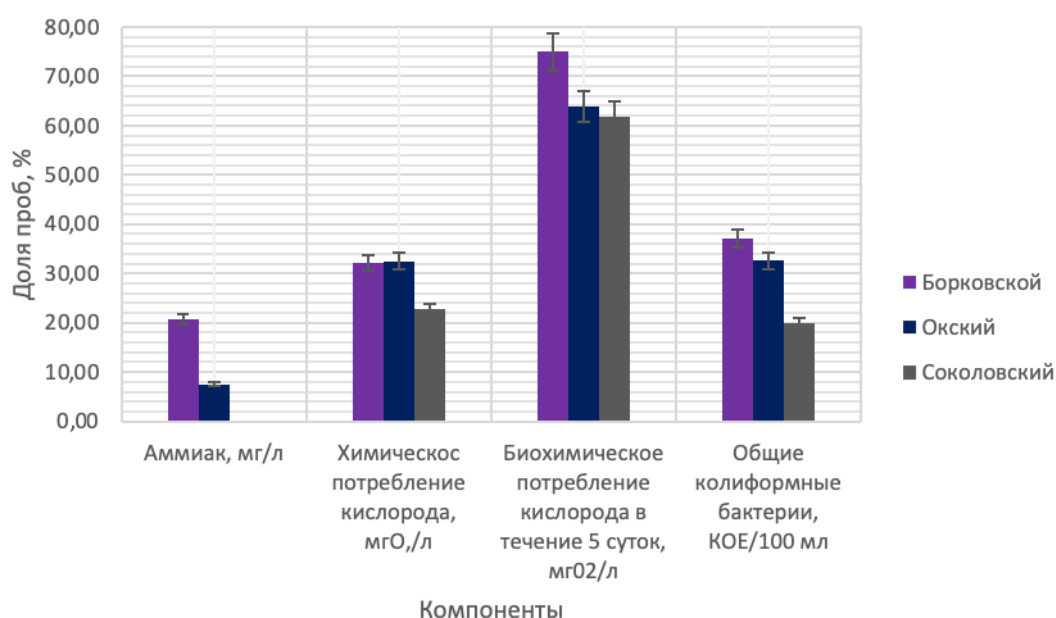


Рисунок 3. Доля проб, не соответствующих гигиеническим нормативам, %

Figure 3. Percentage of samples not complying with hygienic standards, %

Машинное обучение

Полученная нейросеть обучена для прогноза движения, тепломассопередачи и распространения загрязнителей текучей среды с целью моделирования с помощью уравнений Навье-Стокса, которые заложены в коде Python [18,19]. При помощи библиотек Pandas, Matplotlib и Seaborn был подготовлен оптимальный dataset для обучения машины. Программой были построены диаграммы рассеяния для скорости потока, коэффициента продольной дисперсии, максимальной концентрации, времени пика, начала и окончания загрязнения (рис.4). Согласно

рисунку, диаграмма рассеяния показывает, что все экспериментальные значения завышены со средней процентной ошибкой, равной 8%. Первый эксперимент показал, что модель правильно выводит наблюдаемые значения, но значительно завышает прогноз (рис.4а).

