

УДК 681.2: 001.891.5

© С. А. Ракутько, Е. Н. Ракутько, 2024

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ПРИБОРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ЭНЕРГОЭКОЛОГИИ СВЕТОКУЛЬТУРЫ

Реальным путем пополнения исследовательской базы может стать изготовление специфических средств измерений и анализа в конструкторских и производственных подразделениях научных организаций. Выполнен обзор разработанных в лаборатории энергоэкологии светокультуры измерительных приборов и лабораторного оборудования. Работа выполнена на основе библиографического анализа публикаций по проблемам отечественного научного приборостроения. Отмечены причины отставания отрасли. Выдвинута гипотеза, что в этих условиях создание собственных лабораторных инструментов является реальной альтернативой централизованному снабжению. Раскрыта суть технологии "свободного и открытого оборудования" (free and open-source hardware, FOSH), разрабатываемого непосредственно исследователями. Выделены преимущества и недостатки технологии FOSH. Рассмотрен ряд разработок лаборатории в области приборного обеспечения научных исследований: устройство для экологического мониторинга стрессовых состояний растений; листовой гониофотометр; устройство для морфоцветометрии листьев растений; натурная модель растения в светокультуре; устройство для измерения параметров филлотаксиса; измеритель цвета; устройство для определения флуктуирующей асимметрии оптических характеристик листьев растений; листовой фотокориметр; устройство для определения энергоёмкости фотосинтеза; анализатор качества спектра потока оптического излучения в светокультуре. Отмечено, что рассмотренные приборы являются основой научной деятельности лаборатории и позволили с 2011 г. опубликовать 140 статей в научных журналах, более 70 научных работ в сборниках, получить 33 патента на изобретения. Результаты практических разработок удостоены 10 золотых медалей на выставках ВДНХ и АгроРусь. Сделаны выводы: уровень разработок в области приборостроения лаборатории энергоэкологии светокультуры достаточно высок. Коллектив лаборатории имеет серьёзный задел в области научного приборостроения.

Кл. сл.: научные приборы и оборудование, материально-техническая база, научные организации, приборостроение

ВВЕДЕНИЕ

Имеющаяся в распоряжении исследователей экспериментальная база является необходимым условием развития перспективных научных направлений и получения новых интересных результатов. Без приборного обеспечения немислимы научные прорывы, в результате которых существенно обогащаются наши знания о свойствах природы. Как правило, исследовательское оборудование предоставляет отрасль научного приборостроения, предприятия которой специализируются на отдельных видах оборудования.

Пристальное внимание к проблемам обеспечения исследовательских организаций современными техническими средствами (научным оборудованием) закономерно и более чем своевременно. Производство научного оборудования, прежде всего научных приборов, сегодня первенствует в иерархии производства средств производства вообще. Мировой рынок научных приборов в 2022 г.

составил \$28.8 млрд и, по прогнозу, в 2030 г. достигнет \$34.05 млрд [1].

В российских научных организациях дефицит научных приборов нередкое явление. Одной из последних мер его преодоления является Федеральный проект "Развитие отечественного приборостроения гражданского назначения для научных исследований". Данный проект входит в государственную программу Российской Федерации "Научно-технологическое развитие Российской Федерации". Проект предусматривает масштабные ОКР, в результате которых ожидается появление широкой номенклатуры наиболее востребованных приборов и расходных материалов по приоритетным направлениям, подготовка инженерно-научных кадров для профессионального обеспечения области приборостроения в 2023–2030 гг., формирование групп разработчиков уникального научного оборудования для фундаментальных и прикладных исследований, развитие отечественной базы, обеспечение послепродажного сервиса оборудования [2].

С другой стороны, глубокие исторические корни имеет идея создания исследователем собственного оборудования. Она не утратила значения и в нынешнее время коммерческого подхода к комплектованию приборной исследовательской базы. Так, непрерывно растет количество публикаций по использованию популярных микроконтроллеров. Развитие 3D-печати сделало изготовление инструментов для научных исследований широко доступным. При наличии обоснованной методологии применение таких приборов является реальным выходом для исследователей в условиях ограниченности ресурсов [3].

В нашей стране традиционно специфические средства измерений и анализа изготавливались в конструкторских и производственных подразделениях научных организаций [4].

Конструирование приборов исследователями тесно связано с их патентной активностью. В прошлом году доля заявок от вузов и НИИ составила 52%, что почти на 10% превышает значение по предыдущему году. Всего научные учреждения страны в 2023 г. подали 3797 заявок на изобретение [5]. Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) вошел в топ-3 российских заявителей по количеству поданных заявок на изобретение за 2023 г. (62 заявки).

Положительным примером самостоятельного изготовления научного оборудования является лаборатория энергоэкологии светокультуры (ЭЭС) Института агроинженерных и экологических проблем (филиал ФНАЦ ВИМ — ИАЭП). Созданная в ней за многие годы материально-техническая база и накопленный научный потенциал позволили научным сотрудникам лаборатории на достаточно высоком уровне решать сложные научно-технические задачи и способствовать успешной работе тепличной отрасли. Тематика изобретений лаборатории является логическим продолжением ее научной деятельности. Прежде всего это измерительные приборы, связанные с оптическим излучением; предназначенные для исследования свойств растений, для проведения биоиндикации и экологического мониторинга.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования — обосновать необходимость государственной поддержки инициативной собственной разработки научных приборов исследовательскими организациями.

Задачи исследования — рассмотреть проблемы отечественного научного приборостроения, обосновать и продемонстрировать возможности разработки специализированного приборного обеспечения экспериментальных исследований непосредственно в научных организациях, произвести

анализ опыта научного приборостроения и выявить роль созданного приборного обеспечения в научных достижениях лаборатории ЭЭС.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОТЕЧЕСТВЕННОГО НАУЧНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Работа выполнена на основе библиографического анализа публикаций по проблемам отечественного научного приборостроения с представлением созданного в лаборатории ЭЭС приборного обеспечения в этой области.

Отрасль приборостроения играет важную роль не только в контексте текущего развития экономики, но и перспектив дальнейшего технологического перехода в рамках концепции "Индустрия 5.0". Требуется проведение в ускоренном порядке восстановления разорванных цепочек поставок, реструктуризация каналов внешней логистики, расширение рынков сбыта, сохранение квалифицированных кадров. Цифровая трансформация является одной из важнейших целей развития Российской Федерации на период до 2030 г. [6].

Приборостроительная отрасль входит в состав отрасли машиностроения. В ней производятся системы управления, средства измерения и обработки информации, устройства автоматизации. Эта продукция находит широкое применение в промышленности. В последнее время наблюдается усиление государственной поддержки отрасли и инвестирования средств в предприятия. Однако аналитики отмечают, что вместе с тем выделяемых средств на перевооружение предприятий часто недостаточно, поскольку накопленная за предшествующий большой период степень износа основных средств весьма велика. Привлекательность для вложений частного капитала снижают такие факторы, как большие финансовые риски, сложность процесса производства и его трудоемкость, невысокая конкурентоспособность части предприятий [7].

Международный и отечественный опыт свидетельствует о том, что государственная политика и механизмы поддержки в технологическом развитии промышленных компаний могут влиять на траектории развития отраслей, в том числе приборостроения. Полученные результаты позволяют определить пути, с помощью которых региональные политики могут способствовать росту промышленности и повышению ее конкурентоспособности [8].

Предприятия отрасли приборостроения испытывают ряд трудностей, которые обусловлены: недостаточным уровнем компетенций персонала таких предприятий, низкой эффективностью производственных мощностей, сохраняющейся зависимостью от поставок из-за рубежа разных

комплектующих, необходимых для собственного производства. Имеющиеся проблемы должны быть устранены, но это можно сделать только в случае должного внимания к проблемам приборостроительной отрасли со стороны федеральных или региональных органов власти, т.к. требуется реализовать ряд мер, которые могут повысить конкурентоспособность и инновационный потенциал приборостроительного сектора, способствуя его росту и развитию. Следует признать, что предприятия отрасли приборостроения отстают в показателях устойчивого ежегодного развития, что вызвано, помимо уже обозначенных проблем, острой нехваткой финансовых ресурсов, в том числе для реализации финансирования инновационных проектов. Также многие предприятия отрасли демонстрируют неудовлетворительные значения рентабельности собственного капитала и финансовой автономии. Отрасль приборостроения готова обеспечить государственные предприятия и бизнес-структуры своей продукцией, но государство, со своей стороны, должно создать для этого необходимые условия [9].

Научно-технологический вызов является одним из серьезнейших вызовов, с которым на современном этапе сталкивается российская экономика.

Все это происходит в эпоху повышения технологического уклада, информатизации производства. Происходящая на наших глазах четвертая промышленная революция сопровождается широким распространением систем искусственного интеллекта. В создании качественного нового производственного потенциала особенно велика роль приборостроения, обеспечивающего материальную основу, измерительную и аналитическую базу научных исследований и производственных процессов [10].

Научный потенциал страны формирует в первую очередь материально-техническая база вузов и НИИ, определяющая результативность выполняемых научных исследований, а нередко и саму возможность их проведения. Обеспеченности исследовательских лабораторий современным оборудованием в последнее время уделяется большое внимание. И тем не менее, несмотря на принимаемые меры, у большей части государственных НИИ приборная и экспериментальная базы находятся в весьма изношенном состоянии, а часто и морально устарели. Количество и степень пригодности исследовательского оборудования в научных и исследовательских организациях порой не соответствуют уровню, предъявляемому к современному исследовательскому оборудованию.

О НЕОБХОДИМОСТИ И ИНСТРУМЕНТАХ СОБСТВЕННЫХ РАЗРАБОТОК ПРИБОРОВ

В этих условиях необходимо активнее использовать резерв создания собственных лабораторных инструментов в тех условиях, когда по ряду причин полноценное централизованное снабжение невозможно либо недостаточно. Даже в зарубежных исследовательских институтах и университетах при наличии возможности серьезного финансирования существенная часть приборного обеспечения выполняется своими силами [11]. По аналогии с широко известным термином "свободное и открытое программное обеспечение" (free and open-source software, FOSS) предложено понятие "свободное и открытое оборудование" (free and open-source hardware, FOSH). FOSH заключается в предоставляемой информации для оборудования, включая спецификацию, схемы, инструкции, проекты САПР и др., необходимой для физического создания прибора. Технология FOSH показала особую перспективность в разработке индивидуальных научных инструментов. Сегодня существуют примеры FOSH-технологий по подавляющему большинству научных дисциплин. Показано, что для широкого спектра научных инструментов FOSH-технологии обеспечивают снижение стоимости на 87% по сравнению с эквивалентными инструментами. Применение Arduino обеспечивает снижение стоимости до 89% и еще больше — до 92% при использовании 3D-печати. При сочетании Arduino и 3D-печати экономия составляет в среднем 94% по сравнению с коммерческими эквивалентами.

Выделяют следующие преимущества технологии FOSH:

- 1) относительная дешевизна проекта, наибольшая ориентированность на решение специфической научной задачи;
- 2) создание собственного экспериментального оборудования дает гораздо более глубокое понимание принципов, лежащих в основе его конструкции и осознание его ограничений, что приводит к лучшим научным результатам;
- 3) быстрая оперативная разработка расширяет возможности лабораторий;
- 4) открытость технологии — это глобальное явление, которое привлекает талантливых разработчиков и программистов всего мира к разработке и изготовлению оригинальных устройств.

