

## Разработка модульного программно-аппаратного комплекса управления стендом с моделью космической оранжереи

© А.А. Буряк<sup>1</sup>, О.А. Очков<sup>1</sup>, Ю.А. Беркович<sup>1</sup>, С.Н. Лапач<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНЦ РФ — Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, 123007, Россия

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт», Киев, 03056, Украина

*Космические оранжереи для обогащения рациона питания космонавтов рассматриваются как средство улучшения среды обитания космонавтов в автономных пилотируемых экспедициях. Одним из основных требований к космическим оранжереям является минимизация удельного потребления основных бортовых ресурсов: энергии, объема, хладагента, трудозатрат оператора на единицу массы выращенной продукции. Разработан программно-аппаратный комплекс для управления стендом с моделью космической оранжереи при проведении экспериментов по адаптивной оптимизации облученности и спектра освещения посевов. Основным объектом контроля является периодически герметизируемый объем с посевом растений, внутри которого расположены датчики температуры и влажности, а также ИК-газоанализатор для определения видимого фотосинтеза посева по динамике поглощения CO<sub>2</sub>. Датчики и исполнительные механизмы подключены к микроконтроллеру на базе AVR серии Mega 2560, который подсоединен к одноплатному компьютеру Raspberry Pi 4B через преобразователь USB-UART. Модульный пакет программ создан на базе фреймворка ROS (Robot Operating System), что позволило максимально сократить период обучения новых разработчиков и операторов эксперимента. Первые версии разработанного программно-аппаратного комплекса были успешно испытаны на стенде с посевом китайской капусты для поиска траектории параметров оптимального освещения в процессе роста. С помощью этого комплекса были выполнены несколько повторений двухфакторного эксперимента для исследования дрейфа оптимальных режимов светодиодного освещения вегетирующего посева в течение 10 дней при ежедневном варьировании двух факторов — тока в цепи красных светодиодов и тока в цепи белых светодиодов. Были получены оптимальные траектории изменения параметров освещения растений на стенде с моделью космической оранжереи.*

**Ключевые слова:** оптимизация освещения растений, критерий оптимальности, параметры оптимизации, автоматизация экспериментов

**Введение.** Увеличение длительности космических экспедиций в ближайшем будущем потребует улучшения среды обитания космонавтов, в частности, путем включения установок для выращивания овощных растений в системы жизнеобеспечения (СЖО) экипажей [1]. Проекты подобных космических оранжерей (КО) приведены в ряде публикаций [2–4]. Из-за ограниченной доступности и высокой стоимости ресурсов на борту космических кораблей одно из основных требований к КО — минимизация удельного потребления

основных бортовых ресурсов: энергии, объема, расходных материалов, хладагента, а также трудозатрат экипажа по уходу за оборудованием на единицу массы выращенной продукции. Поскольку энергетические потребности для производства растительной продукции на борту пилотируемого космического аппарата высоки [5], можно предсказать, что в первых межпланетных полетах при весьма ограниченной мощности электросиловых установок биологическим звеном в СЖО будут относительно небольшие овощные, или витаминные, КО. Согласно современным оценкам, при полностью искусственном светодиодном освещении энергопотребление светильников будет составлять 50 % и более всего объема энергетических затрат в овощных КО [2]. Следовательно, оптимизация режима освещения посева в КО является актуальной задачей при проектировании современных СЖО для любого проекта долгосрочной космической экспедиции. В настоящее время в Институте медико-биологических проблем РАН совместно с Филиалом АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация — НИИ космического приборостроения» проводятся работы по изготовлению опытного образца салатной КО «Витацикл-Т», предназначенной для выращивания зеленных и пряно-вкусовых культур на российском сегменте Международной космической станции (МКС) [6]. На основании анализа экспериментальных данных, а также с учетом энергетических ресурсов для освещения растений в салатном модуле КО был рекомендован облучатель, выполненный на базе красных (660-нм) и белых (4000 К) светодиодов (СД), с соотношением плотности потока фотонов от красных и белых СД, равным 1,5, суммарной плотностью потока фотонов (ППФ) на уровне верхушек растений в диапазоне 400...430 мкмоль/(м<sup>2</sup>·с) [7].

Данные физиологии растений указывают на то, что оптимальные режимы выращивания синхронных посевов должны изменяться с возрастом растений [8]. Это обусловлено изменением морфологии листьев в процессе старения, а также свойств посева растений как фотоприемника в процессе нарастания биомассы. Следовательно, возможно дополнительно оптимизировать режимы освещения посевов в процессе роста растений, что сделает их эффективнее, чем найденные наиболее выгодные режимы освещения, константные независимо от возраста растений.

В обзоре [9] приведено большое количество работ, посвященных оптимизации искусственного освещения растений в городских условиях и на фабриках растений, направленных в основном на энергосбережение. В числе этих методов упоминаются оптимизация по статическим и динамическим моделям посева, минимизация методами нелинейного программирования, параллельного динамического программирования, применение регуляторов с нечеткой логикой, киберсоциальных алгоритмов программирования и др. В ряде случаев

предлагается использовать методы машинного обучения моделей продукционного процесса растений по множеству получаемых опытных данных. Однако, как указано в работе [10], еще удалось увеличить эффективность использования искусственного света в городских и вертикальных фермах примерно вдвое по сравнению с теплицами с солнечным освещением. Она остается пока достаточно низкой — в пределах 0,032–0,043. Таким образом, имеются значительные резервы экономии энергозатрат при использовании светодиодного освещения посевов растений.

В работе [11] указано основное препятствие для использования в настоящее время вышеуказанных подходов к оптимизации освещения в КО, заключающееся в том, что для накопления необходимых экспериментальных данных потребуются значительные затраты труда и времени. В работах [11, 12] приведен один из альтернативных методов, при котором не понадобится проведение длительных предварительных вегетационных опытов, а именно адаптивной динамической оптимизации с помощью пробных воздействий.

В данной работе была поставлена цель — разработать программно-аппаратный комплекс (ПАК) управления системой адаптивной оптимизации режима светодиодного освещения посева растений, использующей текущие сигналы биологической обратной связи по сигналу видимого фотосинтеза посева растений для оценки в реальном времени оптимального режима освещения в процессе вегетации. Посев растений рассматривается здесь в виде «черного ящика» при минимальной информации о реальной связи выходных параметров с воздействиями на его входах. Считается, что в настоящее время подобный подход можно применять для управления сложными системами на этапе накопления больших массивов экспериментальной информации с целью идентификации и обучения динамической модели управляемого объекта [13].

**Описание стенда.** Блок-схема стенда приведена на рис. 1, фотография стенда с растениями китайской капусты — на рис. 2. В состав стенда входит стеклянная вегетационная камера (ВК), или фитотрон, объемом 80 л с герметично прилегающей крышкой. Внутри ВК размещен корневой модуль с посевом растений китайской капусты, установленный на электронные весы. Камера снабжена системами стабилизации параметров среды: температуры и влажности воздуха, водного потенциала в капиллярно-пористом почвозаменителе, а также инфракрасным газоанализатором CO<sub>2</sub> и узлом обеспечения минерального питания растений на базе сосуда Мариотта, позволяющим реализовать подачу питательного раствора к корням растений по их требованию. Кроме того, ВК была оборудована вентиляторами с электроклапанами и соответствующими трубопроводами для периодической вентиляции и последующей герметизации ее объема.

