

И.И. Стрельников

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА ОРАНЖЕРЕЙНОГО КОМПЛЕКСА ДОНЕЦКОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Донецкий ботанический сад»*

Приведены результаты разработки электронного сенсорного модуля для мониторинга микроклиматических параметров в оранжерейном комплексе Донецкого ботанического сада. Модуль основан на доступных недорогостоящих электронных компонентах и включает управляющий микроконтроллер ESP32 и датчики температуры, влажности воздуха, атмосферного давления и освещенности. Разработаны протоколы обмена информацией и база данных для хранения и первичной обработки показаний прибора. Модуль обладает умеренной автономностью и может продолжать сбор данных до 48 часов в условиях перебоев в сети Интернет или электрического питания.

Ключевые слова: микроклимат, ESP32, температура, влажность воздуха, освещенность

Цитирование: Стрельников И.И. Разработка модуля для измерения параметров микроклимата оранжерейного комплекса Донецкого ботанического сада // Промышленная ботаника. 2023. Вып. 23, № 4. С. 46–53. DOI: 10.5281/zenodo.10566343

Введение

В оранжерейном комплексе Донецкого ботанического сада (далее – ДБС) представлена коллекция тропических и субтропических растений, насчитывающая более 3 тысяч таксонов, из которых 755 занесены в Международный охраняемый список (МСОП). Для сохранения уникальной коллекции необходимо поддержание оптимальных микроклиматических условий. Отклонение от благоприятного режима отрицательно влияет на рост и развитие растений, что обуславливает необходимость мониторинга параметров микроклимата. Своевременный контроль позволяет не только оптимизировать хозяйственные мероприятия по уходу за растениями в оранжерейном комплексе (отопление, полив, проветривание и т.д.), но и обеспечить поддержку научных работ по интродукции растений и изучению адаптивных процессов объективными данными параметров микроклимата [10, 11].

В настоящее время измерения параметров температуры, влажности воздуха и освещенности в оранжерейном комплексе проводятся сотрудниками в ручном режиме с последующим внесением в электронные таблицы. Измерения производятся 3 раза за рабочий день, что недостаточно для точного определения суточных средних значений показателей и их динамики. Для получения объективной информации необходимы автоматизированные электронные станции мониторинга с цифровым протоколированием. В то же время существующие общедоступные системы не имеют возможности измерения освещенности и не обеспечивают достаточную защиту от высокой влажности и проникновения воды. Наружные метеостанции пользовательского сегмента имеют неудобные методы регистрации, обычно сохраняя данные на серверах производителя (что создает проблемы с безо-

пасностью и доступностью) и имеют завышенную себестоимость за счет дополнительных не используемых функций (анемометры, датчики дождя и т.д.) Профессиональные и полупрофессиональные метеостанции имеют высокую стоимость, что усугубляется необходимостью использования как минимум трех станций в одной оранжерее.

Стремительный прогресс в области электроники, в частности в производстве экономических отладочных плат для микроконтроллеров и разнообразных электронных датчиков открыл путь к созданию доступных систем «сделай сам», подходящих для оценки параметров микроклимата [8, 9]. Подобные решения стали популярными как в практике научных исследований, так для управления тепличными хозяйствами [11]. Эта технология позволяет легко собирать высокоточные данные о различных факторах окружающей среды, таких как температура, влажность, интенсивность освещения, уровень влажности почвы и прочее, не вкладывая средства в дорогостоящее коммерческое оборудование [12].

Цель и задачи исследований

Целью исследований была разработка и сборка модуля датчиков микроклимата на основе доступных недорогих радиокомпонентов и микроконтроллера с возможностью сохранения измерений в дополнительном программном модуле информационной системы ДБС.

Задачи работы – разработать требования к модулю, отвечающие потребностям хозяйственной и научной деятельности лаборатории тропических и субтропических растений ДБС; прототип модуля измерений параметров микроклимата; протокол обмена данными между модулем и сервером информационной системы; программный модуль информационной системы для приема, предобработки, хранения и предоставления конечному пользователю данных о микроклимате.

