

УДК 504.064.38

## Применение системы удаленного мониторинга динамики атмосферных параметров в Сибирском ботаническом саду Томского государственного университета

*Бадьин А. В., Суслиев В. И., Саркисян А. С., Казанин В. А., Ланин Е. В., Южаков М. С.*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Томск, Россия  
Kazanin\_2013@mail.ru*

В работе представлены результаты применения системы удаленного мониторинга климатических параметров в оранжереях Сибирского ботанического сада Томского государственного университета. Описан метод автономной локальной регистрации и энергоэффективной передачи данных о состоянии параметров воздуха в помещениях с различными климатическими условиями. Приведены рекомендованные температурные характеристики для годовых сезонов отделов суккулентов и холодных субтропиков, основанные на многолетнем опыте сотрудников Сибирского ботанического сада. Приведен сравнительный анализ полученных климатических данных за год с оптимальными значениями температуры и влажности воздуха в отделах ботанического сада. В результате обработки большого объема данных (182 000 записей) были построены графики динамики изменения температуры и влажности воздуха в суккулентном и холодном субтропическом отделах оранжереи, а также показаны климатических параметров на улице за пределами помещений ботанического сада с сентября 2021 по сентябрь 2022. Описаны факторы, влияющие на отклонение климатических параметров (влажности и температуры воздуха) в отделах оранжереи, и предложен способ стабилизации параметров путем внедрения разработанной системы мониторинга в обратную связь комплекса климатического контроля.

*Ключевые слова:* удаленный мониторинг, атмосферные параметры, холодные субтропики, суккуленты, ботанический сад.

### ВВЕДЕНИЕ

На территории Сибирского ботанического сада Национального исследовательского Томского государственного университета (СибБС ТГУ) обитает около 9500 растений различных видов, форм и сортов, из которых около 4500 принадлежат тропическим и субтропическим видам, для которых необходим постоянный диапазон температур и влажности воздуха (Ямбуров, 2020). Местоположение ботанического сада налагает ряд трудностей на поддержание стабильных атмосферных параметров в оранжерее из-за особенностей климатических зон, а именно, суровые сибирские зимы и стабильно жаркие лета с малыми количествами осадков (Климат Томска, 1982; Амельченко, Малахова, 1994; Морякина, и др., 2008; Барашкова и др., 2013). Например, у растений с САМ-фотосинтезом (метаболизмом углерода по типу толстянковых) фиксация и усвоение углекислого газа происходит ночью (Мамушина, Зубкова, 2005), когда растение может позволить себе открыть устьица без потери воды, но этот процесс зависит от температуры (Lüttge, 2004). Оптимальная температура для растений с САМ-фотосинтезом находится в диапазоне от 5 до 15 °С. Температура ниже 5 °С, как и выше 25 °С, негативно влияет на процессы метаболизма у данных растений, представителями которых являются и суккуленты. Также слишком высокая температура при низком уровне инсоляции зимой в период покоя растений может активировать процессы роста, что приводит к вытягиванию побегов, ослаблению растений и потере своей естественной формы. В холодном субтропическом отделе также важно соблюдение температурных режимов. В частности, зимой диапазон требуемой температуры находится недалеко от критических значений: допустимая температура колеблется в диапазоне от +6 до +10 градусов, но при повышении температуры выше 10 °С может начаться преждевременное разverzание вегетативных и генеративных почек, что недопустимо в

зимний период, а снижение температуры до нуля и ниже вызывает образование льда и разрушения в тканях у неморозостойких растений. Помимо температуры воздуха, важна температура почвы. Суккуленты чувствительны к низкой температуре почвы после полива: могут начинаться гнилостные процессы в корневой системе. Также важными являются показатели влажности воздуха: часть растений пересыхают при ее низких значениях (как, например, растения отдела холодных субтропиков, которые в природе произрастают в условиях высокой влажности), а при высоких значениях могут развиваться обусловленные патогенами заболевания – бактериозы и микозы.

Таким образом, регулярная фиксация температуры является неотъемлемой частью климатического контроля оранжерейных условий. В течение суток сотрудники фиксируют несколько раз за день температуру воздуха, производя записи в журналах, однако такой способ измерений не особо эффективный из-за низкой частоты регистрации данных и не позволяющий своевременно реагировать на изменение атмосферных параметров, а также процесс переноса информации с бумажного варианта на компьютер занимает несколько дней. В связи с этими недостатками было решено использовать устройства сбора климатических данных (УСКД-Агро), размещенных в оранжерее ботанического сада и позволяющих не только увеличить частоту замеров, но и исключить антропогенный фактор. Помимо прочего, оцифрованные данные хранятся на веб-сайте, которые можно скачать и удобно использовать при анализе сезонного ритма развития растений, поскольку легко рассчитать при какой сумме эффективных температур выше +5 °С или +15 °С у растений начинаются разные фенологические фазы.

