УДК: 631.624.004.021

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВОДОТОКОВ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ВОДЫ

Раджабова Махфуза Азимовна
к.т.н., доцент Ташкентский государственный
технический университет
https://doi.org/10.5281/zenodo.24457786

Аннотация. В статье представлен подход к автоматизации экологической оценки водотоков с использованием TDS/EC-датчиков для измерения электропроводности воды. Рассмотрены аппаратные и программные решения на базе Arduino/ESP32, способы передачи данных в облако, визуализация и анализ. Приведена практическая схема подключения датчиков и пример кода для непрерывного мониторинга качества воды. Данный подход позволяет получать точные данные в реальном времени, прогнозировать экологические риски и оптимизировать водопользование.

Ключевые слова: экологическая оценка, водотоки, TDS-датчик, EC-датчик, Arduino, автоматизация, мониторинг воды, электропроводимость воды, экологический мониторинг, система управления, качество воды.

Введение. Вода является ключевым природным ресурсом, и качество водотоков напрямую влияет на здоровье экосистем и человека. Одним из важных показателей состояния воды является электропроводимость (EC), которая отражает концентрацию растворённых ионов, включая соли и загрязняющие вещества. Современные технологии позволяют автоматизировать мониторинг водных объектов, используя доступные микроконтроллеры, такие как Arduino [1]. Автоматизированные системы обеспечивают регулярный сбор данных, сокращают затраты на лабораторный анализ и повышают оперативность экологической оценки. Мониторинг качества водотоков является важной задачей для сохранения экосистем, обеспечения водоснабжения и контроля загрязнений [2]. Традиционные лабораторные методы трудоёмки и не обеспечивают непрерывного контроля. Автоматизация с использованием TDS/EC-датчиков позволяет измерять концентрацию растворённых веществ и электропроводность воды в режиме реального времени. Совмещение датчиков с микроконтроллерами Arduino/ESP32 и облачными платформами обеспечивает сбор, обработку и визуализацию данных, а также предупреждение о превышении допустимых норм [3].

Постановка задачи. Цель исследования - разработка и тестирование автоматизированной системы измерения электропроводимости воды на базе Arduino для экологического мониторинга водотоков. Основные задачи: 1. Определение требований к системе мониторинга водотоков. 2. Разработка схемы и программного обеспечения для Arduino для измерения электропроводимости [4]. 3. Тестирование точности и надёжности измерений. 4. Анализ возможности интеграции системы в автоматизированные сети контроля качества воды. Создать систему сбора данных о

водотоках с использованием TDS/EC-датчика и Arduino. 5. Разработать алгоритм расчёта индексов качества воды и автоматического оповещения. Продемонстрировать практическую реализацию системы для малых и средних водотоков [5].

Решение задач. Сбор данных TDS/EC-датчик измеряет электропроводность воды, DS18B20 – температуру. Передача данных ESP32 отправляет информацию на облако для хранения и анализа (рис.1) [6].

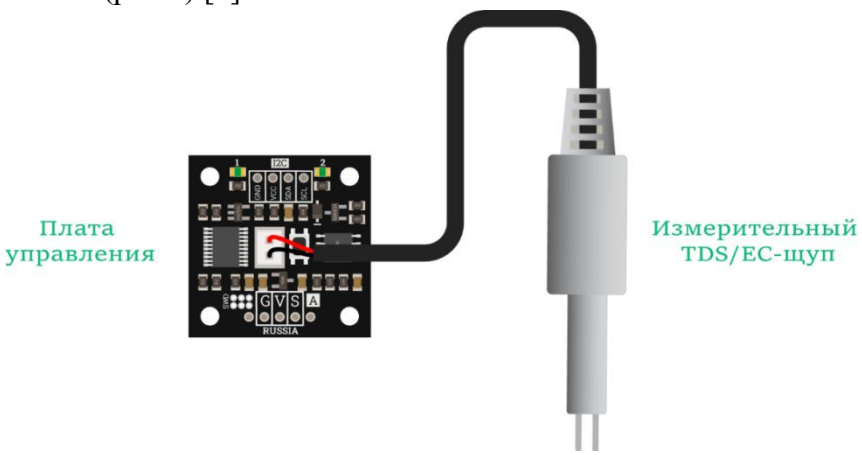

Рис.1. TDS/EC-датчик электропроводности воды

Основные характеристики EC-датчика

Параметр	Значение
Диапазон измерений	0-20 мС/см
Разрешение	0,01 мС/см
Точность	±2%
Интерфейс	Аналоговый выход (AO), цифровой (DO)
Напряжение питания	5 В DC
Ток потребления	~10-20 мА
Рабочая температура	0-80 °C

