

Б. С. МОШКОВ
ДОКТОР БИОЛОГИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОР

*Выращивание
растений при
искусственном
освещении*

Второе переработанное издание

ИЗДАТЕЛЬСТВО «КОЛОС»



ЛЕНИНГРАД - 1968

Борис Сергеевич МОШКОВ
ВЫРАЩИВАНИЕ РАСТЕНИЙ
ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ОСВЕЩЕНИИ.

Второе переработанное издание.
Л., отделение издательства «Колос», 1966.
288 стр. с илл.



Редактор
Ф. С. Голомысов

Переплет художника
А. И. Приimana

Художественный редактор
О. П. Андреев

Технический редактор
Л. Г. Баранова

Корректор
Н. Г. Медвинская



Сдано в набор 7/VIII 1965 г. Под-
писано к печати 30/XII 1965 г.
М-51967. Формат 84×108¹/₃₂. Печ.
л. 9(15,12). Уч.-изд. л. 15,27. Т. п.
1966 г. № 28. Тираж 8 000 экз.
Заказ № 1892. Цена 77 коп.

Отделение издательства «Колос»,
Ленинград, Невский пр., 28.

Ленинградская типография № 1
«Печатный Двор» им. А. М. Горь-
кого Главполиграфпрома Коми-
тета по печати при Совете Ми-
нистров СССР, Гатчинская, 26.

Книга „Выращивание растений при искусственном освещении“ является вторым, переработанным и дополненным изданием.

В ней изложены теоретические основы, раскрывающие потенциальные возможности растений, и описаны опыты, расширяющие наши представления об их росте, продуктивности и скороспелости.

В книге рассказывается о больших возможностях увеличения продуктивности растений и ускорения созревания их урожая.

На примере культуры томатов показано, как при искусственном освещении можно получить шесть урожаев в год с выходом более 100 кг плодов с 1 м². Одновременно намечаются пути удвоения этого урожая.

Читатель найдет в книге практически советы по использованию электрического освещения при выращивании различных видов овощных, плодовых и декоративных растений.

Книга рассчитана на агрономов, научных работников, преподавателей и студентов.

4-3-6
28-66

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАСТЕНИЙ И ИХ ВЫЯВЛЕНИЕ

ЗНАЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРОВОДИМЫХ В УСЛОВИЯХ ИСКУССТВЕННОГО КЛИМАТА

Среди проблем, связанных с благосостоянием человечества, важнейшей является проблема питания. Ведь поверхность материков нашей планеты ограничена и занимает всего $\frac{1}{3}$ ее площади. При этом далеко не все участки суши пригодны для земледелия в его обычном виде.

Вместе с тем, по мере улучшения жизни на земле и прогресса в борьбе с болезнями, этим извечным бичом человечества, смертность будет резко понижаться, а длительность жизни увеличиваться. Несомненно, что будет возрастать и рождаемость, а вместе с ней и число жителей на земле. Такое положение естественно и отнюдь не радно. Конечно, человечество справится со всеми стоящими перед ним проблемами и может быть вовсе не так, как мы думаем, но это не сдерживает и не исключает нашу заботу о будущем наших потомков.

Какие же пути намечаются сейчас, в наши дни, для решения проблемы изобильного питания и, в связи с этим, будущего растениеводства и земледелия?

Самый простой, но в то же время и наименее перспективный путь заключается в использовании под сельскохозяйственные угодья всех доступных для этого территорий.

Если окультурить все пустыни, вырубить все леса, в том числе и тропические, осушить болота, появится значительный резерв новых сельскохозяйственных пло-

щадей, но, во-первых, эти территории все равно ограничены и когда-то их может не хватить, а, во-вторых, резкое изменение естественных ландшафтов может привести к значительному ухудшению микроклимата полей и понижению урожаев. Кроме того, уж очень однообразным станет ландшафт нашей планеты, лишившись лесов и природных угодий.

Еще один аналогичный, но, несомненно, более прогрессивный путь — это включение в сельскохозяйственные угодья водных бассейнов земли, составляющих $\frac{2}{3}$ ее поверхности. Огромные объемы многих водных пространств заселены различными растительными и животными организмами. Большое внимание сейчас обращено на растительные организмы, особенно на водоросли, часть которых, например хлорелла, серьезно изучается.

Хлорелла и подобные ей виды водных растений содержат в своем составе большое количество белка и много других ценных в питательном отношении веществ, обладая при этом высоким коэффициентом нарастания растительной массы.

Хлорелла в естественных водоемах способна давать прирост сухой растительной массы свыше 20 г с 1 м² в сутки. Лучшее поле кукурузы за тот же период времени и с такой же площади дает не более 12—15 г сухой растительной массы. Отсюда было сделано предположение о большей продуктивности водных растений по сравнению с сухопутными, и начались многочисленные работы по окультуриванию хлореллы в разных странах, в том числе и в СССР. В настоящее время наибольшие урожаи растительной массы хлореллы получены в нашей стране. Они достигают за сутки свыше 80 г сухого вещества с 1 м² водной поверхности. Это очень хорошие и конечно не последние достижения, но, как будет показано ниже, и наземные растения способны давать такие же и даже лучшие результаты.

Нельзя забывать, что водные растения, в том числе и хлорелла, по сравнению с сухопутными обычно находятся в лучших условиях существования. В самом деле, растения — обитатели акваторий — никогда не подвергаются действию засух, являющихся стихийным бедствием для многих наземных видов сельскохозяйственных растений. Не страшен для водных обитателей и из-

быток воды, чего нельзя сказать о многих наземных видах растений. А главное, в водной среде по сравнению с воздушной значительно меньшим колебаниям подвергаются и все другие факторы внешней среды, начиная с минерального состава питательных веществ и кончая температурным фактором.

Некоторые виды водных растений, например морская капуста, издавна являются привычным продуктом питания приморского населения. Таким образом, включение водных растений в культуру и питательный рацион человека и животных является, несомненно, прогрессивным и обязательным звеном в решении пищевой и кормовой проблемы не только будущего, но и настоящего.

Помимо этого направления, есть и другие еще более прогрессивные пути, ведущие к обеспечению людей всеми необходимыми для их нормальной жизнедеятельности продуктами. По одному из них идут химики-органики, физико-химики и биохимики. Они надеются разгадать тайну зеленых растений и научиться подобно им синтезировать многие продукты питания из тех же элементов, что и растительные организмы или из подобных им. Этот путь — путь искусственного синтеза сложных органических соединений с последующим превращением их в привычные продукты питания — захватывающе интересен, но чрезвычайно сложен.

В настоящее время еще трудно предсказать, когда и в какой мере растительные и животные продукты питания человека удастся заменить, хотя бы частично, синтетическими, полученными полностью в лаборатории и на заводе из веществ, не являющихся продуктом синтеза живой природы. Поэтому следует подумать о серьезной и глубокой разработке еще одного, и при этом самого надежного, пути обеспечения человечества всеми необходимыми для него продуктами питания, связанного с выяснением потенциальных возможностей растительных организмов и культивированием их в искусственных индустриальных условиях.

Несмотря на успехи растениеводства за последние 50 лет, приведшие к значительному увеличению урожая многих сельскохозяйственных культур, к настоящему времени у некоторых ученых сложилось представление о достигнутом здесь пределе. При прогнозах будущих

растительных пищевых ресурсов исходят почему-то из величины достигнутых урожаев или даже считают возможным их некоторое уменьшение. Тем самым негласно признается, что наши современные представления о продуктивности растений, описанные во многих учебниках и монографиях, являются полными и не могут быть серьезно изменены в сторону прогресса. Но те, кто думает подобным образом, глубоко заблуждаются.

Для пояснения этой мысли приведем пример с пшеницей. В лучших полевых условиях поздний сорт яровой пшеницы — Кахетинская ветвистая — созревает за 140—150 дней и дает урожай около 50 ц с 1 га, или 0,5 кг с 1 м² за год. В лаборатории, полностью в искусственных условиях, урожай этой же пшеницы, также за год, с 1 м² может достигать за 5 генераций 50 кг. И неизвестно, является ли этот урожай предельным. Скорее всего нет. Будущее покажет, во сколько раз удастся увеличить этот и без того сказочный урожай, равный 5 000 ц с 1 га за год.

Не исключено, что такие высокие урожаи невозможны в природных условиях, так как нигде на нашей планете нет сочетаний внешних факторов, соответствующих потребностям растений для их максимальной продуктивности. Зато имеется большое количество различных вредителей и болезней, поглощающих львиную долю урожая, и немало непредвиденных стихийных бедствий, нередко полностью уничтожающих труд земледельца.

Но нельзя сомневаться в том, что по мере все большего и большего овладения природой растительных организмов урожаи их будут неперестанно возрастать в соответствующих для этого естественных условиях. А для некоторых культур, вероятно, окажется рациональным выращивание их полностью в искусственных условиях.

Для познания потенциальных возможностей растений необходимо их подробное изучение в специальных лабораториях, где все факторы внешней среды создаются и регулируются человеком и во всем зависят от его воли. Такие сложные по оборудованию лаборатории обычно называют лабораториями искусственного климата, или фитотронами. Именно в них раскрываются биологические и хозяйственные особенности расте-

ний и создаются невиданные урожаи. Эти же лаборатории послужат прообразом будущих растениеводческих фабрик как основного звена индустриального растениеводства.

Выращивание в них растений обеспечивает получение любых растительных продуктов в необходимых количествах. Поэтому руководимая автором лаборатория все свои исследования направляет на биологическое познание растительных организмов, раскрывающее беспредельные возможности увеличения урожаев и получения их в кратчайшие сроки.

При выращивании растений полностью в искусственных условиях, вне зависимости от естественных изменчивых внешних факторов (географических, почвенных и др.), долгое время самой сложной проблемой был свет. Еще совсем недавно считалось, что на электрическом освещении нельзя получить нормальных урожаев и что этот свет никогда не обеспечит высокой продуктивности растений. Но теперь, после ряда работ, складывается обратное представление: только в условиях искусственного электрического освещения, находящегося полностью во власти экспериментатора, можно добиться получения сказочно высоких урожаев, которые никогда не были получены на изменчивом солнечном освещении. Другие важные факторы получения урожая, такие, как температура среды, окружающей растение, и условия корневого и воздушного питания, представляли меньшие трудности. Например, беспочвенная, гидропонная, как теперь говорят, культура была, в основном, освоена еще в конце прошлого века.

Как показывают наши опыты, продуктивность растений может быть такой высокой, что в будущем, возможно, встанет вопрос о сокращении, а не о расширении площадей под посевами различных культур.

Характер изменения величины земельной площади под культурой, в зависимости от урожая, можно видеть на примере томатных растений.

В среднем человек может съесть 200 г плодов томатов в день, т. е. 73 кг в год. Условно число ежедневных потребителей плодов томатов примем за 200 млн. человек. При норме 73 кг плодов томатов необходимо ежегодно собирать 146 млн. ц. Для определения размеров посевной площади, могущей обеспечить

годовую потребность в плодах томатов, необходимо знать их возможную урожайность. При урожайности 200 ц с 1 га вся площадь, занятая этой культурой, выразится величиной в 730 000 га. Как будет показано ниже, урожайность томатов может быть доведена до 20 000 ц с 1 га, т. е. повышена в сто раз. Понятно, что в этом случае и посевная площадь сократится также в сто раз, и тогда для полного удовлетворения всего населения нашей страны томатами потребуется всего 7300 га вместо существующих сейчас 500 000 га.

Чтобы пояснить, каким образом можно рассчитывать на получение урожая плодов томатов в 20 000 ц с 1 га, остановимся на некоторых результатах наших исследований.

Основным сортом томатных растений, с которым ведутся опыты в лаборатории светофизиологии Агрофизического научно-исследовательского института (АФИ), является Пушкинский 1853. Сорт скороспелый — от появления всходов до созревания первых плодов проходит 100—105 дней. В хороших условиях дает урожай до 660 ц с 1 га, или по 6 кг плодов с 1 м² за год. Число дней от появления всходов до цветения — 60. Биохимические показатели: сухое вещество — примерно 6%, сумма сахаров — от 1,6 до 3%, кислотность около 0,48% и содержание витамина С — от 12 до 20 мг на 100 г*.

Теперь же, после нескольких лет выращивания этого сорта в искусственных условиях, появляются совсем новые представления о его биологии. Число дней от появления всходов до цветения сократилось более чем в два раза. Вместо 60 дней в наших опытах растение томатов сорта Пушкинский 1853 зацветает на 23—25-й день. В природных условиях до созревания плодов проходит 100 дней, а у нас — 50 дней. Через 60 дней, считая от появления всходов, собирается весь урожай плодов, достигающий 18—20 кг с 1 м², что при пересчете на 1 га составляет 1800—2000 ц. Это за 60 суток! А в год около 1 млн. кг плодов!

Значит в определенных условиях томаты значительно скороспелее и урожайнее, чем в естественных и тепличных условиях.

* Содержание витаминов здесь и в последующем изложении приводится в миллиграммах на 100 г сырого веса плодов.

Каково же качество плодов, созревающих за столь короткие сроки? Оказалось, что пищевые и вкусовые достоинства их заметно повысились. Количество сахаров возросло более чем в 2 раза и достигло 5—6%, плоды стали сладкими. Количество аскорбиновой кислоты (витамина С) увеличилось до 25 мг на 100 г, т. е. также удвоилось по сравнению с обычным количеством в плодах растений, выращиваемых на Украине и в более северных широтах. Количество сухого вещества возросло с 6 до 8% и, что особенно ценно, уменьшилась общая кислотность плодов (за счет снижения содержания щавелевой кислоты). Неизменными в наших опытах оказались: высота растений при уборке урожая (50—60 см) и место заложения первой кисти (над 7—8-м листом).

Из внешних (морфологических) признаков изменились величина и вес плодов. В некоторых случаях отдельные плоды весили до 200 г вместо 75—100 г. Больше всего изменилась продуктивность томатных растений. Если обычно с 1 м² собирают около 6 кг плодов за срок, не меньший чем 6—7 месяцев, или около 12 кг за год, то в наших опытах мы снимаем за год с 1 м² шесть урожаев по 18—20 кг плодов каждый, что в общей сложности дает более 100 кг спелых плодов в год с 1 м².

Наличие полноценных семян в плодах делает наш метод выращивания томатов при искусственном освещении весьма ценным для генетической и селекционной работы, направленной на отбор наиболее продуктивных разновидностей. Выращивание растений на искусственном освещении является превосходным методом для ускорения селекционной работы. Ведь получение шести поколений в год в шесть раз ускоряет обычные темпы выведения новых сортов.

Выращивание растений в искусственных условиях, в первую очередь при электрическом освещении, должно сыграть исключительную роль как в изучении растительных организмов, так и в использовании их в различных хозяйственных целях. Искусственное освещение, при наличии оптимального комплекса всех необходимых внешних условий, надо рассматривать не только как заменитель солнечного света, но одновременно и как новый фактор физического воздействия на растения.

Получение высоких урожаев ценных по пищевым качествам плодов томатов полностью в искусственных условиях подтолкнуло выдвинуть проблему о промышленной культуре их в тех районах СССР, где имеется избыток дешевой электроэнергии.

Графики суточного потребления электроэнергии имеют так называемые часы «пик» и часы затишья. Часы «пик» связаны с темными периодами суток, совпадающими с активной деятельностью человека. Они приходятся обычно на вечерние часы — от 16 до 23, а на утренние — от 8 до 11. В эти периоды во многих районах СССР почти вся паличная электроэнергия расходуется. Зато в ночные часы — с 23 до 8 утра и в дневные часы — с 10 до 16 — почти всегда и всюду она оказывается в избытке и не находит рационального применения. Общая продолжительность двух суточных периодов со свободной электроэнергией составляет 14 часов, т. е. как раз столько же, сколько получают света томаты, выращиваемые в лаборатории на искусственном освещении.