Объекты и методики исследований

Разработка модуля велась на основе базовых принципов электроники и радиотехники. Выбор подходящих модулей проводился по результатам всестороннего изучения существующих рыночных предложений электронных компонентов (микроконтроллеров и сенсоров). Микрокод модуля создан с использованием интегрированной

среды разработки PlatformIO на базе редактора VS Code. При этом использовали язык программирования С. Серверная часть проекта заключалась в доработке информационной системы ДБС, представляющей собой веб-приложение, основанное на фреймворке Django (язык программирования Python 3.9 [13]) и СУБД PostgreSQL. Для хранения показателей сенсоров использовали расширение TimescaleDB, реализующее парадигму базы данных временных рядов.

Результаты исследований и их обсуждение

Основываясь на анализе текущих и предполагаемых научных задач лаборатории, а также хозяйственных потребностей, были выделены следующие принципиальные требования для разрабатываемого модуля измерения показателей микроклимата:

1) измерение параметров «температура воздуха», «атмосферное давление», «относительная влажность», «освещенность горизонтального плана»;

2) высокая частота измерений и логирования (измерение 1 раз в 10 секунд) данных для обеспечения усреднения в более крупных временных отрезках и возможности фильтрации выбросов в данных;

3) организация передачи данных на сервер по сети Интернет с применением беспроводной сети WiFi;

4) работа от сети 220 В с дополнительным резервным питанием на случай перебоев электросети, которое обеспечит автономное функционирование прибора минимум на 24 часа;

5) обеспечение временного хранения измерений на период автономной работы или на случай перебоев в сети Интернет;

б) возможность дальнейшей доработки с включением дополнительных сенсоров.

Проведя анализ доступных в розничной продаже радиодеталей и модулей, был подобран набор датчиков: температура – три датчика DS18B20, влажность и давление – BME280, освещенность – BH1750. Для управления системой, считывания данных, предварительной обработки и отправки данных на сервер использовали микроконтроллер ESP32 в виде отладочной платы ESP32-DevKit. Для учета точного времени модуль включает часы реального времени на основе DS3231. Выбрана следующая система

питания модуля: модуль подключается к сети 220 В через розеточный адаптер/трансформатор на 12 В. К линии в 12 В подключен миниатюрный модуль источника бесперебойного питания (ИБП) с 2 литиевыми аккумуляторными батареями типа 18650. Выход ИБП настроен на режим 9 В. Далее, напряжение в 9 В преобразуется понижающим трансформатором на основе LM2596 [7] до рабочего напряжения 5 В, от которого запитывается отладочная плата микроконтроллера и все остальные модули. Общая схема модуля представлена на рисунке 1.

Микроконтроллер ESP32

Плата ESP32-DevKit – это мощная, компактная платформа для разработки на базе беспроводной системы на кристалле ESP32, созданной компанией Espressif Systems. Объединяя возможности WiFi и Bluetooth SoC ESP32 с доступным языком сценариев NodeMCU, эта плата служит удобной основой для реализации проектов в области Интернета вещей (IoT) [6]. В основе платы ESP32-DevKit лежит двухъядерный процессор Xtensa с тактовой частотой 240 МГц, а также интегрированный модуль WiFi, соответствующий стандартам 802.11 b/g/n и Bluetooth. Аппаратные компоненты включают 520 КБ SRAM и 4 МБ флэш-памяти, предназначенной для хра-

нения данных. Благодаря богатому набору контактов общего назначения (GPIO) плата ESP32-DevKit позволяет подключать большое количество внешних датчиков и устройств. Для питания существует несколько альтернатив, включая USB, LiPo батареи и внешние источники питания. Обладая небольшими размерами (5×2,5 см), эта плата является практичным выбором для разработки малоразмерных устройств, в частности, для получения, предварительной обработки и передачи показаний температуры, освещенности и влажности на удаленный сервер по WiFi.