Однако необходимо отметить и некоторые недостатки технологии:

- 1) изделия не являются аналогами для всего имеющегося ассортимента научного оборудования;

2) не все научные группы имеют возможность самостоятельно производить оборудование на достаточном уровне;

3) обеспечение качества и надежности является серьезной проблемой для самостоятельно изготавливаемых приборов [12].

ПРИМЕРЫ ПРИБОРНЫХ РАЗРАБОТОК ЛАБОРАТОРИИ ЭЭС

Устройство для экологического мониторинга

Ниже представлен ряд разработок лаборатории в области приборного обеспечения научных исследований.

Устройство для экологического мониторинга стрессовых состояний растений. Экологический мониторинг в современных условиях является важнейшей задачей при оценке состояния окружающей среды при воздействии на нее антропогенных и других факторов. Интенсивность воздействия можно оценить методом фитоиндикации по реакции растений. Среди многих методов биоиндикации своей простотой и чувствительностью выделяется морфогенетический, основанный на измерении величины флуктуирующей асимметрии (ФА), характеризующей случайные малые отклонения от идеальной зеркальной симметрии билатеральных признаков, т.е. тех признаков, от которых в норме ожидается зеркальная симметрия. Этот показатель характеризует стабильность индивидуального развития растений, т.е. их способность поддерживать гомеостаз развития в условиях внешних воздействий. Показано, что, наряду с геометрическими, могут быть использованы физиологические признаки, в том числе оптические свойства листа растения.

Устройство (рис. 1) смонтировано в корпусе 1, половины которого выполнены с возможностью телескопически вдвигаться одна в другую. К их противоположным сторонам прикреплены концы растяжимого упругого элемента 2, к середине которого прикреплен указатель 3 таким образом, чтобы при относительном перемещении половин корпуса указатель всегда находился на середине расстояния между измерительными отверстиями 4 и 5, имеющимися на нижней стороне каждой половины корпуса. Над измерительными отверстиями размещены оптические блоки 6 и 7, обеспечивающие измерение смешанной и диффузной составляющих отраженного от листа растения потока. Электронный блок 6 вычисляет значение зеркальной компоненты, флуктуирующая асимметрия которой является показателем стрессового состояния растения. Полученные данные отображаются на дисплее 7 [13].

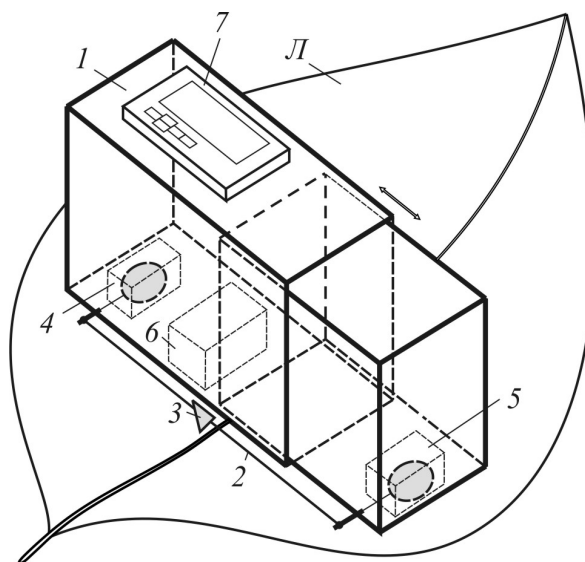


Рис. 1. Схема устройства для экологического мониторинга.

1 — корпус, 2 — упругий элемент, 3 — указатель, 4 и 5 — оптические блоки с измерительными отверстиями, 6 — электронный блок, 7 — дисплей

Технические характеристики:

габариты — $80 \times 60 \times 150$ мм;

диапазон изменения расстояния между измеряемыми участками листа — 30–120 мм;

масса — 0.65 кг.

Листовой гониофотометр

Определить состояние растения и оценить интенсивность процессов, протекающих в нем, можно по пространственному распределению яркости поверхности листа. Наличие зеркальной компоненты говорит о лучшем экологическом состоянии растения.

Основой устройства (рис. 2) является вертикальная стойка 1, к которой неподвижно прикреплена горизонтальная ось 2, на которой по одну сторону стойки закреплена штанга 3 со шкалой 4 и осветителем 5, а по другую — штанга 6 со шкалой 7 и камерой 8. Лист растения Л закрепляют на держателе 9, имеющем плоскую и цилиндрическую площадки. Поворот штанг осуществляют через шаговые двигатели от контроллера (на рис. 2 не показано) [14].

Технические характеристики:

длина штанги осветителя — 570 мм;

длина штанги фотоаппарата — 480 мм;

диапазон углов поворота штанг — $\pm 90^\circ$;

точность установки углов — $\pm 0.5^\circ$;

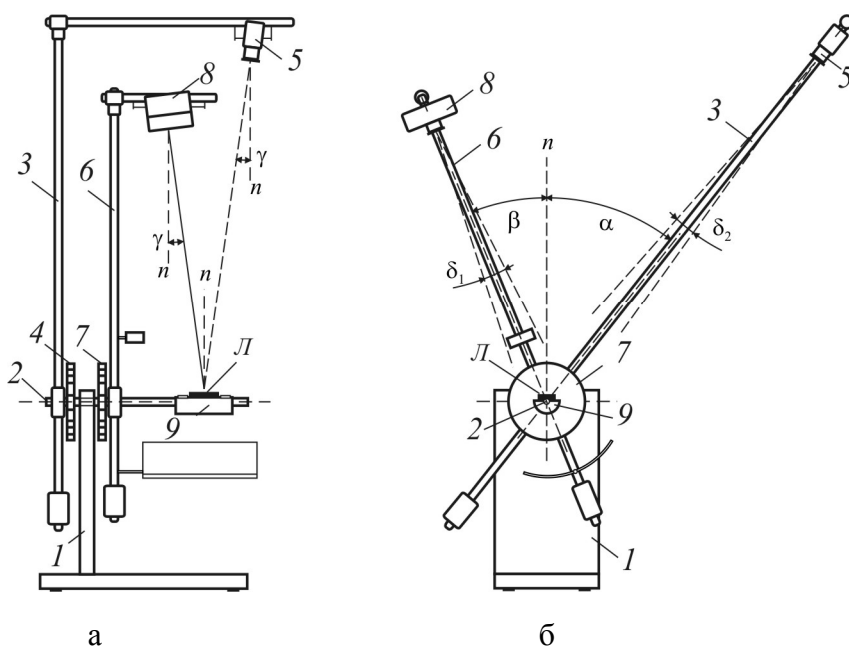


Рис. 2. Схема листового гониофотометра.

а — вид в боковой плоскости, б — вид во фронтальной плоскости.

1 — стойка, 2 — ось, 3 и 6 — штанги, 5 — осветитель, 4 и 7 — шкалы, 8 — камера, 9 — держатель, Л — лист растения

фотоаппарат — SONY DSC-H100;
осветитель — СД лампа 30 Вт 2700 Лм;
габариты — 370 × 140 × 106 мм;
масса — 12 кг.

Устройство для морфоцветометрии листьев растений

Листья весьма чувствительны к неблагоприятным факторам и в условиях стресса при адаптации изменяют свои морфологические и цветные показатели, которые могут выступать как диагностические признаки состояния растений. Показана возможность использования методов морфоцветометрии травянистых растений для анализа степени неблагоприятного воздействия антропогенной нагрузки.

Устройство (рис. 3) имеет корпус 1, выполненный из шарнирно соединенных верхней и нижней секций. Внутри верхней секции размещено выпуклое зеркало 2, сверху размещена камера 3. В нижней секции корпуса расположены диафрагма 4, плоское зеркало 5, осветитель 6 и линза 7. Вертикально направленная оптическая ось камеры проходит через центры измеряемого образца (листа растения) Л, отверстия диафрагмы и осветителя. Съемка производится камерой в проходящем и отраженном свете [15].

Технические характеристики:

размеры окна для съемок — 280 × 160 мм;
источник света — СД лампа 30 Вт, 2700 Лм;
габариты — 400 × 200 × 580 мм;
масса — 3 кг.

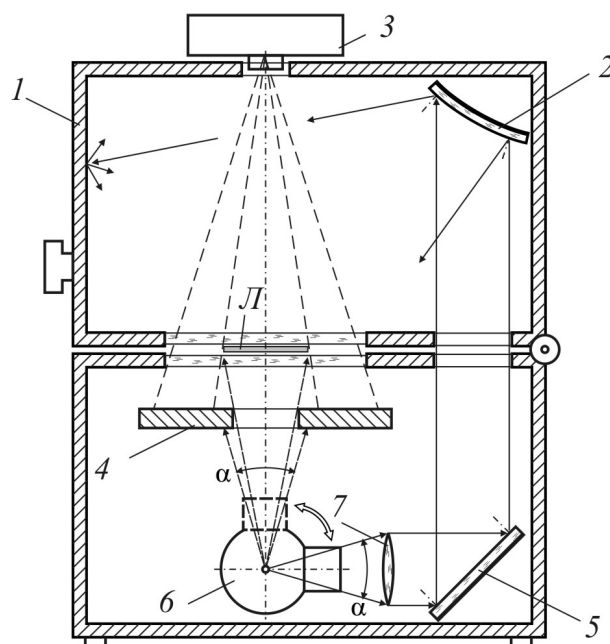


Рис. 3. Схема устройства для морфоцветометрии листьев растений.

1 — корпус, 2 — выпуклое зеркало, 3 — камера, 4 — диафрагма, 5 — плоское зеркало, 6 — осветитель, 7 — линза, Л — лист растения

Натурная модель растения в светокультуре

При исследованиях свойств растений в экспериментах по светокультуре их свойства могут

изменяться во времени, что затрудняет получение достоверных и воспроизводимых показателей. Чтобы изменения свойств растения в течение продолжительного эксперимента не сказались на его результатах, рекомендуется воспользоваться физической моделью, у которой все основные геометрические параметры соответствуют параметрам моделируемого живого растения.

Разработана натурная модель растения, в которой реализована возможность путем подбора задавать геометрические свойства искусственных листьев (рис. 4). Модель содержит вертикально расположенный стержень 1, имитирующий стебель реального растения и искусственные листья 2, которые крепятся на стержне с помощью фиксаторов 3 через гибкие звенья 4. Верхние поверхности каждого листа выполнены из фоточувствительного материала и электрически присоединены к концам электрических проводников 5. В подставке 6 размещены электрически соединенные между собой блок питания 7, микропроцессор 8 и блютуз 9. Внутри подставки концы электрических проводников 5 присоединены к соответствующим входам аналого-цифрового преобразователя микропроцессора [16].