Цель работы – мониторинг состояния атмосферных параметров в отделах СибБС ТГУ и за его пределами.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для непрерывного мониторинга атмосферных параметров на территории СибБС ТГУ был разработан и собран автоматизированный комплекс регистрации климатических данных, состоящий из зондов, базовой станции (БС), Web-сервера с базой данных и двух веб-интерфейсов – сетевого и локального. Структура сети представлена на рисунке 1.

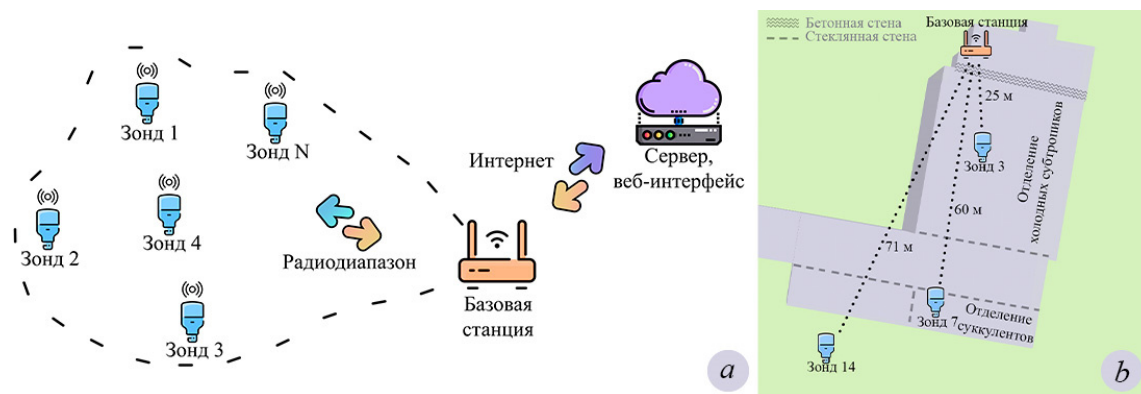


Рис. 1. Структура сети агрометеорологических зондов (а) и их расположение в Сибирском ботаническом саду Томского государственного университета (б)

Способ получения информации об атмосферных характеристиках заключался в размещении измерительных зондов УСКД-Агро в разных климатических зонах на территории ботанического сада ТГУ и за его пределами. Данные измеряются в автономном режиме и передаются на базовую станцию при помощи протокола канального уровня LoRaWAN. Базовая станция слушает эфир в заданном диапазоне частот. Полученные пакеты данных переадресовываются на веб-сервер для удаленного мониторинга.

В зависимости от радиоусловий в каждом зонде выбирается оптимальный набор параметров связи. Применяемая технология LoRa позволяет принимать сигнал от зондов в любой точке ботанического сада и за его пределами до 3 км от базовой станции. Но в этом случае может происходить потеря пакетов информации. В случае ботанического сада уровень RSSI варьируется от  $-90$  дБм до  $-120$  дБм, что говорит о наличии преград и множестве других помех, но даже при таком качестве связи базовая станция принимает все пакеты данных от установленных зондов.

Зонд оснащен датчиками: атмосферного давления и температуры воздуха BMP280, относительной влажности HTU 21, а также температуры почвы DS18B20 на глубине 10 см. Датчик BMP280 обладает диапазоном измерений атмосферного давления от 300 ГПа до 1100 ГПа с погрешностью  $\pm 0,12$  ГПа и температуры от  $-40$  до  $+85$  °C с точностью  $\pm 0,01$  °C (Киба и др, 2019) Рабочий диапазон датчика влажности от 0 до 100 % обладая погрешностью в 3 % и температуры от  $-40$  до  $+125$  °C с точностью измерений  $\pm 0,4$  °C (Зайцев, 2021). Датчик DS18B20 обладает диапазоном измерений от  $-40$  до  $+85$  °C с точностью  $\pm 0,5$  °C (Сучкова и др, 2015; Южаков и др, 2019).

В составе устройства имеются часы реального времени для создания временных меток, карта памяти для резервирования данных, приемопередающий модуль с технологией модуляции LoRa. Также имеется система питания, включающая в себя: контроллер заряда, солнечную панель, два литий-ионных аккумулятора, блок измерения тока солнечной панели и заряда аккумулятора батареи (АКБ).

Блок-схема зонда приведена на рисунке 2.