Температурный сенсор DS18B20

DS18B20 – это высокоточный цифровой датчик температуры производства компании Maxim Integrated. Он использует стандарт интерфейса One-Wire. В проекте для повышения точности и надежности использовали три датчика DS18B20, дополнительно реализующих алгоритм скользящего среднего, охватывающий десятисекундные интервалы. Каждый датчик способен измерять температуру в диапазоне от $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Благодаря настраиваемому разрешению в диапазоне от 9 до 12 бит эти датчики обеспечивают оптимальный баланс между скоростью реакции и точностью в зависимости от потребностей приложения. В проекте модуля ис-

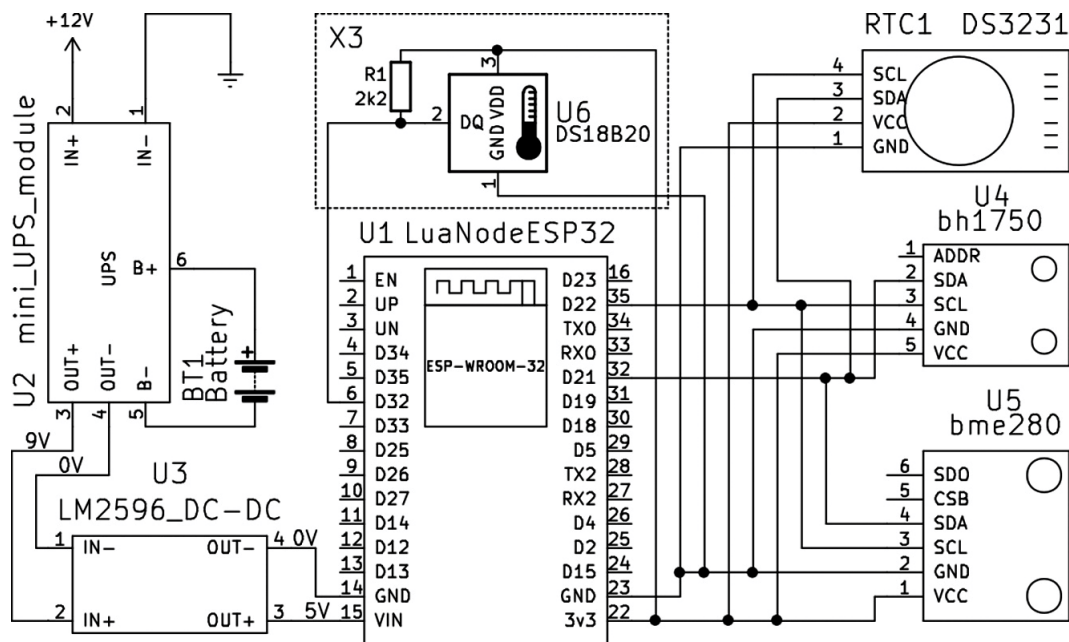


Рис. 1. Общая электрическая схема разработанного измерительного модуля

Fig. 1. General electrical scheme of the developed measuring module

пользовали максимальное разрешение 12 бит, что обеспечивает исключительную точность при сохранении приемлемого времени считывания показателей [4].

Модуль датчиков BME280

BME280 – это компактный маломощный модуль датчиков для измерения параметров окружающей среды, разработанный компанией Bosch Sensortec. Сочетая в себе самые современные технологии, он одновременно измеряет атмосферное давление, относительную влажность и температуру воздуха [2]. Встроенный датчик давления имеет диапазон измерений от 300 гПа до 1100 гПа. Обладает абсолютной точностью $\pm 0,1$ гПа. Встроенный датчик температуры работает в широком диапазоне от -40 °C до $+85$ °C, обеспечивая точность в пределах ± 1 °C при калибровке в контролируемых условиях. Кроме того, BME280 оснащен сложным емкостным датчиком влажности, способным измерять уровень относительной влажности от 0 % до 100 % и демонстрирующим минимальный дрейф на протяжении всего срока службы. Благодаря передовым алгоритмам обработки сигнала и оптимизированным на заводе калибровочным коэффициентам этот датчик демонстрирует долговременную стабильность в сочетании с абсолютной точностью ± 3 %.