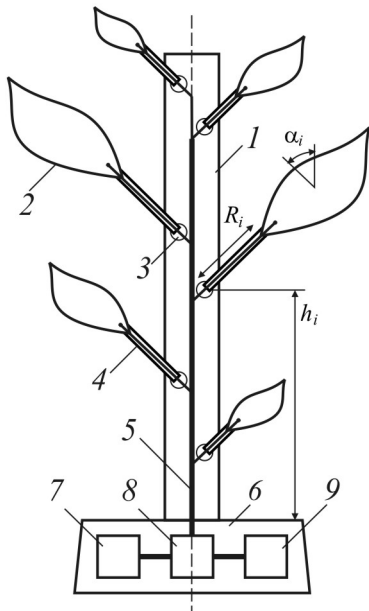


Рис. 4. Натурная модель растения.

1 — стержень, 2 — искусственные листья, 3 — фиксаторы, 4 — гибкие звенья, 5 — электрические проводники, 6 — подставка, 7 — блок питания, 8 — микропроцессор, 9 — блютуз

Технические характеристики:
 количество листьев — до 10 шт;
 длина листа — 30–160 мм;
 ширина листа — 20–70 мм;
 длина черешка — до 40 мм;
 угол наклона черешка — $\pm 80^\circ$;
 угол поворота черешка — $0\text{--}360^\circ$;
 высота узлов листьев на стебле — 5–10 мм;
 габариты — $250 \times 250 \times 500$ мм;
 масса — 2.2 кг.

Устройство для измерения параметров филлотаксиса

Параметры филлотаксиса — расположение листьев на стебле, расстояния между узлами и углы расхождения (дивергенции) между двумя соседними листьями — позволяют характеризовать морфологические свойства растения. В светокультуре по филлотаксису можно судить об устойчивости развития растений. Изменения факторов внешней среды оказывают влияние на параметры филлотаксиса.

Разработанное устройство (рис. 5) позволяет численно измерить основные параметры филлотаксиса. Устройство содержит корпус 1, поворотную платформу 2, угловые шкалы 3 и 4, контактный щуп 5, стойку 6, рычаги 7 и 8.

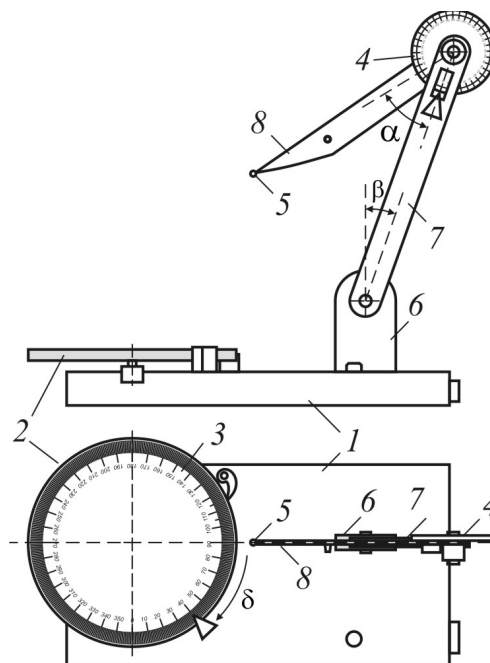


Рис. 5. Устройство для измерения параметров филлотаксиса.

1 — корпус, 2 — поворотная платформа, 3 и 4 — угловые шкалы, 5 — контактный щуп, 6 — стойка, 7 и 8 — рычаги

При измерениях устанавливают платформу с растением в начальное положение, совмещая вертикаль стебля с осью вращения платформы. Вращая платформу в заданном направлении, последовательно переходят от одного узла листьев к другому, касаясь их контактным щупом. Фиксируют высоту узлов и углы дивергенции [17].

Технические характеристики:

длина рычагов — 300 мм;

диаметр столика — 180 мм;

точность измеряемых углов — $\pm 0.5^\circ$;

габариты — $360 \times 200 \times 300$ мм;

масса — 1.6 кг.

Измеритель цвета

Структура и расположение клеток в листьях находят свое внешнее проявление в оптических свойства тканей. Они же определяют функциональное состояние растений: процессы дыхания, респирации, фотосинтеза, на которые непосредственно влияют условия окружающей среды. Изучение цветовых параметров поверхности листа представляет немаловажный практический интерес.

Разработанное устройство выполнено в виде ручного прибора (рис. 6). Внутри эргономичного корпуса расположены микропроцессор 2, датчик цвета 3 (модуль TCS34725), блютуз 6, батарея автономного питания 11. На корпусе расположены кнопки управления, дисплей, USB-разъем, выключатель

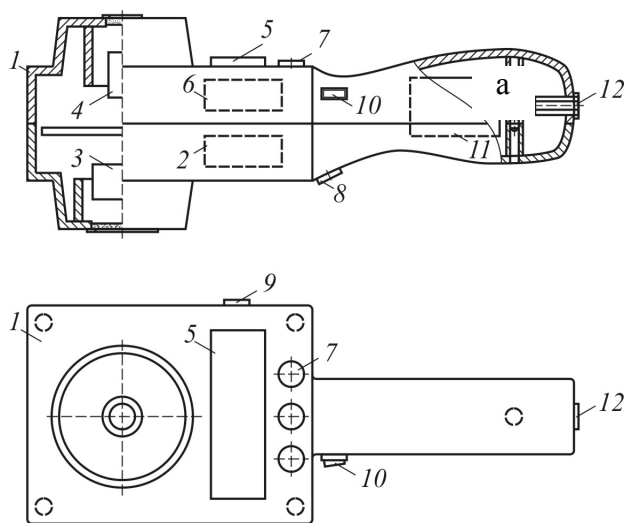


Рис. 6. Измеритель цвета.

а — вид фронтальный с вырезами, б — вид сверху; 1 — корпус, 2 — микропроцессор, 3 — датчик цвета, 4 — индикатор цвета, 5 — дисплей, 6 — блютуз, 7 — клавиатура, 8 — кнопка, 9 — USB-разъем, 10 — выключатель питания, 11 — батарея автономного питания, 12 — разъем внешнего питания

питания, разъем внешнего питания. Устройство при измерениях подносят датчиком цвета к листу растения. Результаты измерения цвета в виде RGB-составляющих отображаются на дисплее и через блютуз могут быть переданы на внешние устройства [18].

Технические характеристики:

габариты — $230 \times 85 \times 90$ мм;

масса — 0.45 кг.

Устройство для определения флуктуирующей асимметрии оптических характеристик листьев растений

Экспериментально найдено, что уровень ФА является чувствительным индикатором состояния растения, характеризующим стабильность его развития в условиях действия факторов среды на растения. Используя это явление в условиях светокультуры, возможно дать комплексную оценку качества создаваемой световой среды и обеспечить ее оптимизацию за счет выбора наиболее приемлемых источников света.

В разработанном устройстве (рис. 7) гибкие световоды 4 и 12 соединяют источники света 3 и 11 с оптическими разъемами 2 и 9, расположенными на зажимах 1 и 8. Съем оптического сигнала производится с помощью устройства управления 6 через разветвленный гибкий световод 7 на спектрометр 5. Зажимы присоединены к направляющей 10 с возможностью взаимного перемещения

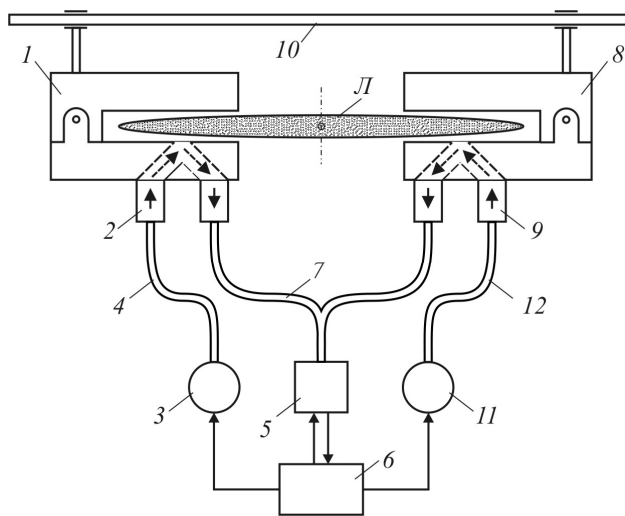


Рис. 7. Устройство для определения флуктуирующей асимметрии.

1 и 8 — зажимы, 2 и 9 — оптические разъемы, 3 и 11 — источники света, 4 и 12 — гибкие световоды, 5 — спектрометр, 6 — устройство управления, 7 — разветвленный гибкий световод, 10 — направляющая, Л — лист растения

и фиксации на ней. При измерениях на поверхности листа растения намечают две симметрично расположенных относительно рахиса точки. Зажимы перемещают вдоль направляющей до совпадения мест измерения оптических характеристик листа с этими точками и фиксируют их на направляющей. Выбранный для измерений лист помещают в зажимы и находят спектральные коэффициенты отражения листа в намеченных точках [19].

Технические характеристики:
спектральный диапазон — 360–1100 нм;
габариты — $300 \times 40 \times 60$ мм;
масса — 0.55 кг.

Листовой фотоколориметр

Содержащиеся в листе растения пигменты обладают селективностью в поглощении света в отдельных спектральных диапазонах. Поэтому оптические свойства листьев, в частности их спектральная поглощающая способность, могут служить показателями функционального состояния растений при воздействии на них внешних факторов. По сравнению с деструктивными методами на основе таких измерений возможна организация оперативного мониторинга состояния растения.

Корпус листового фотоколориметра 1 выполнен в форме пистолета и имеет прорезь для измеряемого листа растения L . Внутри корпуса размещены блок светодиодов 2, фотоприемник 3, процессор 4, дисплей 5, клавиатура 6, блок питания 7;

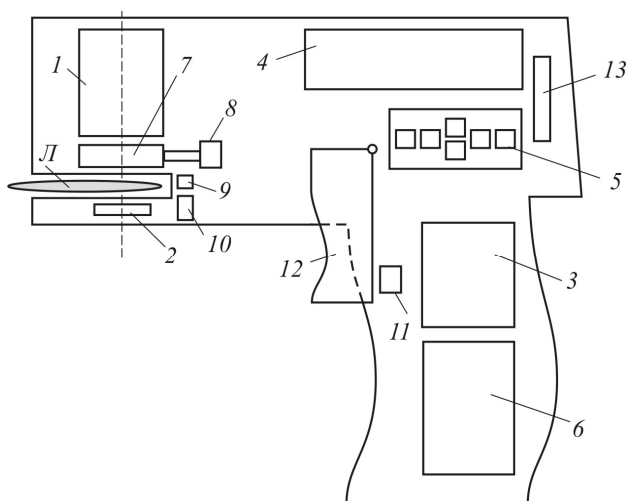


Рис. 8. Листовой фотоколориметр.

1 — корпус, 2 — блок светодиодов, 3 — фотоприемник, 4 — процессор, 5 — дисплей, 6 — клавиатура, 7 — блок питания, 8 — прижим, 9 — электромагнитный привод, 10 — датчик прижима, 11 — датчик толщины, 12 — подпружиненный рычаг, 13 — выключатель, 14 — блок памяти

прижим 8, механически связанный с электромагнитным приводом 9 и датчиком прижима 10; датчик толщины 11; подпружиненный рычаг 12, опирающийся на выключатель 13; блок памяти 14 (рис. 8) [20].