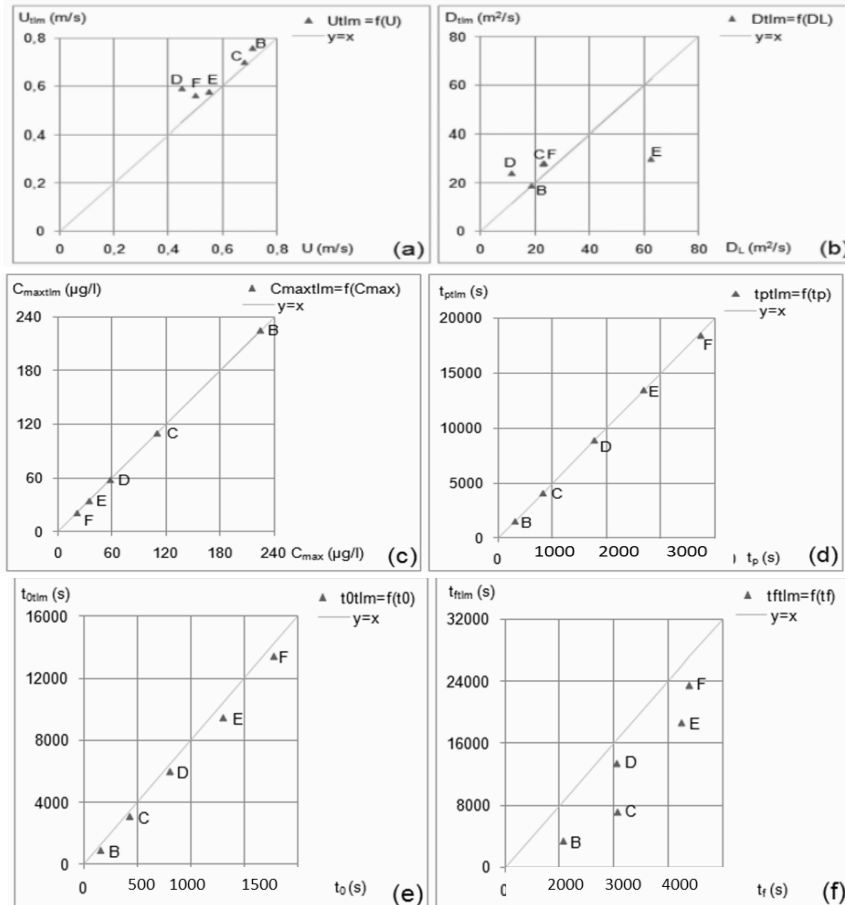


Рис. 4. Диаграммы рассеяния для (а): скорость потока; (b): коэффициент продольной дисперсии; (с): максимальная концентрация; (d): время пика; (е): время начала загрязнения; (f): время окончания загрязнения

Figure 4. Scatter plots for (a): flow rate; (b): longitudinal dispersion coefficient; (c): maximum concentration; (d): peak time; (e): contamination start time; (f): contamination stop time

На рисунке 4b прогнозируемые коэффициенты продольной дисперсии нанесены на график в сравнении с наблюдаемыми. Модель дает хорошую оценку коэффициента продольной дисперсии. Коэффициент продольной дисперсии зависит от ширины и глубины реки; таким образом, это сильно зависит от геометрии реки. Следовательно, разница между прогнозируемыми и наблюдаемыми коэффициентами продольной дисперсии связана с тем, что наша модель не учитывает геометрию реки.

На рисунке 4с показаны прогнозируемые максимальные концентрации по сравнению с экспериментальными, а на рисунке 4d представлено сравнение прогнозируемых и экспериментальных значений времени максимальной концентрации (время пика). Диаграмма разброса на рисунке 4с показывает, что модель правильно предсказала все максимальные концентрации с нулевой средней процентной ошибкой. Диаграмма разброса на рисунке 4d показывает, что максимальное время концентрации, предсказанное моделью, хорошо согласуется с полученным экспериментально. Основная роль модели загрязнителя состоит в том, чтобы правильно определить степень загрязнения (максимальную концентрацию и время ее пика) на заданном расстоянии; представленная оригинальная модель удовлетворяет этому требованию.

На рисунках 4е, 4f представлено сравнение прогнозируемых и экспериментальных значений времени начала и конца загрязнения соответственно. Диаграммы рассеяния показывают, что модель немного занижает время начала загрязнения и значительно занижает время окончания загрязнения.

Модель была обучена с использованием библиотеки Scikit-Learn и показала результат точности 95,91%. Программа представляет результат в графическом виде и выдает вероятность того или иного события на основе прогнозного расчета по уравнениям Навье-Стокса.

Данные измерений, полученные с датчика, могут быть записаны на электронный накопитель либо при наличии интернет-соединения переданы оператору для обработки, вычисления расходов воды и построения эпюр в автоматизированном режиме, так как показано на примере (рисунок 5).