Но в наших обычных опытах, так же как и всегда в природе, томаты получают в течение суток один период света продолжительностью в 14 часов и один период темноты продолжительностью в 10 часов. День с 14-часовым освещением всегда захватывает несколько часов, приходящихся на периоды «пик». Ведь самый длинный суточный период, когда электроэнергия является свободной, не превышает 9 часов. Прежние опыты показали, что томатные растения, получая 9 часов света с последующими 15 часами темноты, дают малые урожаи. Поэтому возникла необходимость попытки выращивания томатов в совершенно необычных суточных чередованиях света и темноты. В часы «пик» опытные растения томатов получали темноту, а в часы затишья — свет. Практически световой режим томатов выглядел так: свет — с 23 до 8 утра — 9 часов, затем темнота — с 8 до 11 часов — 3 часа и снова свет — с 11 до 16 часов — 5 часов, после чего — с 16 до 23 часов — растения находились в темноте.

До цветения развитие томатных растений в необычных актиноритмических условиях шло нормально и через 23 дня они начали цвести. Бутоны появились через 14 дней после всходов. Поокраснение плодов началось

после начала выращивания через 48—50 суток. Уборка плодов производилась в 65-суточном возрасте растений. Урожай с 1 м² достигал 12,5 кг. Этот урожай ниже обычных 18 кг, получаемых при выращивании томатных растений в таких же установках, но на обычном 14-часовом дне. Но ведь это только начало выращивания томатных растений в несвойственных для них суточных ритмах лучистой энергии, и как начало оно совсем неплохое.

Анализ урожая плодов на отдельных растениях показал, что наряду со средним (350 г) лучшие растения дали высокий урожай плодов (500, 550, 570 и 630 г). Таким образом, последовательный отбор наиболее продуктивных растений в этих совсем необычных световых условиях обеспечит достаточно высокий урожай, причем за счет электрической энергии, не находящей сейчас полного сбыта.

Но есть и еще один крупный резерв электроэнергии — это летние месяцы, когда она в большинстве районов страны, особенно в Сибири, используется в очень незначительной доле. Почему бы всю эту избыточную электроэнергию не направить на выращивание томатов, а также и других овощей? Для этого достаточно лишь построить дешевые темные сооружения, пригодные для выращивания растений полностью на электрическом освещении. Это даст населению дополнительные полноценные продукты питания и явится преобразованием нового вида весьма интенсивного растениеводства.

Однако заманчивая задача будущего растениеводства не должна мешать прогрессу и интенсификации растениеводства наших дней. В первую очередь это относится к выращиванию овощных культур с целью круглогодичного снабжения свежими овощами всего населения нашей страны. Для этих целей намечается значительное расширение строительства теплиц вокруг городов, расположенных в различных зонах СССР. А это означает значительное возрастание масштабов использования электрического освещения для зимнего досвечивания растений в течение зимнего полугодия.

Основная по размерам территория СССР лежит к северу от 50-й параллели, что и определяет малое количество света в зимнее полугодие. Здесь зимние дни

коротки, а интенсивность света, даже в полдень, часто настолько мала, что приводит к необходимости читать и писать при искусственном освещении.

Поэтому при зимнем выращивании растений за пределами 50° с.ш. приходится пользоваться досвечиванием их электрическим светом. Досвечивание не означает выращивания растений полностью при искусственном освещении. Напротив, оно предусматривает необходимость, кроме относительно небольших количеств электрического освещения, возможно полного использования и естественного солнечного света. В этом случае следует научиться правильно сочетать естественное и искусственное освещение, устраняя все причины, мешающие наиболее полному использованию дарового солнечного света. Разработка приемов досвечивания растений в теплицах в осенне-зимний период для получения полноценных овощных продуктов в настоящее время является крайне важной практической задачей. Объем зимней культуры растений с обязательным досвечиванием электрическим светом в нашей стране чрезвычайно велик, и это обстоятельство придает совершенно исключительное значение правильной постановке соответствующих исследований.

Ближайшей и основной задачей этих исследований является увеличение продуктивности растений, получающих дополнительное освещение, за счет повышения коэффициента использования растениями как искусственного, так и естественного освещения.

Для этих же целей крайне желательна и объективная оценка относительного светолюбия видов и сортов растений, намечаемых для культуры полностью на искусственном освещении. Чем менее требовательны растения к свету, тем при меньшей мощности лучистого потока они могут быть выращены. Чем меньше будут затраты электроэнергии, тем, в конечном итоге, будет рациональнее электросветокультура растений. Как минимум, для разработки приемов выращивания растений на электрическом освещении нужно знать следующее: 1) какие интегральные мощности лучистого потока различных электрических ламп наиболее пригодны для культуры определенных видов растений;

2) каким должен быть спектральный состав лучистого потока, чтобы было обеспечено его лучшее усвое-

ние и, как результат этого, был получен наибольший урожай растительных продуктов;

3) какой должна быть ежесуточная продолжительность действия лучистой энергии на растения в зависимости от мощности и спектрального состава ее для скорейшего развития растительных видов при высокой их продуктивности;

4) каким должен быть температурный фон в светлые и темные часы суток; в первом случае он определяет собой характер влияния на растения лучистой энергии, а во втором — интенсивность хода темновых реакций суточного обмена (метаболизма) веществ;

5) какими должны быть воздушное питание растений, состав воздуха и количество в нем углекислоты для наиболее интенсивного хода фотосинтеза;

6) как должны идти водоснабжение и расходование воды растениями для лучшего использования ими света;

7) как осуществлять минеральное питание выращиваемых на искусственном освещении видов; здесь, прежде всего, возникает вопрос о создании специальной корнеобитаемой среды.

Ответы на все эти вопросы должны быть гораздо точнее, чем это можно сделать на основании материалов, имеющихся в литературе. Возникает необходимость скорейшего выяснения взаимодействия растения с лучистой энергией в зависимости не только от ее особенностей (спектральный состав, мощность потока, продолжительность его действия), но и от комплекса других факторов внешней среды, участвующих в формировании физиологического состояния растительных видов.

Подробное изучение всех физиологических особенностей растительных видов должно осуществляться в специальных лабораториях (фитотронах), располагающих многообразным оборудованием, позволяющим осуществлять различные комплексы внешних условий и автоматически управлять ими. Такие лаборатории искусственного климата начали появляться с 40-х годов нашего века и сейчас их становится все больше и больше. Одной из самых крупных лабораторий подобного рода является лаборатория искусственного климата Института физиологии растений АН СССР в Москве. Аналогичные лаборатории имеются в США, Канаде, Нидерландах, Бельгии, Франции и т. д. Самым слабым звеном

их являются осветительные установки и световые режимы выращивания растений. В лаборатории светофизиологии Агрофизического научно-исследовательского института, наоборот, основное внимание уделяется световым условиям выращивания растений и, вероятно, именно поэтому здесь были получены наиболее высокие урожаи растений в кратчайшие сроки. Выяснение оптимальных световых режимов и их правильное сочетание с остальным комплексом внешних факторов является наиболее ответственной и трудной стороной при изучении потенциальных возможностей растений.

Несомненно, в нашей стране и в наши дни начинается закладываться фундамент нового, весьма прогрессивного вида растениеводства. Оно по своим методам и результатам будет отличаться от современного примерно так же, как первый аэроплан отличается от космического корабля, облетевшего нашу планету.

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ВЫРАЩИВАНИИ РАСТЕНИЙ В ИСКУССТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

К середине XX в. по сравнению с его началом произошли очень крупные изменения во многих отраслях человеческой деятельности. Огромные сдвиги осуществлялись в промышленности, где технический прогресс привел к совершенно невиданным темпам создания сложнейших машин и оборудования вплоть до электронных счетно-решающих устройств. Резко изменились средства связи от простых телефонов и проволочного телеграфа до современного радио и телевидения. Столь же крупные изменения произошли в способах и скоростях передвижения в пределах и даже за пределами нашей планеты.

Расщепление атомного ядра и освобождение ядерной энергии сулят в будущем неисчислимы ресурсы энергии, используя которые, человек сможет изменить даже климат земли.

Развиваются и биологические науки, хотя не такими темпами, как бы хотелось. Используя современные достижения физики и химии, значительно продвинулась вперед медицина, в результате чего возрос средний период продолжительности человеческой жизни и начали исчезать с лица земли некоторые смертоносные болезни.

На этом фоне поистине чудесных успехов естествознания и техники очень скромными выглядят изменения в области сельского хозяйства и, в частности, в растениеводстве. Оно по-прежнему в очень значительной мере зависит от стихийных сил природы и поэтому не всегда дает ожидаемые результаты. Пожалуй, в этой очень важной области человек все еще находится в плену не зависящих от него обстоятельств, и поэтому урожаи различных сельскохозяйственных культур хотя и возросли, но все еще далеки от желаемых, а главное неустойчивы.

Изменчивые климатические и почвенные условия, многочисленные вредители и болезни, понижающие продуктивность сельскохозяйственных растений, заставляют возделывать гораздо большие площади, чем это было бы нужно при нормальных устойчивых урожаях. Повышение культуры земледелия за счет внесения необходимых удобрений, искусственного орошения и дождевания полей, мелиорации и т. д. является значительным резервом поднятия плодородия почв и получения более или менее устойчивых и удовлетворительных урожаев. Но даже при учете всех этих возможностей приходится во все увеличивающихся масштабах выращивать многие виды растений в защищенном грунте, т. е. в теплицах, парниках и подобных им сооружениях.

При этом, как показала многолетняя практика зимнего выращивания растений в теплицах, основным лимитирующим внешним фактором является свет. В осенне-зимний период в северных и южных широтах солнечного освещения всегда не хватает, и поэтому уже давно возник вопрос об использовании искусственного освещения для культуры растений под стеклом.

В конце прошлого столетия К. А. Тимирязев писал: «...для сообщения тепличным растениям более здорового вида в зимние месяцы, когда, особенно у нас, они страдают от недостатка света, электрическое освещение

могло бы найти себе применение»*. Как известно, это его предвидение оправдалось и все шире и шире реализуется в практике растениеводства защищенного грунта нашей страны. В северных областях СССР, где в течение полугодия не хватает естественного освещения для нормального роста растений, в осенне-зимний период применяют досвечивание электрическим светом овощных, ягодных и декоративных культур. Мало того, исходя из возможностей искусственного досвечивания, в ряде северных районов нашей страны строятся крупные теплично-парниковые комбинаты для бесперебойного круглогодичного снабжения населения овощами и ягодами.

Зеленое растение и солнечные лучи — это понятия, не отделяемые одно от другого. Почти в каждой книге, посвященной солнцу и свету, хотя бы в нескольких словах обязательно упоминается о зеленом растении, превращающем лучистую энергию солнца в живое вещество. В древних мифах, сперва индийских, а затем греческих, солнечные лучи и растения всегда переплетаются и неразрывно связываются между собой.

Несколько позже у античных писателей намечается научный подход к проблеме взаимосвязи солнца и растения. Так, у Вергилия в его сельскохозяйственной поэме «Георгики» можно найти сведения о стремлении растений к свету, т. е. о ростовых световых движениях. Вообще, все, что можно было заметить в природе без специального физиологического эксперимента, было вскрыто практикой первых земледельцев, наблюдавших значение солнечного света в жизни растений. Поэтому и весь сельскохозяйственный труд также издавна связывался с солнцем, и календарь земледельца был солнечным календарем. Эта мысль выражена у Вергилия следующими словами: «Миром для этого всем, разделенным на равные части, солнце правит златое, двенадцать меняя созвездий»**.

Одним из величайших открытий естествознания было и остается открытие способности растений под воздействием света поглощать углекислоту и выделять взамен

ее кислород. Имена М. В. Ломоносова, Пристли (D. Priestley), Сенебье (J. Senebier) и Ингенгуза (J. Ingen-Housz), связанные с этим открытием, должны быть незабываемыми. «Я вижу, — писал Жан Сенебье в 1791 г., — как моя кровь образуется в хлебном колосе, ...а древесина отдает зимою теплоту, огонь и свет, похищенные ею у солнца»*.

В этих словах заключается обобщение величайшего творческого акта природы — синтез живого из неживого при помощи энергии, приносимой солнечными лучами. Вся физиология растений по существу является светофизиологией, ибо световые воздействия определяют собою главное — форму роста и характер биосинтеза растений — и направляют многие физиологические процессы, присущие живому растительному организму.

Характерно, что первые фитофизиологи, вплоть до К. А. Тимирязева, связывали фотосинтетическую деятельность растений с их продуктивностью и конечным урожаем. Под фотосинтезом они понимали весь процесс образования органической материи из неорганических элементов, проходящий за счет солнечной лучистой энергии. Соответствует ли теперешнее, наиболее распространенное понятие фотосинтеза этому единственно правильному классическому определению? Нет, к сожалению, часто не соответствует. Напротив, теперь все больше и больше укореняется явно неверное представление о том, что между интенсивностью фотосинтеза и конечным урожаем нет прямой связи и зависимости.

Газообмен растения со средой является существенной стороной фотосинтеза, но несомненно также, что он не определяет его полностью. Вероятно, есть и другие, не менее, а может быть и более, важные процессы, определяющие в общей совокупности синтез живого из неживого.

Сводить изучение фотосинтеза только к исследованиям газообмена нельзя. Об этом свидетельствует все большее и большее накопление материалов, говорящих о том, что лучший ход фотосинтеза и наибольшая продуктивность растений осуществляются иногда в противоположных условиях.

* К. А. Тимирязев. Сочинения, т. 3. Сельхозгиз, 1937, стр. 327.

** Вергилий. Сельские поэмы. Изд. АН СССР, 1932, стр. 72.

* Цитировано по К. А. Тимирязеву. Сочинения, т. 1. Сельхозгиз, 1937, стр. 223.

Невольно возникает вопрос, почему так медленно развивались знания, относящиеся к выявлению закономерностей использования растениями лучистой энергии солнца. Ведь они являются основой для вскрытия законов создания органического мира из неживой материи. Причина, которая могла затормозить развитие столь важного раздела естествознания, в значительной степени кроется в непостоянстве естественного солнечного освещения, очень затрудняющего постановку необходимых исследований. Даже простое определение отношения растений к свету, по которому судят об их светолюбии, и то сталкивается с большой трудностью.

Еще труднее вести исследования, выясняющие потребности растений в спектральном составе солнечного излучения. Решение последнего вопроса невозможно без относительно длительного выращивания растений в цветном свете определенного спектрального состава и мощности, чего изменчивая солнечная радиация обеспечить не может. Кроме того, в южных районах, где погода наиболее устойчива, ходу подобных исследований не могут не мешать ночные периоды с полным отсутствием солнечного излучения. Тем не менее, с развитием техники изготовления устойчивых стеклянных фильтров опыты с естественным освещением начали проводить. Характерной особенностью их является длительность. К тому же они выясняют влияние только широких областей спектра, а не отдельных его участков.

Работы К. А. Тимирязева с использованием отдельных участков цветного света, полученного при помощи разложения солнечного луча стеклянной призмой, не позволяли проводить длительных опытов, а тем более выращивать растения в этих условиях. Поэтому К. А. Тимирязев и был вынужден в своих исследованиях ограничиться только выяснением спектров поглощения хлорофилла и учетом фотосинтеза отдельных листьев в кратковременных опытах.

Трудности работы с солнечным освещением для решения основных проблем ботаники привели к стремлению в ряде опытов заменить естественное освещение искусственным, находящимся полностью в руках экспериментатора.

Раньше чем возник вопрос о возможности культуры растений на искусственном освещении были сделаны

попытки использования последнего для того, чтобы вызвать отдельные процессы жизнедеятельности растительных организмов. Так, великий русский ученый М. В. Ломоносов в конце ноября 1752 г. на одном из придворных праздников устроил иллюминацию с целью показа действия света на движение листьев растений.

Объяснение иллюминации М. В. Ломоносов дал в специально написанных им стихах:

«Когда ночная тьма скрывает горизонт,
Скрываются поля, леса, берега и понт.
Чувствительны цветы во тьме себя сжимают,
От холоду кроются и солнца ожидают».