Технические характеристики:

габариты — $170 \times 70 \times 200$ мм;
масса — 0.55 кг;
время автономной работы — 3 ч;
время измерения — 30 с;
дисплей — 4 строки;
максимальная оптическая плотность — 4.0 dB.

Устройство для определения энергоемкости фотосинтеза

Фотосинтез является одним из этапов процесса движения потока энергии при ее преобразовании, на котором определяется общая эффективность светокультуры. Подход к оценке эффективности фотосинтеза в светокультуре по его энергоемкости раскрыт в рамках прикладной теории энергосбережения [21].

Устройство (рис. 9) содержит: блок измерения 1 облученности E , создаваемой источником света ИС; блок измерения массы листа M_n 2; блок измерения площади листа S_n 3; блок фиксации времени появления очередного листа T_n 4; блок задания фотопериода $\Phi П$ и времени облучения T_k 5;

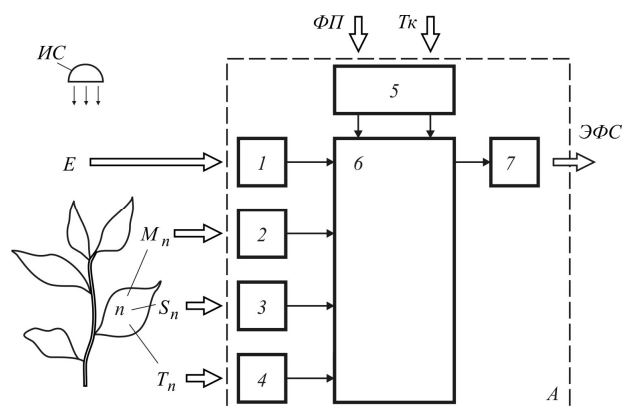


Рис. 9. Устройство для определения энергоемкости фотосинтеза.

ИС — источник света, E — поток облучения от ИС, M_n — масса выбранного n -го листа, S_n — площадь n -го листа, T_n — время появления n -го листа, $\Phi П$ — фотопериод, T_k — время облучения.

1 — блок измерения облученности, 2 — блок измерения массы листа растения, 3 — блок измерения площади листа растения, 4 — блок фиксации времени появления очередного листа на растении, 5 — блок задания фотопериода и времени облучения, 6 — арифметико-логическое устройство, 7 — блок индикации

арифметико-логическое устройство 6; блок индикации 7 энергоемкости фотосинтеза ЭФС [22].

Технические характеристики:

спектральный диапазон — 390–760 нм;

пределы рабочей освещенности — 10–20 000 лк;

фиксируемая масса — до 500 г;

фиксируемые размеры листа — до 300 × 180 мм;

масса — 2.5 кг.

Анализатор качества спектра потока оптического излучения в светокультуре

Диапазон фотосинтетически активной радиации в области 400–700 нм (ФАР) является необходимым для формирования световой среды растений в светокультуре. Внутри этого диапазона важно распределение энергии по отдельным поддиапазонам, которое определяется требованием выращивания растений, их видом и фазой развития. В связи с этим возникает задача оценки близости спектров потока, формируемого источниками света, и потока, наиболее эффективного для растений (т.е. оценки качества спектра), от которого непосредственно зависят экономические показатели светокультуры. Для измерения спектрального состава источников света в практике светокультуры широко используется спектроколориметр ТКА-ВД/02 [1]. На его базе предложен анализатор качества спектра. Методика расчетов реализована в версии 2.3.4 (2012 г.) программного обеспечения спектроколориметра.

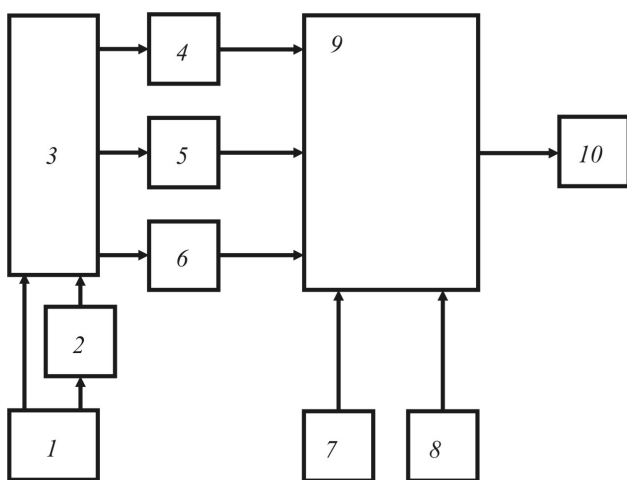


Рис. 10. Функциональная схема анализатора качества спектра.

1 — полихроматор, 2 — блок регистрации спектра, 3 — блок определения фотонной облученности, 4 и 5 — блоки задания доли потока в спектральных поддиапазонах, 6 — арифметико-логическое устройство, 7 и 8 — блок индикации

Анализатор (рис. 10) состоит из полихроматора 1, блока 2 регистрации спектра, выходы которых соединены с входами блока 3 определения фотонной облученности, выходы которого вместе с выходами блоков задания доли потока в спектральных поддиапазонах 4 и 5 соединены со входами арифметико-логического устройства 6, выход которого соединен с блоком индикации 7 [23].

Технические характеристики:

диапазон сканирования спектра — 390–760 нм;

пределы рабочей освещенности — 10–20 000 лк;

масса — 2.5 кг.

РОЛЬ СОЗДАННОГО ПРИБОРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В НАУЧНЫХ ДОСТИЖЕНИЯХ ЛАБОРАТОРИИ ЭЭС И ПЕРСПЕКТИВЫ

Рассмотренные выше приборы являются основой научной деятельности лаборатории. С 2011 г. сотрудниками лаборатории опубликовано 140 статей в научных журналах, более 70 научных работ в сборниках, получено 33 патента на изобретения. Результаты практических разработок удостоены 10 золотых медалей на выставках ВДНХ и Агро-Русь [24].

Показатель уровня готовности технологий созданного приборного обеспечения (в соответствии с приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 6.02.2023 № 107) — третий (разработаны макетные образцы в целях демонстрации ключевых характеристик).

Приборное обеспечение и методические разработки были использованы в совместной деятельности лаборатории с коллегами из Рижского технического университета, г. Рига, и Латвийского сельскохозяйственного университета, г. Елгава, в рамках работ по гранту "New control methods for energy and ecological efficiency increase of greenhouse plant lighting systems (uMOL)".

Измерения на созданной приборной базе проводили в светокультуре томата в блоке теплиц "Межвиди", Латвия, и тепличном комплексе "Круглый год", Пикалево; в светокультуре салата в агрохолдинге "Выборжец", Санкт-Петербург; при выращивании семенного картофеля по аэропонной технологии ГАУ НПЦ "МосСемПродТех-Картофель", г. Москва. На ряд разработок получены акты о внедрении на предприятиях-партнерах: НПО "ПсковАгроИнновации", ООО "Тенко", ООО "ЦентрРегионСервис". Разработанное методическое обеспечение используется в учебном процессе на кафедре ЭОПиЭТ электроэнергетического факультета Санкт-Петербургского государственного аграрного университета.

Теоретические вопросы и особенности практического внедрения результатов исследований по практической светокультуре и ее метрологическому

обеспечению были доложены и обсуждены на научных конференциях Lux Pacifica; Engineering for Rural Development, Латвия; CIOSTA; Инновационные технологии в науке и образовании (ИТНО); Агроинфо; Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики, Саранск; на вузовских конференциях Брянского ГАУ, Мурманского ГТУ, Санкт-Петербургского ГАУ и многих других [25].

Ряд рассмотренных разработок вошли в тест-систему энергоэкологичности светокультуры, удостоенную Золотой медали на выставке "Золотая осень 2019".

Совместно с Ботаническим институтом РАН лаборатория участвовала в онлайн-экспозиции на Российской неделе науки и технологии в рамках Международной китайской выставки "CIEP 2020" с научно-техническим проектом "Создание платформы фенотипирования растений на основе искусственного интеллекта и цифровых технологий".

По итогам мероприятий получено Благодарственное письмо от Международного союза приборостроителей и специалистов по информационным и телекоммуникационным технологиям (МСП ИТТ).

Направление дальнейших исследований лаборатории — разработка интеллектуального метрологического обеспечения и цифровых средств контроля в целях обеспечения энергоэкологичности при функционировании искусственных агроэкосистем.

Научная проблема, связанная с созданием средств мониторинга параметров агроэкосистемы, обусловлена сложным характером объекта исследований, его недостаточной изученностью, отсутствием однозначно рекомендованных для мониторинга параметров.

Исследование будет базироваться на современной парадигме энергоэкологичности, означающей обеспечение экономической эффективности функционирования агроэкосистемы при ее климатической нейтральности [26]. Новая парадигма означает получение ответственно произведенной экологически чистой продукции путем управления продуктивностью агроэкосистемы соответственно складывающимся условиям, оптимизацию эффективности использования ресурсов, уменьшение неблагоприятного воздействия на окружающую среду. Энергоэкологичность подразумевает прецизионное культивирование, контроль и принятие решений на основе данных. Использование современных систем мониторинга позволяет отслеживать и регулировать параметры среды выращивания, внося целенаправленные вмешательства и корректировки. Интеграция научных знаний

отдельных дисциплин обеспечит качественный скачок в управлении агроэкосистемами.

ВЫВОДЫ

1. В настоящее время мировой рынок научных приборов непрерывно растет. Однако в российских научных организациях нередко наблюдается их дефицит. В последнее время исправлению такого положения уделяется большое внимание на самых высоких уровнях. И тем не менее, несмотря на принимаемые меры, у большей части государственных НИИ приборная и экспериментальная базы в значительной мере изношены и морально устарели. Объем и качество исследовательского оборудования не всегда соответствуют современному уровню исследований.

2. Идея создания в конструкторских и производственных подразделениях научных организаций собственного оборудования имеет глубокие исторические корни. Она не утратила значения и в нынешнее время, когда по ряду причин полноценное централизованное снабжение невозможно либо недостаточно. Мировым трендом в разработке и мелкосерийном производстве аналитического и измерительного оборудования в академических институтах и на предприятиях при них, а также в отдельных университетах является технология FOSH — free and open-source hardware (свободное и открытое оборудование). Выявлены основные преимущества технологии FOSH (относительная дешевизна, потенциально лучшая научная результативность, оперативность, открытость) и ее недостатки (неполная аналогия, доступность не для всех научных групп, сложность обеспечения качества и надежности).

3. Анализ опыта самостоятельного изготовления научного оборудования коллективом лаборатории ЭЭС показал, что этот путь является вполне реальным для создания материально-технической базы и решения достаточно сложных научно-технических задач. Рассмотренные примеры показывают достаточно высокий уровень разработок лаборатории ЭЭС в области приборостроения, связанных с оптическим излучением, исследованием свойств растений, проведением биоиндикации и экологического мониторинга. Потенциальными потребителями такой продукции являются растениеводческие и тепличные хозяйства, сити-фермы, частный сектор, научно-исследовательские организации, учебные заведения. Преимуществами собственных разработок перед аналогами являются: невысокая стоимость, ремонтнопригодность.