Модуль - TDS/EC-метр, FLASH-I2C - является устройством для измерения общего количества растворённых твердых веществ в воде и её удельной электрической проводимости [7].

Модуль построен на базе микроконтроллера STM32F030F4 и двух операционных усилителях LMC7101, и LM358, снабжён кнопкой калибровки, светодиодами информирующими о стадии калибровки, и собственным стабилизатором напряжения (рис.2) [8].

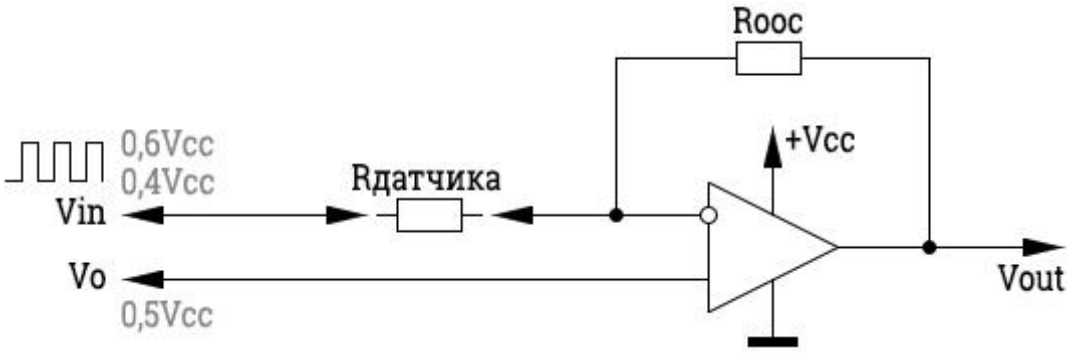

Рис.2. Измерительная часть схемы модуля

Модуль способен работать как TDS-метр для определения общего количества растворённых твердых веществ в воде от 0 до 10,000 ppm (1ppm = 1мг/л воды). Так и в качестве EC-метра для определения удельной электрической проводимости жидкости от 0 до 20,000 мСм/см. Модуль способен работать с различными датчиками (щупами), подключаемыми к колодке в центре платы (рис.3) [9].

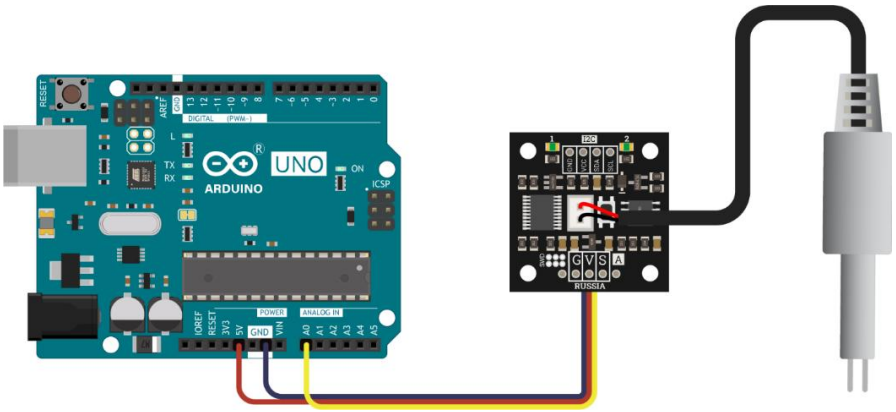

Рис.3. Схема подключение TDS/EC-датчика электропроводности воды к Arduino

Управление модулем осуществляется по шине I2C, а чтение показаний модуля можно осуществлять, либо по шине I2C, либо по аналоговому выходу модуля.

К одной шине I2C можно подключить более 100 модулей. Адрес модуля на шине I2C (по умолчанию 0x09) назначается программно и хранится в его энергонезависимой памяти (рис.4) [10].