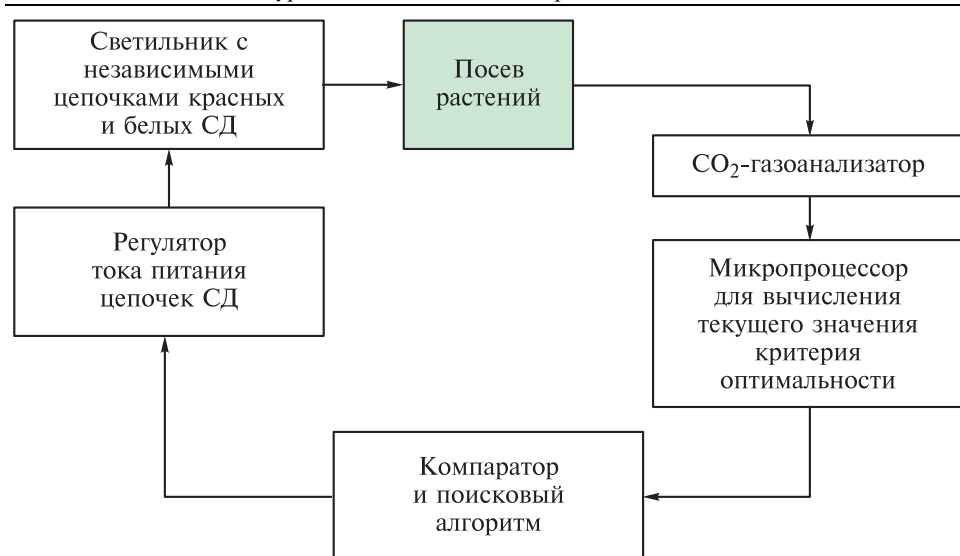


Рис. 1. Блок-схема стенда для адаптивной оптимизации режима светодиодного освещения растений

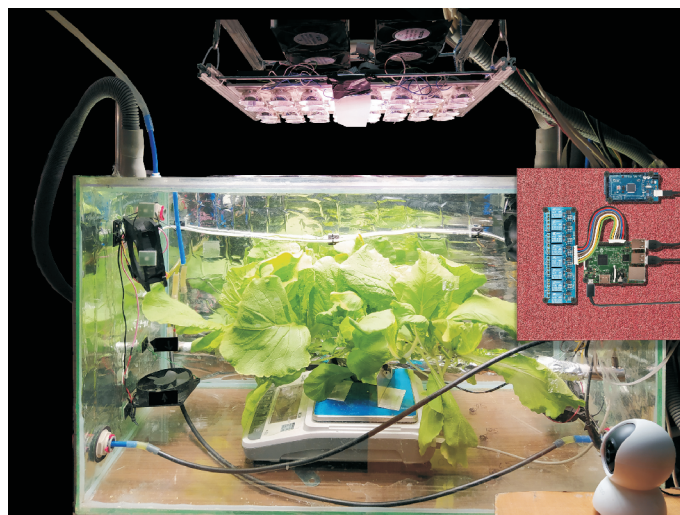


Рис. 2. Фотография стенда с моделью космической оранжереи, справа — макет узла управления и видеокамера

Конструкция системы корневого снабжения растений на стенде была приближена к конструкции КО «Витацикл-Т». Семена китайской капусты, *Brassica chinensis* L., сорт Веснянка, высаживали на корневой модуль в виде горизонтальной трубки из пористого титана, обернутой волокнистым ионообменным почвозаменителем. Гидропонный раствор подавался внутрь пористой трубки из сосуда Мариотта, поддерживающего постоянный водный потенциал около  $-1$  кПа. Первые 14 дней растения росли в люминостате под СД-светильником с крас-

но-белым излучением, при этом были учтены рекомендации из работы [7]. Затем, с 14 по 24 день, опытные растения выращивались в фитотроне на стенде, а контрольные оставались в люминостате при прежнем режиме освещения. Над посевом в фитотроне был смонтирован светильник, построенный на базе красных и белых светодиодов (СД). Растения освещались круглосуточно, но с изменяющимися по определенному алгоритму параметрами освещения  $X1$  и  $X2$  ( $X1$  — суммарная плотность потока фотонов от светильника,  $X2$  — соотношение ППФ от светодиодов с красным и белым излучением). Интерфейсная система электропитания цепочек белых (цветовая температура 4000 К) и красных (640 нм) СД обеспечивала автономное управление токами питания в цепочках каждого типа СД в светильнике через встроенный регулятор по программе, задаваемой микроконтроллером (МК).

Текущую скорость ассимиляции  $CO_2$  посевом, пропорциональную скорости видимого фотосинтеза посева (т. е. разности между фотосинтезом и дыханием посева), определяли по скорости изменения концентрации углекислого газа в фитотроне с помощью инфракрасного газоанализатора (ГА), сигнал с которого поступал в одноплатный компьютер Raspberry Pi 4B. Скорость убывания этой концентрации являлась мерой скорости видимого фотосинтеза:

$$F = (-kV\Delta C)/\Delta t, \quad (1)$$

где  $F$  — скорость убывания концентрации;  $k$  — константа размерностей;  $V$  — объем фитотрона с растениями;  $\Delta C$  — уменьшение концентрации  $CO_2$  в ВК за время измерения  $\Delta t = 8$  мин.

По окончании очередного цикла измерения  $F_i$  значения  $Y1$  и  $Y2$  автоматически изменяли на следующие в матрице эксперимента, и цикл повторялся. Программа Raspberry Pi через каждые 15 мин вычисляла первую производную по времени от убывающей функции концентрации углекислого газа в фитотроне, а также определяла значение критерия оптимальности.

**Алгоритм управления светильником.** Слежение за дрейфом оптимальных параметров освещения растений в КО можно осуществлять с помощью экстремального регулятора, использующего поисковые алгоритмы, например градиентные и симплексные [12]. В работе [14] было показано, что при оптимизации непрерывного дифференцируемого нестационарного функционала с помощью градиентных алгоритмов можно отслеживать траектории дрейфующего экстремума с ошибкой, пропорциональной скорости дрейфа. Ошибки слежения за траекторией экстремума существенно зависят от параметров поисковых алгоритмов [15]. При испытаниях программно-аппаратного комплекса управления на представленном стенде была использована оптимизация по робастному плану на основе псевдослучайных равномерно распределенных в многомерном пространстве

чисел  $\tau$ -последовательности в двумерном пространстве Липшица (или ЛП $\tau$ -чисел) [16]. Данный метод обеспечивает равномерное зондирование многомерного пространства допустимых значений параметров. В отличие от градиентных алгоритмов выбранный план позволяет уменьшить влияние отдельных пропусков и незначительных изменений экспериментальных точек на качество поиска. Ежедневно дважды был повторен двухфакторный эксперимент, состоящий из 32 опытов, с использованием рандомизированной матрицы, приведенной в таблице, где фактор Y1 — ток питания красных СД, а фактор Y2 — ток питания белых СД.