Созданное в лаборатории ЭЭС приборное обеспечение является основой научной деятельности лаборатории. Показатель уровня готовности

технологий созданного приборного обеспечения — третий (разработан макетный образец в целях демонстрации ключевых характеристик). Приборное обеспечение и методические разработки используются в рамках совместной деятельности с коллегами из других научных и производственных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scientific Laboratory Instrument Market, Global Outlook and Forecast 2024–2030. URL: <https://www.grandresearchstore.com/machines/global-scientific-laboratory-instrument-forecast-2024-2030> (дата обращения: 18.07.2024)
2. Быкова Н. В России будут делать научные приборы // Эксперт. 2022. № 48 (1277). С. 57–61. URL: <https://spbib.ru/en/catalog/-/books/12901321-v-rossii-budut-delat-nauchnyye-pribory>
3. Wenzel T. Open hardware: From DIY trend to global transformation in access to laboratory equipment // *PLOS Biology*. 2023. No. 21(1). Id. e3001931. DOI: 10.1371/journal.pbio.3001931
4. Корепанов Е.Н. Научное приборостроение в зеркале времени // Вопросы инновационной экономики. 2023. Т. 13, № 4. С. 2555–2564. DOI: 10.18334/vinec.13.4.119673
5. Годовой отчет Федеральной службы по интеллектуальной собственности за 2023 год / Под ред. Ю.С. Зубова, О.П. Неретина. М.: ФИПС, 2023. 180 с. URL: <https://rospatent.gov.ru/content/uploadfiles/otchet-2023-ru.pdf> (дата обращения: 18.07.2024)
6. Яковлева Е.А., Елисеева М.Д., Манохина Е.Э. Приведение стратегии управления предприятий радиоэлектронной отрасли в соответствие с цифровыми реалиями // Известия СПбГЭУ. 2023. № 4(142). С. 141–144. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54341455>
7. Бачина Т.В., Кобзева В.А. Аналитический обзор отрасли приборостроения в России // Южно-Уральские научные чтения. 2019. № 1(5). С. 67–70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39852786>
8. Беляков Г.П., Рыжая А.А. Государственная поддержка технологического развития промышленных компаний: зарубежный опыт // Российский экономический вестник. 2019. № 5. С. 32–39. URL: <https://dgpu-journals.ru/archives/9902>
9. Суздалева Н.Н. Проблемы диагностики функционирования предприятий отрасли приборостроения Российской Федерации и Северо-Западного федерального округа // Экономика, предпринимательство и право. 2024. Т. 14, № 4. С. 1467–1482. URL: <https://1economic.ru/lib/120711>
10. Колесников А.М., Смирнов М.С., Зубарев А.Е. Пути повышения эффективности государственного регулирования отрасли приборостроение // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2020. № 1(56). С. 89–98. URL: <https://vestnik.pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/2539/>
11. Луцкекина Е.В. Обновление приборного парка научных организаций России: проблемы и решения // Научное приборостроение. 2022. Т. 32, № 3. С. 41–58. URL: <http://iairas.ru/mag/2022/abst3.php#abst3>
12. Pearce J.M. Economic Savings for Scientific Free and Open Source Technology: A Review // *HardwareX*. 2020. Vol. 8. Id. e00139. DOI: 10.1016/j.ohx.2020.e00139
13. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Устройство для экологического мониторинга стрессовых состояний растений. Патент на полезную модель RU 219512U1, 21.07.2023. URL: <https://patents.google.com/patent/RU219512U1/ru>
14. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Гониофотометр для исследования листьев растений. Патент на полезную модель RU 219511U1, 21.07.2023. URL: <https://patents.google.com/patent/RU219511U1/ru>
15. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А., Шаракианэ А.С., Лермонтов С.А. Устройство для морфоцветометрии листьев растений. Патент на полезную модель RU 214546U1, 02.11.2022. URL: <https://patents.google.com/patent/RU214546U1/ru>
16. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Модель растения в светокультуре. Патент на полезную модель RU 215539U1, 16.12.2022. URL: <https://ips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWU1/000/000/00/215/539/%D0%9F%D0%9C-00215539-00001/document.pdf>
17. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Устройство для измерения параметров филлотаксиса. Патент на полезную модель RU 206025U1, 16.08.2021. URL: <https://patents.google.com/patent/RU206025U1/ru>
18. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Измеритель цвета. Патент на полезную модель RU 207344U1, 25.10.2021. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU207344U1_20211025
19. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Устройство для определения флуктуирующей асимметрии оптических характеристик листьев растений. Патент на изобретение RU 2730680C1, 24.08.2020. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2730680C1/ru>
20. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Васькин А.Н., Маркова А.Е. Листовой фотоколориметр. Патент на полезную модель RU 199305U1, 26.08.2020. URL: <https://rosstip.ru/patents/170166-listovoj-fotokolorimetr>
21. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Оценка энергоэффективности источников оптического излучения для растений с позиций прикладной теории энергосбережения // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2015. № 39. С. 359–366. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24853336>
22. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Аюпов М.Р. Устройство для определения энергоёмкости фотосинтеза. Патент на изобретение RU 2580361C1, 10.04.2016. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2580361C1/ru>
23. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Анализатор качества спектра потока оптического излучения в светокультуре. Патент на полезную модель RU 160900U1, 10.04.2016. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU160900U1_20160410
24. Публикационная активность лаборатории энергоэкологии светокультуры: опыт наукометрического

анализа. URL: <https://m.vk.com/@energoecology-publikacionnaya-aktivnost-laboratorii-energoekologii-svetoku> (дата обращения: 18.07.2024)

25. *Ракутько С.А.* Становление и развитие энергоэкологии светокультуры как нового научного направления в институте агроинженерных и экологических проблем // Известия НВ АУК. 2024. № 2(74). С. 332–346. URL:

[https://www.volgau.com/Portals/0/%D0%98%D0%B7%D0%B2%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%8F%20%E2%84%96%20\(74\)%202024_compressed.pdf?ver=HgADPPxpDysf3vPH9xB0YQ%3d%3d](https://www.volgau.com/Portals/0/%D0%98%D0%B7%D0%B2%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%8F%20%E2%84%96%20(74)%202024_compressed.pdf?ver=HgADPPxpDysf3vPH9xB0YQ%3d%3d)

26. *Ракутько С.А., Ракутько Е.Н.* Моделирование и численный анализ энергоэкологичности светокультуры // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019. Т. 13, № 3. С. 11–17. DOI: 10.22314/20737599-2019-13-3-11-17

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Контакты: *Ракутько Сергей Анатольевич*, sergej1964@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 30.07.2024

EXPERIENCE IN DESIGN OF INSTRUMENTATION FOR SCIENTIFIC RESEARCH ON ENERGY ECOLOGY AND HORTICULTURE

S. A. Rakutko, E. N. Rakutko

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, branch in Saint Petersburg, Russia

A real way to replenish the research base can be the production of specific measuring and analysis instruments in the design and production departments of scientific organizations. To review the measuring instruments and laboratory equipment developed in the laboratory of energy ecology and light culture. The work was carried out on the basis of a bibliographic analysis of publications on the problems of domestic scientific instrument making. The reasons for the industry's lag are noted. It has been hypothesized that under these conditions, creating your own laboratory instruments is a real alternative to centralized supply. The essence of the technology of "free and open-source hardware" (FOSH), developed directly by researchers, is revealed. The advantages and disadvantages of FOSH technology are highlighted. A number of laboratory developments in the field of instrumentation for scientific research are considered: a device for environmental monitoring of stress states of plants; leaf goniophotometer; device for morpho-colorimetry of plant leaves; full-scale model of a plant in horticulture; device for measuring phyllotaxis parameters; color meter; a device for determining the fluctuating asymmetry of the optical characteristics of plant leaves; leaf photocalorimeter; device for determining the energy intensity of photosynthesis; quality analyzer for the spectrum of optical radiation flux in horticulture. It was noted that the considered devices are the basis of the scientific activity of the laboratory and, counting scientific activity since 2011, have allowed us to publish 140 articles in scientific journals, more than 70 scientific papers in collections, and obtain 33 patents for inventions. The results of practical developments were awarded 10 gold medals at the VDNH and AgroRus exhibitions. The level of developments in the field of instrument engineering at the Laboratory of Energy Ecology and horticulture is quite high. The laboratory team has a serious background in the field of scientific instrument making.

Keywords: scientific instruments and equipment, material and technical base, scientific organizations, instrument making

REFERENCES

1. *Scientific Laboratory Instrument Market, Global Outlook and Forecast 2024–2030*. URL: <https://www.grandresearchstore.com/machines/global-scientific-laboratory-instrument-forecast-2024-2030> (accessed: 18.07.2024)
2. Bykova N. [Russia will make scientific instruments]. *Ehkspert* [Expert], 2022, no. 48 (1277), pp. 57–61. URL: <https://spbib.ru/en/catalog/-/books/12901321-v-rossii-budut-delat-nauchnyye-pribory> (In Russ.).
3. Wenzel T. Open hardware: From DIY trend to global transformation in access to laboratory equipment. *PLOS Biology*, 2023, vol. 21, no. 1, Id. e3001931. DOI: 10.1371/journal.pbio.3001931
4. Korepanov E.N. [Scientific instrumentation in the mirror of time]. *Voprosy innovatsionnoi ekonomiki* [Russian journal of innovation economics], 2023, vol. 13, no. 4, pp. 2555–2564. DOI: 10.18334/vinec.13.4.119673 (In Russ.).
5. Zubov Yu.S., Neretin O.P., editors. *Godovoi otchet Federal'noi sluzhby po intellektual'noi sobstvennosti za 2023 god* [Annual Report of the Federal Service for Intellectual Property for 2023]. Moscow, FIPS Publ., 2023. 180 p. URL: <https://rospatent.gov.ru/content/uploads/otchet-2023-ru.pdf> (accessed: 18.07.2024). (In Russ.).
6. Yakovleva E.A., Eliseeva M.D., Manokhina E.E. [Bringing the management strategy of enterprises in the radio-electronic industry in accordance with digital realities]. *Izvestiya SPbGEhU* [Bulletin of SPbSEU], 2023, no. 4(142), pp. 141–144. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54341455>
7. Bachina T.V., Kobzeva V.A. [Analytical review of the instrumentation industry in Russia]. *Yuzhno-Ural'skie nauchnye chteniya* [South Ural Scientific Readings], 2019, no. 1(5), pp. 67–70. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39852786>
8. Belyakov G.P., Ryzhaya A.A. [State support of technological development of industrial companies: foreign experience]. *Rossiiskii ekonomicheskii vestnik* [Russian Economic Bulletin], 2019, no. 5, pp. 32–39. URL: <https://dgpu-journals.ru/archives/9902> (In Russ.).
9. Suzdaleva N.N. [Problems in diagnostics of instrumentation companies of the Russian Federation and the North-Western Federal District]. *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo* [Journal of Economics, Entrepreneurship and Law], 2024, vol. 14, no. 4, pp. 1467–1482. (In Russ.). URL: <https://1economic.ru/lib/120711>
10. Zubarev A.E., Kolesnikov A.M., Smirnov M.S. [Methods to improve the efficiency of the state regulation of the instrument making industry]. *Vestnik Tikhookeanskogo go-*

- sudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Pacific State University], 2020, no. 1(56), pp. 89–98. (In Russ.). URL: <https://vestnik.pnu.edu.ru/vestnik/pub/articles/2539/>
11. Lutschekina E.V. [Updating equipment for the science organizations of Russia: the problems and their solutions]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2022, vol. 32, no. 3, pp. 41–58. (In Russ.). URL: <http://iairas.ru/mag/2022/abst3.php#abst3>
 12. Pearce J.M. Economic Savings for Scientific Free and Open Source Technology: A Review. *HardwareX*, 2020, vol. 8, Id. e00139. DOI: 10.1016/j.ohx.2020.e00139
 13. Rakutko E.N., Rakutko S.A. *Ustroistvo dlya ehkologicheskogo monitoringa stressovykh sostoyanii rastenii*. Patent RF no. RU 219512U1 [Patent for useful model for the Device for ecological monitoring of stress conditions of plants]. Prioritet 21.07.2023. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/RU219512U1/ru>
 14. Rakutko E.N., Rakutko S.A. *Goniofotometr dlya issledovaniya list'ev rastenii*. Patent RF no. RU 219511U1 [Patent for useful model for the Goniophotometer for examination of plant leaves]. Prioritet 21.07.2023. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/RU219511U1/ru>
 15. Rakutko E.N., Rakutko S.A., Sharakshane A.S., Lermontov S.A. *Ustroistvo dlya morfotsvetometrii list'ev rastenii*. Patent RF no. RU 214546U1 [Patent for useful model for the Device for morphocolorimetry of plant leaves]. Prioritet 02.11.2022. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/RU214546U1/ru>
 16. Rakutko S.A., Rakutko E.N. *Model' rasteniya v svetokul'ture*. Patent RF no. RU 215539U1 [Patent for useful model for the Plant model in light culture]. Prioritet 16.12.2022. (In Russ.). URL: <https://fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWU1/000/000/000/215/539/%D0%9F%D0%9C-00215539-00001/document.pdf>
 17. Rakutko E.N., Rakutko S.A. *Ustroistvo dlya izmereniya parametrov fillotaksisa*. Patent RF no. RU 206025U1 [Patent for useful model for the Device for measuring phyllo-taxis parameters]. Prioritet 16.08.2021. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/RU206025U1/ru>
 18. Rakutko E.N., Rakutko S.A. *Izmeritel' tsвета*. Patent RF no. RU 207344U1 [Patent for useful model for the Color meter]. Prioritet 25.10.2021. (In Russ.). URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU207344U1_20211025
 19. Rakutko S.A., Rakutko E.N. *Ustroistvo dlya opredeleniya fluktuiruyushchei asimmetrii opticheskikh kharakteristik list'ev rastenii*. Patent RF no. RU 2730680C1 [Patent for the Device for determining fluctuating asymmetry of optical characteristics of plant leaves]. Prioritet 24.08.2020. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/RU2730680C1/ru>
 20. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Vas'kin A.N., Markova A.E. *Listovoi fotokolorimetr*. Patent RF no. RU 199305U1 [Patent for useful model for the Leaf photocolorimeter]. Prioritet 26.08.2020. URL: <https://rosstip.ru/patents/170166-listovoj-fotokolorimetr> (In Russ.).
 21. Rakutko S.A., Rakutko E.N. [The evaluation of energy effectiveness of light sources for plants according to applied theory of power saving]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Saint-Petersburg State Agrarian University], 2015, no. 39, pp. 359–366. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24853336>
 22. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Ayupov M.R. *Ustroistvo dlya opredeleniya ehnergoemkosti fotosintezы*. Patent RF no. RU 2580361C1 [Patent for the Device for determining power consumption of photosynthesis]. Prioritet 10.04.2016. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/RU2580361C1/ru>
 23. Rakutko S.A., Rakutko E.N. *Analizator kachestva spektra potoka opticheskogo izlucheniya v svetokul'ture*. Patent RF no. RU 160900U1 [Patent for useful model for the Analyzer of optical radiation flux spectrum quality in light culture]. Prioritet 10.04.2016. (In Russ.). URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU160900U1_20160410
 24. *Publikatsionnaya aktivnost' laboratorii ehnergoehkologii svetokul'tury: opyt naukometricheskogo analiza* [Publication activity of the laboratory of energy ecology of light-culture: experience of scientometric analysis]. (In Russ.). URL: <https://m.vk.com/@energoecology-publikacionnaya-aktivnost-laboratorii-energoehkologii-svetoku> (accessed: 18.07.2024).
 25. Rakutko S.A. [Formation and development of energy and ecology convergence in greenhouse horticulture as a new scientific field at the institute of agricultural engineering and environmental problems]. *Izvestiya NV AUK* [Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: science and higher vocational education], 2024, no. 2(74), pp. 332–346. (In Russ.). URL: [https://www.volgau.com/Portals/0/%D0%98%D0%B7%D0%B2%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%8F%20%E2%84%96%20\(74\)%202024_compressed.pdf?ve r=HgADPPxpDysf3vPH9xB0YQ%3d%3d](https://www.volgau.com/Portals/0/%D0%98%D0%B7%D0%B2%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%8F%20%E2%84%96%20(74)%202024_compressed.pdf?ve r=HgADPPxpDysf3vPH9xB0YQ%3d%3d)
 26. Rakutko S.A., Rakutko E.N. [Simulation and Numerical Analysis of Energy-and-Ecological Compatibility of Indoor Plant Lighting]. *Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii* [Agricultural Machinery and Technologies], 2019, vol. 13, no. 3, pp. 11–17. DOI: 10.22314/20737599-2019-13-3-11-17 (In Russ.).

Contacts: Rakutko Sergey Anatol'evich,
sergej1964@yandex.ru

Article received by the editorial office on 30.07.2024

INTRODUCTION

The experimental base available to researchers is a necessary condition for the development of promising scientific directions and obtaining new interesting results. Without instrumentation, scientific breakthroughs are unthinkable, as a result of which our knowledge of the properties of nature has been significantly enriched. As a rule, research equipment is provided by the scientific instrument-making industry, individual enterprises specialize in certain types of equipment.

Close attention to the problems of providing research organizations with modern technical means (scientific equipment) is natural and more than timely. Scientific equipment, primarily scientific devices, today takes first place in the hierarchy of means of production in general. The world market for scientific instruments in 2022 amounted to \$28.8 billion and, according to the forecast, will reach \$34.05 billion in 2030 [1].

In Russian scientific organizations, a shortage of scientific instruments is not uncommon. One of the latest measures to overcome it is the Federal Project "Development of Domestic Civil Instrument Engineering for Scientific Research". This project is part of the state program of the Russian Federation "Scientific and Technological Development of the Russian Federation". The project provides for large-scale R&D, which is expected to result in the emergence of a wide range of the most popular devices and consumables in priority areas, training of engineering and scientific personnel for professional support of the instrument engineering field in 2023-2030, the formation of groups of developers of unique scientific equipment for fundamental and applied research, the development of a domestic base, and the provision of after-sales service for equipment [2].

On the other hand, the idea of creating a researcher's own equipment has deep historical roots. It has not lost its significance in the present time of a commercial approach to staffing an instrument research base. Thus, the number of publications on the use of popular microcontrollers is continuously growing. The development of 3D printing has made the production of instruments for scientific research widely accessible. With a sound methodology, the use of such devices is a real solution for researchers with limited resources [3].

In our country, traditionally, specific measuring and analytical instruments were manufactured in the design and production departments of scientific organizations [4].

The design of devices by researchers is closely related to their patent activity. Last year, the share of applications from universities and research institutes was 52%, which is almost 10% higher than the value

for the previous year. In total, scientific institutions of the country filed 3,797 applications for inventions in 2023 [5]. The Federal Scientific Agro-Engineering Center VIM entered the top 3 Russian applicants in terms of the number of applications filed for inventions in 2023 (62 applications).

A positive example of independent production of scientific equipment is the laboratory of energy and ecological efficiency of photoculture (EEEE) of the Institute of Agroengineering and Environmental Problems (branch of VIM Center). The research infrastructure created in it over many years and the accumulated scientific potential allowed the scientific staff of the laboratory to solve complex scientific and technical problems at a sufficiently high level and contribute to the successful work of the greenhouse industry. The subject of the inventions of the laboratory is a logical continuation of its scientific activity. First of all, these are measuring devices associated with optical radiation; designed to study the properties of plants, for bioindication and environmental monitoring.

GOAL AND OBJECTIVES OF THE RESEARCH

The purpose of the study is to justify the need for state support for proactive in-house development of scientific instruments by research organizations.

The objectives of the study are to consider the problems of domestic scientific instrumentation, justify and demonstrate the possibilities of developing specialized instrumentation for experimental research directly in scientific organizations, analyze the experience of scientific instrumentation, and identify the role of the created instrumentation in the scientific achievements of the EEEP laboratory.

ANALYSIS OF PROBLEMS OF DOMESTIC SCIENTIFIC INSTRUMENT-MAKING

The work is based on a bibliographic analysis of publications on the problems of domestic scientific instrument-making with a presentation of the instrumentation created in the EEEP laboratory in this area.

The instrument-making industry plays an important role not only in the context of the current development of the economy, but also in the prospects for further technological transition within the framework of the "Industry 5.0" concept. It is necessary to carry out an accelerated restoration of broken supply chains, restructure external logistics channels, expand sales markets, and retain qualified personnel. Digital transformation is one of the most important development goals of the Russian Federation for the period up to 2030 [6].

The instrument-making industry is part of the mechanical engineering industry. It produces control sys-

tems, measuring and information processing equipment, and automation devices. These products are widely used in industry. Recently, there has been an increase in government support for the industry and investment in enterprises. However, analysts note that the funds allocated for the re-staffing of enterprises are often insufficient, since the degree of depreciation of fixed assets accumulated over a long period is very high. The attractiveness of private capital investments is reduced by such factors as high financial risks, the complexity of the production process and its labor intensity, and the low competitiveness of some enterprises [7].

International and domestic experience indicates that government policy and mechanisms for supporting the technological development of industrial companies can influence the development trajectories of industries, including instrument-making. The obtained results allow us to determine the ways in which regional policymakers can promote the growth of the industry and increase its competitiveness [8].

Instrument-making enterprises are experiencing a number of difficulties caused by: insufficient level of competence of the personnel of such enterprises, low efficiency of production capacities, continued dependence on supplies from abroad of various components necessary for their own production. The existing problems must be eliminated, but this can only be done in the case of due attention to the problems of the instrument-making industry on the part of federal or regional authorities, since it is necessary to implement a number of measures that can increase the competitiveness and innovative potential of the instrument-making sector, promoting its growth and development. It should be recognized that enterprises of the instrument-making industry lag behind in terms of sustainable annual development, which is caused, in addition to the already identified problems, by an acute shortage of financial resources, including for the implementation of financing of innovative projects. Also, many enterprises in the industry demonstrate unsatisfactory values of return on equity and financial autonomy. The instrument-making industry is ready to provide state enterprises and business structures with its products, but the state, for its part, must create the necessary conditions for this [9].

The scientific and technological challenge is one of the most serious challenges that the Russian economy is currently facing.

