

А. Н. Шилин, Л. А. Коновалова, Т. А. Барбанак

ПРИБОР ДЛЯ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ВОДЫ В ВОДОЕМАХ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

eltech@vstu.ru, mila27121989@mail.ru, ttttttt20032003@mail.ru

Автор, ответственный за переписку:

Людмила Александровна Коновалова, mila27121989@mail.ru

В статье рассматривается проблема оперативного контроля качества водных ресурсов. Представлены результаты разработки портативного бюджетного прибора на базе микроконтроллера ATmega328P для измерения общего содержания растворенных твердых веществ (TDS). В качестве метода измерения выбран кондуктометрический способ, обеспечивающий компромисс между точностью, скоростью и стоимостью. Аппаратная часть устройства включает датчик TDS, температурный сенсор для компенсации температурной погрешности и LCD-дисплей с интерфейсом I2C для вывода данных. Разработана принципиальная схема, корпус, обеспечивающий компактность и защиту компонентов, и программное обеспечение с алгоритмами фильтрации и температурной коррекции. Проведенные испытания показали работоспособность прибора в диапазоне 0–1000 ppm с погрешностью не более $\pm 8\%$. Устройство апробировано в полевых условиях на водных объектах г. Волгограда, что подтвердило его эффективность для бытового использования, экологического мониторинга и образовательных целей. Обсуждаются перспективы модернизации устройства, включая интеграцию модулей Wi-Fi, GPS и карт памяти для расширения функциональности.

Ключевые слова: качество воды, TDS, кондуктометрия, портативный прибор, экологический мониторинг, температурная компенсация

A. N. Shilin, L. A. Konovalova, T. A. Barbanakov

DEVICE FOR MONITORING WATER QUALITY IN WATER RESERVOIRS

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

The article discusses the problem of operational control of water quality. The results of the development of a portable low-cost device based on the ATmega328P microcontroller for measuring total dissolved solids (TDS) are presented. The conductometric method is chosen as the measurement method, providing a compromise between accuracy, speed, and cost. The hardware of the device includes a TDS sensor, a temperature sensor for temperature error compensation, and an LCD display with an I2C interface for data output. A schematic diagram, a housing that ensures compactness and protection of components, and software with filtering and temperature correction algorithms have been developed. The conducted tests showed that the device is operational in the range of 0–1000 ppm with an error of no more than $\pm 8\%$. The device has been tested in the field on water bodies in Volgograd, which confirmed its effectiveness for household use and environmental monitoring.

Keywords: water quality, TDS, conductometry, portable device, environmental monitoring, temperature compensation

Введение

Проблема обеспечения надлежащего качества водных ресурсов остается одной из наиболее актуальных в контексте глобальных экологических вызовов и задач устойчивого развития. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, потребление загрязненной воды является причиной распространения опасных заболеваний и приводит к значительным социально-экономическим потерям. В этой связи разработка эффективных методов и средств оперативного контроля качества воды представляет существенный научный и практический интерес.

Особую значимость имеет мониторинг общего содержания растворенных твердых веществ (TDS), являющегося интегральным показателем минерализации воды. Повышенные значения TDS могут свидетельствовать о наличии солей тяжелых металлов, нитратов, сульфатов и других потенциально опасных соединений. Существующие методы определения TDS включают гравиметрический, оптический и кондуктометрический способы. Гравиметрический метод, являясь эталонным, характеризуется высокой трудоемкостью и продолжительностью анализа. Оптические методы требуют использования дорогостоящего оборудования и сложной пробоподготовки, что ограничивает их применение для оперативного контроля.

Кондуктометрический метод, основанный на измерении электропроводности водных растворов, обладает рядом преимуществ, включая быстроту анализа, простоту реализации и экономическую эффективность. Однако его практическое применение сопряжено с необходимостью решения проблемы температурной зависимости электропроводности и обеспечения требуемой точности измерений.