Рабочая матрица двухфакторного эксперимента

Фактор	Номер опыта															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Y1, mA	130	70	190	40	160	100	220	25	145	85	205	55	175	115	235	17
Y2, mA	130	190	70	160	40	100	220	235	115	55	175	85	205	145	25	138

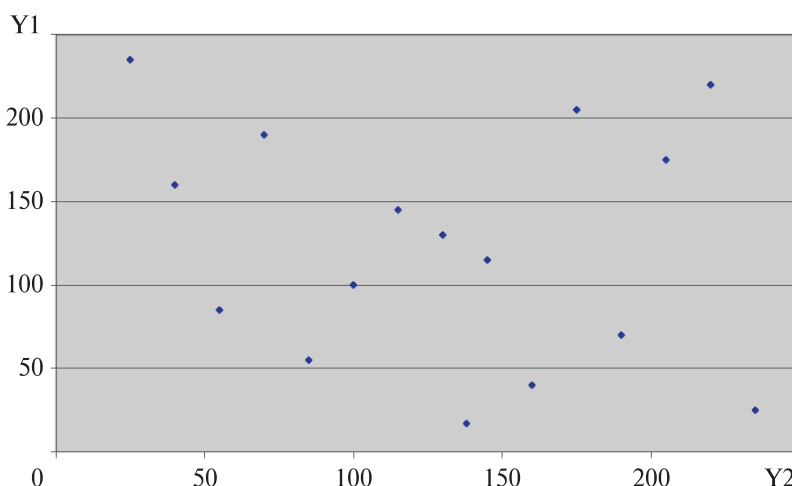


Рис. 3. Распределение точек робастного плана поискового эксперимента в пространстве факторов Y1 и Y2

Распределение точек плана поискового эксперимента из рабочей матрицы 1 в допустимой области изменений факторов Y1 и Y2 показано на рис. 3.

По окончании очередного цикла измерения  $F_i$ , где  $i$  — номер дня начиная от посадки семян растений [10, 14]. Значения факторов Y1 и Y2 в матрице эксперимента автоматически изменялись на следующие, а затем цикл повторялся.

Весь период реализации двухфакторного эксперимента продолжался в течение 8 ч, после чего полученные результаты аппроксимировали регрессионной зависимостью  $G_i(Y1, Y2)$ , где  $i$  — номер дня от

посадки семян растений, а  $G$  — критерий оптимизации [10, 14]. Затем определяли координаты минимума  $G_i$ :  $Y1_{\min}$  и  $Y2_{\min}$ . Найденные параметры  $Y1_{\min}$  и  $Y2_{\min}$  автоматически выставлялись в светильнике, и в течение последующих 16 ч растения в фитотроне выращивали при этих значениях светового режима. Описанная процедура повторялась ежедневно с 14-го по 24-й день вегетации посева капусты.

**Критерий оптимизации светового режима.** Для оценки эффективности систем освещения КО в качестве критериев оптимальности было предложено использовать несколько показателей, в частности, удельный урожай КО по хозяйственно-полезной биомассе на единицу потребляемой на освещение посева энергии ( $M_E$ ) или на единицу объема вегетационной камеры ( $M_V$ ) [2]. Очевидно, что эти показатели отражают соответственно энергетическую эффективность посева и эффективность использования объема оранжереи — двух наиболее дорогих и ограниченных ресурсов на борту космического аппарата. Однако использование этих критериев по отдельности для выбора оптимального режима освещения в КО затруднено. Причина состоит в том, что при фиксированных условиях выращивания растений не существует такого значения плотности светового потока, который обеспечивал бы одновременно возможные максимумы удельного урожая на единицу потребляемой энергии ( $M_E$ ) и на единицу занимаемого объема ( $M_V$ ) [2]. Увеличение одного из этих показателей, зависящих от режима освещения, ведет к уменьшению другого. В работе [11] для выбора оптимального режима освещения КО предложен компромиссный критерий в виде минимума текущего значения так называемой эквивалентной массы (ЭМС) КО:

$$\text{Min } G(t_i) = \min [K_1 / F(X1(t_i), X2(t_i)) + K_2 X1(t_i) / F(t_i)]. \quad (2)$$

Здесь  $G(t)$  — текущий показатель светозависимой части эквивалентной массы системы;  $F$  — видимый фотосинтез посева;  $X1$  — интегральная плотность вертикального потока фотонов от СД-облучателя;  $X2$  — соотношение плотности потока фотонов от СД с красным и белым излучением на уровне верхушек побегов соответственно;  $K_1$  и  $K_2$  — коэффициенты «стоимости» (в [кг]) электромагнитной совместимости (ЭМС) единицы посадочной площади (или объема) и единицы потребляемой КО электрической мощности соответственно. Электромагнитная совместимость рассчитывается с учетом потребления основных бортовых ресурсов: энергии, объема, расходных материалов, хладагента для охлаждения, а также удельных трудозатрат экипажа на единицу массы выращенной продукции. Методика расчета ЭМС приведена в работе [17]. Уменьшение ЭМС КО приводит к снижению стоимости доставки аппаратуры на космический аппарат и ее эксплуатации. Оценки  $K_1 = 45,2 \text{ кг/м}^3$  и  $K_2 = 114 \text{ кг/м}^3$ , зависящие от конструкции космического корабля и сценария конкретной косми-

ческой экспедиции, были взяты из работы [18] для сценария экспедиции на лунной базе длительного пребывания с использованием для освещения растений солнечного света в течение лунного дня и с освещением посевов от СД-светильников с ППФ на уровне около  $500 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  в ночное время.

**Описание программно-аппаратного комплекса.** Поиск траекторий оптимальных параметров освещения растений с биологической обратной связью является длительным непрерывным технологическим процессом, требующим периодического расчета или выбора значений соотношения ППФ от СД с красным и белым излучением, а затем перенастройки пробных шагов по параметрам излучения светильника. Это предъявляет ряд дополнительных требований к программному обеспечению (ПО) системы управления. Во-первых, такая система должна функционировать продолжительное время без прямого вмешательства оператора, контролирующего ход эксперимента. Во-вторых, ПО системы контроля в таких экспериментальных установках должно обеспечивать возможность модернизации и доработки исходного кода, особенно при изменениях растительного объекта (сорта или вида растений). Кроме того, на этапе наземной отработки в такой системе может изменяться перечень используемых в системе устройств, датчиков и исполнительных механизмов. И наконец, ПО должно обеспечивать возможность автоматически обнаруживать в приемлемые сроки нештатные ситуации, а также оповещать оператора о них, сохраняя при этом неизменными, насколько это возможно, подходящие условия среды обитания растений в каждой конкретной аварийной ситуации. Блок-схема разработанного ПАК представлена на рис. 4.