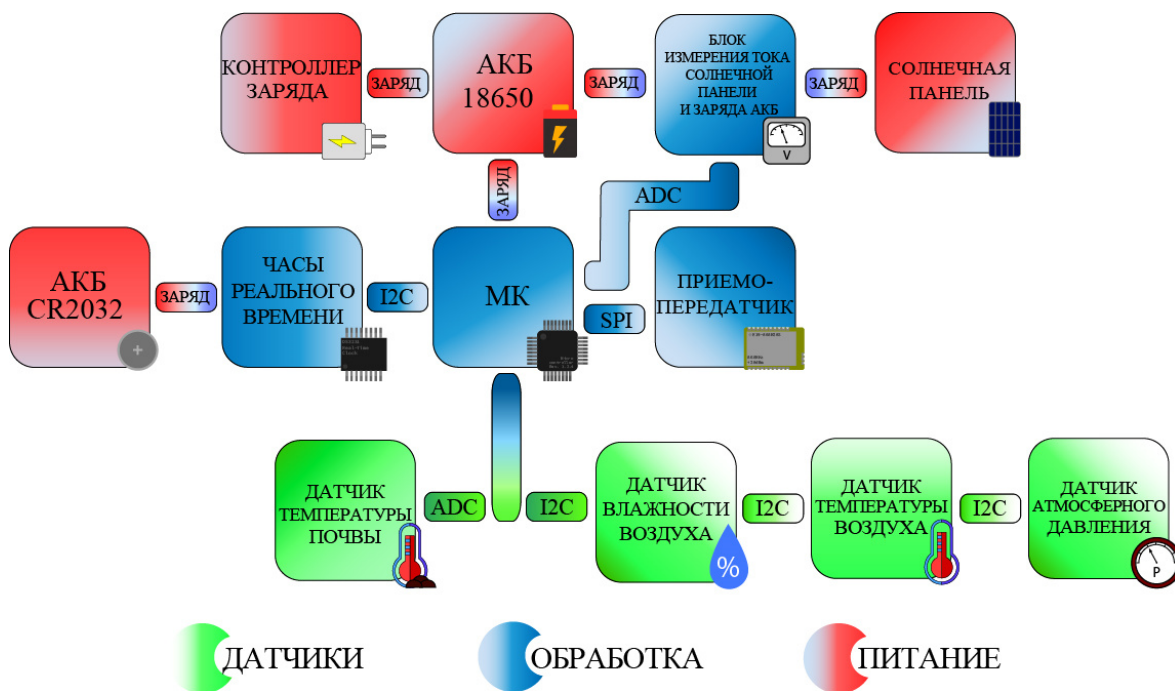


Рис. 2. Блок-схема зонда

Базовая станция сконструирована на основе микроконтроллера ESP-8266 с поддержкой WiFi-интерфейса, с помощью которого производится выход устройства в сеть Интернет. Базовая станция оснащена OLED дисплеем для отслеживания состояния подключенных агрозондов.

Базовая станция работает от источника постоянного питания, но при возникновении аварийной ситуации, в системе предусмотрено питание от двух АКБ с суммарной ёмкостью 6 Ач.

Блок-схема базовой станции приведена на рисунке 3.

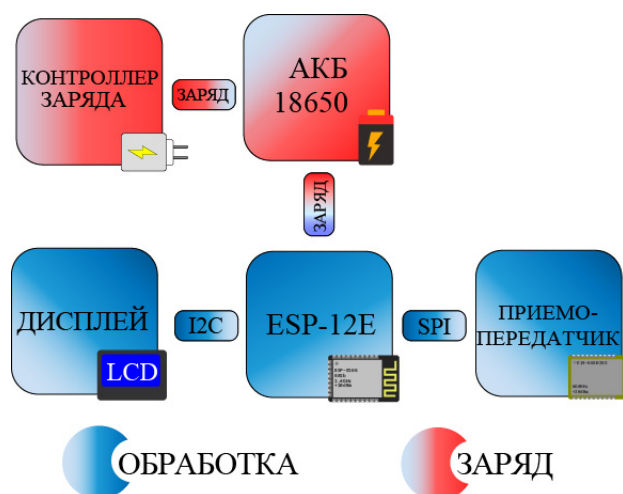


Рис. 3. Блок-схема базовой станции

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В оранжерее Сибирского ботанического сада температура в теплицах является важным показателем. Температурные режимы установлены сотрудниками с учетом климатических зон произрастания растений в естественных условиях с поправкой на сибирские погодные условия. В частности, для суккулентного и холодного субтропического отделов установлены следующие температурные режимы, указанные в таблице 1.

Таблица 1

Необходимые температурные режимы в различные сезоны года для суккулентного и холодного субтропического отделов СибБС ТГУ

Отдел	Период							
	Зима Ноябрь – март		Весна Март – май		Лето Май – сентябрь		Осень Сентябрь – ноябрь	
	Часть суток, температура, °С							
	день	ночь	день	ночь	день	ночь	день	ночь
Суккуленты	13–15	11–13	18–20	16–18	24–30	20–24	15–17	13–15
Холодные субтропики	8–10	6–8	13–15	11–13	20–25	18–20	12–15	10–12

Для годичного мониторинга параметров атмосферы (температуры, влажности) в оранжереях суккулентов и холодных субтропиков (рис. 4) в период с сентября 2021 по сентябрь 2022 были установлены агрометеорологические зонды на высоте 70 сантиметров от поверхности земли.