Целью настоящего исследования является разработка научно-обоснованных решений по созданию портативного прибора для измерения TDS на базе микроконтроллера ATmega328P с реализацией алгоритмов температурной компенсации. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: проведение сравнительного анализа методов определения TDS; разработка структурной и принципиальной схем прибора; создание алгоритмов обработки измерительных сигналов; экспериментальное исследование метрологических характеристик прибора; апробация разработанного решения в натурных условиях.

Научная новизна работы заключается в разработке комплексного подхода к созданию портативного кондуктометрического прибора, включающего оригинальные решения по аппаратной реализации и алгоритмическому обеспечению процессов измерения. Практическая значимость определяется возможностью использования результатов работы для мониторинга качества водных ресурсов в природоохранной деятельности, сельском хозяйстве и жилищно-коммунальном хозяйстве.

Теоретической и методологической основой исследования являются работы отечественных и зарубежных ученых в области кондуктометрии, микропроцессорной техники и анализа качества водных сред. Экспериментальные исследования проводились с использованием современных методов измерения и обработки данных. Для решения поставленных задач был выбран кондуктометрический метод. Реализованная аппаратная платформа прибора основана на микроконтроллере ATmega328P, который выполняет функции управления, аналого-цифрового преобразования и обработки данных. Для измерения содержания растворенных

твердых веществ (TDS) применяется датчик SEN0244 с двумя электродами из нержавеющей стали AISI 316 и диапазоном измерений 0–1000 ppm, подключаемый к аналоговому входу микроконтроллера. Для компенсации температурной погрешности используется цифровой датчик температуры DS18B20 в герметичном корпусе, обеспечивающий точность $\pm 0,5$ °C и подключенный по шине. Интерфейс пользователя реализован на базе LCD-дисплея 16x2 с модулем I2C, что позволило минимизировать количество соединительных проводов с двух до четырех (VCC, GND, SDA, SCL) и сохранить цифровые шины микроконтроллера. Общая схема подключения компонентов представлена на рис. 1.

Конструктивное исполнение обеспечивает удобство эксплуатации и защиту компонентов. Для этого был разработан с помощью 3D-печати корпус из ABS-пластика, обладающего высокой прочностью и устойчивостью к воздействию окружающей среды. Конструкция включает отсек для батарейного питания, типа «Крона» на 9 В, монтажные стойки для платы Arduino, посадочное место для дисплея и герметичные отверстия для погружения датчиков TDS и температуры.

Программное обеспечение, разработанное в среде Arduino IDE, реализует комплексный алгоритм работы, включающий несколько ключевых функций. Обеспечивается сбор данных посредством циклического считывания аналогового сигнала с TDS-датчика и цифровых показаний с термодатчика по шине 1-Wire. Для повышения точности применяется медианная

фильтрация массива из 30 аналоговых измерений для подавления случайных шумов и выбросов. Критически важным элементом является алгоритм температурной компенсации, приводящий значение электропроводности к стандартной температуре 25 °C с использованием температурного коэффициента $\alpha = 0,02$ °C⁻¹, характерного для природных вод. После этого выполняется расчет *TDS* – пересчет компенсированного значения напряжения в концентрацию (в ppm) с использованием калибровочного коэффициента. Для удобства пользователя реализовано потактное обновление информации: температура измеряется каждые 2 секунды, данные *TDS* усредняются каждые 40 мс, а итоговый результат выводится на дисплей с интервалом 800 мс. Результаты измерений в режиме реального времени выводятся на LCD-дисплей, а также в последовательный порт (Serial Monitor) для отладки и записи.

Для обеспечения точности и подтверждения достоверности показаний была проведена калибровка и валидация прибора. Калибровка выполнялась с использованием стандартных растворов хлорида натрия (NaCl) известной концентрации. Процедура включала проверку нулевых показаний в дистиллированной воде и калибровку по раствору с концентрацией 500 ppm для определения поправочного коэффициента. Валидация результатов проводилась на образцах воды с различной степенью минерализации: от дистиллированной до природной и минеральной вод.