В темноте растения, из которых М. В. Ломоносов устроил картину сада, стояли со сложенными листьями, но вот вспыхнула иллюминация, изображающая восход солнца:

«Но только лишь оно в луга свой луч прольет,
Открывшись в теплоте сияет каждый цвет,
Богатство красоты пред оным отверзает
И свой приятный дух, как жертву, проливает...» *

и сад М. В. Ломоносова развернул листья навстречу свету.

Позже, в 1865 г., А. С. Фаминцин применил искусственное освещение уже к изучению основного процесса жизнедеятельности растений — фотосинтезу. Подвергая действию света керосиновых ламп, снабженных специальными рефлекторами, водоросль (спирогира), находившуюся в блюде с водой, он наблюдал образование крахмала в ее хлоропластах.

Таким образом была доказана возможность фотосинтеза в условиях не только солнечного, но и искусственного освещения, даже и такого слабого, какой давали керосиновые лампы.

Вскоре А. С. Фаминцин и И. П. Бородин на свету ламп сперва с керосиновой, а потом и газовой горелкой с успехом изучали прорастание спор, деление клеток, движение растений и т. д. Поэтому нет ничего удивительного, что вслед за открытием электрического

* М. В. Ломоносов. Сочинения в стихах. СПб., 1893, стр. 166.

освещения начались попытки его использования и для выращивания растений. Однако еще раньше этого, с введением на городских улицах газового освещения, были сделаны интересные наблюдения за поведением деревьев, находящихся около фонарей. Оказалось, что те части кроны деревьев, на которые непосредственно попадал свет, осенью не сбрасывали листьев, и тем самым обычные листопадные виды становились вечнозелеными.

Первая попытка использования электрического освещения для воздействия на растения, по-видимому, принадлежит Мангону (H. Mangon) и относится к 1860—1861 гг. Этот автор применил свет электрической дуги для наблюдений за позеленением и фототропическими изгибами проростков. Затем в конце прошлого столетия Сименс (C. W. Siemens) в Англии, Дегерен (P. P. Dehérain) и Бонье (G. Bonnier) во Франции впервые демонстрировали опыты с выращиванием растений на электрическом освещении.

В то же время, в 1882 г., К. А. Тимирязев выступил со специальной лекцией, посвященной вопросу о возможности выращивания растений на электрическом освещении. На ней впервые при помощи волшебного фонаря было продемонстрировано действие электрического освещения на процесс разложения углекислоты водяными растениями. В этой лекции К. А. Тимирязев прежде всего разобрал опыты Сименса и Дегерена. Он показал, что первый (Сименс), несмотря на наличие в его распоряжении целой теплицы, снабженной мощными дуговыми лампами, не сумел прибавить ничего нового к тому, что было известно о действии на растения других, не электрических, искусственных источников освещения. Второй (Дегерен) «...брал сосуды емкостью приблизительно в литр, наполнял их водою, содержащей углекислоту и стебельки *Elodea*, и количество кислорода измерял целыми десятками кубических сантиметров. Но какой же результат дали эти опыты? Далеко не блестящий: приборы с *Elodea*, помещенные на расстоянии двух и трех метров от регулятора (в 2000 свечей), в шесть и восемь дней непрерывного освещения дали такое количество кислорода, какое при летнем солнце получилось бы в один час, — другими словами, главный процесс питания растений происходил приблизительно в 150 раз слабее, чем при солнечном свете»*.

Отсюда можно видеть, как неутешительны были результаты первых опытов с действием на растения электрического освещения. Однако это не помешало К. А. Тимирязеву высказать полные оптимизма предположения о будущей роли электрического освещения в решении теоретических вопросов физиологии растений. Он говорил: «...теперь уже можно предвидеть любопытные результаты для чисто научного изучения явлений растительной жизни при помощи этого света (электрического — Б. М.)»*. Но самым важным для нас является положение К. А. Тимирязева, сформулированное им в той же лекции так: «Во всяком случае, опыт над выделением кислорода доказывает, что коренного, качественного различия между действием электрического и солнечного света не существует»*. Оно положено в основу всех наших светофизиологических исследований и привело к существенным результатам.

Из первых ботанических работ с электрическим светом (также с вольтовой дугой) особенно интересны опыты, проведенные Бонье. Этот исследователь выдерживал растения параллельно на непрерывном освещении и на 12-часовом дне с последующей 12-часовой ночью. Ему удалось показать не только наличие приростов растительной массы под воздействием электрического света, но и зависимость их от продолжительности периода ежесуточного освещения. Этот же фактор сказался и на изменении в анатомическом строении, и на окраске растений. Можно считать, что первые актиноритмические закономерности были вскрыты в опытах с электрическим освещением, а не с естественным светом.

Все исследователи конца прошлого века, пользовавшиеся в своих работах электрическим освещением, применяли излучение вольтовой дуги, пропущенное через стеклянные и водяные фильтры. Первая попытка использовать для культуры растений свет ламп накаливания была сделана в 1895 г. Рэном (F. W. Rane), зажигавшим над растениями в ночные часы угольные 16-свечовые лампочки. Однако в то время из-за несовершенства электрического освещения предпочитали пользоваться

* К. А. Тимирязев. Сочинения, т. 3. Сельхозгиз, 1937, стр. 326 и 327.

другими источниками освещения и, в частности, газовой горелкой Ауэра. Пользуясь ее светом, В. Н. Любименко провел свои ранние опыты, посвященные изучению фотосинтеза. Только в 1910 г. Тэленом (O. Thelen) были испробованы новые в то время источники электрического света — ртутная лампа с увиолевым стеклом и лампа Нерста. Первая оказалась для культуры растений совершенно непригодной, а вторая была рекомендована им для добавочного освещения в пасмурные дни зимой.

Электрическое освещение для культуры растений в теплицах зимой одним из первых использовал Г. Клебс (G. Klebs). Он показал, что некоторые виды, в частности молодило (*Sempervivum*), не цветут в зимние месяцы из-за малой продолжительности дня. Благодаря продлению зимних дней электрическим светом молодило стало цвести. Исследования Г. Клебса и последовавшие затем актиноритмические работы других авторов послужили новым толчком к расширению опытов, посвященных изучению действия электрического освещения на растения.

Наибольший интерес представляют работы Н. А. Максимова. Ему удалось вырастить ряд растительных видов полностью на электрическом освещении, начиная от посева и кончая сбором новых семян. В своих первых опытах он пользовался обычными 500- и 1000-ваттными лампами накаливания, которые находились в темной камере примерно на высоте 1 м и горели над растениями. Объектами его исследований были пшеница, ячмень, горох, фасоль, гречиха и т. д. Пшеница, ячмень и горох дали вполне нормальные семена и при этом в очень короткие сроки — за 40—60 дней. Исходя из полученных результатов, Н. А. Максимов тогда же рекомендовал широкое использование электрического освещения контрольными семенными станциями и селекционными учреждениями. Последние при использовании электрического освещения получали возможность, выращивая несколько поколений в год, ускорить селекционный процесс. Кроме того, для селекционеров электрическое освещение открыло возможность получения одновременного цветения видов, цветущих в природе в разные сроки, и тем самым упрощало задачу их скрещиваний.

Доказав возможность замены естественного освещения электрическим при выращивании растений от семени до образования новых семян, Н. А. Максимов открыл новую страницу светофизиологических исследований.

В 1932 г., принимая участие в организации Агрофизического института, Н. А. Максимов явился одним из инициаторов создания специальной лаборатории светофизиологии и светокультуры растений, научной деятельностью которой он неизменно интересовался до конца жизни. Первым руководителем этой лаборатории был В. П. Мальчевский.

Помимо исследований, проводимых в этой лаборатории, дальнейшему развитию светокультуры растений способствовали также опыты Н. А. Артемьева в Московской сельскохозяйственной Академии им. К. А. Тимирязева.

Работы Н. А. Артемьева были посвящены изучению воздействия электрической энергии на жизнь растений. Проведя свои первые исследования в полевых условиях, он убедился в их бесполезности из-за сильного варьирования всех основных условий среды, окружающей растения. Желая устранить это неравенство и сделать все условия опытов контролируемыми, Н. А. Артемьев, по его словам, «...разработал способ исследования, исключая изменчивую игру физических факторов и прежде всего света»*. Для этого ему пришлось сконструировать установку, названную им люменостатом, так как в ней постоянство света любой силы могло быть строго поддерживаемо. При этом, конечно, пришлось отказаться от естественного освещения. Источником света в его люменостатах была 500-ваттная лампа накаливания. Объектами опытов являлись огурцы, томаты, овес, вика, капуста, салат, декоративные культуры: лобелия, астра, фуксия, цинерария, бромелия, гвоздика, канна, орхидеи, розы, акация и наконец лимон.

Огурцы давали плоды за 62 дня, но изменяли форму плодов от обычной (сорт Муромский) к грушевидной. Канна и орхидеи почти непрерывно цвели. Цвели и

* Н. А. Артемьев. Проблемы энергетического воздействия на рост растений. Изд. ВАСХНИЛ, 1936, стр. 19.

другие декоративные культуры. Томаты и овес не дошли до плодоношения.

Неблагоприятно влияние искусственного света сказывалось на капусте и салате — они вытянулись и полегли.

Энергодействие на рост растений, по Н. А. Артемьеву, представляет комплексную проблему, правильное решение которой возможно только при четком расчленении отдельных видов действующей энергии — тепловой (теплокультура), световой (светоккультура) и электрической (электрокультура). Дальнейшего развития работы подобного направления не получили.

Из зарубежных исследований заслуживают внимания работы Одена (S. Oden) в Швеции, Гарвея (K. Harvey) и группы работников Бойс-Томсоновского института в Америке, Роденбурга в Нидерландах и т. д.

Работы Одена были вызваны созданием в Швеции общества по культуре растений на электрическом освещении. Они интересны тем, что в них количество лучистой энергии определялось по пирометру (Онгстрема) и выражалось в калориях.

Гарвей, выращивая на электрическом освещении большое количество видов, пытался дать сравнительную оценку их «светолюбия», но большинство растений в его опытах было далеко от нормального состояния.

Много лет изучается действие света на растения в Бойс-Томсоновском институте. При постройке его были созданы установки, позволяющие выращивать растения на фоне различных внешних условий. В частности, были построены специальные «спектральные» теплицы с остеклением, пропускающим только определенные отрезки солнечного спектра. Однако результаты этих работ очень скромны. О них можно судить по книге В. Крокера (W. Crocker) «Рост растений», представляющей собой сводку работ института за 20 лет. В ней имеется вывод о вредном действии искусственного света на некоторые культуры, например томаты, герань, колеус, при непрерывном освещении последних, без всяких попыток анализа этой вредности. Практических выводов из многолетней работы по изучению действия света на растения вообще не делается, и автор ограничивается только общими замечаниями. Вполне определенный практический вывод имеется только по вопросу о полезности досвечивания растений в зимнее время.

Во всех светофизиологических работах Бойс-Томсоновского института нет и намека на разработку приемов выращивания растений полностью на искусственном освещении. Именно поэтому, разбирая важный для светоккультуры вопрос о минимальной освещенности, необходимой для поддержания жизни растений, работники этого института берут основным объектом исследования калифорнийское мамонтово дерево. Даже, казалось бы, такой практический вопрос, как сравнительная оценка различных источников искусственной радиации, а именно: ламп накаливания, неоновых, натриевых и ртутных ламп, привел исследователей (J. M. Arthur, W. D. Steward, 1935) к такому выводу: «Между полосами излучения различных ламп, полосами поглощения пигмента хлорофилла и действием света этих ламп на накопление растительными тканями сухого веса нет никакой связи»*. Вопрос же о предпочтении того или иного источника электрической радиации для культуры растений оставлен открытым.

Роденбург (J. W. M. Roodenburg, 1930) сравнивал действие на растения света различных искусственных источников радиации (ламп накаливания, неоновых и ртутных) в тепличных условиях.

По его мнению, лампы накаливания при увеличении интенсивности их света перегревают и непомерно вытягивают растения, почему он и делает вывод об их ограниченном применении (только при культуре теплолюбивых видов). Неоновые лампы Роденбург выдвигает на первое место, считая их наиболее пригодными для культуры растений с дополнительным электрическим освещением. Что касается ртутных ламп, то их назначением было, главным образом, выяснение вопроса о потребностях растений в ультрафиолетовом излучении. Таковых не оказалось, а сами лампы были признаны им непригодными к использованию, так как состав их света мало подходит к тому, который признается необходимым для фотосинтеза.

Наконец, в числе главнейших иностранных работ нельзя не остановиться на исследованиях французских авторов Трюфо (T. G. Truffau) и Турнейсена (G. Thur-

* В. Крокер. Рост растений. Пер. с англ., изд-во иностранной литературы, 1950, стр. 277.

появил), опубликованных в 1929 г., которые поставили своей целью вырастить на электрическом освещении вполне нормальные растения, ничем не отличающиеся от солнечных. Для осуществления своей цели они использовали круговое движение (14 оборотов в минуту) двух 1200-ваттных ламп накаливания, находящихся на одном горизонтальном стержне. Движением ламп они старались достичь равномерности освещения растений. Последние находились ниже их на 120 см. В результате у фасоли были получены нормально созревшие семена, а ягоды земляники созрели за 40 дней.

Принцип подвижных осветительных установок был использован и в СССР инженером И. Н. Финкельштейном. В 1937 г. им была предложена подвижная осветительная установка с возвратно-поступательным, благодаря бесконечному тросу и двухходовому червяку, движением ламп. По мысли автора, движение позволяло набегать неравномерности освещения растений и затемнения их от естественного света неподвижной арматурой.

Лаборатория светофизиологии АФИ начала свою экспериментальную работу с мая 1932 г. Основной ее задачей в предвоенный период была разработка методов применения искусственного света при выращивании сельскохозяйственных растений для повышения их урожайности и получения нескольких поколений в год для селекционных целей. Несколько позднее наметился второй раздел исследований лаборатории — изучение действия качества света на растения. Кроме того, В. П. Мальчевский большое внимание уделял применению искусственного света для ускорения роста и развития сеянцев древесных пород. Итоги всех этих исследований изложены им и его сотрудниками в Трудах лаборатории, изданных в 1938 г., и в его отчетах, частично опубликованных в Трудах Института Физиологии растений АН СССР.

Наиболее интересными из них являются следующие: 1) получение в год пяти поколений ранних сортов ярных пшениц; 2) получение зрелых плодов томатов за 100 суток на искусственном освещении; 3) ускорение роста сеянцев древесных пород; 4) разработка приемов выращивания рассады томатов с досвечиванием ее электрическим светом и т. п.

Опытами В. П. Мальчевского, С. И. Доброхотовой и других его сотрудников было охвачено свыше 50 видов (не считая сортов) растений. Варьировалась ежесуточная продолжительность освещения. Велись работы по «фотоиндукции», разрабатывался прием так называемых световых ударов. Конструировались приборы для оценки световых условий выращивания растений. Много внимания уделялось действию спектрального состава света на ростовые процессы, на развитие растений, на их морфологию и анатомию.

Основным источником электрического освещения в лаборатории в тот период были 300—500-ваттные лампы накаливания, горевшие в различной арматуре, в основном в глубокоизлучателях и боковых софитах.

Кроме того, в лаборатории имелись стеклянно-ртутные лампы, натриевые лампы и неоновые рекламные трубки. Лампы накаливания, снабженные колпаками, для получения наиболее равномерного освещения располагались над стеллажами в темных помещениях в шахматном порядке на расстоянии 0,9 м одна от другой и на высоте 75—100 см от вершин растений. Температура воздуха в этих помещениях поддерживалась на уровне 22—25°; относительная влажность 50—60%. Освещенность растений колебалась в пределах от 4000 до 8000 лк. В этих условиях особенно хорошо росли древесные виды. В их числе изучались: сосна, ель, лиственница, береза, боярышник, шиповник, лещина, липа, желтая акация, обыкновенный ясень, барбарис, американский ясень и американский клен. Почти все эти виды в условиях непрерывного электрического освещения быстро росли и образовывали большую вегетативную массу, что В. П. Мальчевский приписывал действию спектрального состава излучения ламп накаливания. Однако видную роль в скорости роста сеянцев и саженцев древесных видов играет и длинный день, а тем более непрерывное освещение.