На рисунках 5–8 приведены результаты временной динамики изменения температуры и влажности воздуха в отделах холодных субтропиков и суккулентов с рекомендованными температурными режимами для каждого сезона. Красная линия соответствует верхнему пределу рекомендуемых значений, а синяя – нижнему.



Рис. 4. Расположение агрометеорологических зондов в отделах холодных субтропиков (a) и суккулентов (b) оранжереи Сибирского ботанического сада Томского государственного университета

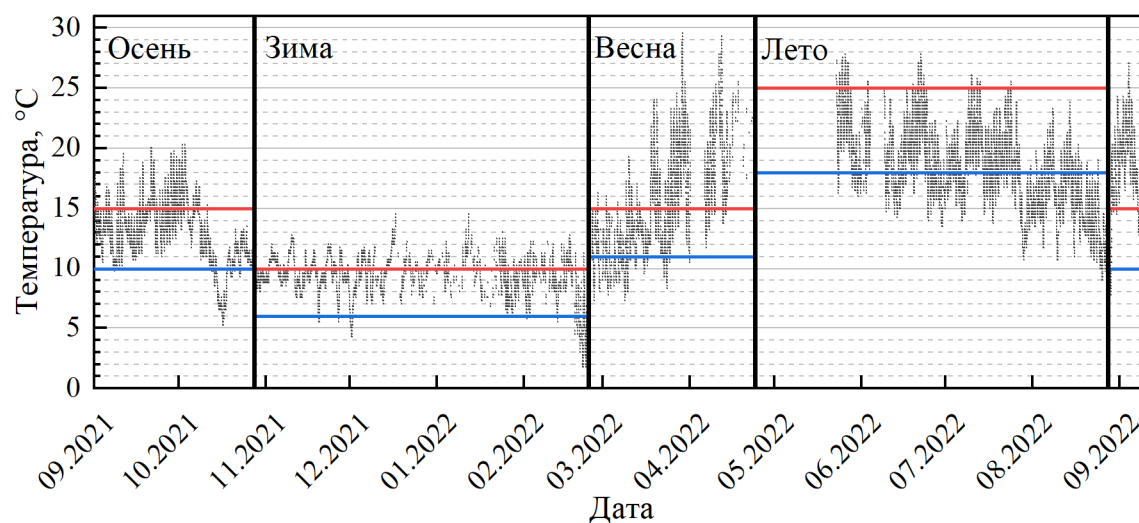


Рис. 5. Температура воздуха в отделе холодных субтропиков Сибирского ботанического сада Томского государственного университета (сентябрь 2021 – сентябрь 2022)

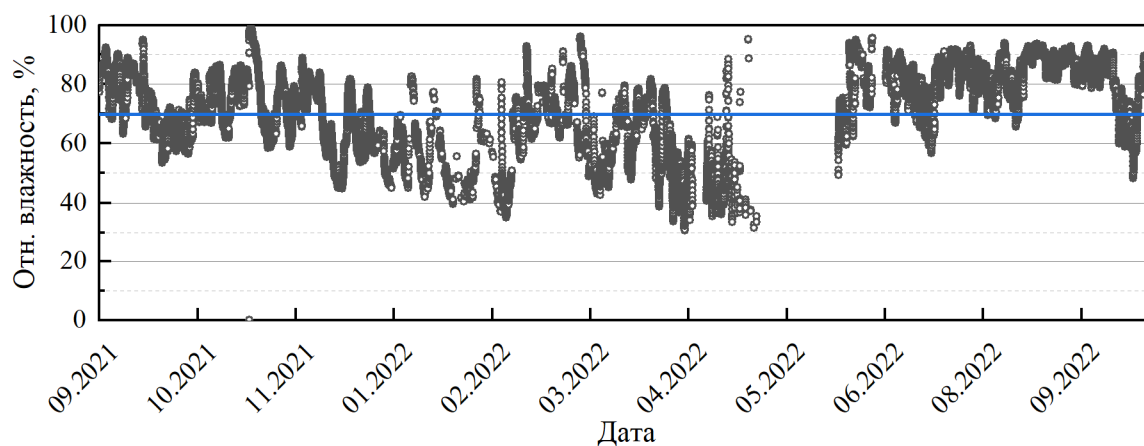


Рис. 6. Влажность воздуха в отделе холодных субтропиков Сибирского ботанического сада Томского государственного университета (сентябрь 2021 – сентябрь 2022)