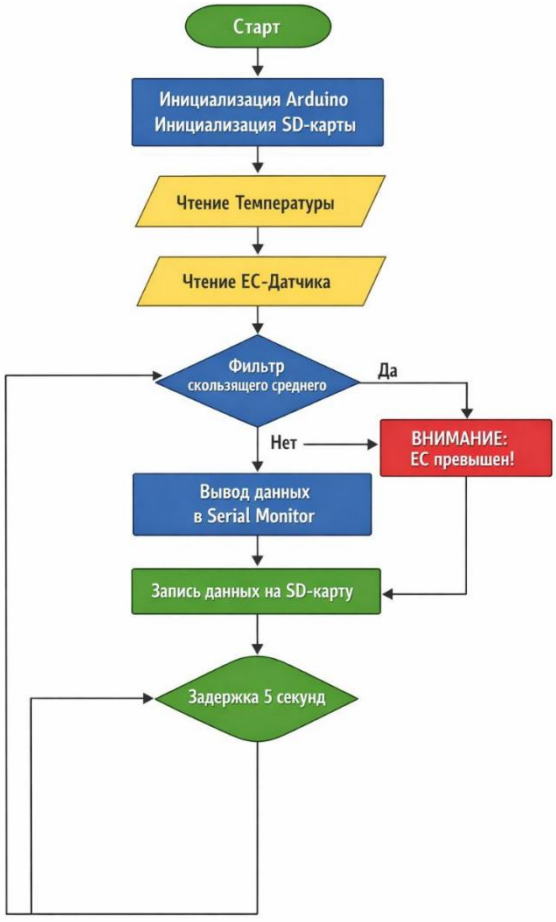

Рис.4. Блок-схема алгоритма управления объекта

Код Arduino для измерения электропроводности воды

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
const int ECPin = A0;
const int chipSelect = 10;
const int oneWireBus = 2;
const int numSamples = 10;
const float ECThreshold = 2.0;
const float voltageRef = 5.0;
const int analogMax = 1023;
const float EC_Coefficient = 1.0;
OneWire oneWire(oneWireBus);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
float ecSamples[numSamples];
int sampleIndex = 0;
void setup() {
Serial.begin(9600);
sensors.begin();
for (int i = 0; i < numSamples; i++)
ecSamples[i] = 0;
if (!SD.begin(chipSelect)) {
Serial.println("Ошибка инициализации SD-карты!");
} else {
Serial.println("SD-карта готова.");
}
}
void loop() {
sensors.requestTemperatures();
float temperatureC = sensors.getTempCByIndex(0);
int sensorValue = analogRead(ECPin);
float voltage = sensorValue * voltageRef / analogMax;
float ecRaw = voltage * EC_Coefficient;
ecSamples[sampleIndex] = ecRaw;
sampleIndex = (sampleIndex + 1) % numSamples;
float ecSum = 0;
for (int i = 0; i < numSamples; i++) ecSum += ecSamples[i];
float ecFiltered = ecSum / numSamples;
Serial.print("Температура (°C): ");
Serial.print(temperatureC);
Serial.print(" | EC (мС/см): ");
Serial.println(ecFiltered);
if (ecFiltered > ECThreshold) {