Что касается ускорения развития сеянцев, то за время опытов у В. П. Мальчевского на первом году жизни зацвел шиповник, который в дальнейшем цвел по два раза в год.

К сожалению, в довоенных работах лаборатории основной источник электрического освещения — лампы накаливания — использовался неправильно.

Стремись к увеличению площади, освещаемой одной лампой, обычно 500-ваттной, ее подвешивали на высоту в 100 см над растениями и тем самым ухудшали их рост и снижали продуктивность. Высокий подвес ламп над растениями применялся как из боязни перегрева растений, так и из желания максимально расширить освещаемую ими площадь. Это приводило к резкому снижению мощностей лучистого потока, достигающего до растений, и эффект от применения искусственного освещения был незначителен.

Именно поэтому, начиная с 1945 г. и по настоящее время, в лаборатории светофизиологии АФИ, руководимой автором, проводятся исследования, направленные на выяснение условий, необходимых для наиболее полного использования света различными растительными организмами.

С 1946 г. в лаборатории светофизиологии начались первые в СССР опыты по выращиванию растений полностью в лучистом потоке люминесцентных трубок, так называемых ламп дневного и белого света. Эти опыты были проведены прежде всего с листовыми овощными культурами: салатом, шпинатом и укропом. Все они очень плохо растут в обычных условиях электрического освещения, создаваемого за счет горения отдельных ламп накаливания. Даже при освещении 500-ваттными лампами, используемыми в арматуре типа «Глубокоизлучатель», растения этих видов обычно ненормально вытянуты. Отсюда напрашивался вывод о непригодности этих культур для выращивания на электрическом освещении. Это и понятно: малое количество дешевой продукции требовало для своего формирования значительных затрат электроэнергии, и потому их электро-светоккультура не могла быть рентабельной.

Первая партия 15-ваттных люминесцентных трубок была получена в 1946 г., и сотрудникам лаборатории пришлось разработать схему установок, пригодных для выращивания растений.

После выбора схемы и изготовления необходимого количества дросселей люминесцентные 15-ваттные трубки были смонтированы на металлических каркасах размером 1,5×0,5 м с расстоянием между осями трубок 60—70 мм. Указанные расстояния были приняты, исходя из светотехнических соображений, и полностью оправда-

лись результатами выращивания растений. Оказалось, что и салат, и шпинат, и укроп, находясь на свету только люминесцентных трубок, имели совершенно нормальный вид и образовали за короткий срок значительную вегетативную массу, причем салат и особенно укроп долго оставались, несмотря на непрерывное освещение, в вегетативном состоянии. В этих опытах была обнаружена задержка цветения некоторых видов светом люминесцентных трубок.

Отметим, что люминесцентный свет задерживает переход от роста к репродукции у всех длиннопневных видов.

Так, ветвистая пшеница в возрасте 25 дней, выращенная на свету ламп накаливания, колосится, а на свету люминесцентных трубок не колосится, хотя в обоих случаях освещение было непрерывным (рис. 1).

В начале следующего 1947 г. на люминесцентном освещении выращивали главным образом салат, шпинат, редис и землянику. Эти культуры были выбраны по общему признаку — расположению листьев почти в одной плоскости, что удобно для выращивания на искусственном освещении. Как известно, три первые культуры — шпинат, салат и редис — относятся к растениям длинного дня, в условиях которого очень быстро переходят к плодоношению. Быстро развиваясь на длинном дне, они дают малую товарную продукцию. Редис плохо образует корнеплоды, а у салата и шпината развивается небольшое число листьев, предшествующих появлению цветоносов.

На люминесцентном же освещении все три культуры накапливали вегетативную массу лучше всего на длинном дне. В частности, редис образовывал самые крупные корнеплоды при продолжительности суточного освещения в 22 часа. В этих условиях рост его шел наиболее быстро, цветочные стебли не появлялись. При сокращении ежесуточного периода освещения люминесцентным светом снижалась продуктивность растений, и уже на 18-часовом дне корнеплоды не формировались. Отсюда можно сделать заключение о малой мощности лучистого потока люминесцентных ламп для культуры некоторых видов растений. Количество витамина С в корнеплодах редиса и в листьях салата и шпината, выращенных на длинном дне, создаваемом за счет

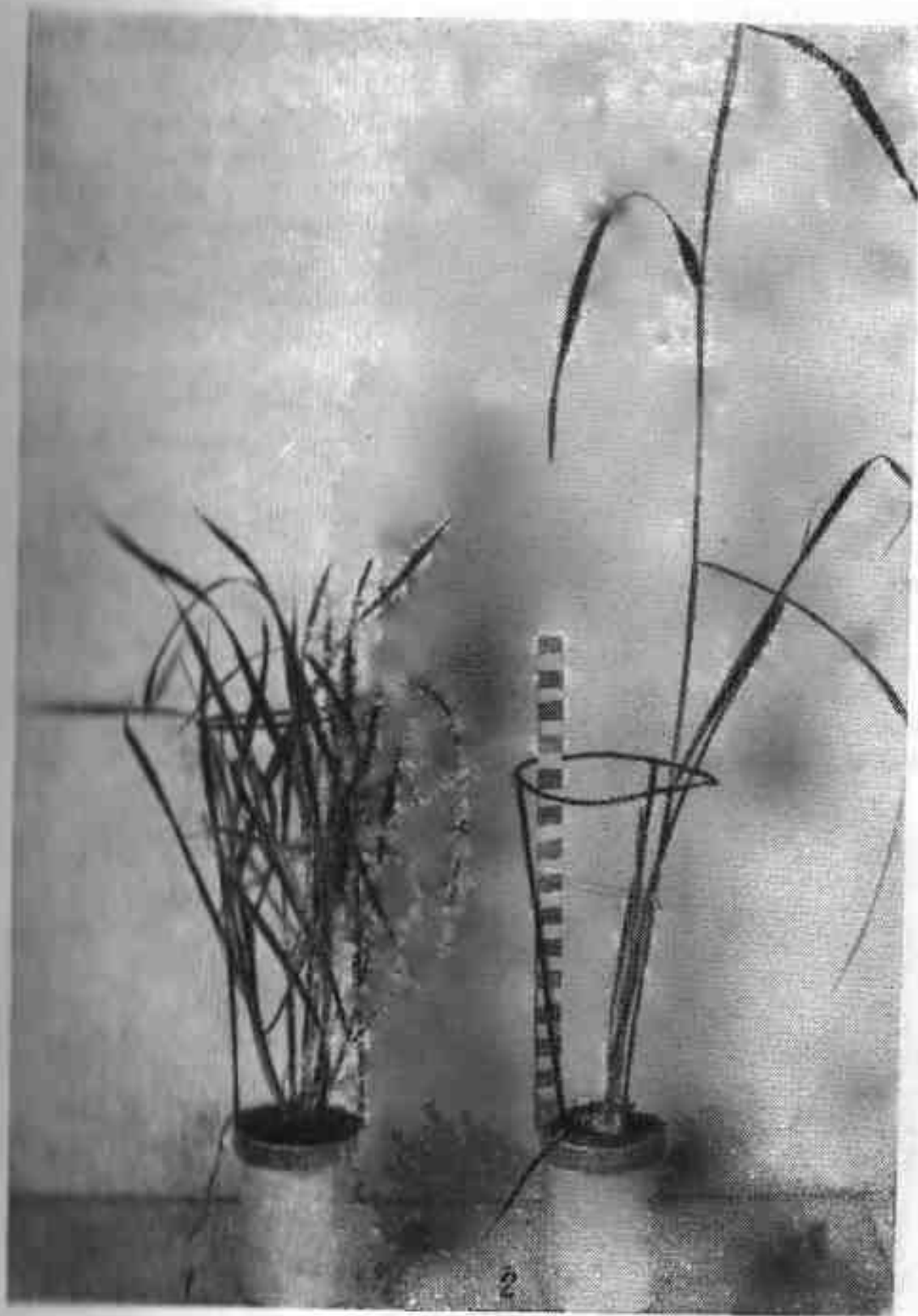


Рис. 1. Пыльная пшеница, выращенная на боковом освещении.
1 — люминесцентными лампами, 2 — мелкими (автомобильными) лампами накаливания.

люминесцентных трубок, было равно его содержанию в условиях нормальной культуры на естественном освещении. Средний вес 10 растений редиса (сорт Розовый с белым кончиком) за 28 суток выращивания его даже на 16-часовом ежедневном люминесцентном освещении достигал 78 г, а на непрерывном освещении, в этих же условиях культуры, доходил до 150—160 г. Очень хорошо на люминесцентном освещении рос и укроп, давая большое количество листьев, но сильно запаздывал с переходом к цветению (на 20 суток против нормы).

Аналогичное явление мы наблюдали и при культуре земляники. Так, при выращивании ремонтантного мелкоплодного сорта Солимахер, начиная с посева семян и до плодоношения, в лучистых потоках ламп накаливания (в установке с водяным фильтром) и люминесцентных трубок отмечено значительное различие в росте и развитии ее сеянцев. Растения выращивали по одному в горшках емкостью на 0,5 кг почвы. Длина периода освещения во всех случаях равнялась 18 часам, температура воздуха днем 25—27°, а ночью — 22—25°.

Сеянцы земляники в установке из ламп накаливания зацвели через 30 дней после появления всходов и дали зрелые ягоды при обильном плодоношении через 50—55 дней после всходов. За 65 дней (считая от всходов) с одного среднего куста было собрано по 120 ягод высоких пищевых достоинств (до 7% сахаров).

Сеянцы земляники на люминесцентном освещении зацвели на 15 дней позже, а массовое созревание ягод началось только на 80-й день от посева. Средний урожай с куста не превышал 80 ягод, качество их было ниже по содержанию как сахаров, так и витамина С.

Характер роста кустов земляники на свету ламп накаливания и на люминесцентном освещении также значительно различался (рис. 2). Кусты, выросшие в осветительной установке с лампами накаливания, были более мощными, раскидистыми и почти в два раза превосходили по весу кусты, выросшие на люминесцентном освещении. Сырой вес первых достигал 170 г, а вторых только 80 г. Заслуживает особого внимания факт плодоношения сеянцев земляники в условиях высоких температур без какой-либо яровизации. Так же вели себя и крупноплодные сорта земляники. Причем при посадке усов они давали ягоды через 30—40 дней.

По-разному реагируют на излучение ламп накаливания и люминесцентных также сеянцы древесных видов. Это видно из опыта, в котором сеянцы белой акации выращивались в лучистом потоке люминесцентных 30-ваттных ламп и в осветительной установке, состоящей из зеркальных ламп накаливания. Продолжительность освещения в обоих случаях равнялась 18 часам в сутки, и все другие условия выращивания были одинаковыми. В возрасте двух месяцев высота растений, количество междоузлий и общая листовая масса были значительно большими у сеянцев, выросших на свету ламп накаливания (рис. 3).

В 1947—1948 гг. изучение поведения растений в условиях люминесцентного освещения начато А. Ф. Клешиным под руководством Н. А. Максимова (Институт Физиологии растений АН СССР). Несколько позже к аналогичным исследованиям, также по инициативе Н. А. Максимова, приступил В. М. Леман (кафедра физиологии и микробиологии растений ТСХА) и С. В. Тагеева (Институт биофизики АН СССР).

Эти и другие исследования, как в нашей стране, так и за рубежом, создали прочный фундамент для нового вида растениеводства, пользующегося искусственным

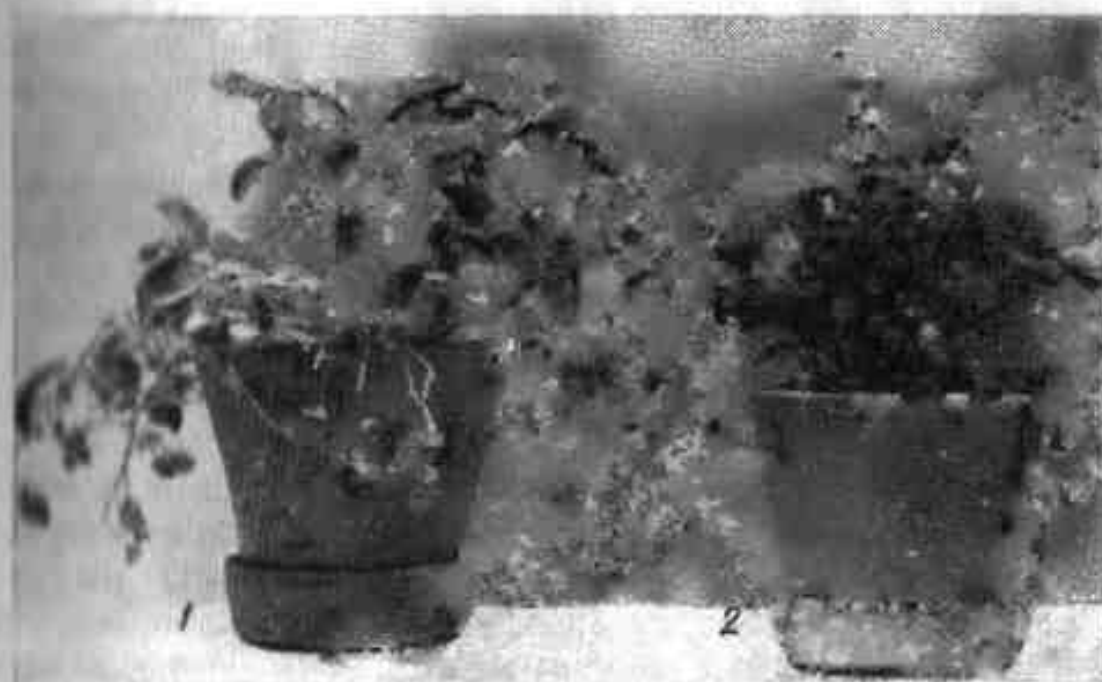


Рис. 2. Ремонтантная земляника в 45-дневном возрасте (от всходов).

1 — освещение лампами накаливания, 2 — люминесцентное освещение.



Рис. 3. Сеянцы белой акации из осветительных установок с люминесцентными лампами (1) и с зеркальными лампами накаливания (2).

вещением, и, вместе с тем, значительно продвинули вперед общие представления о значении света в жизни растений.

В 1959 г. в лаборатории светофизиологии проводились опыты по выращиванию томатов и огурцов в лучистых потоках, создаваемых дуговыми ртутно-люминесцентными лампами (ДРЛ). Томаты сорта Пушкинский 1853 выращивались при освещении четырьмя 500-ваттными лампами ДРЛ на 1 м² при общей электрической мощности 2 кВт. Эти лампы использовались в armатуре типа «Глубоконалучатель», покрытой изнутри для лучшего отражения света алюминиевой краской. Мощность лучистого потока на уровне вершин растений (20—25 см от ламп) измеряли пиранометром Янишевского, она оказалась равной в среднем 300 Вт/м² (освещенность — 20 000—30 000 лк). Продолжительность горения ламп в течение суток равнялась 14 часам.

На 1 м² под лампами ДРЛ размещали 25 растений томатов в почвенно-водной культуре, при которой верхняя часть корневой системы находится в почве, средняя — в воздухе, а нижняя, наиболее активно растущая, — в питательном растворе Гельригеля половинной концентрации. Питательный раствор находился на дне баков, каждый из которых имел следующие размеры (в см): длина 100, ширина 100, высота 20. В верхней части баков помещались специальные квадратные сосуды с сетчатым дном, наполненные почвой, в которых выращивалось по одному растению. Раствор подавался в бак электронасосом, смонтированным в баке с раствором, а слив раствора в тот же бак происходил самотеком. По мере использования раствор доливался новым той же концентрации или водой.

Рост томатов под лампами ДРЛ, особенно в первое время, шел несколько медленнее, чем в обычной световой установке с 16 зеркальными лампами накаливания мощностью каждая 300 Вт. В результате этого под лампами ДРЛ растения были более компактными и меньшими по размерам. При освещении лампами ДРЛ бутонобразование наблюдалось на 15-й день от появления всходов, цветение — на 30-й, завязывание плодов — на 36—37-й, созревание — на 65-й день. Запаздывание в сроках развития, по сравнению с растениями из установки с зеркальными лампами накаливания, составляло 5 дней.