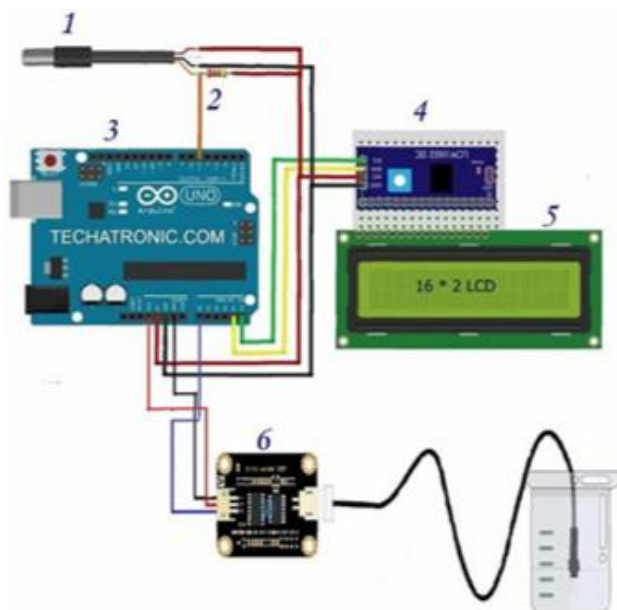


Рис. 1. Схема подключения компонентов:
1 – датчик температуры, 2 – резистор, 3 – Arduino Uno, 4 – I2C,
5 – LCD (жидкокристаллический дисплей), 6 – датчик TDS (SEN0244)

Результаты исследования

Проведенные лабораторные испытания позволили оценить основные метрологические характеристики разработанного прибора. Ре-

зультаты калибровки и температурной компенсации по стандартным растворам NaCl представлены в таблице.

Результаты калибровки и температурной компенсации по стандартным растворам NaCl

Температура, °C	Без температурной компенсации, ppm	Погрешность, %	С температурной компенсацией, ppm	Погрешность, %
8	334	-33,2	477	-4,6
12	377	-24,6	481	-3,8
15	412	-17,6	488	-2,4
18	461	-7,8	490	-2,0
22	476	-4,8	495	-1,0
25	508	+1,6	503	+0,6
30	553	+10,6	507	+1,4
37	621	+24,2	510	+2,0
42	678	+35,6	516	+3,2

Как следует из представленных данных, реализованный алгоритм температурной компенсации позволил существенно повысить точность измерений общего содержания растворенных твердых веществ (*TDS*) в водных средах. Эффективность разработанного алгоритма демонстрируется снижением погрешности измерений с 35,6 % до 5 % в широком диапазоне температур 8–42 °C.

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшая эффективность температурной компенсации достигается в экстремальных температурных условиях. При температуре 8 °C, характерной для холодного времени года, погрешность уменьшилась с 33,2 % до 4,6 %, Аналогичная тенденция наблюдается и при высоких температурах: при 42 °C погрешность сократилась с 35,6 % до 3,2 %, что представляет высокое улучшение точности измерений.

Наилучшие результаты достигаются при температуре, близкой к стандартной калибровочной (25 °C), где погрешность не превышает 0,6 %. Это объясняется тем, что калибровка прибора проводилась именно при данной температуре, что минимизирует дополнительные поправочные коэффициенты. Однако важно отметить, что даже при значительном отклонении от калибровочной температуры (15–20 °C) погрешность сохраняется на приемлемом уровне 2–4 %.

Разработанный алгоритм температурной компенсации основан на применении температурного коэффициента $\alpha = 0,02 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, характерного для большинства природных вод. Данный коэффициент учитывает зависимость электропроводности воды от температуры, обусловленную изменением вязкости раствора и подвижности ионов. При повышении температуры уменьшается вязкость воды, что приводит к увеличению подвижности ионов и, соответственно, росту электропроводности даже при неизменной концентрации растворенных веществ.

Результаты полевых испытаний прибора, нанесенные на карту мониторинга (рис. 2), выявили значительную пространственную дифференциацию уровня минерализации водных объектов г. Волгограда, что свидетельствует о неоднородности антропогенной нагрузки на водные экосистемы региона.