Serial.println("ВНИМАНИЕ: EC превышен!");
}
File dataFile = SD.open("EC_data.csv", FILE_WRITE);
if (dataFile) {
dataFile.print(millis());
dataFile.print(",");
dataFile.print(temperatureC);
dataFile.print(",");
dataFile.println(ecFiltered);
dataFile.close();
} else {
Serial.println("Ошибка записи на SD-карту.");
}
delay(5000); // Интервал измерений 5 секунд
}
```

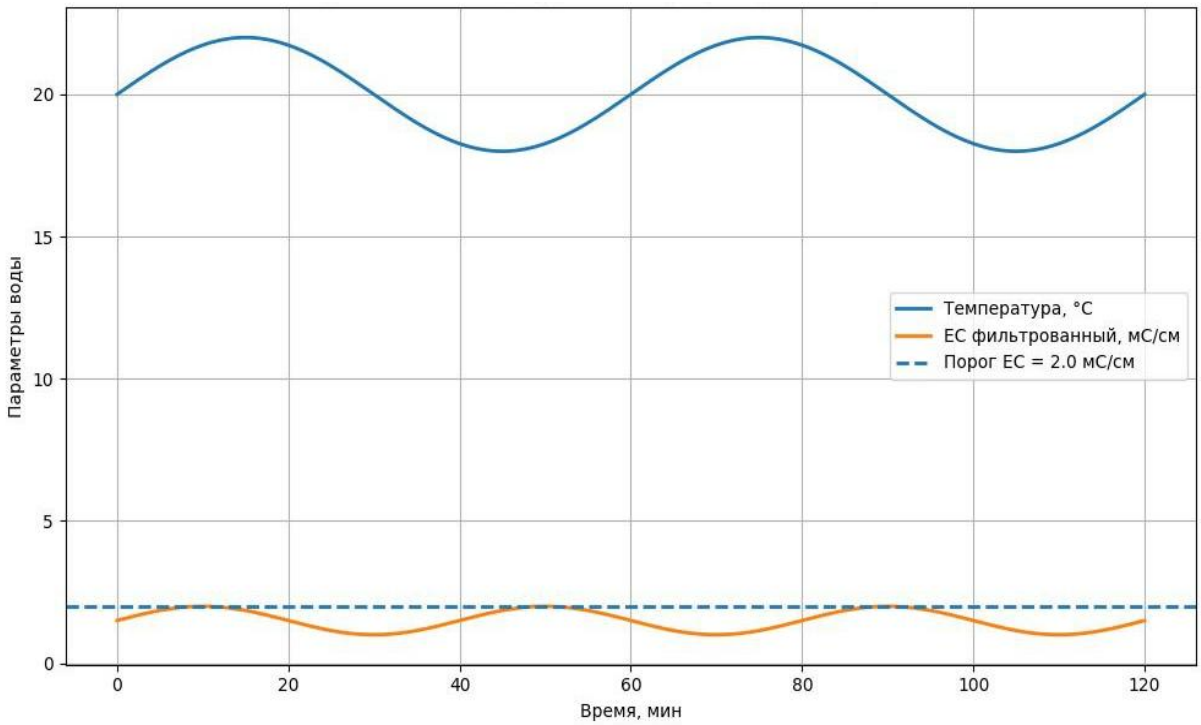

Рис.5. Динамика температуры и электропроводности водотока

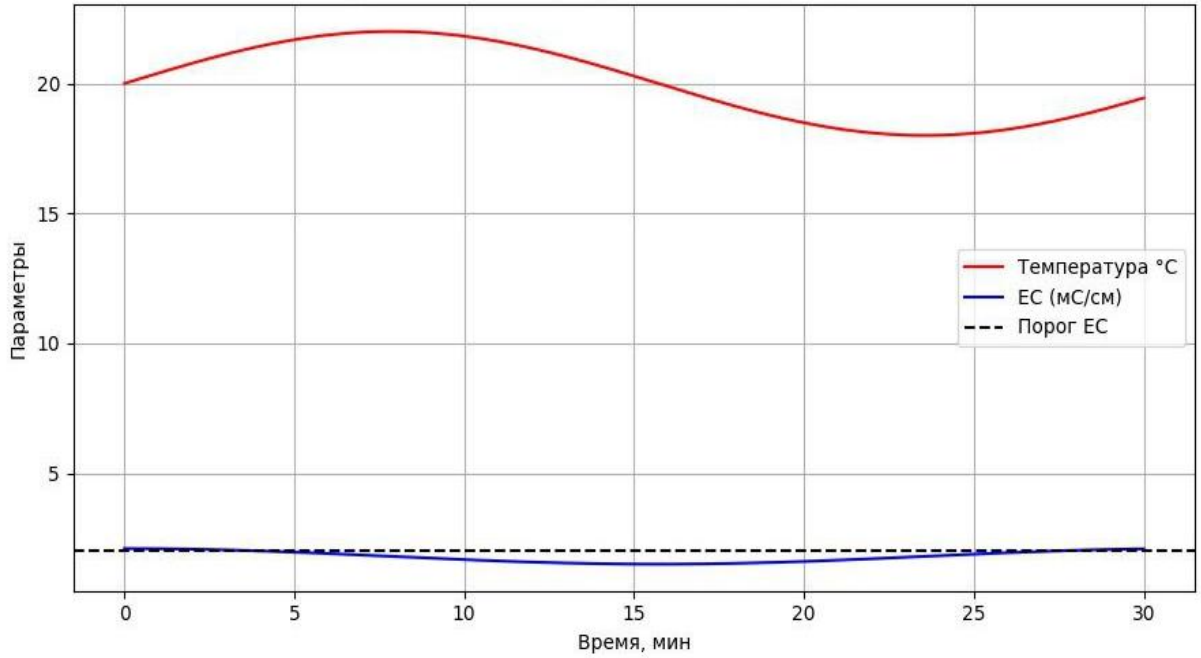

Рис.6. Динамика температуры и электропроводности

Математическая модель мониторинга водотоков по электропроводимости.

Электропроводимость воды

Электропроводимость (EC) воды зависит от концентрации растворенных ионов. Основная формула для перевода напряжения с датчика в EC:

$$EC = k * U_{EC} (1)$$

где:

EC - электропроводимость в мС/см;

U_{EC} - напряжение с аналогового выхода EC-датчика;
k - калибровочный коэффициент, зависящий от датчика и температуры воды.
Напряжение с Arduino вычисляется через АЦП:

$$U_{EC} = \frac{ADC}{2^{n}-1} * U_{опор} (2)$$

где:
ADC - значение с аналогового входа (0 - 1023 для Arduino 10-бит);
n = 10 - разрядность АЦП;
$U_{опор}$ - опорное напряжение (5 В для Arduino Uno).

Температурная коррекция EC

Электропроводимость сильно зависит от температуры. Коррекция вычисляется как:

$$EC_{20} = \frac{EC}{1+\alpha*(T-20)} (3)$$