Цветы томатов через 3 дня после раскрытия обрабатывали ростовым веществом «ТУ» (натриевая соль 2,4,5-трихлорфеноксиуксусной кислоты), взятым в виде водного раствора при концентрации 25 мг на 1 л.

За 65 дней культуры с 1 м² площади, освещаемой лампами ДРЛ, был получен урожай плодов томатов, равный 8 кг, при затратах электроэнергии 1820 кВт·ч. Затраты электроэнергии на 1 кг плодов составляли соответственно 228 кВт·ч. При среднем урожае плодов на одно растение 320 г у двух растений из 25 урожай достигал 480 г. Это свидетельствует о том, что средняя продуктивность растений может быть увеличена. Принимая во внимание компактную форму растений, можно довести их число в установке (1 м²) до 36 и, таким образом, при тех же затратах электроэнергии рассчитывать на получение урожая плодов не менее 14 кг с 1 м². В этом случае затраты электроэнергии на 1 кг плодов снизятся до 130 кВт·ч.

Кроме того, добавление красно-оранжевой радиации к излучению ламп ДРЛ за счет горения неоновых ламп дает дополнительные возможности увеличения урожая. При использовании установок с таким комбинированным освещением можно улучшить и качество плодов. Так, содержание витамина С при выращивании томатов на одних только лампах ДРЛ составляло 11 мг на 100 г, а при выращивании на лампах ДРЛ и неоновых (НД-1 или НД-2, применяемых для маяков) — 23 мг на 100 г. Первые ориентировочные опыты по выращиванию растений в комбинированном свете ламп ДРЛ и неоновых, как мы и ожидали, дали лучшие результаты, чем выращивание на одних только лампах ДРЛ.

В 1959 г. в лаборатории светофизиологии был впервые получен урожай плодов томатов сорта Пушкинский 1853 при выращивании их на люминесцентном освещении (лампы ДС или БС), равный 6 кг с 1 м². На 1 м² площади горели по 18 часов в сутки 18 люминесцентных ламп мощностью по 40 Вт. Растения в количестве 25 штук на 1 м² выращивались, как и обычно, в почвенно-водной культуре.

Так как установка с люминесцентными лампами потребляет наименьшее количество электроэнергии на 1 м² освещаемой площади (общая мощность установки — 0,8 кВт, с учетом потерь в дросселях), а урожай,

полученный за 75 дней, оказался достаточно высоким, затраты на 1 кг продукции составили всего лишь 100 кат·ч.

К сожалению, хорошие результаты по урожайности при выращивании томатов на люминесцентном освещении несколько обесцениваются низкими пищевыми качествами плодов. Кроме того, готовая продукция получается за длительный срок — 75 дней. Недостаточно высокое качество плодов при выращивании томатов в этих условиях связано со слабым лучистым потоком, создаваемым обычными люминесцентными лампами низкого давления. Поэтому добавление к люминесцентным лампам ламп накаливания или неоновых значительно улучшает результаты. Более того, установки с люминесцентными лампами требуют больших затрат материалов и времени при монтаже по сравнению с лампами накаливания и ДРЛ, а их световой поток при верхнем освещении трудно сконцентрировать в одном направлении, в связи с чем наблюдаются значительные потери света, достигающие 50%.

Наибольший урожай и лучшие плоды (по сахаристости и витаминности) получают в установке с зеркальными лампами накаливания. Однако затраты электроэнергии на 1 кг продукции, из-за большой мощности осветительной установки и низкой световой отдачи ламп накаливания, достигают в настоящее время 200 кат·ч, что превышает расход энергии при пользовании люминесцентными лампами. Несомненно, что расход электроэнергии на килограмм плодов в установках с зеркальными лампами накаливания будет неуклонно снижаться за счет повышения урожая и, предположительно, будет доведен до 100—120 кат·ч.

Первые опыты по выращиванию растений под лампами ДРЛ показали, что урожай томатов и скорость их развития выше, чем при люминесцентном освещении, и в некоторой степени приближаются к результатам, полученным при выращивании томатов на свету зеркальных ламп накаливания. Выше приводились соображения, показывающие возможность получения под лампами ДРЛ урожая плодов томатов, равного 14 кг с 1 м². Таким образом, расход электроэнергии на 1 кг продукции может быть снижен примерно до той же величины или даже несколько меньшей, чем при выращивании

растений на свету зеркальных ламп накаливания. Из сказанного выше следует, что лампы ДРЛ имеют преимущества при выращивании томатов перед люминесцентными лампами низкого давления.

Аналогичные данные по оценке ламп ДРЛ были получены и при культуре огурцов. Для выращивания рассады огурцов сорта Клинский местный лампы ДРЛ использовались так. Площадь в 1 м², на которой размещалось 100 растений, освещалась четырьмя 250-ваттными лампами ДРЛ. Продолжительность освещения в опытах равнялась 14 часам ежедневно. На 12-й день от появления всходов на каждом растении имелось по 3 настоящих листа; растения были компактной формы с укороченными междоузлиями (длина подсемядольного колена — 3—3,5 см, междоузлий — 0,5—0,8 см). Максимальная площадь листа достигала 168 см². Вес массы одного растения составлял в сыром виде 7,8 г, в сухом — 0,6 г (среднее из 10 определений). Таким образом, лампы ДРЛ обеспечивают получение хорошей рассады огурцов в сжатые сроки.

Лампы ДРЛ при использовании их для выращивания самых разнообразных растений имеют несомненные преимущества перед люминесцентными лампами. По сравнению с ними они обладают значительно большей мощностью лучистого потока и простотой в эксплуатации.

Световая отдача ламп ДРЛ в два с лишним раза превышает световую отдачу ламп накаливания. Лампы ДРЛ можно использовать без водного фильтра, а это в значительной степени облегчает обращение с ними в условиях практического растениеводства; их можно подвешивать прямо над стеллажами, не боясь ожогов растений (расстояние от растений до ламп 25—30 см).

Очевидно, что выращивание растений в условиях искусственного освещения достигнет наивысшего прогресса одновременно с прогрессом светотехники. Появление новых мощных электрических ламп, особенно ламп, спектр излучения которых будет наиболее близок к солнечному, приведет светофизиологию и светокультуру растений на новые и, несомненно, весьма перспективные рубежи. Примером сказанного могут служить первые, и пока отдельные, результаты использования для выращивания растений мощных газоразрядных ксеноновых

лами высокого давления. Лампы этого типа известной фирмы «Осрам» испытывались Рюшем — Мюллером (Hüsch — Müller) в опытах по ассимиляции, результаты которых были опубликованы в 1957 г.

В нашей стране первый опыт по выращиванию растений в лучистом потоке ксеноновой лампы отечественного производства провели В. М. Леман и О. С. Фантазов в лаборатории искусственного климата ТСХА. Они пользовались отечественной лампой, изготовленной в опытно-производственном порядке, мощностью в 6 кВт с водяным охлаждением и с интенсивностью светового потока, близкого по спектру к солнечному, более 200 000 лм.

Поместив такую лампу в темной камере, они, по их сообщению, вырастили при помощи ее излучения урожай томатных растений сорта Пушкинский 1853 за 88 суток от появления всходов. Причем средний урожай с одного куста достигал 700 г, а отдельных растений — 840 г. В опыте на 1 кг плодов томатов было затрачено менее 150 кВт·ч электроэнергии.

Интересны и последующие опыты этих же авторов, где они использовали одну ксеноновую лампу для освещения в м² стеллажа при выращивании томатной рассады с небольшими затратами электроэнергии на одно растение. В этом случае ксеноновая лампа помещалась над серединой освещаемого стеллажа на высоте 1 м. Даже при таком высоком подвесе и при освещении такой значительной площади большая часть рассады томатов оказывалась близкой по своему состоянию к рассаде, выращенной в лучистом потоке люминесцентных 30-ваттных трубок.

Следовательно, при использовании ксеноновой лампы в теплице для досвечивания при выгонке рассады она заменяет около 150 люминесцентных 30-ваттных трубок и не менее 10 ламп ДРЛ мощностью 500 вт каждая.

Несомненно, что дальнейшее освоение ксеноновых ламп как основного источника искусственного освещения при выращивании растений сулит много новых и интересных результатов и остается только пожелать, чтобы их выпуск в необходимых масштабах был скорее осуществлен нашей промышленностью одновременно с новыми приспособлениями.

ЕСТЕСТВЕННОЕ И ИСКУССТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

СОЛНЕЧНЫЙ СВЕТ

Когда идет речь о солнечном свете как о факторе, необходимом для жизни растений, следует помнить, что это не вообще излучение солнца, а только та его часть, которая, видоизменяясь в атмосфере, доходит до земли, все время меняющей свое положение в пространстве.

Самое простое, что можно сказать о солнце, это то, что оно каждый день всходит и заходит в точках небосклона, которые весной смещаются к северу, а осенью начинают отступать к югу. В связи с этим изменяется длина солнечного пути над данным районом земли, а следовательно, и продолжительность дня и ночи. Именно поэтому в процессе длительной эволюции растительные организмы, так же как и другие представители живого мира, непрерывно подвергались воздействию суточных ритмов солнечной лучистой энергии, присущих определенным географическим районам. Сезонные и годовые изменения в чередованиях дня и ночи привели к возникновению суточной и сезонной ритмики физиологических процессов, определяющих жизнедеятельность всех фотосинтезирующих растений.

Днем, т. е. в течение периода, когда солнце находится над горизонтом, его излучение — свет, изменяясь количественно и качественно, обеспечивает растения необходимой энергией, которую они используют не только на текущие физиологические процессы, но

одновременно и связывают в своем теле, превращая из энергии кинетической в энергию потенциальную.

Ночью, когда солнце находится за горизонтом, растения не получают солнечной энергии и все их жизненные процессы, идущие в темноте, осуществляются за счет освобождения энергии, накопленной ими ранее, в дневное время.

Всю энергию, которую растение получает от солнца, издавна принято называть светом по аналогии с той частью излучения солнца, которую человеческий глаз воспринимает как свет.

В действительности, как будет показано ниже, активно воздействующей на растение является и радиация, характеризующаяся электромагнитными колебаниями, невидимыми для человеческого глаза. В настоящее время понятие физиологически активной радиации непрерывно расширяется. И это совершенно естественно и закономерно.

Практически в светофизиологии растений понятия свет, лучистая энергия, радиация неразрывно связаны с солнечным электромагнитным излучением и являются синонимами. Есть солнце над горизонтом — есть и свет, приносимый его лучами, нет солнца — нет света, царит ночь.

У академика С. И. Вавилова есть превосходное определение физического значения солнечных лучей: «Солнечные лучи несут с собой солнечную массу. Свет — не бестелесный посланник Солнца, а само Солнце, часть его, долетевшая до нас в совершенной, раскрытой, в энергетическом смысле, форме, в форме света» *.

Таким образом, свет — это носитель энергии, распространяющейся в космическом пространстве со скоростью, близкой к $300\,000\text{ м/сек}$ и обладающей периодическими свойствами. Кроме скорости и периодичности (частоты), свет обладает такими характерными для него качествами, как интенсивность, поляризация, дифракция, отражение и преломление.

Электромагнитные волны обладают всеми этими же физическими качествами, т. е. они отражаются, преломляются, поляризуются и обладают дифракцией. Отсюда

* С. И. Вавилов. Глаз и солнце. Изд. АН СССР, 1950, стр. 72.

появилось еще одно представление о свойстве света — он оказался электромагнитным явлением.

Именно это обстоятельство показало характер взаимодействия света и вещества. Вещество построено из электрически заряженных и нейтральных частиц (электронов, позитронов, протонов и т. д.). Всякое движение этих элементарных частиц порождает электромагнитные волны, т. е. свет.

По С. И. Вавилову: «Материя, т. е. вещество и свет, одновременно обладают свойствами волн и частиц, но в целом это не волны и не частицы и не смесь того и другого. Наши механические понятия не в состоянии полностью охватить реальность, для этого нехватает наглядных образов» *.

Свет всегда связан с веществом. Он в нем зарождается и в нем исчезает. Под действием света из вещества могут выбрасываться составные части атомов — электроны. Свет может производить в веществе различные химические изменения. Под воздействием света вещество может светиться само (рассеяние света, флуоресценция, фосфоресценция).

Поглощаясь веществом, свет нагревает его. Наконец, хотя и очень слабо, свет давит на вещество, как это было впервые показано русским физиком П. Н. Лебедевым.

Сравнительно недавно, в начале этого века, М. Планком (M. Planck) было показано, что свет может поглощаться и излучаться лишь вполне определенными порциями энергии — квантами. Квант света был назван также фотоном.

Воззрение на излучение света как на явление, имеющее в основе волновую природу, признает, что энергия распределяется равномерно по всей длине волны, однако квантовая теория исходит из представления о концентрации энергии отдельными сгустками, порциями — квантами. Энергия отдельного кванта, с точки зрения обычных представлений, очень мала, но в масштабе атомных явлений колоссальна. Считается, что энергия светового кванта близка к величине кинетической энергии молекулы при температуре $20\,000^\circ\text{C}$. Этой концен-

* С. И. Вавилов. Глаз и солнце. Изд. АН СССР, 1950, стр. 44—45.

трированностью энергии и объясняется сильное действие, оказываемое светом на вещество. При поглощении света в целом ряде веществ происходят химические реакции, изменяющие их внутреннюю структуру. Эти реакции называются фотохимическими.

Для выяснения более простых и конкретных проблем, связанных с использованием растениями лучистой энергии (света), вернемся к привычным актинометрическим представлениям.

Свет, доходящий до растений, может быть отнесен к трем категориям. Во-первых, к растениям приходят прямые солнечные лучи. Во-вторых, эти же лучи, но рассеянные в атмосфере и отраженные от земной поверхности. И, в-третьих, лучистые потоки, не связанные непосредственно с солнцем. Это излучение различных нагретых тел и в первую очередь земной и водной поверхности нашей планеты. Это слабые лучи далеких звезд и звездных миров (туманностей). Это, наконец, гамма-лучи с очень короткими волнами, возникающие в результате медленного распада некоторых радиоактивных атомов. Но все виды не солнечных излучений занимают в жизни растений совершенно ничтожное место по сравнению с солнечным лучистым потоком.

Помимо природных, не зависящих от человека, космических и земных излучений, растения за последнее время все больше и больше начинают подвергаться облучению созданных человеком источников искусственной радиации в виде различных типов электрических и других ламп. При этом полезно помнить, что, зажигая любую лампу, мы в конечном итоге потребляем опять-таки, хотя и очень малую, часть солнечной энергии, накопленной растениями в виде угля, дров и нефти.

Ведь и энергия водопадов, водных хранилищ и ветра также имеет в своей основе все ту же энергию солнечного излучения.

Искусственный свет, особенно мощных электрических ламп накаливания и ксеноновых высокого давления, имеет в своем спектральном составе много общего с солнечным светом.

Количество лучистой энергии, приносимое солнечными лучами на землю, огромно. Можно считать, что солнечные лучи повышают температуру поверхности

земли на 300° по сравнению с межпланетным пространством. Одновременно с нагревом земной поверхности, что приводит к перемещению воздушных масс, они совершают огромную работу по круговороту воды в пределах земной атмосферы.

Совершенно понятно, что такая колоссальная работа может совершаться только за счет столь же значительного количества энергии. И действительно, по подсчетам некоторых астрономов, лучистая энергия солнца, непрерывно поступающая на землю, характеризуется очень крупными величинами. Они считают ее равной работе 217 миллиардов 316 миллионов л. с. или, иначе, 543 млрд. паровых машин по 400 л. с. каждая, работающих день и ночь без остановки.

Для более полной характеристики солнца как источника энергии напомним, что указанное огромное количество лучистой энергии, попадающей на землю, составляет только одну двухмиллиардную часть того, что излучает солнце во все стороны.