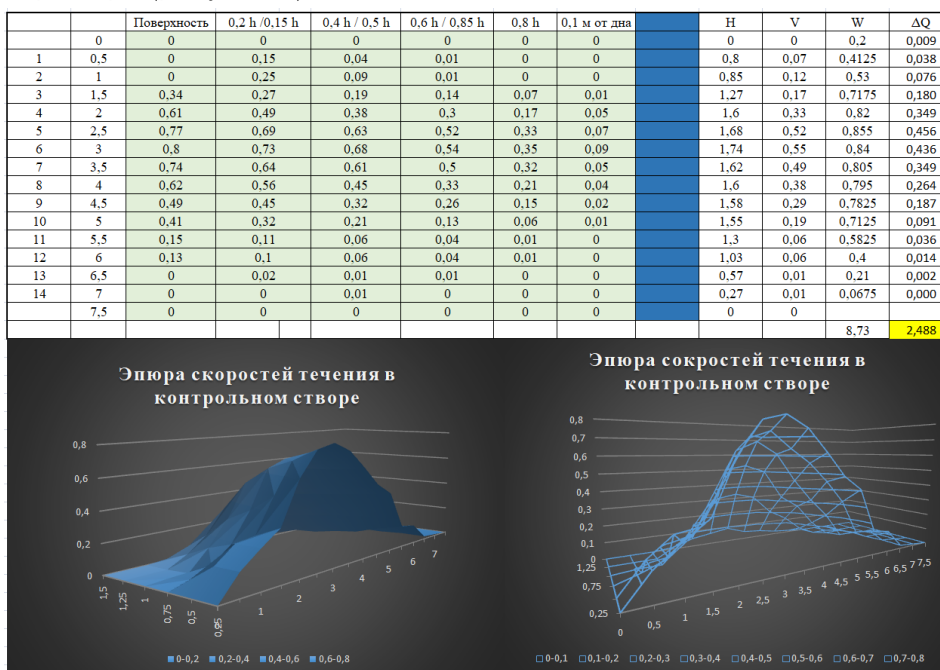


Рис. 5. Пример обработки данных, полученных датчиком скоростей течения

Figure 5. Data processing example of data obtained by flow velocity sensor

Таким образом, в створе предполагаемого водотока может быть получена площадь сечения русла ($8,73 \text{ м}^2$) и расход воды в контрольном створе ($2,49 \text{ м}^3/\text{с}$).

В целях поиска источника сброса загрязняющих веществ контрольные створы для измерений расходов воды можно устанавливать в хаотичном порядке, что при выявлении разницы в показателях (расходов) позволит максимально точно определять местоположение «несанкционированного» водопользователя.

Кроме того, хаотичная установка контрольных створов при высокой частоте их распределения позволит строить актуальные карты или 3D-модели с данными скоростей течения воды в руслах рек или каналах. В случаях тщательного индивидуального исследования водотока (при различных фактических уровнях воды и времен года) построенные карты скоростей течения позволят решать следующие задачи в области охраны окружающей среды:

1. Определение зон санитарной охраны (ЗСО). Карты скоростей течения позволят определять границы ЗСО водных объектов, используемых для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения.
2. Определение и контроль за качеством воды. Скорость течения воды влияет на перемешивание и распределение веществ в водотоке. Актуальные карты позволяют оценить, как быстро загрязнения могут распространяться и повлиять на изменение качества воды.
3. Проведение научных гидрологических и экологических исследований. Наличие актуальных данных скоростей течения позволяет изучать влияние водных потоков на экосистемы, что в свою очередь помогает принимать меры по сохранению биоразнообразия и предотвращению негативных последствий для окружающей среды. В области гидрологии и водного хозяйства актуальные данные водотоков дают возможность эффективно планировать меры по предотвращению наводнений, а также разрабатывать стратегии для устойчивого управления водными ресурсами.

Обсуждение. Машинное обучение и инновационное автоматизированное оборудование необходимо для мониторинга поверхностных и подземных вод в гидрологических целях и для исследования динамики загрязнения водных объектов. Машинное обучение делает мониторинг наиболее эффективным, точным и оперативным. Инновационные датчики расходов и скоростей способствуют высокотехнологичному подходу к измерению параметров водной среды. Так, к примеру, ученые из МГУ [20] с помощью нейросети построили прогнозные модели реки Сетунь, выявили участки и периоды времени,

фиксирующие наибольшие показатели мутности воды. Однако модель работает на ограниченном наборе данных и прогноз рассчитан на учет загрязнения водного объекта взвешенными частицами.