где:
EC_{20} - приведенная к 20°C электропроводимость;
$\alpha \approx 0{,}02$ 1/°C - температурный коэффициент;
T - температура воды в °C.

Фильтр скользящего среднего

Для сглаживания шумов используется скользящее среднее:

$$\overline{EC_n} = \frac{1}{N}\sum_{i-0}^{N-1} EC_{n-i} (4)$$

где:

$\overline{EC_n}$ - усреднённое значение на текущем шаге;

N - количество последних измерений;
EC_{n-i} - отдельные измерения.

Экологическая оценка

Для мониторинга качества воды вводим индекс загрязнения (Q), основанный на EC:

$$Q = \frac{\overline{EC_n}}{EC_{max}} (5)$$

где:
EC_{max} - максимально допустимая электропроводимость для данного водотока (например, 2 мС/см для пресной воды);
Q > 1 указывает на превышение нормы.

Автоматическое оповещение

Система сигнализирует при превышении порога:

$$S = \begin{pmatrix} 1, если & \overline{EC_n} > & EC_{порог} \\ 0, & иначе & \end{pmatrix} (6)$$

где S - бинарная переменная для уведомления.

Динамика изменения EC

Для прогнозирования состояния водотока можно использовать дискретную модель изменения EC во времени:

$$EC_{n+1} = EC_n + \Delta t * (R_{вх} - R_{вых} + R_{загр}) (7)$$

где:

$R_{вх}$ - естественное поступление ионов;

$R_{выхt}$ - вымывание ионов;

$R_{загр}$ - антропогенное загрязнение;

Δt - интервал измерений.