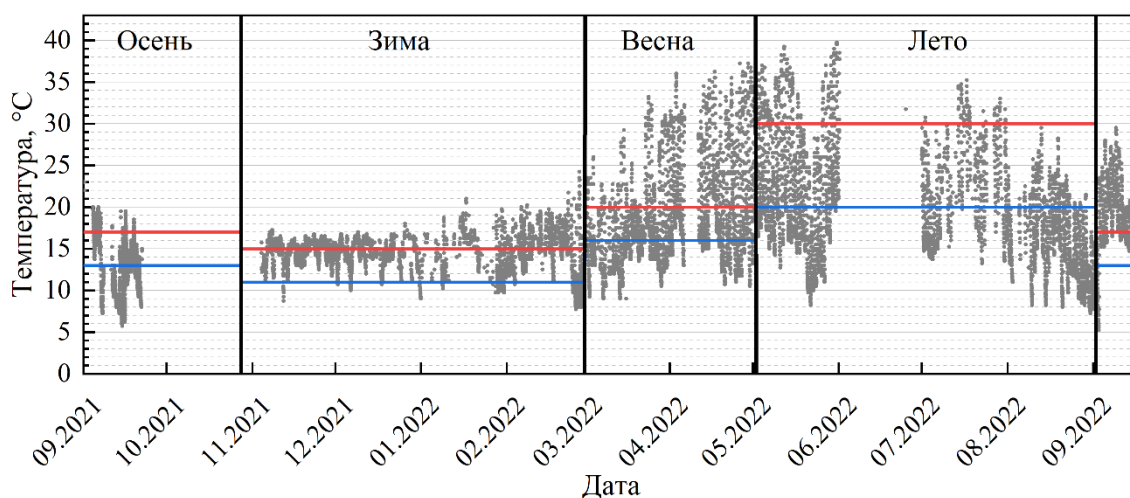


Рис. 7. Температура воздуха в отделе суккулентов Сибирского ботанического сада Томского государственного университета (сентябрь 2021 – сентябрь 2022)

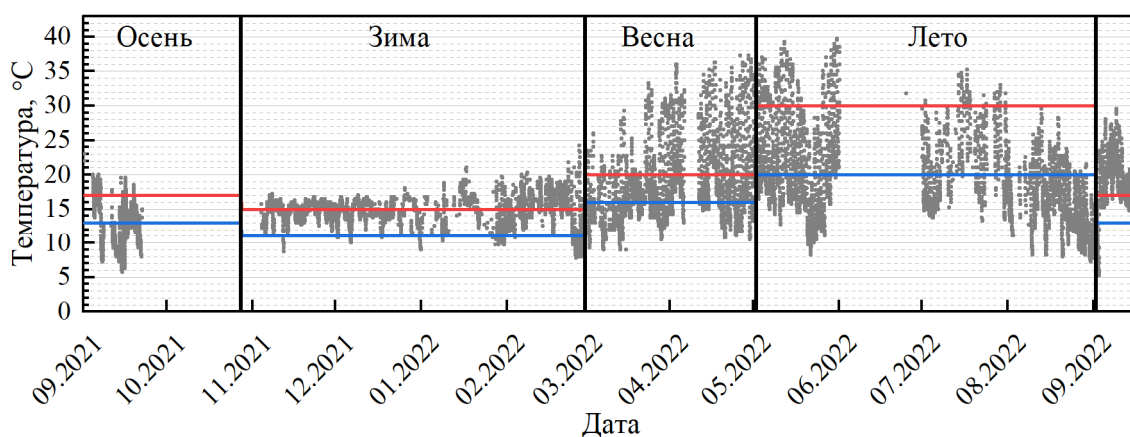


Рис. 8. Влажность воздуха в отделе суккулентов Сибирского ботанического сада Томского государственного университета (сентябрь 2021 – сентябрь 2022)

Для сравнения атмосферных параметров в оранжереях, относительно характеристик окружающей среды, был частично смонтирован в землю контрольно-измерительный зонд (рис. 9), располагающийся за пределами оранжерей ботанического сада на расстоянии 5 метров от главного корпуса.

На графиках (рис. 10–12) представлены результаты годичного мониторинга атмосферных параметров на улице около ботанического сада.