Каков же характер этого излучения, что оно дает непосредственно растениям — вот вопросы, наиболее интересные для данной темы.

Излучающая поверхность солнца (фотосфера) имеет температуру около 6000° . При такой температуре все известные элементы находятся в парообразном состоянии и спектр их излучения близок к спектру абсолютно черного тела при той же температуре (рис. 4).

Атмосфера, окружающая землю, несколько изменяет характер солнечной радиации. В результате ее воздействия энергетический максимум излучения солнца у поверхности земли приходится на длину волн около 550 мкм, вызывающую в нормальном человеческом зрении ощущение желто-зеленого цвета. Любопытно, что этот максимум в солнечном излучении у поверхности

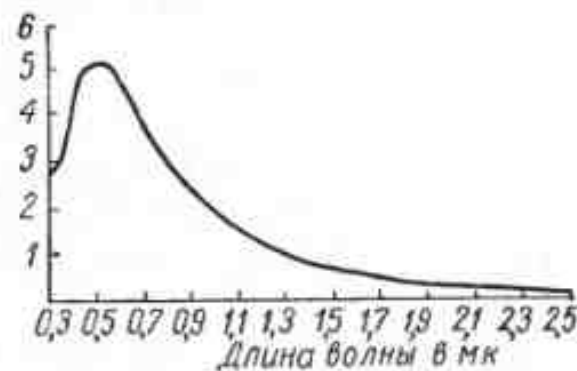


Рис. 4. Распределение энергии в солнечном спектре (по Н. Н. Калитину).

земли очень хорошо совпадает с максимальной спектральной чувствительностью человеческого глаза.

В обе стороны от энергетического максимума лежат другие спектральные участки излучения, быстро переходящие из видимой области за ее пределы. Особенно широка область невидимой солнечной радиации за границей оранжево-красного участка спектра. Это так называемая инфракрасная радиация. У другого конца видимого спектра занимает место ультрафиолетовая радиация, также невидимая человеком, но ее во много раз меньше, чем инфракрасной. Излучения, лежащие в пределах одинаковых длин волн, называются монохроматическими. Они являются простейшими элементами всякого излучения. Их бесконечно много. Они как бы составляют непрерывный ряд элементов, образующих сплошной спектр. Но только один небольшой отрезок совокупности излучений вызывает в наших глазах ощущение света. Физической характеристикой монохроматических излучений служат длины волн, или частота электромагнитного колебания, или энергия отдельных частиц лучистого потока — квантов. Длина волн убывает, а величина квантов возрастает от инфракрасной области спектра к ультрафиолетовой.

Скорость распространения лучистых потоков чрезвычайно велика. В межпланетном пространстве она равна для всех электромагнитных излучений и составляет 299 800 км/сек. Для наилучшего осознания значения этой скорости существует очень наглядное сравнение. Если бы можно было между землей и солнцем построить мост и пустить по нему поезд, идущий с постоянной скоростью 60 км/час, то он пришел бы с земли на солнце через 285 лет, а солнечный луч проносится через это огромное расстояние за 8 минут.

В средах, вызывающих преломление лучей, скорость распространения различных монохроматических излучений неодинакова. Например, в стекле и в воде красное излучение распространяется несколько скорее, чем фиолетовое.

Длина любой волны излучения (сокращенно λ) может быть измерена и при этом с большой точностью. Они (эти длины) представляют собой очень малые величины, не превышающие, например для видимых излучений, $1/1000$ мм. Для их выражения пользуются следую-

щими единицами: микрон (сокращенно μ) — миллионная доля метра, миллимикрон (сокращенно ммк) — тысячная доля микрона, ангстрем (сокращенно $\text{\AA}$) или десятитысячная доля микрона.

Видимая область излучения находится в пределах длин волн 0,4—0,8 μ , или 400—800 ммк , или 4000—8000 $\text{\AA}$.

Основные цветные участки спектра видимого излучения в их наиболее типичном виде выражаются следующими длинами волн:

фиолетовый цвет	.. 410 ммк	желтый цвет	... 580 ммк
синий	> .. 470 >	оранжевый	> ... 600 >
зеленый	> .. 520 >	красный	> ... 650 >

Все эти излучения в определенном энергетическом соотношении между собой при их одновременном воздействии на человеческий глаз создают впечатление белого света.

Как для фотосинтеза, так и вообще для нормального течения любых фотобиологических процессов жизнедеятельности растений нужен свет — лучистая энергия, не только определенного спектрального состава, но и соответствующей мощности. И то и другое, а также и продолжительность ежесуточного освещения, зависят от характера поступления на поверхность земли солнечного излучения.

В различные времена года на различных широтах высота солнца над горизонтом (измеряемая углом падения луча к поверхности земли) меняется от 0 до 90°, а продолжительность ежесуточного освещения — от полной темноты до непрерывного освещения. Оба эти фактора определяют количество приходящей на землю солнечной лучистой энергии. Чем меньше угол, под которым падают лучи солнца на землю, тем длиннее путь солнечного луча и больше атмосферная масса земли, лежащая на его пути.

За единицу массы атмосферы принято считать длину пути солнечного луча до поверхности земли при положении солнца в зените. Следующий ряд цифр показывает зависимость массы атмосферы, проходимой солнечными лучами, от высоты стояния солнца над горизонтом:

высота солнца	... 90°	60°	30°	10°	5°	3°	0,5°
масса атмосферы	... 1,0	1,2	2,0	5,6	10,4	15,4	35,4

Чем ниже солнце над горизонтом, тем большую массу атмосферы проходят его лучи, раньше чем попадают на землю. А так как атмосфера не является для солнечных лучей прозрачной средой, а, напротив, рассеивает и поглощает их составляющими ее элементами, то ее масса не может не сказываться на количестве и на качестве света у поверхности земли. Опыт показывает, что при среднем состоянии прозрачности атмосферы, в зависимости от ее массы, до земли доходят следующие количества лучистой энергии: при высоте солнца в 60° — 70%, при высоте в 30° — 60%, а при стоянии солнца над горизонтом под углом в 5° — только 20% радиации. Причем, от величины угла, под которым излучение падает на облучаемый предмет, зависит общее количество энергии, приходящейся на единицу поверхности. Чем меньше угол, тем на большую площадь распределяется энергия, приносимая лучистым потоком. При отвесном падении лучистого потока его энергия распределяется на наименьшей площади, и, следовательно, каждая точка этой поверхности получает максимальное количество энергии (рис. 5).

Если солнечный луч падает на земную поверхность под углом в 30° , то каждая единица этой поверхности получит энергии в два раза меньше по сравнению с поверхностью, на которую этот луч падает отвесно, т. е. под углом в 90° . Понятно, что с еще большим уменьшением угла падения лучей будет уменьшаться и количество лучистой энергии, приходящейся на единицу поверхности. Так, количество энергии, приходящейся на

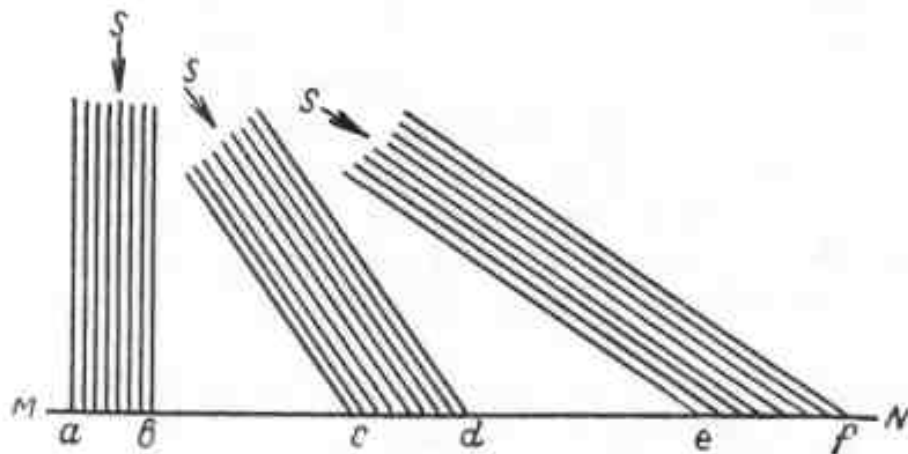


Рис. 5. Зависимость напряжения солнечной радиации от угла падения (по Н. Н. Калитину).

единицу поверхности, составляет при высоте солнца в 10° только $1/6$, а при высоте в 5° — всего $1/12$ часть энергии лучистого потока при отвесном его падении.

Вот потому-то зимой при малой высоте солнца над горизонтом и коротких днях количество лучистой энергии, достигающей земной поверхности, мало.

Различные части атмосферы по-разному поглощают и рассеивают проходящее через них солнечное излучение. Поэтому спектральный состав солнечного излучения у границы земной атмосферы и у поверхности земли несколько различен. Не остается он постоянным и в течение суток и в течение года, особенно в умеренных и северных широтах.

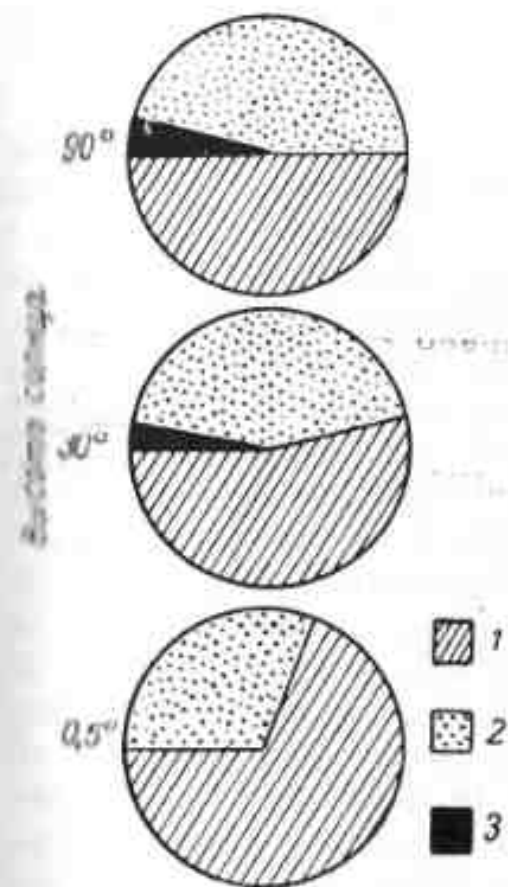
Попадая в земную атмосферу, излучение солнца рассеивается молекулами газов и взвешенными среди них частицами пыли, кристаллами льда и капельками воды. Характер рассеивания в атмосфере по спектру излучения неодинаков и определяется длиной волны излучения и размером рассеивающих частиц. Чем короче длина волны, тем больше рассеивание. Так, для наиболее коротких ультрафиолетовых волн, доходящих до поверхности земли, рассеивание их атмосферой в 30 раз больше по сравнению с красной областью спектра. Еще большее значение для изменения спектрального состава света, доходящего до поверхности земли, имеет поглощение атмосферы. Прозрачность последней неодинакова для различных областей спектра солнечного излучения.

Наибольшему изменению под влиянием атмосферы подвержена ультрафиолетовая область радиации. Она и сильно рассеивается и еще больше поглощается. Основным поглотителем ультрафиолетовой радиации в атмосфере является озон, находящийся в ее верхних частях (в стратосфере). Благодаря его присутствию спектр солнечного излучения, попадающий на землю, обрывается в ультрафиолетовом конце на длине волны в 291 мкм.

Воздействие на живые клетки радиацией ртутно-кварцевых ламп, излучающих ультрафиолетовую радиацию, с длиной волн более коротких, чем 290 мкм, показало ее губительное действие. Очевидно, живое вещество не приспособлено переносить воздействие тех факторов, которых нет в природе нашего мира.

Рис. 6. Спектральный состав солнечной радиации при различных высотах солнца над горизонтом.

1 — инфракрасная, 2 — видимая, 3 — ультрафиолетовая (по Н. Н. Калитину).



Инфракрасная радиация поглощается частично углекислотой и водяными парами, которых в атмосфере немало, причем общее количество их подвержено значительным колебаниям.

Видимая часть солнечного излучения претерпевает

наименьшие изменения при прохождении через атмосферу. Поэтому и энергетический максимум излучения, находящийся в сине-фиолетовой области, смещается атмосферой в сравнительно незначительной степени, если солнце стоит около зенита и атмосфера чиста.

Общее представление о суточном изменении спектрального состава прямого солнечного излучения у поверхности земли дает рис. 6, показывающий соотношение между тремя главнейшими его областями (инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой) в зависимости от высоты стояния солнца над горизонтом. При положении солнца прямо над головой (в зените), что бывает только в южных широтах, на долю инфракрасной радиации приходится до 50% от общей суммы солнечного излучения. В этих же условиях видимое излучение составляет только 46%, а ультрафиолетовое всего 4% от общего потока солнечной радиации.

При уменьшении высоты солнца до 30° количество инфракрасной радиации возрастает до 53%, а видимой и ультрафиолетовой падает — первой до 44%, а второй до 3%.

При положении солнца у горизонта ультрафиолетовое излучение исчезает полностью из лучистого потока, достигающего земли, и солнечные лучи в это время несут только инфракрасную (72%) и видимую (28%) радиацию.

Область инфракрасной радиации в солнечном излучении простирается непосредственно от красной грани с $\lambda = 760$ мкм и вплоть до лучей с $\lambda = 2500—3000$ мкм. Однако основное количество энергии в этом тепловом излучении приходится на ближнюю инфракрасную радиацию с $\lambda = 800—1200$ мкм.

Инфракрасная радиация, лежащая за пределами 3000 мкм, полностью поглощается водяными парами и водой, поэтому она обычно не доходит до земной поверхности.

Наличие в солнечном свете большого количества ближней инфракрасной радиации в течение всего светлого периода заставляет предполагать ее несомненное значение для жизнедеятельности растений в силу эволюционных закономерностей развития растительного мира. И действительно, новые исследования по физиологии растений в условиях искусственного освещения показывают, что ближняя инфракрасная радиация является вполне физиологической радиацией (см. стр. 227).

Что касается видимой области излучения, то ее спектральный состав в различных условиях стояния солнца над горизонтом представлен на рис. 7. Как видно, при стоянии солнца в зените все пять основных составных частей белого света — красная, желтая, зеленая, синяя и фиолетовая — находятся почти в одинаковом соотношении. По мере приближения солнца к горизонту красно-оранжевая часть видимого излучения возрастает, а все остальные области, и особенно сине-фиолетовая, резко сокращаются. Уже при высоте солнца в 10° половину всей видимой радиации составляют красные лучи, $\frac{1}{4}$ приходится на желтое излучение, а остальные три участка спектра вместе составляют только $\frac{1}{4}$ радиации. При положении солнца у горизонта оно кажется красным потому, что в это время (высота солнца около 0,5°) $\frac{3}{4}$ видимого излучения, достигающего до земли, составляет красная область спектра. В это время сине-фиолетовое излучение у поверхности земли отсут-

ствуется, а на желто-зеленое приходится $\frac{1}{4}$ всего видимого излучения.

Кроме прямой солнечной радиации, о которой говорилось выше, для жизни растений очень большое значение имеет и так называемая рассеянная радиация. Последняя представляет собой ту же солнечную радиацию, но рассеянную атмосферой. В пасмурные дни, когда солнце закрыто тучами, до растений доходит только рассеянная радиация. Так как таких дней немало, интересно знать, что же представляет собой этот вид света. Основное отличие его от прямого излучения заключается в том, что последний имеет направленный поток лучистой энергии от солнца к любому облучаемому им предмету или поверхности, а у рассеянной солнечной радиации общая направленность отсутствует, и она идет от всех точек небесного свода. Это обстоятельство делает рассеянную радиацию наиболее равномерной. Второе различие этих потоков сводится к неодинаковому спектральному их составу. Так, в рассеянной радиации при наличии безоблачного неба преобладает коротковолновая часть; при облачном небе, наоборот, максимум излучения перемещается к более длинным волнам.