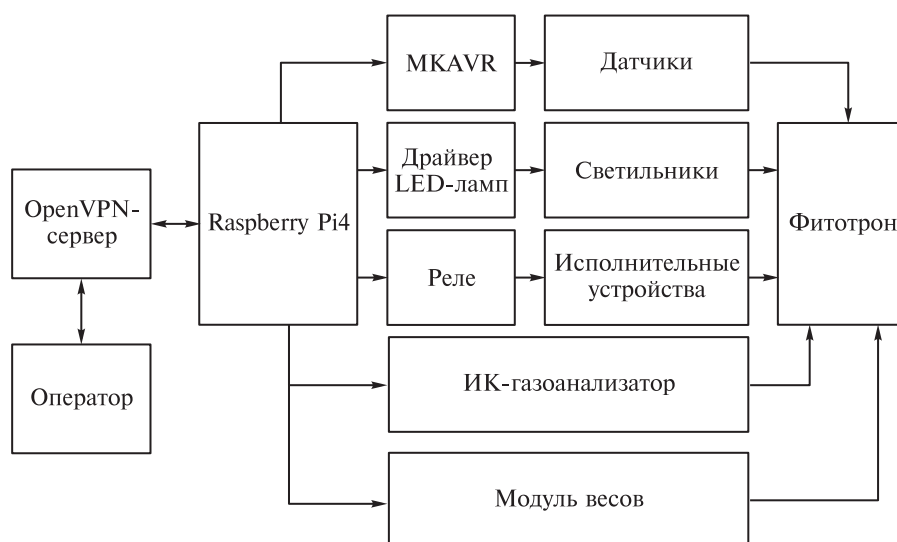


Рис. 4. Блок-схема программно-аппаратного комплекса



Программно-аппаратный комплекс состоит из четырех основных блоков: блока измерения концентрации углекислого газа, блока управления светодиодными светильниками, блока управления экспериментом и вегетационной камеры с растениями.

Блок измерения концентрации CO<sub>2</sub> содержит:

датчик концентрации углекислого газа SBA-5 производства компании PP-Systems (США);

насос подачи воздуха из емкости с растениями и системы осушения этого воздуха;

баллон с тарировочным азотом и систему управляемых через реле клапанов и редукторов для проведения автоматической калибровки датчика перед каждой серией измерений.

Блок управления светодиодными светильниками включает в себя модульный светодиодный светильник и драйверы. Подробное описание этого блока было дано в работе [12].

Блок управления экспериментом реализован на основе одноплатного компьютера Raspberry Pi 4B. Управление исполнительными устройствами (клапанами, насосами и т. д.) осуществляется с помощью группы реле с оптоизоляцией, подключенных к GPIO-контактам Raspberry Pi. Датчики и сенсоры (температуры, относительной влажности и давления воздуха в ВК, массы посева в корневых модулях и токов электропитания в цепочках СД) подключены к микроконтроллеру расширения AVR Atmega 2560 и к GPIO-контактам Raspberry. Блок измерения CO<sub>2</sub> и драйвер светильника подсоединены к Raspberry через преобразователь usb-uart.

В автоматическом режиме ПАК реализует 15-минутный цикл измерения видимого фотосинтеза. Он подразделяется на несколько этапов: расчет и настройка параметров очередного шага изменения режима освещения после получения результатов измерения видимого фотосинтеза и ЭМС на предыдущем цикле; открытие клапанов подачи воздуха для проветривания объема фитотрона и включение вентиляторов; калибровку газоанализатора азотом, отключение вентиляторов; закрытие клапанов подачи воздуха; герметизация объема, измерение динамики поглощения углекислого газа растениями в течение заданного времени. Затем происходит переход на следующий цикл (или шаг).

**Описание структуры программного обеспечения.** Созданное ПО открыто распространяется по лицензии GNU GPLv3 (текущую рабочую версию кода можно получить по адресу: [https://github.com/houseofbigseals/ros\\_farmer\\_pc](https://github.com/houseofbigseals/ros_farmer_pc)). Система управления экспериментальным стендом создана на базе фреймворка ROS (Robot Operating System) [19], разработанного для управления мобильными робототехническими системами. ROS позволяет разделить программу на функциональные модули — ROS-ноды, что, фактически,

предоставляет возможность реализовать микросервисную архитектуру ПО, а также удобную архитектуру приложения по управлению и диагностике процессов на множестве распределенных в локальной сети компьютеров [20]. Передача данных между ROS-нодами организована с помощью примитивов издатель-подписчик и клиент-сервис. Применять ROS также удобно при обучении операторов для разрабатываемой аппаратуры.

**Описание схемы удаленного доступа.** Блок-схема удаленного управления стендом показана на рис. 5. Все блоки стенда и компьютеры объединены в единую виртуальную сеть. Для удаленного доступа к вегетационным стендам используется технология OpenVPN — программное обеспечение с открытым исходным кодом под лицензией GNU General Public License (GPL) [21]. Его можно использовать, для того чтобы установить безопасную связь с помощью зашифрованных каналов типа точка-точка или сервер-клиенты между компьютерами, физически расположенными в разных локальных сетях. OpenVPN, обращаясь к широко распространенной библиотеке OpenSSL, способен проходить трансляторы сетевых адресов (NAT) и межсетевые экраны. Он позволяет компьютерам аутентифицировать друг друга, применяя заранее созданный общий секретный ключ, клиентские сертификаты или просто пары «имя пользователя — пароль». В созданной системе используются конфигурация сети типа сервер-клиенты и верификация пользователя по клиентскому сертификату. OpenVPN-сервер

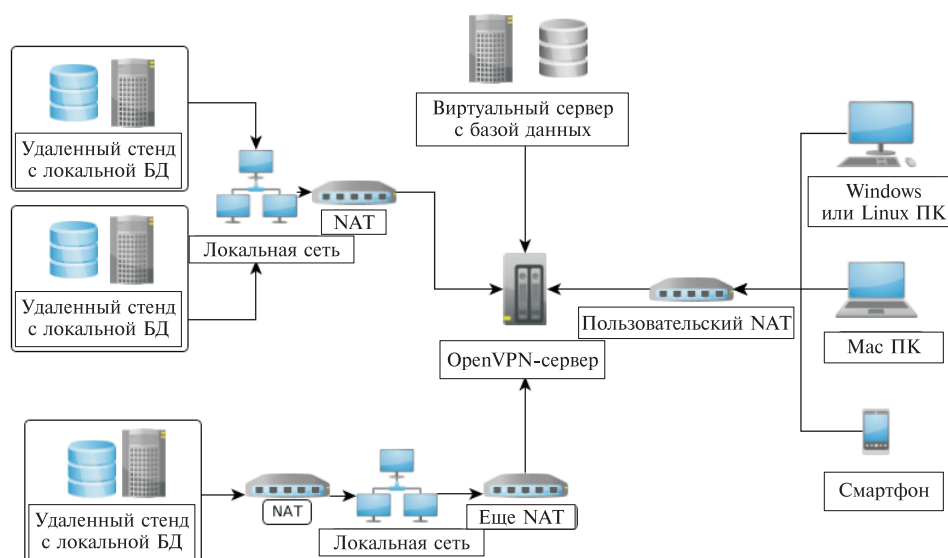


Рис. 5. Схема удаленного управления стендом:

БД — база данных; NAT (Network Address Translation) — преобразование сетевых адресов; OpenVPN — мультиплатформенный, гибко настраиваемый, бесплатный VPN-сервер с открытым исходным кодом

находится на виртуальной машине в хостинге, а клиентами являются компьютеры вегетационных стендов и пользователей.