Датчик освещенности BH1750

BH1750 – это компактный цифровой датчик внешней освещенности с низким энергопотреблением, предназначенный для точного определения уровня освещенности в фотометрических единицах, таких как люкс или фут-свечи. Произведенный компанией Rohm Semiconductor, он основан на передовой КМОП-технологии, обеспечивающей широкий динамический диапазон, высокую чувствительность и пониженное энергопотребление по сравнению с традиционными решениями на основе ПЗС или фотодиодов [3]. Благодаря гибкому интерфейсу, совместимому с протоколами I²C и SPI, BH1750 может легко интегрироваться с различными микроконтроллерами и платами разработки. Имеет два режима работы – с непрерывным и триггерным измерением, что позволяет контролировать частоту выборки и стратегии управления питанием. Датчик демонстрирует широкий диапазон измерений от 0,1 лк до 65535 лк. Используя усилитель с возможностью выбора коэффициента усиления,

BH1750 обеспечивает оптимальную чувствительность независимо от преобладающих условий освещенности, что позволяет избежать насыщения или чрезмерного шума. В пределах собственной единицы измерения 0,1 лк BH1750 гарантирует типичную точность ± 10 % (для 1–500 лк) и ± 15 % (для 500–65535 лк). При соответствующей настройке датчик автоматически компенсирует колебания температуры и напряжения, обеспечивая стабильный и надежный результат даже в сложных условиях.

Часы реального времени DS3231

DS3231 – это высокоточный модуль часов реального времени (RTC), производимый компанией Maxim Integrated. Разработан специально для приложений, требующих точности и долговечности. Чип RTC включает кристаллический осциллятор с температурной компенсацией (TXCO) и специализированную схему для противодействия эффектам старения, присущим кварцевым кристаллам. В результате DS3231 демонстрирует низкие месячные отклонения ниже ± 2 частей на миллион (ppm), что составляет считанные секунды на протяжении нескольких десятилетий [5]. В DS3231 встроен вечный календарь, поддерживающий вычисление даты за пределами столетия, включая компенсацию високосного года. Имея два входа синхронизации – один квадратной волны, а другой импульсный – этот модуль RTC легко справляется с множеством внешних источников синхронизации. Дополнительный вывод Vbat расширяет функциональность резервного копирования с использованием дополнительного источника питания, сохраняя функции хронометража даже при перебоях в подаче основного питания. Эксплуатационные пределы охватывают широкий температурный диапазон, от -40 °C до $+85$ °C, обеспечивая стабильную работу в различных климатических зонах и экстремальных условиях работы.

Сводная характеристики отобранных сенсоров параметра микроклимата представлены в таблице 1.

Процедура калибровки

Температура воздуха является одним из самых значимых параметров, поэтому особое внимание было уделено калибровке датчиков температуры для обеспечения максимальной точности измерений. Чтобы откалибровать три тем-

Таблица 1. Сводная таблица с характеристиками выбранных сенсоров параметров микроклимата

Название модуля	Параметр	Диапазон измерений	Погрешность
DS18B20	Температура воздуха	-55 °C – +125 °C	±0,5 °C
BME280	Атмосферное давление	300 hPa – 1100 hPa	±0,1 hPa
BME280	Относительная влажность	0 % – 100 %	±3 %
BH1750	Интенсивность освещения	0,1 lux – 65535 lux	±10 % – ±15 %

пературных датчика DS18B20 в измерительном модуле, был проведен процесс калибровки по двум опорным точкам: тройной точке воды (TPW) при 0 °C и точке кипения дистиллированной воды, скорректированной на атмосферное давление с помощью датчика BME280. Были подготовлены контейнеры для каждой точки отсчета. Для TPW использовали смесь колотого льда и охлажденной воды, чтобы поддерживать стабильную температуру 0°C. Температура кипения измерялась в нагреваемой воде после визуального подтверждения начала кипения.

Датчики DS18B20 помещали в каждый контейнер, не допуская прямого контакта с охлаждающими средствами или источниками тепла.

После этого ожидали некоторое время, пока датчики не начинали демонстрировать постоянные чтения. Время измерения TPW составляло 30 минут, время измерения температуры кипящей воды – 10 минут.

Получив серии данных, устанавливали постоянную ошибку измерения для каждого датчика при температуре 0 °C и 100 °C, после чего рассчитали уравнение для пересчета показаний датчика в реальную температуру с использованием метода линейной регрессии. Коэффициенты (пересечение и уклон) для каждого сенсора вносили в микрокод модуля, в результате чего на сервер поступали уже скорректированные данные. Пример данных калибровки представлен на рисунке 2.