Наиболее благоприятная ситуация наблюдается в основных водных артериях города. Река Волга демонстрирует относительно низкие показатели *TDS* в диапазоне 250–280 ppm, что соответствует норме для крупных равнинных рек и свидетельствует о эффективной самоочищающей способности водного объекта. Аналогичные показатели зафиксированы в ериках Верблюды (310–320 ppm) и Судомойка (350 ppm), что позволяет отнести эти водотоки к категории условно фоновых.

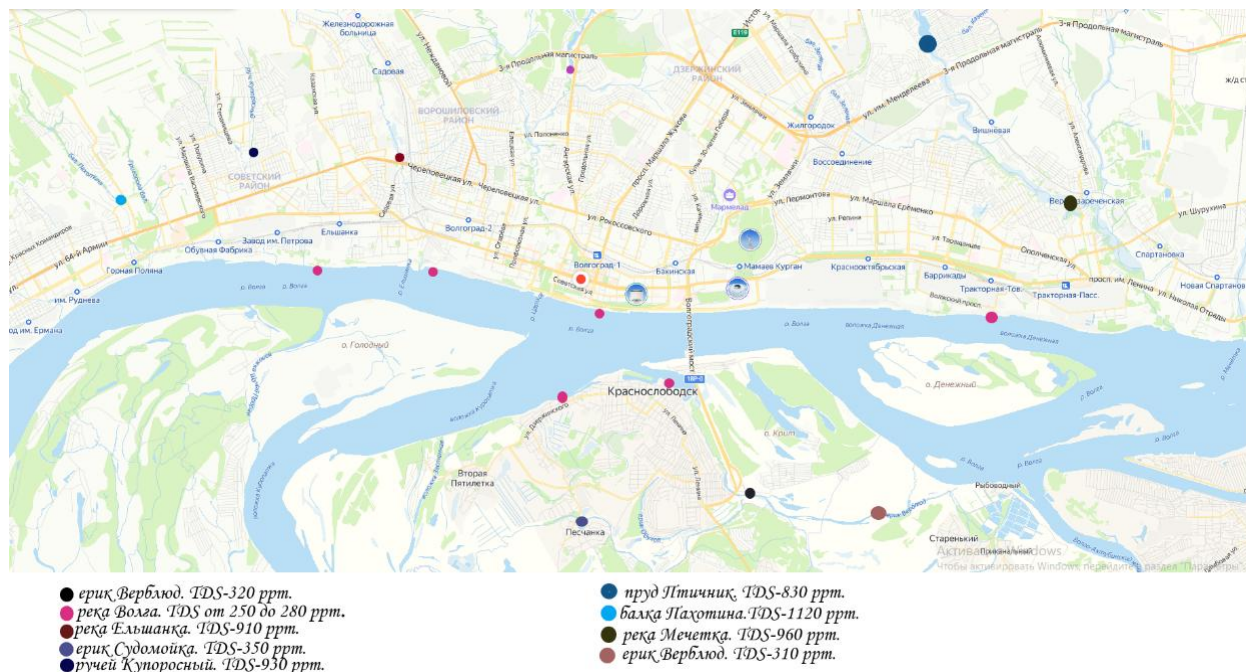


Рис. 2. Карта мониторинга минерализации воды в регионе

Вместе с тем, выявлена группа водных объектов с повышенной минерализацией, требующая особого внимания. К ним относятся пруд Птичник (830 ppm), ручей Купоросный (930 ppm) и река Мечетка (960 ppm). Показатели TDS в этих водоемах превышают фоновые значения в 3–3,5 раза, что указывает на значительное антропогенное воздействие. Особую тревогу вызывает состояние реки Елшанка (910 ppm) и балки Пахотина (1120 ppm), где зафиксированы максимальные значения минерализации. Столь высокие показатели TDS могут быть связаны с поступлением промышленных стоков, сельскохозяйственных дренажных вод или нарушением естественного гидрологического режима.

Пространственный анализ распределения показателей TDS позволяет выявить четкую закономерность: наименьшие значения характерны для основных водных артерий (Волга, крупные ерики), тогда как максимальная минерализация наблюдается в малых водотоках и изолированных водоемах. Это объясняется как естественными факторами (разбавление в крупных реках), так и антропогенными (концентрация загрязняющих веществ в малых водоемах).