Доступ к серверу из Интернета разрешен только по ssh-ключу. Система настроена таким образом, что клиентам разрешен доступ по ssh на машины других клиентов, но не на сервер. Следовательно, в случае заражения клиентской машины вредоносным кодом администратору достаточно отключить сервер, и все машины виртуальной сети окажутся изолированными. Новое устройство может быть добавлено в сеть путем создания клиентского сертификата и добавления его на OpenVPN-сервер и на клиентскую машину. Конфигурация локальной сети, в которой находится новое устройство, не имеет значения, если имеется доступ в Интернет и на устройстве установлено приложение OpenVPN.

**Сбор и обработка экспериментальных данных.** Блок-схема системы сбора данных изображена на рис. 6. Для каждого датчика, подключенного к системе, создана ROS-нода сбора данных, которая отправляет данные от него в соответствующий топик. Сообщения из всех таких топиков собираются в MySQL-базу данных (БД) нодой взаимодействия с базой данных. Каждый 15-минутный экспериментальный цикл обрабатывается главной нодой контроля. Она осуществляет все операции по работе с реле, контролю калибровки датчика CO<sub>2</sub>, выставлению нужного светового режима и т. д.

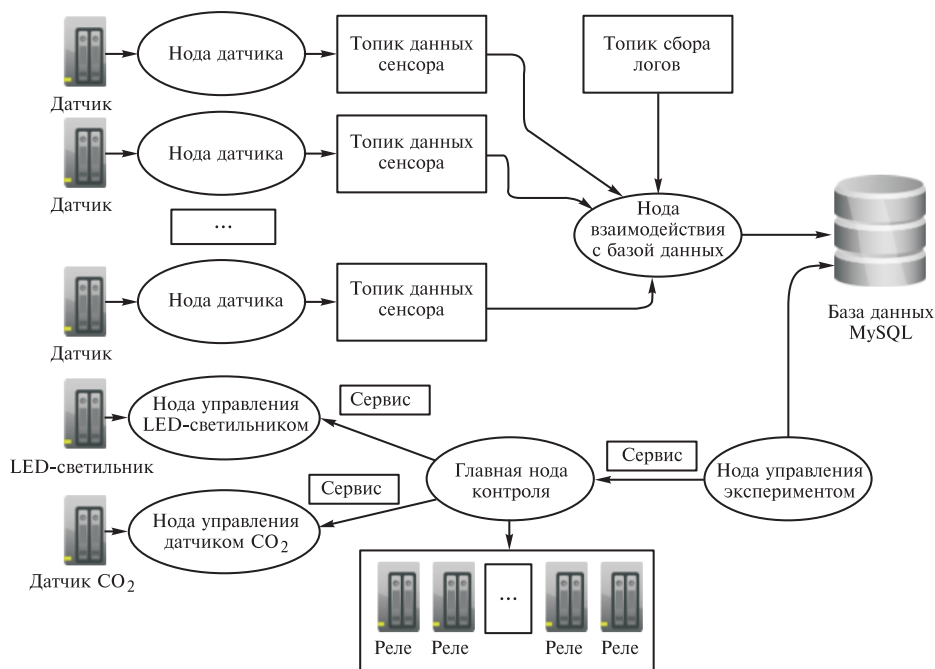


Рис. 6. Блок-схема системы сбора данных (эллипсами обозначены ROS-ноды, а прямоугольниками — ROS-топики)

Новый режим освещения выставляется нодой управления экспериментом, изолированной от всех физических операций, которая получает от главной ноды контроля только данные о начале — завершении очередного цикла. Затем она отправляет ей новый режим освещения, подсчитанный в соответствии с выбранным поисковым алгоритмом и критерием оптимизации светового режима.

Благодаря подобной архитектуре все данные измерений и вычислений, а также Журналы системных событий собираются в MySQL-БД, что позволяет автоматизировано обрабатывать результаты эксперимента и проводить мониторинг текущего состояния установки.

**Результаты и обсуждение.** Пример визуализации данных о динамике параметров среды растений в вегетационной камере, собираемых ПАК за 8 мин измерения дрейфа концентрации  $\text{CO}_2$ , показан на рис. 7. Данные были получены при удаленном доступе к стенду с моделью КО. Можно отметить, что после герметизации ВК в течение приблизительно 1-2 мин наблюдались нелинейные переходные процессы из-за выравнивания по ее объему температуры, относительной влажности и концентрации  $\text{CO}_2$  в воздухе. Далее происходило монотонное повышение температуры воздуха в ВК вследствие нагрева от светильника и относительной влажности из-за транспирации растений, а также понижение концентрации углекислого газа в результате фотосинтеза растений. Очевидно, что изменения температуры и влажности воздуха в течение 8 мин измерений оказывали некоторое воздействие на скорость видимого фотосинтеза посева. Однако предварительные опыты показали, что уровень этих погрешностей существенно ниже изменений фотосинтеза посева из-за перенастройки режима освещения и роста растений, что позволило, в итоге, выделить с помощью разработанного программно-аппаратного комплекса (ПАК) реальную динамику видимого фотосинтеза посева на фоне указанных шумов.

Разработанный ПАК устойчиво регистрировал динамику показаний датчиков параметров среды растений и результатов расчета видимого фотосинтеза посевов. Кроме того, он позволял автоматически вычислять моменты распределения случайных результатов измерений на различных временных отрезках. На рис. 8 представлены полученные с помощью ПАК графики изменения параметров режимов освещения растений и среды их обитания, а также физиологических показателей 20-суточного посева китайской капусты за 8-часовой сеанс проведения двухфакторного эксперимента по робастному поисковому плану из таблицы. При задаваемых изменениях суммарной ППФ от СД-светильника были зафиксированы соответствующие колебания температуры воздуха в ВК и минимальных значений концентрации  $\text{CO}_2$  в конце 8-минутных циклов измерения фотосинтеза.

Максимальное значение концентрации  $\text{CO}_2$ , а также минимальная температура воздуха при этом почти не изменялись, поскольку каждый цикл начинался после проветривания ВК воздухом из лабораторного помещения, оборудованного воздушным кондиционером.