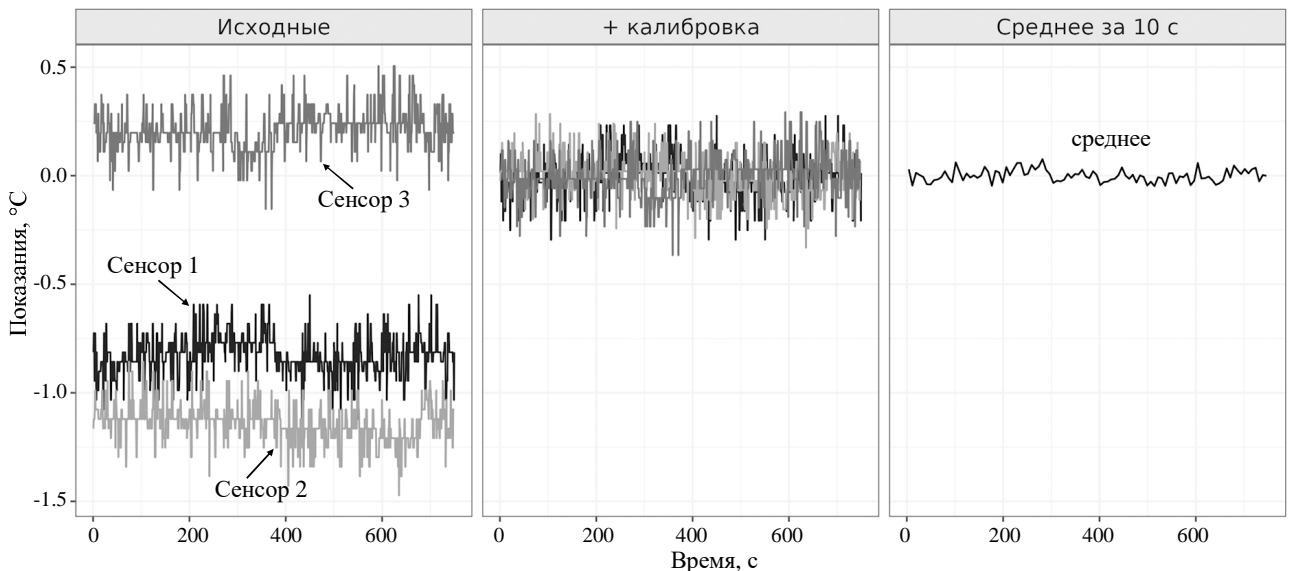


Рис. 2. Пример сырых измерений температурных датчиков во время калибровки, после удаления систематической ошибки и с учетом усреднения с шагом в 10 секунд

Fig. 2. Example of raw temperature sensor measurements during calibration, after removing the systematic error and taking into account averaging in 10-second increments

Расчетная точность измерения температуры с учетом усреднения составила 0,091 °С. Показания прочих датчиков принимаются с погрешностью, заявленной производителем.

Микрокод модуля

Прошивка устройства разработана на языке программирования C с применением платформы PlatformIO.

Основные процессы и задачи управляющей программы:

- 1) инициализация всех устройств;
- 2) инициализация Wi-Fi и асинхронного менеджера TCP запросов;
- 3) обращение к серверу точного времени для обновления текущего времени на плате RTC (часы реального времени);
- 4) подготовка структур данных для промежуточного хранения данных;
- 5) цикл для считывания данных с датчиков в течение 10 секунд, с усреднением результатов;
- 6) отправка данных на сервер в асинхронном режиме.

Данные считываются с учетом максимальной частоты работы отдельных сенсоров. Фиксация температуры происходит 1 раз в секунду (с учетом 3-х датчиков за 10 секунд собирается 30 показаний), влажности – 1 раз в 2,5 секунды (4 раза за 10 секунд), освещенности и атмосферного давления 1 раз в секунду (10 раз за цикл). Далее полученные значения усредняются и сохраняются вместе с меткой времени (середина цикла в 10 секунд). Из данных формируется пакет. Пакеты сохраняются в FIFO (first in, first out – «первым пришел – первым ушел») буфер.