All this is happening in the era of increasing technological structure, informatization of production. The fourth industrial revolution, which is happening before our eyes, is accompanied by the widespread use of artificial intelligence systems. In the creation of a qualitatively new production potential, the role of instrument engineering is especially great, providing the research infrastructure, measurement, and analytical

base of scientific research and production processes [10].

The scientific potential of the country is formed primarily by the material and technical base of universities and research institutes, which determines the effectiveness of the scientific research carried out, and often the very possibility of their implementation. Much attention has been paid to the provision of research laboratories with modern equipment in recent years. And nevertheless, despite the measures taken, the instruments and experimental infrastructure of a large part of state research institutes are in a very worn-out state, and are often morally obsolete. The quantity and degree of suitability of research equipment in scientific and research organizations sometimes do not correspond to the level required of modern research equipment.

ON THE NEED AND INSTRUMENTS FOR IN-HOUSE DEVELOPMENT OF DEVICES

In these conditions, it is necessary to more actively use the reserve of creating in-house laboratory instruments in those conditions when, for a number of reasons, full-fledged centralized supply is impossible or insufficient. Even in foreign research institutes and universities, with the possibility of major financing, a significant part of the instrumentation is carried out by their own efforts [11]. By analogy with the widely known term "free and open-source software" (FOSS), the concept of "free and open-source hardware" (FOSH) is proposed. FOSH consists of providing information for equipment, including specifications, schematics, instructions, CAD designs, etc., necessary for the physical creation of the device. FOSH technology has shown particular promise in the development of individual scientific instruments. Today, there are examples of FOSH technologies in the vast majority of scientific disciplines. It has been shown that for a wide range of scientific instruments, FOSH technologies provide an 87% cost reduction compared to equivalent instruments. The use of Arduino provides a cost reduction of up to 89% and even more — up to 92% when using 3D printing. When combining Arduino and 3D printing, the cost reduction is on average 94% compared to commercial equivalents.

The following advantages of FOSH technology are highlighted:

- 1) relative cheapness of the project, the greatest focus on solving a specific scientific problem;

- 2) creating experimental equipment gives the company a much deeper understanding of the principles behind its design and an awareness of its limitations, which leads to better scientific results;

- 3) rapid operational development expands the capabilities of laboratories;

4) openness of technology is a global phenomenon that attracts talented developers and programmers from all over the world to develop and manufacture original devices.

However, it is necessary to note some shortcomings of the technology:

- 1) the products are not analogs for the entire range of scientific equipment available;
- 2) not all scientific groups have the ability to independently produce equipment of a sufficient quality;
- 3) ensuring quality and reliability is a serious problem for independently manufactured devices [12].

EXAMPLES OF INSTRUMENTATION DEVELOPMENTS OF EEP LABORATORY

Device for environmental monitoring

Below are a number of developments in the laboratory in the field of instrumentation for scientific research.

Device for environmental monitoring of stress conditions of plants. Environmental monitoring in modern conditions is the most important task in assessing the state of the environment when exposed to anthropogenic and other factors. The intensity of the impact can be assessed by the phytoindication method based on the reaction of plants. Among many bioindication methods, the morphogenetic method stands out for its simplicity and sensitivity. It is based on measuring the value of fluctuating asymmetry (FA), which characterizes random small deviations from the ideal mirror symmetry of bilateral features, i.e., those features from which mirror symmetry is normally expected. This indicator characterizes the stability of individual plant development, i.e., their ability to maintain developmental homeostasis under external influences. It has been shown that, along with geometric features, physiological features, including optical properties of the plant leaf, can be used.

The device (Fig. 1) is mounted in housing 1, the halves of which are designed with the ability to telescopically slide one into the other. Attached to their opposite sides are the ends of an elastic stretchable element 2, to the middle of which an indicator 3 is attached in such a way that during the relative movement of the housing halves the indicator is always in the middle of the distance between the measuring holes 4 and 5 located on the lower side of each housing half. Above the measuring holes, optical units 4 and 5 are located, ensuring the measurement of the mixed and diffuse components of the flow reflected from the plant leaf. Electronic unit 6 calculates the value of the mirror component, the fluctuating asymmetry of which is an indicator of the stress state of the plant. The obtained data are displayed on display 7 [13].

Fig. 1. Schematic diagram of the device for environmental monitoring.

1 — housing, 2 — elastic element, 3 — indicator, 4 and 5 — optical units with measuring holes, 6 — electronic unit, 7 — display

Technical specifications:

dimensions — $80 \times 60 \times 150$ mm;

range of variation of the distance between the measured sections of the leaf — 30–120 mm;

weight — 0.65 kg.

Leaf goniophotometer

The condition of a plant and the intensity of the processes occurring in it can be determined by the spatial distribution of the brightness of the leaf surface. The presence of a mirror component indicates a better ecological condition of the plant.

The basis of the device (Fig. 2) is a vertical stand 1, to which a horizontal axis 2 is rigidly attached, on one side of which a rod 3 with a scale 4 and an illuminator 5 is fixed, and on the other side — a rod 6 with a scale 7 and a chamber 8. Plant leaf $\mathcal{L}$ is fixed on a holder 9, which has a flat and cylindrical platform. The rotation of the rods is carried out through stepper motors from the controller (not shown in Fig. 2) [14].

Fig. 2. Schematic diagram of a leaf goniophotometer. a — side view, б — frontal view.

1 — stand, 2 — axis, 3 and 6 — rods, 5 — illuminator, 4 and 7 — scales, 8 — chamber, 9 — holder, $\mathcal{L}$ — plant leaf

Technical specifications:

length of the illuminator rod — 570 mm;

length of the camera rod — 480 mm;

rod rotation angle range — $\pm 90^\circ$;

angle setting accuracy — $\pm 0.5^\circ$;

camera — SONY DSC-H100;

illuminator — LED lamp 30 W 2700 lm;

dimensions — $370 \times 140 \times 106$ mm;

weight — 12 kg.

Device for morphocolorimetry of plant leaves

Leaves are very sensitive to unfavorable factors and, under stress conditions during adaptation, change their morphological and color indicators, which can act as diagnostic signs of the state of plants. The possibility of using morphocolorimetry methods of herbaceous plants to analyze the degree of adverse impact of anthropogenic load is shown.

The device (Fig. 3) has a body 1, made of hinged upper and lower sections. Inside the upper section there is a convex mirror 2, on top there is a chamber 3. In the lower section of the housing there is a diaphragm 4, a flat mirror 5, an illuminator 6 and a lens 7. The vertically directed optical axis of the camera passes through the centers of the measured sample (plant leaf) 8, the apertures of the diaphragm, and the illuminator. The camera takes pictures in transmitted and reflected light [15].

Fig. 3. Scheme of the device for morphocolorimetry of plant leaves.

1 — housing, 2 — convex mirror, 3 — chamber, 4 — diaphragm, 5 — flat mirror, 6 — illuminator, 7 — lens, 8 — plant leaf

Technical specifications:

dimensions of the window for shooting — 280×160 mm;

light source — LED lamp 30 W, 2700 lm;

dimensions — $400 \times 200 \times 580$ mm;

weight — 3 kg.

Full-scale model of a plant in photoculture

When studying the properties of plants in photoculture experiments, their properties can change over time, which makes it difficult to obtain reliable and reproducible indicators. In order to prevent changes in the properties of a plant during a long-term experiment from affecting its results, it is recommended to use a physical model in which all the main geometric parameters correspond to the parameters of the simulated living plant.

A natural model of a plant has been developed in which the possibility of setting the geometric properties of artificial leaves by selection has been realized (Fig. 4). The model contains a vertically located rod 1, simulating the stem of a real plant and artificial leaves 2, which are attached to the rod with the help of clamps 3 through flexible links 4. The upper surfaces of each leaf are made of photosensitive material and are electrically connected to the ends of electrical conductors 5. The stand 6 contains a power supply 7, a microprocessor 8, and a Bluetooth 9, which are electrically connected to each other. Inside the stand, the ends of electrical conductors 5 are connected to the corresponding inputs of the analog-to-digital converter of the microprocessor [16].

Fig. 4. Full-scale model of a plant.

1 — rod, 2 — artificial leaves, 3 — clamps, 4 — flexible links, 5 — electrical conductors, 6 — stand, 7 — power supply, 8 — microprocessor, 9 — Bluetooth

Specifications:

number of leaves — up to 10 pcs;

leaf length — 30–160 mm;

leaf width — 20–70 mm;

petiole length — up to 40 mm;

petiole inclination angle — $\pm 80^\circ$; petiole rotation angle — 0–360°;

height of leaf nodes on the stem — 5–10 mm;

dimensions — $250 \times 250 \times 500$ mm;

weight — 2.2 kg.

Device for measuring phyllotaxis parameters

Phyllotaxis parameters are the arrangement of leaves on the stem, distances between nodes, and divergence angles between two adjacent leaves. They characterize the morphological properties of the plant. In photoculture, phyllotaxis can be used to judge the stability of plant development. Changes in environmental factors affect phyllotaxis parameters.

The developed device (Fig. 5) allows numerical measurement of the main phyllotaxis parameters. The device contains a housing 1, a rotary platform 2, angular scales 3 and 4, a contact probe 5, a stand 6, levers 7 and 8.

Fig. 5. Phyllotaxis parameter measuring device.

1 — body, 2 — rotary platform, 3 and 4 — angular scales, 5 — contact probe, 6 — stand, 7 and 8 — levers

During measurements, the platform with the plant is set to the initial position to align the stem vertical with the platform rotation axis. Rotating the platform in a given direction, a researcher successively moves from one leaf node to another, touching them with the contact probe. The heights of nodes and divergence angles are recorded [17].

Specifications:

length of levers — 300 mm;

diameter of table — 180 mm;

accuracy of measured angles — $\pm 0.5^\circ$;

dimensions — $360 \times 200 \times 300$ mm;

weight — 1.6 kg.

Color meter

The structure and arrangement of cells in leaves has an external manifestation in the optical properties of tissues. They also determine the functional state of plants: the processes of respiration, photosynthesis, which are directly affected by environmental conditions. Studying the color parameters of the leaf surface is of considerable practical interest.

The developed device is managed manually (Fig. 6). Inside the ergonomic case there is a microprocessor 2, a color sensor 3 (TCS34725 module),

Bluetooth 6, and an autonomous power battery 11. On the housing there are control buttons, a display, a USB connector, a power switch, and an external power connector. During measurements, the color sensor of the device is brought to the plant leaf. The color measurement results in the form of RGB components are displayed on the display and can be transmitted to external devices via Bluetooth [18].

Fig. 6. Color meter.

a — front view with cutouts, 6 — top view;
1 — housing, 2 — microprocessor, 3 — color sensor,
4 — color indicator, 5 — display, 6 — Bluetooth,
7 — keyboard, 8 — button, 9 — USB connector,
10 — power switch, 11 — battery, 12 — external
power connector

Specifications:

dimensions — $230 \times 85 \times 90$ mm;
weight — 0.45 kg.