Полученные данные подчеркивают необходимость разработки дифференцированных мероприятий по охране водных ресурсов Волго-

града, с особым вниманием к малым водотокам как наиболее уязвимым элементам гидрографической сети.

Заключение

Проведенные исследования подтвердили эффективность разработанного портативного прибора для оперативного контроля общего содержания растворенных твердых веществ (TDS) в водных ресурсах. Созданное устройство на базе микроконтроллера ATmega328P демонстрирует стабильную работу в диапазоне 0–1000 ppm с погрешностью не более $\pm 8\%$, что соответствует требованиям к приборам полупрофессионального класса.

Ключевым достижением работы стала реализация алгоритма температурной компенсации, позволившего снизить погрешность измерений с 35,6 % до 5 % в широком температурном диапазоне 8–42 °C. Наибольшая эффективность алгоритма была достигнута в экстремальных температурных условиях, где погрешность измерений была снижена в 7–11 раз.

Практическая значимость разработки подтверждена результатами полевых испытаний на водных объектах Волгограда, которые выявили значительную пространственную дифференциацию уровня минерализации – от 250 ppm в р. Волга до 1120 ppm в балке Пахотина. Полученные данные свидетельствуют о необхо-

димости дифференцированного подхода к охране водных ресурсов региона.

Основные преимущества разработанного прибора включают: сочетание достаточной точности с доступностью и простотой использования; энергоэффективность и автономность работы; возможность оперативного контроля в полевых условиях; универсальность применения для экологического мониторинга, бытового использования и образовательных целей.

Перспективы дальнейшего развития проекта связаны с интеграцией беспроводных модулей связи (Wi-Fi, GSM для передачи данных в облачные сервисы), добавлением GPS-модуля для автоматической геопривязки измерений и расширением функциональности за счет подключения дополнительных датчиков для комплексной оценки качества воды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баянов, Н. Г. ООПТ и совершенствование мониторинга водных экосистем в России / Н. Г. Баянов // Астраханский вестник экологического образования. – 2013. – № 4 (26). – С. 82–88.
2. Болгов, М. В. О проблемах развития нормативно-методической базы управления водными ресурсами и водопользованием в Российской Федерации / М. В. Болгов, Е. В. Веницианов, С. Н. Шашков // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2021. – № 2. – С. 8–21. – DOI: 10.35567/1999-4508-2021-2-1.
3. Данилов-Данильян, В. И. Водные ресурсы России: состояние, использование, охрана, проблемы управления / В. И. Данилов-Данильян // Экономика. Налоги. Право. – 2019. – Т. 12, № 5. – С. 18–31. – DOI: 10.26794/1999-849X-2019-12-5-18-31.
4. Избранные труды Института водных проблем РАН (1967-2017) : монография : в 2 т. / под ред. А. Н. Гельфана. – М. : Курс, 2017. – Т. 1. – 1360 с.
5. Куденко, Д. В. Современные методы эколого-гидрогеологического мониторинга водных объектов в зарубежной и отечественной практике / Д. В. Куденко, Л. И. Симакова // Экология речных ландшафтов : сб. ст. по материалам VIII Междунар. науч. экол. конф. (г. Краснодар, 1 дек. 2023 г.). – Краснодар : КубГАУ, 2024. – С. 162–170.
6. Кутявина, Т. И. Современное состояние и проблемы мониторинга поверхностных водных объектов России (обзор) / Т. И. Кутявина, Т. Я. Ашихмина // Теоретическая и прикладная экология. – 2021. – № 2. – С. 13–21. – DOI: 10.25750/1995-4301-2021-2-013-021.
7. Мамась, Н. Н. Актуальные подходы к эколого-гидрогеологическому мониторингу водных объектов / Н. Н. Мамась, А. Ю. Горбенко, Д. В. Куденко // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2023. – № 3 (91). – С. 151–160.
8. Об утверждении Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года и плана мероприятий по ее реализации : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 27 авг. 2009 г. № 1235-р // СПС «Консультант-Плюс». – Режим доступа: URL: <https://docs.cntd.ru/document/902173350> (дата обращения: 01.09.2025 г.).