Так как источником рассеянной радиации являются солнечные лучи, то все основные закономерности, указанные для прямой солнечной радиации, относятся в известной степени и к рассеянной. В частности, интен-

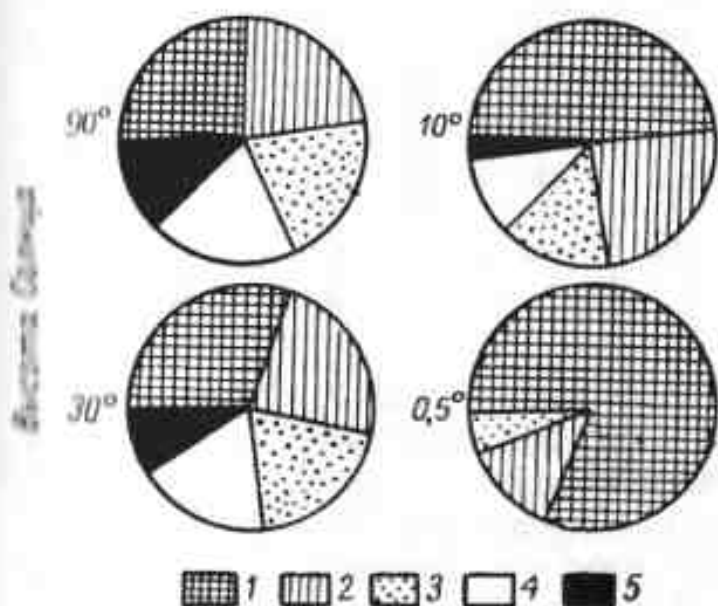


Рис. 7. Спектральный состав видимой солнечной радиации при различных высотах солнца над горизонтом.

1 — красная, 2 — желтая, 3 — зеленая, 4 — синяя, 5 — фиолетовая (по Н. Н. Калинин).

сивность рассеянной радиации изменяется в зависимости от высоты стояния солнца над горизонтом: возрастает с увеличением высоты его и ослабевает с уменьшением последней. При безоблачном небе количество рассеянной радиации зависит от прозрачности атмосферы. Чем чище атмосфера, тем меньше рассеянной радиации; чем больше в атмосфере добавочных центров рассеивания (пылинок и т. п.), тем больше рассеянной радиации. Однако, как показывают прямые измерения, количество рассеянной радиации при безоблачном небе очень невелико, и роль ее в общем приходе лучистой энергии для земной поверхности незначительна. Иное дело при облачном небе. В это время количество рассеянного света очень увеличивается, так как облака, состоящие из капелек воды или кристаллов льда, являются хорошей рассеивающей и отражающей средой. Роль рассеянной радиации особенно велика для северных и полярных широт, где прямых солнечных лучей часто не бывает.

Для растений наибольшее значение имеет так называемая суммарная радиация, состоящая из прямой солнечной, рассеянной и отчасти отраженной. Последняя представляет собой солнечную радиацию, отраженную земной поверхностью в целом и ее отдельными составными элементами (почвой, водными бассейнами, различными растительными ландшафтами и т. д.). Этот вид радиации имеет обедненный спектральный состав и наименьший удельный вес в общем потоке солнечного суммарного излучения. Суммарное солнечное излучение является основным физическим фактором, определяющим возможность жизни и высокой продуктивности высших растительных организмов.

Лучистая энергия солнца обеспечивает растения светом и теплом. И того и другого тем больше, чем выше стоит солнце над горизонтом, чем меньше препятствий на пути солнечного излучения от солнца к поверхности растений и чем длиннее период нахождения солнца над горизонтом.

Общее количество солнечной лучистой энергии, поглощенной растениями за астрономические сутки (24 часа), зависит от спектрального состава, мощности излучения в единицу времени и от продолжительности периода облучения.

Именно поэтому следует знать, как эти факторы распределяются по различным районам огромной территории СССР.

В самой южной точке СССР, находящейся в Туркменской ССР, наибольшая высота солнца над горизонтом в момент летнего солнцестояния достигает 78° (табл. 1). В том же районе наименьшая высота полуденного солнца в зимние месяцы равна 31°. В Ленинграде максимальная высота солнца составляет 53°, а минимальная всего лишь 6°. Севернее, например на острове Вайгач или в устье Енисея, наибольшая высота солнца над горизонтом достигает всего 43°, а минимальная зимой — отрицательной величины (—3°), что означает нахождение солнца за горизонтом, т. е. полярную ночь.

Таблица 1

Высота солнцестояния (в градусах) в полуденные часы на различных широтах в пределах СССР в течение года (по В. В. Шаронову)

Даты		Градусы северной широты					
месяц	число	35	45	50	55	60	70
Январь	21	35	25	20	15	10	0
Февраль	21	44	34	29	24	19	9
Март	22	55	45	39	35	30	20
Апрель	21	67	57	51	47	42	32
Май	21	75	64	69	55	50	40
Июнь	20	78	68	63	58	53	43
Июль	20	75	65	60	59	50	40
Август	19	67	58	53	48	43	33
Сентябрь	28	54	43	38	33	28	18
Октябрь	18	45	35	30	26	20	11
Ноябрь	17	36	26	22	16	11	1
Декабрь	17	31	21	16	11	6	—3

Чем выше стоит солнце над горизонтом, тем больше энергии приходится на более коротковолновую часть видимого излучения; относительное количество красной и инфракрасной радиации, наоборот, возрастает с уменьшением высоты стояния солнца над горизонтом (табл. 2).

Таблица 2

Относительная интенсивность различных областей спектра солнечной радиации при разной высоте солнцестояния (в % к общему излучению)

Излучение	Длина волны (мкм)	Высота солнцестояния					
		5°	10°	20°	30°	50°	90°
Ультрафиолетовое	295—400	0,4	1,0	2,0	2,7	3,2	4,7
Видимое	400—760	38,6	41,0	42,7	43,7	43,9	45,3
В том числе:							
фиолетовое . .	400—440	0,6	0,8	2,6	3,8	4,5	5,4
синее	440—490	2,1	4,6	7,1	7,8	8,2	9,0
зеленое	490—565	2,7	5,9	8,3	8,8	9,2	9,2
желтое	565—595	8,0	10,0	10,2	9,8	9,7	10,1
красное	595—760	25,2	19,7	14,5	13,5	12,2	11,5
Инфракрасное . .	> 760	61,0	58,0	55,3	54,6	52,9	50,0

При ознакомлении с табл. 2 бросается в глаза, что в пределах стояния солнца над горизонтом от 5 до 90° меньше всего изменяется количество желтой (565—595 мкм) радиации, сохраняющейся все время на уровне около 10%.

Очевидно, что при одинаковом состоянии атмосферы наиболее значительные суточные изменения в спектральном составе солнечного излучения должны наблюдаться в южных широтах, а наименьшие в северных вследствие свойственных этим широтам амплитуд между наиболее низким (всюду одинаковым) и наиболее высоким (зенитным) переменным положением солнца над горизонтом. Чем выше географическая широта, тем однообразнее спектр солнечного излучения, приходящего к поверхности земли, и тем богаче он красными и инфракрасными лучами, особенно в утренние и вечерние часы, а также при переходе от лета к зиме и от зимы к весне. Вообще в природе существует вполне реальная закономерность: чем меньше интенсивность света, тем больше в нем красной и инфракрасной радиации.

Сглаженные (без фраунгоферовых линий) кривые распределения энергии в спектре солнца при различных высотах над горизонтом показаны на рис. 8.

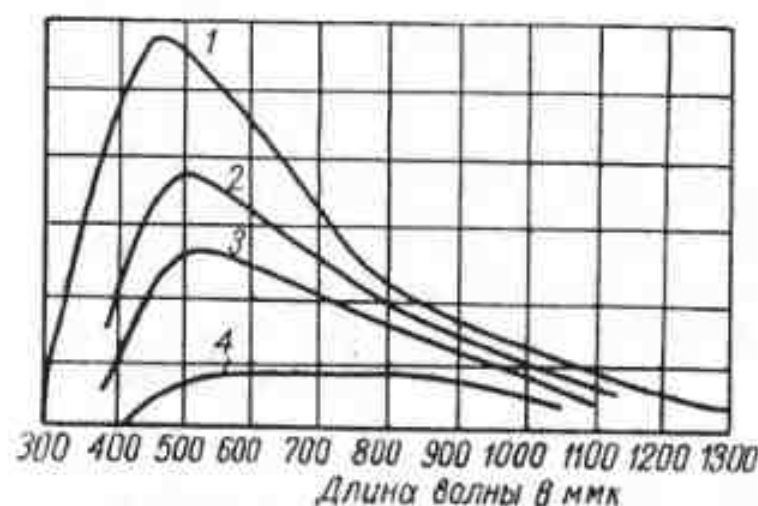


Рис. 8. Распределение энергии в спектре солнца при различных высотах над горизонтом.

1 — за пределами атмосферы, 2 — на поверхности земли при положении солнца в зените (около 90°), 3 — то же при высоте солнца над горизонтом 30°, 4 — то же при высоте солнца над горизонтом 10° (т. е. в условиях, близких к восходу и закату).

То обстоятельство, что растения в течение своей жизни значительный период времени находятся в условиях красного освещения (радиация низко стоящего солнца), вероятно, привело к оптическим свойствам хлорофилла, имеющего максимум поглощения в красной области спектра.

Благодаря избирательной способности пигментной системы растений изменения спектрального состава солнечной радиации в течение суток могут оказывать сравнительно небольшое влияние на общее количество поглощаемой растениями лучистой энергии.

Суточные изменения положения солнца над горизонтом приводят к переменному суточному режиму интенсивности солнечной радиации на поверхности земли. В свою очередь суточный режим освещения меняется день ото дня и в течение года в умеренных широтах достигает наибольшего различия летом и зимой в дни, близкие летнему и зимнему солнцестоянию.

Различие в суточном потоке прямой солнечной радиации особенно велико при измерении той ее части, которая достигает горизонтальной поверхности. Для г. Павловска Ленинградской области это различие настолько велико, что практически между обилием света в июле и почти полным отсутствием его в январе лежит такое же световое несоответствие, как между днем и ночью.

Такое колоссальное различие в суточном притоке солнечной лучистой энергии на горизонтальную поверхность в январе и июле в Павловске связано, в первую очередь, с двумя факторами. Во-первых, с различным

стоянием солнца над горизонтом — высоким (до 53°) летом и низким (7—9°) зимой и, во-вторых, с продолжительностью периода нахождения солнца над горизонтом. На широте Павловска продолжительность дня в период летнего солнцестояния достигает почти 19 часов, а во время зимнего солнцестояния не превышает 6 часов (табл. 3).

Таблица 3

Средние месячные величины потока солнечной радиации на горизонтальную поверхность для различных высот солнца по наблюдениям в Павловске (в кал/см² · мин)

Высота солнца (градусов)	Январь	Март	Июнь	Сентябрь	Декабрь
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
7	0,09	0,08	0,06	0,07	0,10
9	0,13	0,12	0,10	0,10	—
11	—	0,16	0,13	0,14	—
29	—	0,59	0,51	0,55	—
31	—	—	0,56	0,59	—
33	—	—	0,60	—	—
43	—	—	0,82	—	—
53	—	—	1,02	—	—

Приведенные в табл. 3 числа свидетельствуют о примерно одинаковом количестве энергии, приходящейся на горизонтальную поверхность в зимнее и летнее полугодие при одинаковой высоте солнца над горизонтом.

Некоторое превышение энергии зимой по сравнению с летом может быть объяснено более чистой атмосферой. Чем выше широта пункта в северном полушарии, тем ниже полуденное стояние солнца и, следовательно, тем меньше приходится энергии на земную поверхность в единицу времени. Именно поэтому с продвижением с севера на юг зимой и осенью заметно увеличивается общее количество солнечной лучистой энергии (табл. 4).

Но совсем другая закономерность наблюдается летом и весной. В эти времена года, несмотря на такое же уменьшение высоты стояния солнца по мере движения от экватора к полюсу, что и зимой, общее количе-

ство энергии, падающее на земную поверхность, примерно одно и то же. Это казалось бы парадоксальное явление может быть в основном объяснено тем, что в эти месяцы года (весна, лето) по мере движения к северу возрастает продолжительность суточного периода нахождения солнца над горизонтом (длина дня). Уже на 70° с. ш. солнце не заходит почти в течение трех месяцев, тогда как в более умеренных широтах длина дней уменьшается.

Таблица 4

Сезонные и годовые количества суммарной солнечной радиации (в кал/см^2) в различных пунктах СССР (по К. Я. Кондратьеву)

Пункт	Северная широта	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Бухта тихая	$80^\circ 19'$	0	22	31	2	55
Бухта Тикси	$71^\circ 35'$	1	30	33	5	69
Павловск	$59^\circ 41'$	3	25	35	8	71
Новосибирск	$55^\circ 02'$	7	28	38	11	84
Воронеж	$51^\circ 40'$	7	30	42	15	94
Евпатория	$45^\circ 09'$	8	37	52	24	121
Кисловодск	$43^\circ 54'$	17	35	44	23	119

Суточные чередования света и темноты (дня и ночи) обусловлены 24-часовыми циклами полного оборота земли вокруг оси вращения, проходящей через точки полюсов.

Естественно, что в то время, когда одна часть земли обращена к солнцу и находится в сфере его излучения, другая, противоположная ей, не получает солнечной радиации и, следовательно, над ее территорией царит ночь.

Так как скорость вращения земли вокруг оси постоянна, то, казалось бы, что продолжительность дня и ночи должна быть также постоянной и равной. Действительно, такое равенство имеется в экваториальных широтах земли. Во всех же других широтах, особенно в полярных, продолжительность дня или точнее соотношение между длиной дня и ночи изо дня в день изменяется. На полюсах земли целые полгода держится день, а затем на другое, зимнее, полугодие сменяется ночью. Данные сезонные изменения в чередованиях све-

та и темноты, а также и смена времен года определяются постоянным наклоном оси вращения земли к плоскости эклиптики под углом в $66,5^\circ$.

Орбита вращения земли вокруг солнца имеет эллиптическую форму, причем солнце находится не в центре, а в одном из ее фокусов. Благодаря этому среднее расстояние от земли до солнца в $150\,000\,000$ км изменяется в течение года примерно на $5\,000\,000$ км.

Наименьшим расстояние от земли до солнца бывает в январе, когда земля находится в перигелии, а наибольшим — в июле, при нахождении ее в афелии. Опыт показывает, что в январе каждый квадратный сантиметр поверхности земли, расположенный перпендикулярно к солнечным лучам, получает солнечной радиации на 7% больше, чем в июле. Но в январе прямые лучи солнца попадают только на некоторые области южного полушария. Северное полушарие в этот период года, наоборот, более всего отклонено от солнца, и поэтому лучи его падают на поверхность земли под наименьшим углом. В июле положение полушарий меняется. Северное становится обращенным к солнцу, а южное наиболее отклоненным от него. Следовательно, смену времени года определяет не расстояние земли от солнца, а наклон оси вращения нашей планеты. Но несколько более теплое лето южного полушария по сравнению с северным связано с нахождением земли в перигелии, т. е. в точке своей орбиты, наиболее близкой к солнцу.

Деление года на четыре части связано с четырьмя определенными датами: летним и зимним солнцестоянием и весенним и осенним равноденствием. В день летнего солнцестояния, для северного полушария 22 июня, в умеренных и северных широтах стоит самый длинный день в году, причем его длина возрастает от экватора к полюсу (с 12 часов до непрерывного освещения). Этот день совпадает с разгаром лета и является его астрономическим началом. Затем длина дней начинает убывать и к 22 сентября достигает 12 часов. Это день осеннего равноденствия. Лето кончилось. Начинается осень. Дни продолжают сокращаться вплоть до 22 декабря, когда наступает самый короткий день в году — день зимнего солнцестояния, день начала астрономической зимы и вместе с тем день солнцеворота, как говорит наш

народ. С этого периода начинается возрастание длины дня, достигающей к 22 марта снова 12 часов. Это день весеннего равноденствия. С этого периода и до дня летнего солнцестояния стоит лучшее время года — астрономическая весна.