Существующие датчики измерения скоростей и расходов воды, имея высокую эффективность, являются дорогостоящими. Наполнение элементарных датчиков сложными элементами считается трудоемким и экономически невыгодным [21, 22]. Авторская разработка датчика с хвостовым оперением и встроенным плагином для расчета скорости течения является высокоэффективной в практическом применении и с точки зрения экономики.

Заключение. Полученные данные свидетельствуют о загрязнении воды в реке Ока. Предложена методика проведения замеров скоростей течения и построения эпюр расходов воды на водотоках с целью поиска источника сбросов загрязняющих веществ посредством беспилотного надводного аппарата. В связи с высокой степенью водообмена на водотоках наличие пробы воды с превышенными значениями ПДК не дает гарантии выявления нарушителя. В частности, если водопользователь отсутствует в базе надзорных органов, то подтвердить его вину становится практически невозможным без наличия исчерпывающей доказательной базы. При наличии широкой сети гидрологического мониторинга на водотоках проблема в доказательной базе была бы исчерпывающей, однако в зависимости от протяженности реки частая установка гидрологических постов по экономическим и людским соображениям невозможна. В таком случае в качестве альтернативного варианта дополнения гидрологических наблюдений может быть использован беспилотный корабль, способный снимать данные в любом контрольном створе по усмотрению оператора. Прогнозный сценарий предоставляет ценную информацию о потенциальном изменении концентрации загрязняющих веществ в будущем. Эти результаты могут использоваться для разработки мер по улучшению качества воды в реке Ока и защите экосистемы реки.

Список литературы:

1. Науменко Н.О., Жезмер В.Б., Новиков А.В. и др. Разработка автоматизированной системы мониторинга безопасности гидротехнических сооружений. Потаповские чтения-2019. 2019 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38550338>
2. Науменко Н.О. Введение рационального нормирования на объемы сбросов загрязняющих веществ в водные объекты, с целью поддержания устойчивости экосистемы. Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса. 2019. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42331309>

3. Лагутина Н.В., Науменко Н.О., Новиков А.В., Сумарукова О.В. Оценка качества вод Рыбинского водохранилища вследствие снижения уровня вод. Природообустройство. 2019; 2: 122-126. DOI 10.34677/1997-6011/2019-2-122-126
4. Бадагуев Б.Т. Экологическая безопасность предприятия. Приказы, акты, инструкции, журналы, положения, планы. 2-е изд., пер. и доп. / Б.Т. Бадагуев. М.: Альфа-Пресс, 2018. <https://opac.nsuem.ru/mm/2013/000176762.pdf>
5. Лурье П.М., Панов В.Д., Саломатин А.М. Гидрология и сток. СПб.: Гидрометеиздат, 2001.
6. Орлов А.И., Федосеев В.Н. Проблемы управления экологической безопасностью. Менеджмент в России и за рубежом. 2000;6:78-86.
7. Саркисов О.Р. Экологическая безопасность и эколого-правовые проблемы в области загрязнения окружающей среды: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Юриспруденция». М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2017. <https://djvu.online/file/Jz5CWItMIYxBy>
8. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1974.
9. Буданова К.Т. Теория и методология географических наук. Орел: Орл. госуд. ун-т, 2003.
10. Раткович Л. Д. Вопросы рационального использования водных ресурсов и проектного обоснования водохозяйственных систем: монография / Л. Д. Раткович, В. Н. Маркин, И. В. Глазунова; Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К. А. Тимирязева (Москва), Институт природообустройства им. А. Н. Костякова. Москва: РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, 2014. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://elib.timacad.ru/dl/full/2277.pdf>.
11. Карпенко Н.П., Ломакин И.М., Дроздов В.С. Вопросы управления геоэкологическими рисками при оценке качества подземных вод на урбанизированных территориях. Природообустройство. 2019; 5:106-111.
12. Евграфов А.В. Метрология, стандартизация и сертификация: учебно-методическое пособие. М.: РГАУ-МСХА, 2015.
13. Литвинова, А. А., Дементьев, А. А., Ляпкало, А. А., Коршунова, Е. П. Сравнительная характеристика показателей качества воды реки Оки в местах водозаборов хозяйственно-питьевой системы водоснабжения города Рязани. Российский медико-биологический вестник имени академика ИП Павлова. 2022;Т 30(4):481-488.
14. Жолдакова З. И., Синицына О. О., Турбинский В. В. О корректировке требований к зонам санитарной охраны источников централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения населения. Гигиена и санитария. 2021;Т. 100(11):1192-1197.
15. Карпенко Н. П., Ширяева М. А. Трехмерное моделирование как система отображения суммарного химического загрязнения почв. Природообустройство. 2021;1: 6-14.