Device for determining fluctuating asymmetry of optical characteristics of plant leaves

It has been experimentally found that the FA level is a sensitive indicator of the state of a plant, characterizing the stability of its development under conditions of the action of environmental factors on plants. Using this phenomenon in photoculture conditions, it is possible to give a comprehensive assessment of the quality of the created light environment and ensure its optimization by choosing the most suitable light sources.

In the developed device (Fig. 7), flexible light guides 4 and 12 connect light sources 3 and 11 with optical connectors 2 and 9, located on clamps 1 and 8. The optical signal is picked up using control device 6 through branched flexible light guide 7 to spectrometer 5. The clamps are connected to guide 10 and capable of mutual movement and fixation on the guide. When taking measurements, two points symmetrically located relative to the rachis are marked on the surface of the plant leaf. The clamps are moved along the guide until the measurement locations of the optical characteristics of the leaf coincide with these points, and they are fixed on the guide. The leaf selected for measurements is placed in the clamps, and the spectral reflectance coefficients of the leaf are found at the marked points [19].

Fig. 7. Device for determining fluctuating asymmetry.

1 and 8 — clamps, 2 and 9 — optical connectors,
3 and 11 — light sources, 4 and 12 — flexible light
guides, 5 — spectrometer, 6 — control device, 7 —
branched flexible light guide, 10 — guide, 11 — plant
leaf

Specifications:

spectral range — 360–1100 nm;
dimensions — $300 \times 40 \times 60$ mm;
weight — 0.55 kg.

Leaf photocolormeter

The pigments contained in the plant leaf have selectivity in absorbing light in individual spectral ranges. Therefore, the optical properties of leaves, in particular their spectral absorption capacity, can serve as indicators of the functional state of plants when exposed to external factors. In comparison with destructive methods, it is possible to organize operational monitoring of the plant condition on the basis of such measurements.

The housing of the leaf photocolormeter 1 is made in the form of a pistol and has a slot for the measured plant leaf 11. Inside the housing there is a block of light-emitting diodes 2; a photodetector 3; a processor 4; a display 5; a keyboard 6; a power supply 7; a clamp 8, mechanically connected to an electromagnetic drive 9 and a clamp sensor 10; a thickness sensor 11; a spring-loaded lever 12, resting on a switch 13; a memory unit 14 (Fig. 8) [20].

Fig. 8. Leaf photocolormeter.

1 — housing, 2 — LED block, 3 — photodetector,
4 — processor, 5 — display, 6 — keyboard, 7 —
power supply, 8 — clamp, 9 — electromagnetic
drive, 10 — clamp sensor, 11 — thickness sensor,
12 — spring-loaded lever, 13 — switch, 14 — mem-
ory block

Specifications:

dimensions — $170 \times 70 \times 200$ mm;
weight — 0.55 kg;
battery life — 3 h;
measurement time — 30 s;
display — 4 lines;
maximum optical density — 4.0 dB.

Device for determining the energy intensity of photosynthesis

Photosynthesis is one of the stages of the energy flow during its transformation, at which the overall efficiency of photoculture is determined. The approach to assessing the efficiency of photosynthesis in photoculture by its energy intensity is disclosed within the framework of the applied theory of energy saving [21].

The device (Fig. 9) contains: a unit for measuring I the irradiance E created by the light source IIC ; a unit for measuring the leaf mass M_n ; 2; a unit for measuring the leaf area S_n ; 3; a unit for recording the time of appearance of the next leaf T_n ; 4; a unit for setting the photoperiod ΦII and the irradiation time T_k ; 5;

an arithmetic logic unit 6; an indication unit 7 of the energy capacity of photosynthesis $\exists\Phi C$ [22].

Fig. 9. Device for determining the energy intensity of photosynthesis.

HC — light source, E — irradiation flux from HC , M_n — mass of the selected n -th leaf, S_n — area of the n -th leaf, T_n — time of appearance of the n -th leaf, $\Phi\Pi$ — photoperiod, T_k — irradiation time.

1 — irradiance measurement unit, 2 — plant leaf mass measurement unit, 3 — plant leaf area measurement unit, 4 — unit for recording the time of appearance of the next leaf on the plant, 5 — unit for setting the photoperiod and irradiation time, 6 — arithmetic logic unit, 7 — indication unit

Technical specifications:

spectral range — 390–760 nm;

limits of working illumination — 10–20 000 lux;

fixed weight — up to 500 g;

fixed leaf dimensions — up to 300 × 180 mm;

weight — 2.5 kg.

Spectrum quality analyzer of optical radiation flux in photoculture

The range of photosynthetically active radiation in the region of 400–700 nm (PAR) is necessary for the formation of the light environment of plants in photoculture. Within this range, the distribution of energy over individual subranges is important, which is determined by the requirements of the grown plants, their type, and development phase. In this connection, the problem of assessing the closeness of the spectra of the flux generated by light sources and the flux most effective for plants (i.e. assessing the quality of the spectrum), on which the economic indicators of photoculture directly depend, arises. To measure the spectral composition of light sources, the spectrophotometer TKA-BД/02 [1] is widely used in the practice of photoculture. On its basis, a spectrum quality analyzer is proposed. The calculation method is implemented in version 2.3.4 (2012) of the spectrophotometer software.

The analyzer (Fig. 10) consists of a polychromator 1, a spectrum recording unit 2, their outputs are connected to the inputs of a photon irradiance determination unit 3, the outputs of which, together with the outputs of the flux fraction setting units in spectral subranges 7 and 8, are connected to the inputs of an arithmetic logic unit 9, the output of which is connected to an indication unit 10 [23].

Technical specifications:

spectrum scanning range — 390–760 nm;

working illumination limits — 10–20,000 lx;

weight — 2.5 kg.

Fig. 10. Functional diagram of the spectrum quality analyzer.

1 — polychromator, 2 — spectrum recording unit, 3 — photon irradiance determination unit, 7 and 8 — units for setting the flux share in spectral subranges, 9 — arithmetic logic unit, 10 — indication unit

ROLE OF THE DEVELOPED INSTRUMENTATION IN THE SCIENTIFIC ACHIEVEMENTS OF THE EEP LABORATORY AND PROSPECTS

The devices discussed above are the basis of the scientific activities of the laboratory. Since 2011, the laboratory staff has published 140 articles in scientific journals, more than 70 scientific papers in collections, and received 33 patents for inventions. The results of practical developments were awarded 10 gold medals at the VDNKh and AgroRus exhibitions [24].

The level of readiness of the technologies of the created instrumentation (in accordance with the order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation dated 06.02.2023 No. 107) is the third (prototypes have been developed to demonstrate key characteristics).

The instrumentation and methodological developments were employed in the laboratory joint activities with colleagues from the Riga Technical University, Riga, and the Latvian University of Agriculture, Jelgava, within the framework of work on the grant "New control methods for energy and ecological efficiency increase of greenhouse plant lighting systems (uMOL)".

Measurements using the created instruments were carried out in the tomato photoculture in the block of greenhouses "Mezhvidi", Latvia, and the greenhouse complex "Krugly God", Pikalevo; in the lettuce photoculture in the agroholding "Vyborzhets", St. Petersburg; when growing seed potatoes using the aeroponic technology of the Scientific and Production Center "MosSemProdTekhKartofel", Moscow. Implementation certificates were received for a number of developments at partner enterprises: NPO "PskovAgroInnovations", OOO "Tenko", OOO "TsentrRegion-Service". The developed methodological support is used in the educational process at the Department of Energy Supply of Enterprises and Electrical Technologies of the Electrical Power Engineering Faculty of the St. Petersburg State Agrarian University.

Theoretical issues and features of practical implementation of research results on practical light culture and its metrological support were reported and discussed at scientific conferences Lux Pacifica; Engineering for Rural Development, Latvia; CIOSTA; In-

novative Technologies in Science and Education (IT-NO); Agroinfo; Problems and Prospects for the Development of Domestic Lighting, Electrical Engineering and Energy, Saransk; at university conferences of Bryansk State Agrarian University, Murmansk State Technical University, St. Petersburg State Agrarian University, and many others [25].

A number of the developments considered were included in the test system of energy and ecological efficiency of photoculture, which was awarded the Gold Medal at the Golden Autumn 2019 exhibition.

Together with the Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, the laboratory participated in an online exhibition at the Russian Science and Technology Week within the framework of the International Chinese Exhibition "CIEP 2020" and presented a scientific and technical project "Creation of a plant phenotyping platform based on artificial intelligence and digital technologies".

Following the events, a Letter of Gratitude was received from the International Union of Instrument Makers and Specialists in Information and Telecommunication Technologies (IUIT).

The direction of further research in the laboratory is the development of intelligent metrological support and digital control tools in order to ensure energy and ecological efficiency in the functioning of artificial agroecosystems.

The scientific problem associated with the creation of means for monitoring agroecosystem parameters is due to the complex nature of the research object, its insufficient study, and the absence of parameters clearly recommended for monitoring.

The study will be based on the modern paradigm of energy and ecological efficiency, which means ensuring the economic efficiency of the functioning of the agroecosystem, taking into account its climate neutrality [26]. The new paradigm means obtaining responsibly produced environmentally friendly products by managing the productivity of the agroecosystem in accordance with the prevailing conditions, optimizing the efficiency of resource use, and reducing the adverse impact on the environment. Energy and environmental efficiency require data-driven decision-making, precise management, and cultivation. The use of modern monitoring systems allows one to track and regulate the parameters of the growing environment, making targeted interventions and adjustments. Integration of scientific knowledge of individual disciplines will ensure a qualitative leap in the management of agroecosystems.

CONCLUSIONS

1. Currently, the world market for scientific instruments is continuously growing. However, in Russian scientific organizations, there is often a shortage

of them. Recently, much attention has been paid to correcting this situation at the highest levels of management. And yet, despite the measures taken, the instrumentation and experimental bases of a large part of state research institutes are largely worn out and obsolete. The volume and quality of research equipment do not always correspond to the modern level of research.

2. The idea of creating in-house equipment in the design and production departments of scientific organizations has deep historical roots. It has not lost its significance even at the present time, when for a number of reasons full-fledged centralized supply is impossible or insufficient. The global trend in the development and small-scale production of analytical and measuring equipment in academic institutes and at enterprises attached to them, as well as in individual universities, is FOSH technology — free and open-source hardware. The main advantages of the FOSH technology (relative cheapness, potentially better scientific efficiency, responsiveness, openness) and its disadvantages (incomplete analogy, availability not for all scientific groups, difficulty in ensuring quality and reliability) are revealed.

3. Analysis of the experience of independent production of scientific equipment by the team of the EEEP laboratory showed that this way is quite realistic for creating a material and technical base and solving quite complex scientific and technical problems. The considered examples show a fairly high level of developments in the EEEP laboratory in the field of instrumentation related to optical radiation, studying the properties of plants, conducting bioindication and environmental monitoring. Potential consumers of such products are crop and greenhouse farms, city farms, the private sector, research organizations, and educational institutions. The advantages of our in-house developments over analogues are: low cost, maintainability.

The instrumentation created in the EEEP laboratory is the basis of the laboratory's scientific activities. The readiness level of the technologies of the created instrumentation is the third (a prototype has been developed to demonstrate key characteristics). The instrumentation and methodological developments are used in the framework of joint activities with colleagues from other scientific and production enterprises.