Эта модель позволяет прогнозировать, когда EC может превысить допустимые нормы и требует вмешательства.

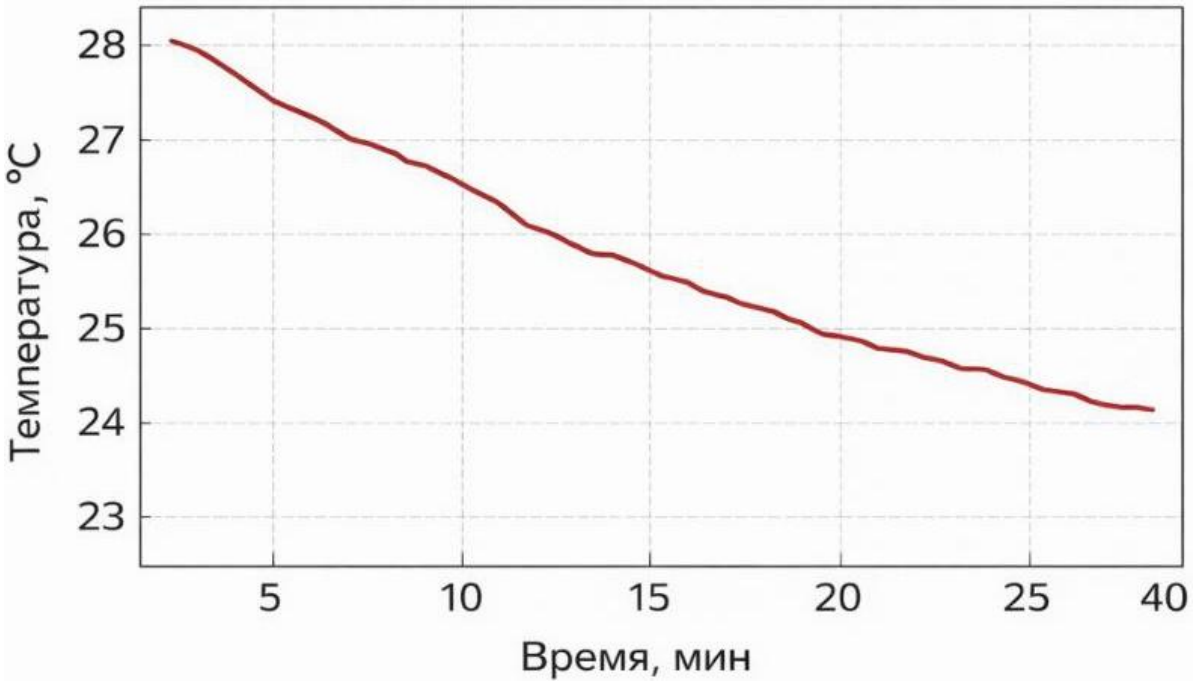

Рис.7. Динамика температуры

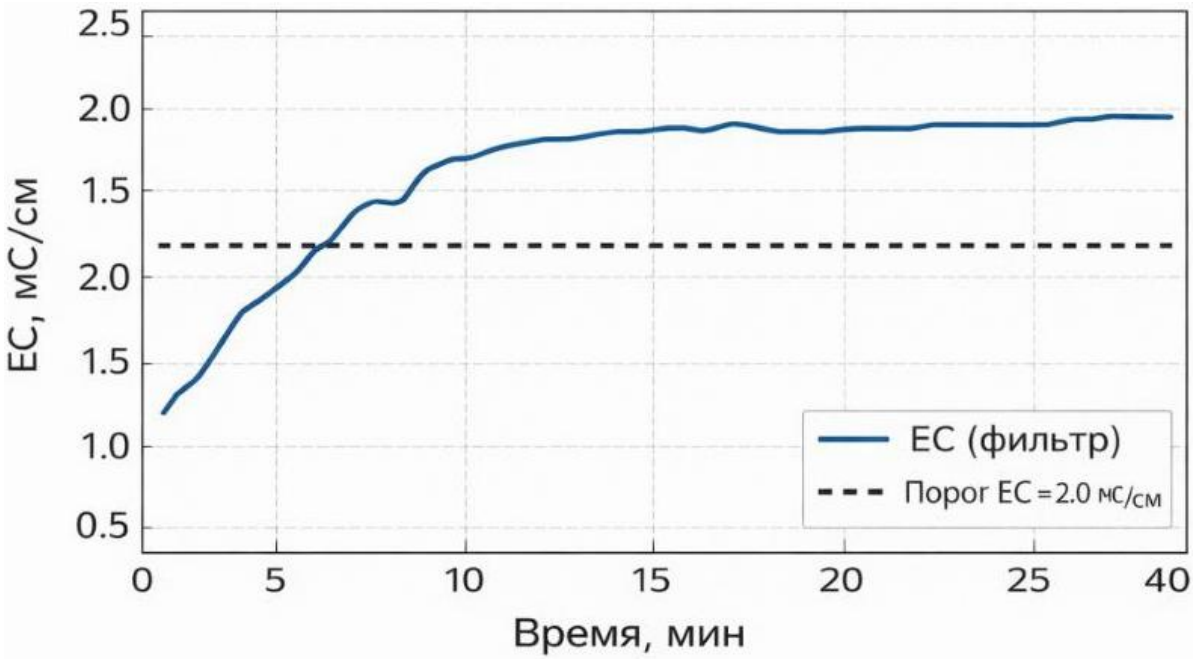

Рис.8. Динамика электропроводности воды

Числовая модель измерения электропроводимости воды. Данные измерений: Arduino снял следующие значения с EC-датчика (АЦП 10-бит, диапазон 0 – 1023, $U_{опор}$ = 5 В):

Время (с)	ADC (EC-датчик)	Температура (°C)
0	512	18
5	520	18,5
10	530	19
15	525	19,2
20	540	19,5

Преобразование ADC в напряжение

$$U_{EC} = \frac{ADC}{1023} * 5 \quad (8)$$

Вычисляем для каждого измерения:

1. цифровое значение 512 из АЦП соответствует $U_{EC} = \frac{512}{1023} * 5 \approx 2{,}50$ В
2. цифровое значение 520 из АЦП соответствует $U_{EC} = \frac{520}{1023} * 5 \approx 2{,}54$ В
3. цифровое значение 530 из АЦП соответствует $U_{EC} = \frac{530}{1023} * 5 \approx 2{,}59$ В
4. цифровое значение 525 из АЦП соответствует $U_{EC} = \frac{525}{1023} * 5 \approx 2{,}56$ В
5. цифровое значение 540 из АЦП соответствует $U_{EC} = \frac{540}{1023} * 5 \approx 2{,}64$ В

Преобразование напряжения в EC

Используем калибровочный коэффициент k = 1,2 мС/см на вольт:

$$EC = k * U_{EC} (9)$$

Время (с)	V (В)	EC (мС/см)
0	2,50	3,00
5	2,54	3,05
10	2,59	3,11
15	2,56	3,07
20	2,64	3,17

Температурная коррекция EC

Используем коэффициент α = 0,02 1/°C:

$$EC_{20} = \frac{EC}{1+\alpha*(T-20)} (10)$$

1. Время 0; $EC_{20} = \frac{3,00}{1+0,02*(18-20)} = \frac{3,00}{0,96} \approx 3,13$ мС/см
2. Время 5; $EC_{20} = \frac{3,05}{1+0,02*(18,5-20)} = \frac{3,05}{0,97} \approx 3,14$ мС/см
3. Время 10; $EC_{20} = \frac{3,11}{1+0,02*(19-20)} = \frac{3,11}{0,98} \approx 3,17$ мС/см
4. Время 15; $EC_{20} = \frac{3,07}{1+0,02*(19,2-20)} = \frac{3,07}{0,984} \approx 3,12$ мС/см
5. Время 20; $EC_{20} = \frac{3,17}{1+0,02*(19,5-20)} = \frac{3,17}{0,96} \approx 3,20$ мС/см

Фильтр скользящего среднего (N = 3)

$$\overline{EC_n} = \frac{EC_{20,n}+EC_{20,n-1}+EC_{20,n-2}}{3} (11)$$

Время (с)	EC20 (мС/см)	Скользящее среднее
0	3,13	3,13
5	3,14	3,14
10	3,17	(3,13 + 3,14 + 3,17) / 3 = 3,15
15	3,12	(3,14 + 3,17 + 3,12) / 3 = 3,143
20	3,20	(3,17 + 3,12 + 3,20) / 3 = 3,163

Проверка порога и экологическая оценка

Порог EC для пресной воды: EC_{max} = 2,0 мС/см.

$$Q = \frac{\overline{EC}}{EC_{max}} (12)$$

Время (с)	Скользящее среднее	Q	Порог
0	3,13	1,565	превышен
5	3,14	1,57	превышен
10	3,15	1,575	превышен
15	3,143	1,572	превышен
20	3,163	1,582	превышен

Водоток имеет повышенную электропроводимость, превышающую допустимые нормы, требуется экологический контроль и возможное вмешательство.

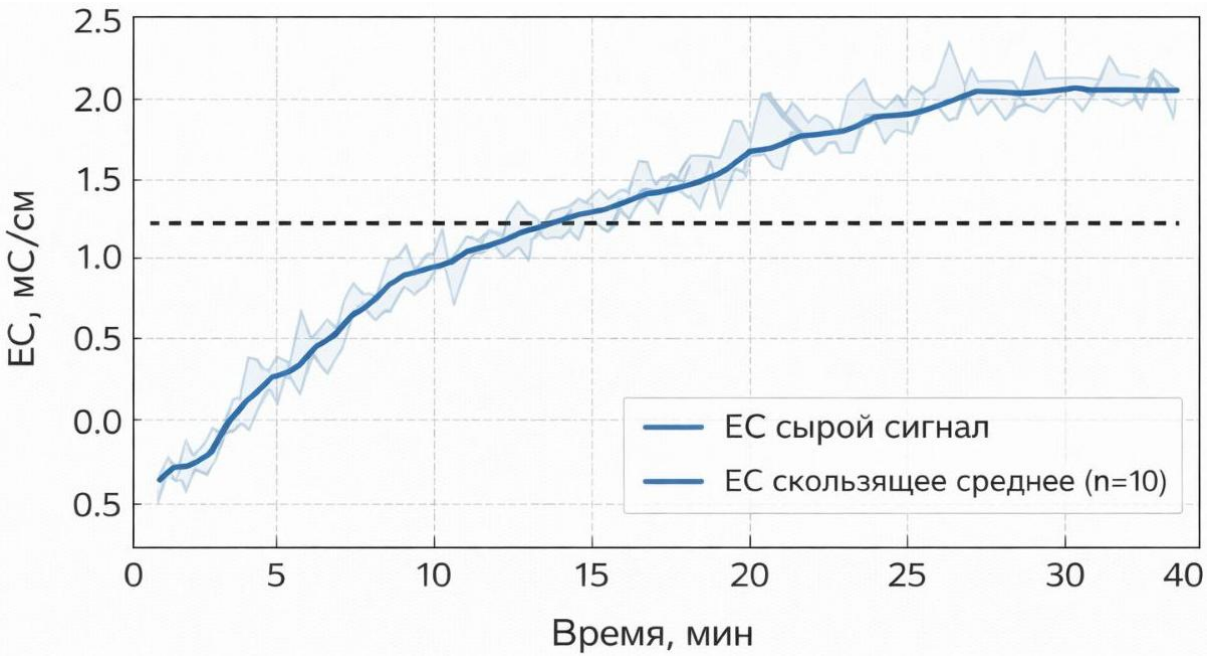

Рис.9. EC сырой сигнал и скользящее среднее (n=10)