16. Лагутина Н.В., Науменко Н.О., Новиков А.В., Сумарукова О.В. Оценка качества вод Рыбинского водохранилища вследствие снижения уровня вод. *Природообустройство*. 2019;2:122-125.
17. Науменко Н.О. Введение рационального нормирования на объемы сбросов загрязняющих веществ в водные объекты с целью поддержания устойчивости экосистемы. Материалы VI научно-практической конференции молодых ученых «Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса». М.: ФГБНУ ВНИРО, 2018.
18. Бадагуев Б.Т. Экологическая безопасность предприятия. Приказы, акты, инструкции, журналы, положения, планы. 2-е изд., пер. и доп. М.: Альфа-Пресс, 2018.
19. Лурье П.М., Панов В.Д., Саломатин А.М. Гидрология и сток. СПб.: Гидрометеиздат, 2001.
20. Чалов С. Р., Морейдо В. М., Денисова И. С., Солонилов И. Высокочастотный мониторинг и модели машинного обучения для оценки синоптической изменчивости стока взвешенных наносов малой городской реки. *Гидросфера. Опасные процессы и явления*. 2023; Т. 5(1):59-74. DOI: <https://doi.org/10.34753/HS.2023.5.1.59>
21. Калыгулов А., Жандияр Е. Цифровизация учета воды на оросительных каналах мелиоративных систем= Digitalization of water metering in irrigation channels of reclamation systems. 2024. URI документа <https://rep.bstu.by/handle/data/42891>
22. Эргашев О. М. Интеллектуальный оптоэлектронный прибор для учета и контроля расхода воды в открытых каналах. *Al-Farg'oniy avlodlari*. 2023; Т. 1(4): 60-65. DOI <https://zenodo.org/records/10333174>

References:

1. Naumenko N.O., Zhesmer, V.B., Novikov A.V. et al. Development of an automated system for monitoring the safety of hydraulic structures. *Potapov Readings-2019: Collection of proceedings*. Moscow: Izd-vo MISI-MGSU, 2019. (In Russ).
2. Naumenko N.O. Introduction of rational rationing on the volume of pollutant discharges into water bodies in order to maintain the stability of the ecosystem. *Proceedings of the VI scientific and practical conf. of young scientists 'Modern problems and prospects of development of fishery complex'*. MOSCOW: FGBNU VNIRO, 2018. (In Russ).
3. Lagutina N.V., Naumenko N.O., Novikov A.V., Sumarukova O.V. Estimation of water quality of the Rybinsk reservoir due to water level decrease. *Prirodoobustrojstvo* 2019; 2: 122-125. (In Russ).
4. Badaguiev B.T. Ecological safety of the enterprise. Orders, acts, instructions, journals, regulations, plans. 2nd ed., per. and ext. Moscow: Alfa-Press, 2018. (In Russ).
5. Lurie P.M., Panov V.D., Salomatina A.M. Hydrology and runoff. SPb.: Gidrometeoizdat, 2001. (In Russ).