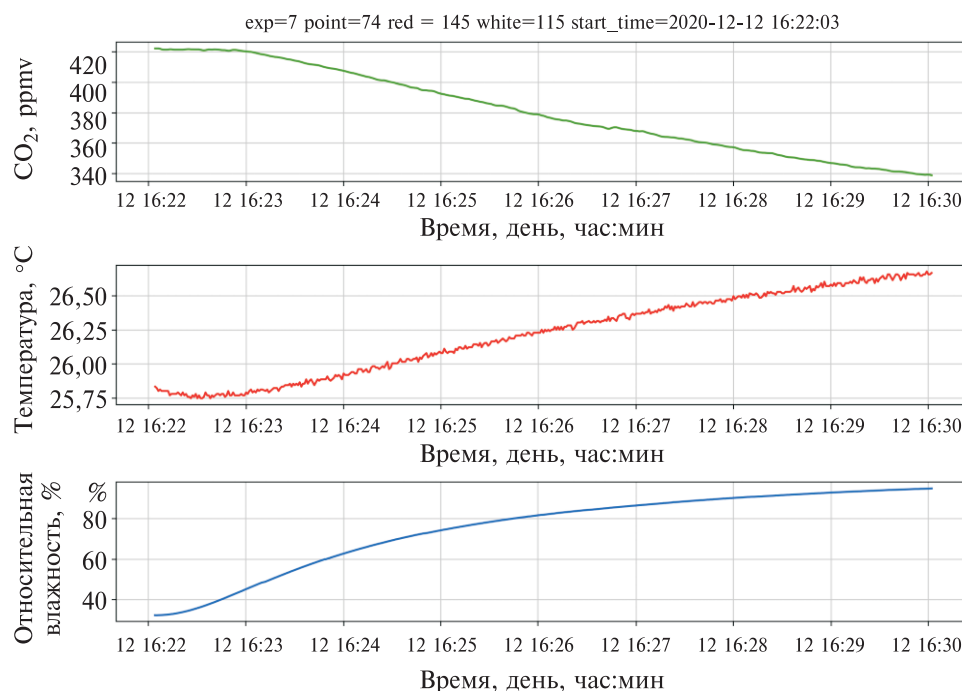
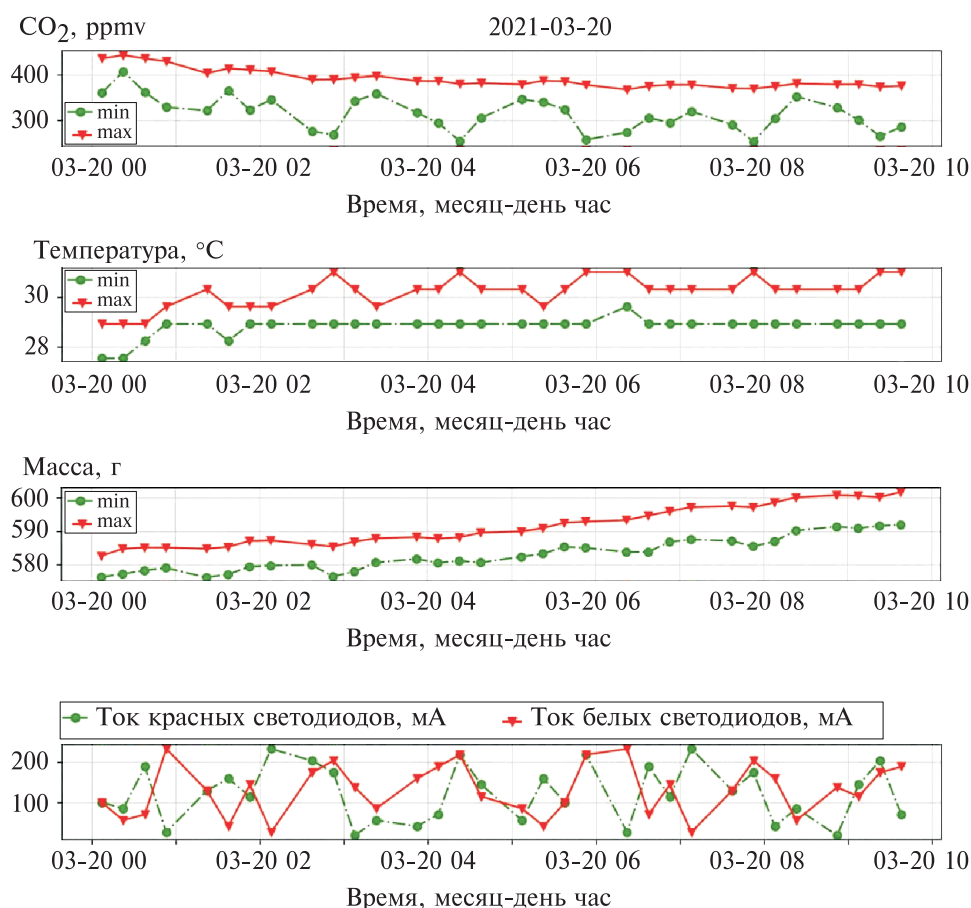


Рис. 7. График данных, полученных от сенсоров в течение 8 мин измерений после герметизации вегетационной камеры, возраст растений — 19 суток

Динамика биомассы растений, показанная на рис. 8 с помощью ПАК, также соответствует возможным оценкам скорости роста растений при выбранных параметрах среды. Полученные данные позволили ежедневно автоматически определять оптимальное значение параметров X1 и X2 режима освещения растений и вычислить соответствующее значение критерия  $G_{\min}(t)$ . Следует отметить, что устойчивый алгоритм оптимизации режима освещения растений по робастному плану, как на основе равномерно распределенных в многомерном пространстве ЛПт-чисел, так и с помощью традиционных D-оптимальных планов, многофакторного эксперимента обладает тем недостатком, что проведение выбранного числа опытов с растениями занимает значительную долю суток. В нашем случае из 8 часов, ежесуточно требуемых на реализацию такого плана, растения находились при оптимальных условиях освещения лишь полчаса. Таким образом, потери на поиск и отслеживание оптимума могли быть значительными в течение почти третьей части из 10 суток эксперимента. В дальнейшем предстоит определить потери на поиск опти-

мума при использовании градиентных методов и выбрать наиболее эффективный метод слежения за дрейфом минимума критерия (2) в процессе роста растений.



**Рис. 8.** График минимальных и максимальных значений измеряемых сенсорами параметров для каждой 15-минутной поисковой точки за 8 ч проведения двухфакторного эксперимента (см. таблицу), возраст растений — 20 суток

В результате описанного эксперимента были получены данные о дрейфе минимума текущего показателя светозависимой части эквивалентной массы КО в течение последних 10 суток товарной вегетации посева китайской капусты. Разработанный ПАК позволил на удаленном доступе автоматически определять и устанавливать в светильнике оптимальные условия освещения, чтобы таким образом следить за траекторией экстремума величины  $G(t)$ . Результаты вегетационных опытов, проведенных на стенде, позволили отметить такие положительные качества разработанного ПАК, как высокая степень автоматизации экспериментального процесса при удаленном доступе оператора, широкий набор программных инструментов для

хранения, обработки и анализа большого объема разнородных данных эксперимента, удобный человеко-машинный интерфейс. Такой интерфейс обеспечивает возможность управления ходом эксперимента и текущего анализа данных, а также модификации запуска и протокола эксперимента без внесения существенных изменений ПО.

#### **Выводы.**

1. Разработанный программно-аппаратный комплекс позволил оптимизировать параметры освещения растений на стенде с моделью космической оранжереи по критерию минимума светозависимой части эквивалентной массы КО.

2. Разработанный программно-аппаратный комплекс реализовал автоматизацию удаленного контроля выращивания растений и управления этим процессом в модели космической оранжереи.

3. Модульная структура программного обеспечения в разработанном ПАК, стандартизация системы передачи данных, а также широкая доступность большого объема обучающих материалов на базе фреймворка ROS поможет сократить время при обучении разработчиков и операторов новых космических экспериментов с растениями в КО.

*Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований по базовой теме РАН 64.2.*

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Романов С.Ю., Железняков А.Г., Телегин А.А., Гузенберг А.С., Андрейчук П.О., Протасов Н.Н., Беркович Ю.А. Системы жизнеобеспечения экипажей длительных межпланетных экспедиций. *Известия РАН, Энергетика*, 2007, № 3, с. 57–74.
- [2] Беркович Ю.А., Кривобок Н.М., Смолянина С.О., Ерохин А.Н. *Космические оранжереи: настоящее и будущее*. Москва, Изд-во «Фирма “Слово”», 2005, 368 с.
- [3] Zabel P., Bamsey M., Schubert D., Tajmar M. Review and analysis of over 40 years of space plant growth systems. *Life Sciences in Space Research*, 2016, vol. 10, pp. 1–16.
- [4] Morrow R., Wetzel J., Richter R., Crabb T. Evolution of space-based plant growth technologies for hybrid life support systems. 47th International Conference on Environmental Systems 16-20 July 2017, Charleston, South Carolina. *47th ICES paper*. Sierra Nevada Corp., 2017, vol. ICES-2017-301. URL: [https://ttu-ir.tdl.org/bitstream/handle/2346/73075/ICES\\_2017\\_301.pdf?sequence=1](https://ttu-ir.tdl.org/bitstream/handle/2346/73075/ICES_2017_301.pdf?sequence=1)
- [5] Беркович Ю.А., Синяк Ю.Е., Смолянина С.О., Кривобок Н.М., Ерохин А.Н., Романов С.Ю., Гузенберг А.С. Энергетические потребности для производства растительной пищи в длительных пилотируемых космических экспедициях. *Известия РАН, Энергетика*, 2009, № 1, с. 27–35.
- [6] Орлов О.И., ред. *Медико-биологические эксперименты на борту российского сегмента Международной космической станции. Сб. ст. ГИЦ РФ-ИМБП РАН*. Москва, 2021, с. 144–148.

- [7] Berkovich Yu.A., Konovalova I.O., Erokhin A.N., Smolyanina S.O., Smolyanin V.G., Yakovleva O.S., Tarakanov I.G., Ivanov T.M. LED lighting optimization as applied to a vitamin space plant growth facility. *Life Sciences in Space Research*, 2019, vol. 20, pp. 93–100.
- [8] Мокроносков А.Т. *Онтогенетический аспект фотосинтеза*. Москва, Наука, 1981, 196 с.
- [9] Avgoustaki D.D., Xydis G. Plant factories in the water-food-energy. Nexus era: a systematic bibliographical review. *Food Security*, 2020, vol. 12.2, pp. 253–268.
- [10] Kozai T., Niu G., Takagaki M. Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production. *Academic press*, 2016, 405 p.
- [11] Беркович Ю.А., Очков О.А., Буряк А.А., Смолянина С.О., Переведенцев О.В., Лапач С.Н. Некоторые пути оптимизации светодиодного освещения в светокультуре растений. *Светотехника, спецвыпуск «Светокультура растений»*, 2019, S1, с. 37–42.
- [12] Беркович Ю.А., Очков О.А., Переведенцев О.В. Обоснование метода адаптивной оптимизации светодиодного освещения растений для витаминной оранжереи в составе системы жизнеобеспечения космических экипажей. *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 2018, т. 52, № 6, с. 86–94.
- [13] Ведяхин А. и др. *Сильный искусственный интеллект: На подступах к сверхразуму*. Москва, Изд-во «Интеллектуальная литература», 2021, 232 с.
- [14] Попков А.Ю. Градиентные методы для нестационарных задач безусловной оптимизации. *Автоматика и телемеханика*, 2005, № 6, с. 38–46.
- [15] Беркович Ю.А., Очков О.А., Переведенцев О.В., Буряк А.А. Выбор алгоритмов адаптивной оптимизации фотосинтеза растений для космических оранжерей. *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 2019, т. 53, № 2, с. 85–92.
- [16] Лапач С. Н. Робастные планы эксперимента. *Математические машины и системы*, 2016, № 4, с. 111–121.
- [17] Levri J.A., Vaccary D.A., Drysdale A.E. Theory and Application of Equivalent System Mass Metric. *SAE Technical Paper*, 2000, vol. 2000-01-2395.
- [18] Drysdale A., Bugbee B. Optimizing a plant habitat for space: a novel approach to plant growth on the Moon. *International Conference on Environmental Systems. SAE Technical Paper*, 2003, vol. 2003-01-2360. DOI: 10.4271/2003-01-2360
- [19] Quigley M., Gerkey B., Conley K., Faust J., Foote T., Leibs J., Berger E., Wheeler R., Ng A. ROS: an open-source Robot Operating System. *ICRA workshop on open source software*, 2009, vol. 3, no. 3.2, pp. 5–9.
- [20] Malavolta I., Lewis G., Schmerl B., Lago P., Garlan D. How do you architect your robots? State of the practice and guidelines for ROS-based systems. *2020 IEEE/ACM 42nd International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP)*. *IEEE*, 2020, pp. 31–40.
- [21] Skendzic A., Kovacic B. Open source system OpenVPN in a function of Virtual Private Network. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing*, 2017, vol. 200, no. 1, art. no. 012065.

Статья поступила в редакцию 19.05.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Буряк А.А., Очков О.А., Беркович Ю.А., Лапач С.Н. Разработка модульного программно-аппаратного комплекса управления стендом с моделью космической оранжереи. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 6.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-6-2090>



**Буряк Андрей Алексеевич** окончил магистратуру МГУ имени М.В. Ломоносова (2018), физический факультет, специальность радиофизика. Аспирант Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, (специальность радиофизика). Область научных интересов: биотехнические системы жизнеобеспечения, точное земледелие, системы управления устройствами для выращивания растений, автоматизация научного эксперимента. e-mail: buryak.andrej@list.ru

**Очков Олег Анатольевич** окончил Московский авиационный институт (2009), инженер по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств». Аспирант ГНЦ РФ — ИМБП РАН, (специальность «Безопасность в чрезвычайных ситуациях»). Сфера научных интересов: автоматические системы управления устройствами для выращивания растений. e-mail: chopic@bk.ru

**Беркович Юлий Александрович** — д-р техн. наук, окончил в 1968 г. МАИ (специальность «Системы управления летательных аппаратов») и в 1976 г. МГУ (факультет «Вычислительная математика и кибернетика»). Профессор, ведущий научный сотрудник, руководитель сектора ИМБП. Сфера научных интересов: биолого-технические системы жизнеобеспечения космических экипажей, устройства и технологии для космических оранжерей. e-mail: berkovich@imbp.ru

**Лапач Сергей Николаевич** окончил Киевский политехнический институт (прикладная математика, 1977), инженер-математик. Старший преподаватель НТУУ «КПИ». e-mail: lapach@ukr.net

## Development of a modular software and hardware complex for a test-stand with a space greenhouse model

© A.A. Buryak<sup>1</sup>, O.A. Ochkov<sup>1</sup>, Yu.A. Berkovich<sup>1</sup>, S.N. Lapach<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Russian Federation State Research Center Institute of Biomedical Problems RAS (IBMP), Moscow, 123007, Russia

<sup>2</sup> National Technical University of Ukraine — “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 03056, Ukraine