Анализ полученных графиков температурных зависимостей (рис. 4, 6 и 9) за зимний период показывает, что при значительных перепадах температур (от  $-29$  до  $+3$  °C) на улице в оранжереях СибБС ТГУ поддерживаются относительно стабильные значения температуры, имеющие отклонения за рекомендованные границы  $\pm 3$  °C (суккуленты) и  $\pm 2,5$  °C (холодные субтропики) в дневное время, а в ночное время имеет место быть понижение температуры на  $2$  °C ниже нормы. Данные отклонения не являются пагубными для растений рассматриваемых отделов, так как температура за ночное время не опускалась ниже критического значения ( $0$  °C) и в течение дня поднималась до рекомендованных и выше параметров. Возрастание температуры весной и в первой половине лета в суккулентном и холодном субтропическом

отделах связано с увеличением длительности светового дня и повышением уровня инсоляции. Также стоит отметить, что южное расположение суккулентного отдела заметно влияет на прогрев теплицы в течение дня.



Рис. 9. Внешний вид агрометеорологического зонда, расположенного на улице у Сибирского ботанического сада Томского государственного университета

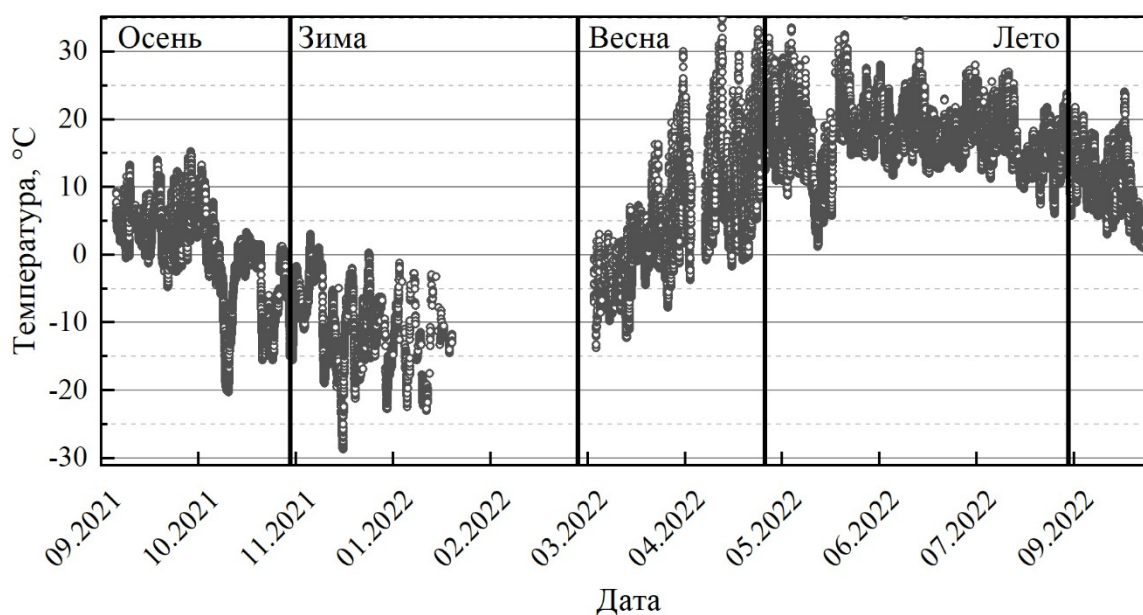


Рис. 10. Температура воздуха на улице около Сибирского ботанического сада Томского государственного университета (сентябрь 2021 – сентябрь 2022)

В холодном субтропическом отделе верхние значения температур также заметно возрастают, но с меньшей крутизной, чем в суккулентном отделе, так как этот отдел по своей площади значительно больше суккулентного, и с южной стороны расположен смежный отдел оранжереи, поэтому холодный субтропический отдел не может так интенсивно прогреваться. Позже, со второй половины лета и в начале осени, прослеживается динамика на уменьшение температуры воздуха в оранжереях до момента включения отопительной системы.

Высокая влажность воздуха осенью и во второй половине лета в суккулентном отделе связана с увеличением количества осадков и одновременным понижением температуры на

улице. Мероприятия по уменьшению содержания водяного пара в воздушной среде заключаются в сокращение полива растений.