6. Orlov A.I., Fedoseev V.N. Problems of ecological safety management. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom*. 2000; 6: 78-86. (In Russ).
7. Sarkisov, O.R. Environmental safety and environmental legal problems in the field of environmental pollution: Textbook for university students studying in the speciality 'Jurisprudence'. M.: UNITY-DANA, 2017. (In Russ).
8. Rozhdestvenskiy A.V., Chebotarev A.I. Statistical methods in hydrology. L: Gidrometeoizdat, 1974. (In Russ).
9. Budanova K.T. Theory and Methodology of Geographical Sciences. Orel: Orel State University, 2003. (In Russ).
10. Ratkovich, L. D. Issues of rational use of water resources and design justification of water management systems: a monograph / L. D. Ratkovich, V. N. Markin, I. V. Glazunova; Russian State Agrarian University - K. A. Timiryazev MSHA (Moscow), A. N. Kostyakov Institute of Nature Management. Moscow: K. A. Timiryazev Russian State Agrarian University - K. A. Timiryazev MSHA, 2014. [Electronic resource]. Access mode: <http://elib.timacad.ru/dl/full/2277.pdf>. (In Russ).
11. Karpenko N.P., Lomakin I.M., Drozdov V.S. Issues of geocological risk management in the assessment of groundwater quality in urbanised areas. *Prirodoobustrojstvo*. 2019;5:106-111. (In Russ).
12. Evgrafov A.V. Metrology, standardisation and certification: textbook. M.: RGAU-MSHA, 2015. (In Russ).
13. Litvinova, A. A. A., Dementiev, A. A., Lyapkalo, A. A., Korshunova, E. P. Comparative characteristics of water quality indicators of the Oka River in the places of water intakes of the household drinking water supply system of the city of Ryazan. *Rossijskij mediko-biologicheskij vestnik imeni akademika IP Pavlova*. 2022; T. 30(4): 481-488. (In Russ).
14. Zholdakova Z. I., Sinitsina O. O., Turbinsky V. V. V. On the adjustment of requirements for the sanitary protection zones of sources of centralised household and drinking water supply to the population. *Gigiena i sanitariya*. 2021; T. 100(11): 1192-1197. (In Russ).
15. Karpenko N. P., Shiryayeva M. A. Three-dimensional modelling as a system for displaying the total chemical pollution of soils. *Prirodoobustrojstvo*. 2021;1: 6-14. (In Russ).
16. Lagutina N.V., Naumenko N.O., Novikov A.V., Sumarukova O.V. Estimation of water quality of Rybinsk reservoir due to water level decrease. *Prirodoobustrojstvo*. 2019;2:122-125. (In Russ).
17. Naumenko N.O. Introduction of rational rationing on the volume of pollutant discharges into water bodies in order to maintain the sustainability of the ecosystem. Proceedings of the VI scientific and practical conference of young scientists 'Modern problems and prospects of development of fishery complex'. MOSCOW: FGBNU VNIRO, 2018. (In Russ).
18. Badaguiev B.T. Ecological safety of the enterprise. Orders, acts, instructions, journals, regulations, plans. 2nd ed., per. and ext. Moscow: Alfa-Press, 2018. (In Russ).

19. Lurie P.M., Panov V.D., Salomatin A.M. Hydrology and runoff. SPb.: Gidrometeoizdat, 2001. (In Russ).
20. Chalov S. R., Moreido V. M., Denisova I. S., Solonikov I. High-frequency monitoring and machine learning models for assessment of synoptic variability of suspended sediment load runoff of a small urban river. *Gidrosfera. Opasnye processy i yavleniya*. 2023;T5(1): 59-74. (In Russ). DOI: <https://doi.org/10.34753/HS.2023.5.1.59>
21. Kalygulov A., Zhandiyar E. Digitalization of water metering in irrigation channels of reclamation systems. 2024. URI of the document <https://rep.bstu.by/handle/data/42891> (In Russ).
22. Ergashev O. M. Intellectual optoelectronic device for metering and control of water flow in open canals. *AI-Farg'oniy avlodlari*. 2023;V.1.(4):60-65. (In Russ). DOI <https://zenodo.org/records/10333174>

Поступила/Received: 16.04.2024

Принята в печать/Accepted: 27.05.2024