*Space greenhouses (SG) that can be used for enriching the astronauts' diet are also considered a means of improving the astronauts' life environment in autonomous crewed expeditions. One of the main requirements for SC is to minimize the specific consumption of the main onboard resources: energy, space, refrigerant, and labor-hours per unit mass of grown product. Experiments on adaptive optimization of irradiation and illumination spectrum were performed and a hardware and software complex (HSC) was developed to control the test-stand with the SG model. The main object of control is an intermittently pressure-sealed chamber with temperature and humidity sensors, as well as an IR gas analyzer. The latter determines the visible photosynthesis of the plants based on the dynamics of CO<sub>2</sub> absorption. The sensors and actuators are connected to a Mega 2560 AVR microcontroller connected to a Raspberry Pi 4B single-board computer via a USB-UART converter. The modular software package was created on the basis of the ROS (Robot Operating System) framework, which minimizes the training period for new developers and experiment operators. The first HSC versions were successfully tested on a test-stand with Chinese cabbage to find the trajectory of optimal lighting parameters during the growth process. The HSC made it possible to carry out several replications of a 2-factor experiment to study the drift of the optimal LED lighting modes during a 10 days' period with daily variation of 2 factors — the current in the red LED circuit and the current in the white LED circuit. Optimal change patterns in the lighting parameters for a test-stand with a space greenhouse model were obtained.*

**Keywords:** optimization of plant lighting, optimization parameters, experiment automation

### REFERENCES

- [1] Romanov S.Yu., Zheleznyakov A.G., Telegin A.A., Guzenberg A.S., Andreychuk P.O., Protasov N.N., Berkovich Yu.A. *Izvestiya RAN, Energetika — Thermal Engineering*, 2007, no. 3, pp. 57–74.
- [2] Berkovich Yu.A., Krivobok N.M., Smolyanina S.O., Erokhin A.N. *Kosmicheskie oranzherii: nastoyaschee i budushee* [Space greenhouses: the present and the future]. Moscow, Firma Slovo Publ., 2005, 368 p.
- [3] Zabel P., Bamsey M., Schubert D., Tajmar M. *Life Sciences in Space Research*, 2016, vol. 10, pp. 1–16.
- [4] Morrow R., Wetzel J., Richter R., Crabb T. Evolution of space-based plant growth technologies for hybrid life support systems. *47th ICES paper*, Sierra Nevada Corp., 2017, vol. ICES-2017-301. Available at: [https://ttu-ir.tdl.org/bitstream/handle/2346/73075/ICES\\_2017\\_301.pdf?sequence=1](https://ttu-ir.tdl.org/bitstream/handle/2346/73075/ICES_2017_301.pdf?sequence=1)
- [5] Berkovich Yu.A., Sinyak Yu.E., Smolyanina S.O., Krivobok N.M., Erokhin A.N., Romanov S.Yu., Guzenberg A.S. *Izvestiya RAN, Energetika — Thermal Engineering*, 2009, no. 1, pp. 27–35.

- [6] Orlov O.I., red. Mediko-biologicheskie eksperimenty na bortu rossiyskogo segmenta Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii [Biomedical experiments aboard the Russian segment of the International Space Station]. *Sb. st. GNTs RF — IMBP RAN* [Coll. papers, RAS – IBMP]. Moscow, 2021, pp. 144–148.
- [7] Berkovich Yu.A., Konovalova I.O., Erokhin A.N., Smolyanina S.O., Smolyanin V.G., Yakovleva O.S., Tarakanov I.G., Ivanov T.M. *Life Sciences in Space Research*, 2019, vol. 20, pp. 93–100.
- [8] Mokronosov A.T. *Ontogeneticheskiy aspekt fotosinteza* [Ontogenetic aspect of photosynthesis]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 196 p.
- [9] Avgoustaki D.D., Xydis G. *Food Security*, 2020, vol. 12.2, pp. 253–268.
- [10] Kozai T., Niu G., Takagaki M. *Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Academic press, 2016, 405 p.
- [11] Berkovich Yu.A., Ochkov O.A., Buryak A.A., Smolyanina S.O., Perevedentsev O.V., Lapach S.N. *Svetotekhnika, Spetsvypusk “Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiia po primeneniyu svetodiodnykh fitobluchateley” — Light and Engineering, sp. no. “Int. Conf. on Application of LED Grow Lights”*, 2019, S1, pp. 37–42.
- [12] Berkovich Yu.A., Ochkov O.A., Perevedentsev O.V. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina — Aerospace and Environmental Medicine*, 2018, vol. 52, no. 6, pp. 86–94.
- [13] Vedyakhin A., et al. *Silny iskusstvenny intellekt: Na podstupakh k sverkhrazumu* [Strong artificial intelligence: approaching the superintelligence]. Moscow, Intellektualnaya literatura Publ., 2021, 232 p.
- [14] Popkov A.Yu. *Avtomatika i telemekhanika — Automation and Remote Control*, 2005, vol. 66, no. 6, pp. 881–891.
- [15] Berkovich Yu.A., Ochkov O.A., Perevedentsev O.V., Buryak A.A. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina — Aerospace and Environmental Medicine*, 2019, vol. 53, no. 2, pp. 85–92.
- [16] Lapach S.N. *Matematicheskie mashiny i sistemy — Mathematical Machines and Systems*, 2016, no. 4, pp. 111–121.
- [17] Levri J.A., Vaccary D.A., Drysdale A.E. Theory and Application of Equivalent System Mass Metric. *SAE Technical Paper*, 2000, vol. 2000-01-2395.
- [18] Drysdale A., Bugbee B. Optimizing a plant habitat for space: a novel approach to plant growth on the moon. *SAE Technical Paper*, 2003, vol. 2003-01-2360.
- [19] Quigley M., Gerkey B., Conley K., Faust J., Foote T., Leibs J., Berger E., Wheeler R., Ng A. ROS: an open-source Robot Operating System. *ICRA workshop on open source software*, 2009, vol. 3, no. 3.2., pp. 5–9.
- [20] Malavolta I., Lewis G., Schmerl B., Lago P., Garlan D. How do you architect your robots? State of the practice and guidelines for ROS-based systems. *2020 IEEE/ACM 42nd International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP)*, IEEE, 2020, pp. 31–40.
- [21] Skendzic A., Kovacic B. Open source system OpenVPN in a function of Virtual Private Network. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2017, vol. 200, no. 1, art. no. 012065.

**Buryak A.A.** graduated from Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, with a Master’s degree in Radiophysics in 2018. Research interests: biotechnical life support systems, precision farming, control systems for plant growing devices, automation of a scientific experiment. e-mail: buryak.andrej@list.ru

**Ochkov O.A.** graduated from Moscow Aviation Institute in 2009; engineer majoring in Design and Technology of Radioelectronic Equipment, post-graduate student majoring in Security in Emergency Situations, Russian Federation State Research Center Institute of

Biomedical Problems RAS (IBMP). Research interests: automated control systems for plant growing devices. e-mail: chopic@bk.ru

**Berkovich Yu.A.** graduated from Moscow Aviation Institute with a degree in Aircraft Control Systems in 1968, from Lomonosov Moscow State University with a degree in Computational Mathematics and Cybernetics in 1976; Dr. Sc. (Eng.), Professor, Senior Research Fellow, Russian Federation State Research Center Institute of Biomedical Problems RAS (IBMP). Research interests: bioengineering life-support systems for crewed space missions; space greenhouse equipment and technology.  
e-mail: berkovich@imbp.ru

**Lapach S.N.** graduated from Kiev Polytechnic Institute with a degree in Applied Mathematics in 1977; mathematical engineer, Assist. Professor, National Technical University of Ukraine — “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. e-mail: lapach@ukr.net