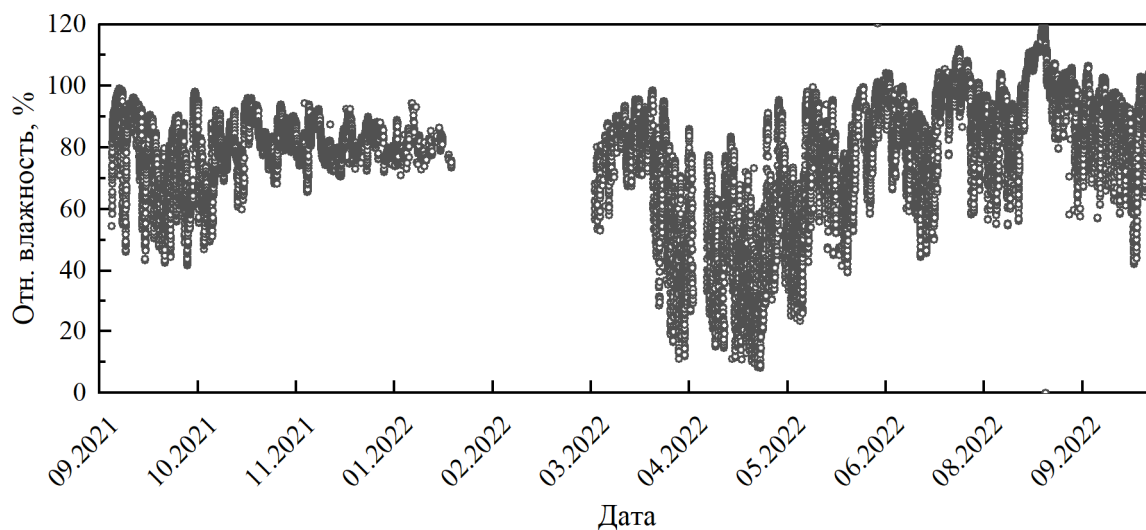


Рис. 11. Влажность воздуха на улице около Сибирского ботанического сада Томского государственного университета (сентябрь 2021 – сентябрь 2022)

Для холодных субтропиков высокая влажность является важной составляющей нормальной жизнедеятельности растений, а низкая может повлечь за собой необратимые последствия для растений. Пониженное значение содержания водяного пара в воздухе наблюдается в зимне-весенний период, что свидетельствует о необходимости увеличения орошения растений. Низкие показания влажности для суккулентного отдела, наоборот, не являются пагубными, поэтому какие-либо меры предпринимать не требуется, а период низкой влажности в холодном субтропическом отделе является заметно продолжительным, что говорит о необходимости внедрения системы автоматизированного орошения для регулирования влажности в допустимых пределах.

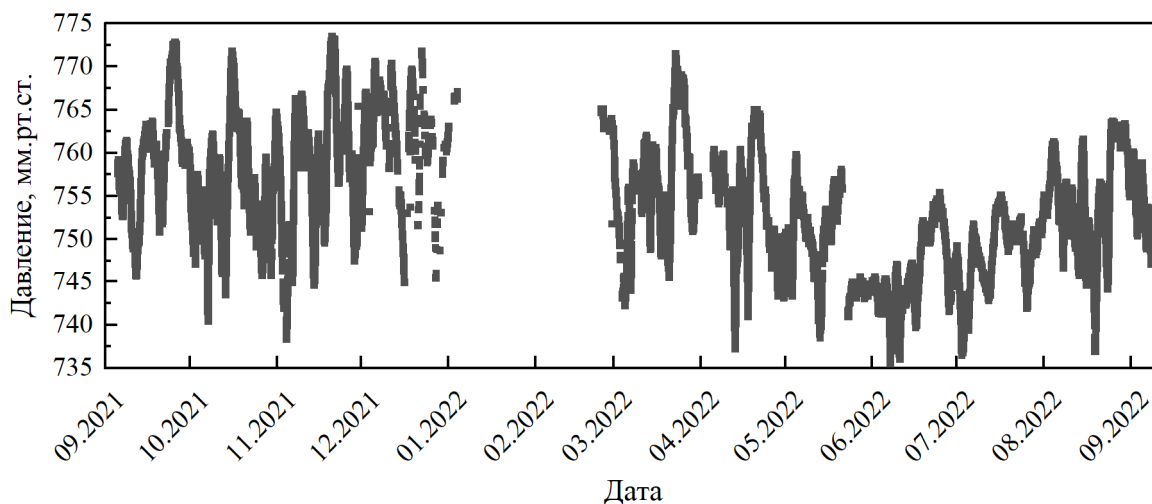


Рис. 12. Атмосферное давление на улице около Сибирского ботанического сада Томского государственного университета (сентябрь 2021–сентябрь 2022)



Как видно из графиков (рис. 10–12), данные с агрометеорологического зонда около ботанического сада имеют временной разрыв в период с конца января по март 2022 года. Обусловлено это тем, что установленный зонд вне помещений СибБС конструктивно предназначался для применения в оранжереях ботанического сада (с расположением солнечной панели сверху). При выпадении снега на поверхность панели, автономность зонда пропадает, и как следствие, происходит плавный разряд аккумуляторной батареи за счет исчезновения возможности подзарядки. При окончательном сходе снега, энергоэффективность солнечных панелей восстанавливается и данные о состоянии климатических параметров снова стали регистрироваться. Для применения таких систем в суровых условиях сибирского климата целесообразно применять конструкцию корпуса зондов с боковым расположением солнечных элементов под углом 75–90 градусов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе показаны результаты годичного мониторинга климатических параметров в оранжереях СибБС ТГУ и на территории, непосредственно прилегающей к нему. Полученную информацию можно использовать для принятия решений по корректировке системы отопления и превентивных мер. В будущем планируется организовать не только онлайн-доступ к данной информации, но и внедрить систему оповещения о выходе температуры за критические значения с целью предотвращения аварийных ситуаций (нарушение целостности остекления, сбой в системе водяного отопления). Данная система позволит оперативно решать проблемы и избегать гибели ценных растений СибБС ТГУ.