Асинхронно с циклом считывания выполняется цикл отправки данных. Каждые 2 секунды происходит проверка буфера данных. Если в нем присутствует хотя бы один пакет, то инициализируется его отправка на сервер. Пакет дополняется подписью и отправляется посредством Wi-Fi на сервер информационной системы ДБС. Если серверная программа получила пакет данных, успешно его обработала и сохранила в базу данных, то возвращается соответствующий ответ с меткой успешного завершения. Если модуль получает ответ с указанием успеха обратки, пакет данных удаляется из буфера данных. Если же ответ отсутствует или успешность сохранения данных не подтверждается, пакет вновь сохраняется в буфер данных. Таким образом, в случае перебо-

ев в сети Интернет или временной недоступности сервера данные продолжают накапливаться в буфере. Накопление может продолжаться 2-е суток, после чего старые пакеты начнут удаляться из буфера. Предложенная реализация позволяет обеспечить временную автономность модуля без потери данных. После восстановления штатной работы сети и сервера данные вновь начинают отправляться в нормальном режиме.

Серверная часть

Для приема и хранения показаний микроклимата подготовлено расширение серверной программной части информационной системы [1]. В основе расширения лежит создание 3-х новых таблиц базы данных. В настоящее время информационная система использует систему управления базами данных PostgreSQL. Таблица измеряемых параметров хранит перечень всех возможных параметров, которые могут измеряться модулями, а также обозначение величин. Таблица описания модулей хранит перечень имеющихся модулей (на данный момент создан только один модуль, но в дальнейшем подразумевается, что подобные модули будут установлены во всех оранжереях и переходах). Для каждого модуля указан его идентификационный номер. Также в этой таблице хранится описание структуры пакета с данными (сохраняется список ссылок на таблицу измеряемых параметров). Таким образом, будущие модули потенциально могут содержать иные датчики, при этом пакеты данных от каждого из них будут обрабатываться адекватным образом. Кроме того, в таблице хранится указание местоположения каждого модуля.

Таблица с измерениями – основная таблица, в которой будут храниться все измерения с текущего и потенциальных модулей. Основные колонки таблицы: идентификатор модуля (служит для связи с таблицей описания модулей); дата-время (указывается для каждого измерения); параметр (указание типа измерения в виде ссылки на таблицу измеряемых параметров); показание (значение, полученное с датчика). Таблица реализована с применением дополнения TimescaleDB для PostgreSQL. Это дополнение позволяет реализовать функционал базы данных временных серий. В частности, подобная схема облегчает формирование отчетов. Например, в большинстве случаев, пользователю не требуются столь частые замеры параметров микрокли-

мата (каждые 10 секунд). На практике чаще требуются усредненные значения за 1 час, 6 часов, сутки, неделю. Встроенные функции TimescaleDB позволяют формировать такие запросы к базе данных, усреднять значения в последовательности временных интервалов, а также обрабатывать пропуски значений. При этом обеспечивается высокая скорость доступа и фильтрации данных по признаку времени. Этот аспект является крайне важным, так как даже один модуль будет производить 12 миллионов записей в год. Фильтрация больших объемов записей классическими методами реляционной базы данных может быть медленной. При этом TimescaleDB обеспечивает обработку таких временных рядов в пределах десятков миллисекунд.

Выводы

Разработаны технические требования к модулю измерения параметров микроклимата оранжерейного комплекса, подобрана номенклатура электронных сенсоров для измерения температуры и влажности воздуха, атмосферного давления и освещенности. В качестве контролирующего органа выбран микроконтроллер ESP32. Предложенная электронная схема модуля обеспечивает питание от сети 220 В с режимом автономной работы на протяжении до 48 часов. Для обеспечения передачи данных от модуля к серверу разработан собственный протокол обмена данными. Предложена схема базы данных для эффективного хранения измерений модуля.

Схема прибора обеспечивает высокую точность и частоту измерения параметров микроклимата на уровнях, соответствующих научным и хозяйственным задачам лаборатории. При этом стоимость модуля остается относительно низкой, что позволяет масштабировать прототип на весь оранжерейный комплекс. Разработанная система обмена и хранения данных снимает существенные риски, связанные с блокировками и нестабильностью сети Интернет или перебоями в сети электропитания.