Выводы: Автоматизированный мониторинг водотоков с использованием TDS/EC-датчиков и Arduino обеспечивает оперативную экологическую оценку. Реализуемая система позволяет непрерывно собирать и анализировать данные о качестве воды. Применение облачных платформ и визуализации улучшает прогнозирование и принятие решений для устойчивого использования водных ресурсов. Перспективы включают интеграцию дополнительных датчиков (pH, мутность, кислород), а также использование машинного обучения для раннего выявления загрязнений.

Список использованной литературы:

1. Monk, S. Programming Arduino: Getting Started with Sketches. McGraw-Hill Education, 2016.
2. Thing Speak Documentation.
3. He, L., Zhang, X., et al. IoT-based real-time water quality monitoring system. Sensors, 2021, 21(14): 4742.
4. Mishra, A., Singh, R. Automated water quality monitoring using Arduino and IoT. Int. J. of Engineering Research, 2020, 9(6): 112-118.
5. Карпова, Е. Л. Электропроводность воды как показатель загрязнения водотоков. Журнал гидробиологии, 2019, №3, с. 45-52.
6. Гусев В.В. Экологический мониторинг водных объектов. Москва, 2020.
7. Arduino. Arduino Official Documentation.
8. Козлов С.А. Автоматизация измерительных систем. Санкт-Петербург, 2019.
9. APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition, 2017.
10. Михайлов А.П. Электропроводность воды и методы её измерения. Журнал “Водные ресурсы”, №4, 2021.