**Благодарности.** Авторы выражают признательность к.б.н. Ямбурову М. С. и Романовой С. Б. (Сибирский ботанический сад НИ ТГУ) за помощь в организации проведения измерений и оказание консультативной помощи.

*Работа выполнена в рамках проектов «Центр студенческой проектной деятельности» и «Разработка информационной системы непрерывного мониторинга процессов депонирования и эмиссии углерода и оценки агропотенциала почв Сибири» в рамках программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).*

## Список литературы

- Амельченко В. П., Малахова Л. А. Научно-методические вопросы охраны редких и исчезающих растений Томской области // Проблемы региональной экологии. – 1994. – Т. 2. – С. 105–107
- Барашкова Н. К., Кружевская И. В., Поляков Д. В. Экстремальный режим погоды летом 2012 г. на территории Томской области как отражение современных глобальных климатических тенденций // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 372. – С. 173–179.
- Зайцев А. В. Оцифровка аналоговых сигналов // E-Management. – 2021. – Т. 4, № 1. – С. 13–19.
- Киба Д. А., Любушкина Н. Н., Гудим А. С., Биткина А. А. Регистратор условий хранения и транспортировки специализированных грузов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. – Т. 62, № 7. – С. 668–674.
- Климат Томска / [Ред. С.Д. Кошинский и др.]. – Л.: Гидрометиздат, 1982. – 176 с.
- Мамушина Н. С., Зубкова Е. К. САМ-фотосинтез: распространение и эколого-физиологические аспекты // Ботанический журнал. – 2005. – Т. 90, № 11. – С. 1641–1650.
- Морякина В. А., Свиридова Т. П., Беляева Т. Н. и др. Сохранение биоразнообразия растений мировой флоры в Сибирском ботаническом саду Томского госуниверситета // Информационный вестник ВОГиС. – 2008. – Т. 12, № 4. – С. 555–563.
- Сучкова Л. И., Хуссейн Х. Ш. А. х. М., Якунин М. А., Якунин А. Г. Исследование долговременной стабильности параметров термодатчиков DS18B20 // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 1 (35). – С. 42–46.
- Южаков М. С., Бадьин А. В., Пидотова Д. А. Разработка устройства сбора и передачи данных «УСКД-365П» // Актуальные проблемы радиофизики (АПР 2019): VIII Международная научно-практическая конференция. – 2019. – С. 173–177.

Ямбуров М. С. 140 лет Сибирскому ботаническому саду Томского государственного университета // Ботанические сады как центры изучения и сохранения фиторазнообразия // Труды Международной научной конференции, посвященной 140-летию Сибирского ботанического сада Томского государственного университета. – 2020. – С. 5–7.

Lüttge, U. Ecophysiology of Crassulacean Acid Metabolism (CAM) // Annals of Botany. – 2004. – Vol. 93, N 6. – 629 pp.

**Badin A. V., Suslyayev V. I., Sarkisyan A. S., Kazanin V. A., Lanin E. V., Yuzhakov M. S. Application of the system of remote monitoring of atmospheric parameters dynamics in the Siberian Botanical Garden of Tomsk State University // Ekosistemy. 2023. Iss. 34. P. 5–14.**

The paper presents the results of the application of the remote monitoring system of climatic parameters in the greenhouses of the Siberian Botanical Garden of Tomsk State University. The method of autonomous local registration and energy-efficient transmission of data on the state of air parameters in rooms with different climatic conditions is described. The recommended temperature characteristics for the annual seasons of succulents and cold subtropics departments are given, based on the long-term experience of employees of the Siberian Botanical Garden. A comparative analysis of the obtained climatic data for the year with optimal values of temperature and humidity in the departments of the botanical garden is given. As a result of processing a large amount of data (182,000 records) graphs of the dynamics of changes in temperature and humidity in the succulent and cold subtropical sections of the greenhouse were plotted, as well as indications of climatic parameters outside the premises of the botanical garden from September 2021 to September 2022. The factors influencing the deviation of climatic parameters (humidity and air temperature) in the greenhouse departments are described, and a method for stabilizing the parameters by introducing the developed monitoring system into the feedback of the climate control complex is proposed.

*Key words:* remote monitoring, atmospheric parameters, cold subtropics, succulents, botanical garden.

*Поступила в редакцию 25.11.22*

*Принята к печати 15.02.23*