Работа выполнена в рамках государственной темы FREG-2023-0006 «Интродукционное изучение растений мировой флоры и их полифункциональное использование в степной зоне» (Регистрационный номер № 1023020900005-0-1.6.11;1.6.20;1.6.19)

1. Стрельников И.И., Приходько С.А., Глухов А.З., Николаева А.В. Разработка информационной системы Донецкого ботанического сада // *Промышленная ботаника*. 2021. Т. 21, N 1. С. 36–52.
2. BME280 Combined humidity and pressure sensor [Electronic resource]. URL: <https://www.mouser.com/datasheet/2/783/BST-BME280-DS002-1509607.pdf> (accessed 16.10.2023).
3. Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC BH1750FVI [Electronic resource]. URL: <http://www.mouser.com/ds/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf> (accessed 18.12.2022).
4. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire® Digital Thermometer [Electronic resource]. URL: <https://www.elecrow.com/download/DS18B20.pdf> (accessed 18.12.2022).
5. DS3231 Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal [Electronic resource]. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds3231.pdf> (accessed 16.01.2023).
6. ESP32 Series Datasheet [Electronic resource]. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (accessed 16.01.2023).
7. LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator [Electronic resource]. URL: <https://www.ti.com/lit/gpn/LM2596> (accessed 16.01.2024).
8. Mickley J.G., Moore T.E., Schlichting C.D., DeRobertis A., Pfisterer E.N., Bagchi R. Measuring microenvironments for global change: DIY environmental microcontroller units (EMUs) // *Methods in Ecology and Evolution*. 2019. Vol. 10, N 4. P. 578–584.
9. Mühlbauer L.K., Zavattoni G., Virtanen R., Grube M., Weber B., Clark T. Arduinos in the wild: A novel, low-cost sensor network for high-resolution microclimate monitoring in remote ecosystems // *Ecological Solutions and Evidence*. 2023. Vol. 4, N 3. P. e12255.
10. Rivas-Sánchez Y., Moreno-Pérez M., Roldán-Cañas J. Environment Control with Low-Cost Microcontrollers and Microprocessors: Application for Green Walls // *Sustainability*. 2019. Vol. 11, N 3. P. 782.

11. *Sahour A., Boumehrez F., Benouaret M., Mokhneche A.* Greenhouse Climate Controller by Using of Internet of Things Technology and Fuzzy Logic // *Instrumentation Mesure Métrologie*. 2021. Vol. 20, N 1. P. 29–38.
12. *Sethi S.S., Ewers R.M., Jones N.S., Orme Ch.D.L., Picinali L.* Robust, real-time and autonomous monitoring of ecosystems with an open, low-cost, networked device // *Methods in Ecology and Evolution*. 2018. Vol. 9, N 12. P. 2383–2387.
13. *van Rossum G., Drake F.L.* Python 3 Reference Manual. Scotts Valley: CreateSpace, 2009. 242 p.

Поступила в редакцию: 17.11.2023

UDC 681.5.08+681.586.3/6

DEVELOPMENT OF A MODULE FOR MEASURING MICROCLIMATE PARAMETERS OF THE GREENHOUSE COMPLEX OF DONETSK BOTANICAL GARDEN

I.I. Strelnikov

Federal State Budgetary Public Institution «Donetsk botanical garden»

The results of development of electronic sensor module for monitoring microclimatic parameters in the greenhouse complex of Donetsk Botanical Garden are presented. The module is based on available inexpensive electronic components and includes controlling microcontroller unit ESP32 and sensors of temperature, air humidity, atmospheric pressure and illumination. Also protocols for information exchange and database for storage and primary processing of device readings were developed. The module has moderate autonomy and can continue to collect data for up to 48 hours in conditions of interruptions in the Internet network or power supply.

Key words: microclimate, ESP32, temperature, air humidity, illumination

Citation: Strelnikov I.I. Development of a module for measuring microclimate parameters of the greenhouse complex of Donetsk Botanical Garden // *Industrial Botany*. 2023. Vol. 23, N 4. P. 46–53. DOI: 10.5281/zenodo.10566343