Таблица 5

Астрономическая длина дня (в часах и минутах) в различных пунктах СССР
(по В. В. Шарову)

Даты		Градусы северной широты				
месяц	число	45	50	55	60	70
Январь	20	9—18	8—45	8—00	7—01	0—00
Февраль	20	10—40	10—23	10—03	9—37	8—09
Март	17—18	12—01	12—00	12—00	12—00	12—00
Апрель	20	13—43	14—02	14—27	14—59	16—58
Май	20	15—01	15—37	16—23	17—30	24—00
Июнь	19—22	15—38	16—23	17—23	18—53	24—00
Июль	20	15—09	15—47	16—36	17—47	24—00
Август	20	13—52	14—14	14—41	15—16	17—28
Сентябрь	25—26	12—00	12—00	12—00	12—00	12—04
Октябрь	20	10—47	10—31	10—12	9—46	8—27
Ноябрь	20	9—23	8—51	8—09	7—12	2—32
Декабрь	20—23	8—44	8—06	7—09	5—51	0—00

Характер изменения длины дня по месяцам для пяти географических широт, начиная 45° и кончая 70° с. ш., приведен в табл. 5. С весеннего равноденствия (22 марта) и по осеннее равноденствие (22 сентября) по мере возрастания широты возрастает и длина дня. В зимнее полугодие, начиная с осеннего равноденствия и кончая весенним, наоборот, с продвижением от более низких широт к более высоким продолжительность светлого периода суток уменьшается, доходя до полной темноты. Этим, как его называет автор, актиноритмическим фактором, а также высотой солнца над горизонтом и определяется в основном общее количество солнечной лучистой энергии, падающей на земную поверхность. Конечно, все сказанное справедливо лишь для определенных «нормальных» состояний атмосферы. Изменения в

ее чистоте, а главное колебания в погодных (метеорологических) условиях могут сильно изменить действительный приход солнечного излучения к поверхности растительных сообществ и отдельных растений.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Основным источником искусственного освещения в настоящее время является электрическая энергия. Она превращается в излучение (свет) при помощи специальных преобразователей, которые называются электрическими лампами.

За 80-летнее развитие электроламповой промышленности конструкция ламп и их светотехнические качества сильно изменились. Они прошли путь от угольной лампочки в несколько свечей до мощных ксеноновых ламп, дающих лучистые потоки, превышающие по интенсивности солнечный свет у поверхности нашей планеты.

Первым типом ламп для электрического освещения были угольные дуги; их еще и до сих пор употребляют в некоторых оптических приборах и в специальных прожекторных установках.

Вскоре появились лампы накаливания, прошедшие к настоящему времени наиболее длинный путь усовершенствования и занимающие теперь одно из основных мест в электроламповой промышленности.

Позднее начали изготовлять различные типы газоразрядных ламп без люминофоров и с люминофорами, приспособленные для специальных осветительных целей. Эти источники радиации находятся сейчас в состоянии непрерывного совершенствования и являются более экономичными, чем лампы накаливания. Особое место занимают лампы, которые конструируют в последние годы специально для растениеводческих целей, соединяющие в себе принципы как лампы накаливания, так и газоразрядной лампы.

Каждая из всех перечисленных выше электрических ламп имеет свои достоинства и недостатки, но все они

в той или иной степени пригодны для получения искусственного освещения, заменяющего естественный солнечный свет, способствующего не только расширению периодов активного бодрствования человека, но также и жизнедеятельности растительных организмов.

Лучистому потоку каждого типа ламп, в соответствии с температурой накала, используемого для свечения газа, и соответствующего люминофора, присущ свой спектральный диапазон излучения и его мощность, т.е. энергия в определенных участках спектра, а следовательно, и общая интегральная мощность излучения.

Помимо этого, различные типы ламп обладают неодинаковым характером излучения. У одних ламп, где светится нагретое твердое тело (лампы накаливания), спектр сплошной, как у солнца; у других ламп, газосветных, как правило, наблюдается линейный спектр, специфический для данного светящегося вещества. У третьего типа ламп имеются спектры смешанного характера, где на основной сплошной фон накладываются отдельные линии излучения. Таков спектр люминесцентных и современных дуговых ламп.

Следовательно, теперь для любых целей освещения можно располагать лампами различного спектрального состава, различной мощности и разнообразными по размерам и форме.

Наиболее массовым источником электрического освещения является так называемая газополная лампа накаливания. Лучистый поток, испускаемый ею, создается за счет накала током вольфрамовой спирали. При горении лампы в нормальном режиме она нагревается до температуры 2800°K . Для предохранения вольфрамовой нити от распыления колбы ламп наполняют инертными, не поддерживающими окисление газами: азотом, аргоном, их смесью или криптоном. Поэтому они и называются газополными. Лампы накаливания, у которых внутри колбы создается безвоздушное пространство, называются вакуумными.

Спектральный состав излучения ламп накаливания находится во взаимосвязи с температурой накала вольфрамовой спирали. Максимум излучения ламп накаливания лежит в пределах длины волн $900\text{--}1100\text{ мкм}$ (рис. 9). От него к ультрафиолетовой области количество энергии резко убывает, а в инфракрасной спадает

очень плавно. На видимую область приходится только около 12% от всего лучистого потока, создаваемого лампой накаливания. Все остальные 88% ее радиации лежат в пределах инфракрасного излучения. Это обстоятельство делает лампу накаливания несовершенным источником освещения и плохим преобразователем электрической энергии в световую. Поэтому непрерывно продолжаются поиски более экономных электрических осветительных приборов.

В видимой области излучения ламп накаливания энергетические мощности быстро падают в направлении от красного к фиолетовому концу спектра. Если разбить весь видимый спектр 500-ваттной лампы накаливания (табл. 6) на три части — сине-фиолетовую, желто-зеленую и красно-оранжевую и сравнить их спектральные энергии между собой, приняв за 100% энергию всей видимой области, то получатся следующие соотношения: сине-фиолетовая радиация 11,5%, желто-зеленая 29% и красно-оранжевая 59,4%. Исходя из этих соотношений, лампы накаливания считают хорошим источником радиации для фотосинтеза, но плохим для формообразовательных процессов.

В табл. 7 дано распределение энергии по спектру в видимой области излучения черного тела при температуре 5200°K , аналогичного среднему дневному свету, для тех же частей спектра. При сравнении данных табл. 6 и 7 нетрудно видеть иные соотношения между тремя частями видимого спектра.

В спектре полуденного солнца процентное соотношение указанных выше частей спектра почти одинаково, тогда как в радиации ламп накаливания сине-фиолето-

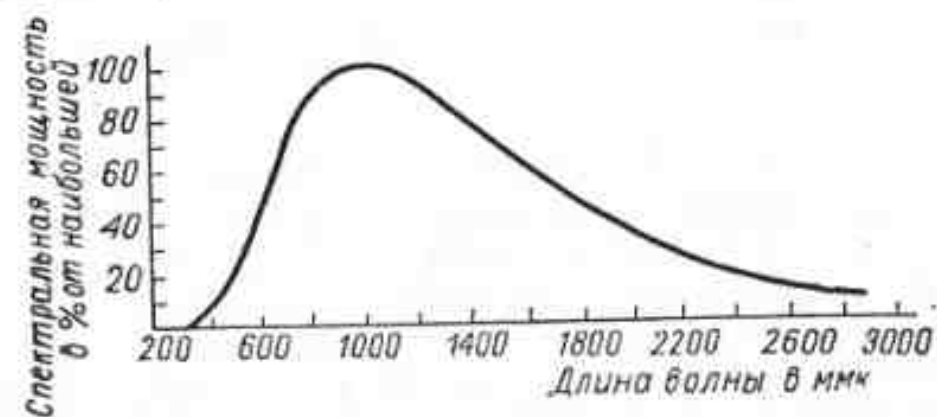


Рис. 9. Спектральное распределение излучения лампы накаливания (цветная температура 2842°K).

вого излучения почти в шесть раз меньше, чем красно-оранжевого. Именно эта их спектральная особенность мешает созданию, за счет излучения отдельных ламп накаливания, световых условий, подобных солнечным.

Таблица 6

Спектральное распределение энергии в видимой области излучения 500-ваттной лампы накаливания

Части спектра видимого излучения					
синие-фиолетовая		желто-зеленая		красно-оранжевая	
длина волны (м.мк)	энергия (процент)	длина волны (м.мк)	энергия (процент)	длина волны (м.мк)	энергия (процент)
405	0,6	505	1,9	605	4,2
415	0,7	515	2,1	615	4,5
425	0,8	525	2,3	625	4,7
435	0,9	535	2,5	635	5,0
445	1,1	545	2,8	645	5,2
455	1,2	555	3,0	655	5,5
465	1,4	565	3,3	665	5,7
475	1,5	575	3,5	675	5,8
485	1,6	585	3,7	685	6,0
495	1,7	595	4,0	695	6,2
—	—	—	—	705	6,6
Сумма	11,5	Сумма	29,1	Сумма	59,4

Собирая в осветительные установки достаточно мощные лампы накаливания, особенно зеркальные, и используя при этом соответствующие фильтры и экраны, можно получать лучистые потоки, значительно превосходящие потоки прямых солнечных лучей в любой области спектра.

Таким образом, если не считаться с затратами электроэнергии, очень высокими при эксплуатации ламп накаливания, последние могут быть признаны хорошим искусственным источником освещения. И если их широкое использование в практике пока дорого, то для научно-исследовательских работ, имеющих целью выяснение световых потребностей растений, применение их вполне оправдано.

Лампа накаливания, хотя и не является настоящим точечным излучателем, но практически близка к нему,

и поэтому мощность ее лучистого потока быстро убывает при возрастании расстояния между нитью накала и освещаемым объектом. До известной степени здесь справедливо правило обратных квадратов, по которому можно считать, что мощность (плотность) лучистого потока отдельной лампы обратно пропорциональна квадрату расстояния от нити до поверхности растений. Поэтому при высоком подвесе отдельных ламп накаливания без специальной арматуры растения получают недостаточное облучение, вследствие этого вытягиваются и дают малую продуктивность.

Таблица 7

**Распределение энергии по спектру излучения черного тела при 5200°K (белый свет)
(по Ш. Фабри)**

Части спектра видимого излучения					
синие-фиолетовая		желто-зеленая		красно-оранжевая	
длина волны (м.мк)	энергия (процент)	длина волны (м.мк)	энергия (процент)	длина волны (м.мк)	энергия (процент)
400	2,578	500	3,358	600	3,400
410	2,696	510	3,389	610	3,378
420	2,771	520	3,414	620	3,351
430	2,906	530	3,434	630	3,320
440	2,996	540	3,444	640	3,258
450	3,079	550	3,452	650	3,293
460	3,151	560	3,452	660	3,224
470	3,217	570	3,444	670	3,186
480	3,272	580	3,434	680	3,144
490	3,321	590	3,421	690	3,103
—	—	—	—	700	3,062
Сумма	29,987	Сумма	34,242	Сумма	35,719

Данный серьезный недостаток обычных ламп накаливания был устранен изменением их колбы. Последняя из обычной грушевидной была превращена в параболическую, а главное, из прозрачной переделана в зеркальную, хорошо отражающую свет. Для этого вся цокольная часть зеркальной лампы и вся ее поверхность, не направленная непосредственно вниз, покрыты зеркальной, нанесенной распылением на стекло колбы, пленкой.

Зеркальные лампы накаливания удобны прежде всего тем, что не требуют никакой дополнительной арматуры, а их зеркальная параболическая колба хорошо собирает излучение внутри колбы и направляет его вниз в виде параллельного пучка. Нижняя часть колбы обычно делается матовой для лучшего распределения лучистого потока на освещаемой поверхности.

Зеркальные лампы накаливания в настоящее время выпускаются не только с параболическими, но и с круглыми колбами, дающими менее направленный световой поток. Так же как и большинство обычных ламп накаливания, их зеркальные варианты делают для напряжения в сети 127 и 220 в и мощностью 300 и 500 вт.

Для растениеводческих целей следует изготовить и испытать зеркальные лампы накаливания мощностью 200, 150 и даже 100 вт.

Электрические лампы, действие которых основано на использовании свечения газа или паров металлов в процессе газового разряда, называются газоразрядными или газосветными.

Излучение этого типа ламп возникает в результате возбуждения атомов или молекул газообразного вещества, сталкивающихся между собой или с электронами во время прохождения через него электрического тока.

Как уже говорилось выше, характерной особенностью газосветных ламп является линейный спектр, представленный или отдельными линиями или группами отдельных линий. Относительная яркость линий и количество энергии в их излучении определяются давлением газа и химическим составом стеклянных колб или трубок.

Чаще всего для газосветных ламп используют газ неон или пары ртути и натрия.

Свечение неона в видимой области складывается из желтого, оранжевого и красного участков спектра и поэтому его цвет оранжево-красный (рис. 10). Пары натрия светятся желтым светом за счет двойной линии спектра, характеризующейся длинами волн в 589 и 589,6 мкм. Ртутные лампы светятся голубовато-белым светом и имеют в спектре видимой области 4 отдельные линии: фиолетовую, синюю, зеленую и желтую.

Все эти лампы благодаря их определенной цветности употребляют только для специальных целей, поэто-

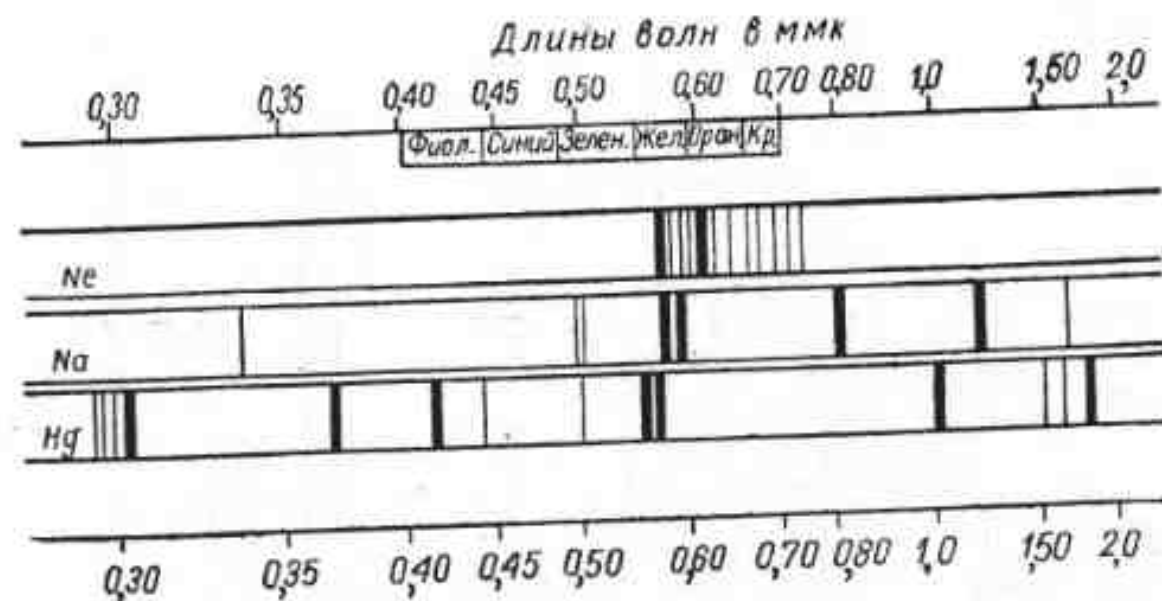


Рис. 10. Спектры излучения газосветных трубок.

му изготовляют в небольшом количестве. Кроме того, они обычно требуют специальных пусковых приспособлений (дресселей) и повышенных напряжений (не ниже 220 в).

Натриевая лампа может служить образцом типичнейшей газосветной лампы с светящимися парами металлов низкого давления. В конструкции и работе ее наиболее совершенно осуществляются свойства основных процессов газового разряда. При их создании были использованы все новые факторы, способствующие значительному усовершенствованию лампы (наполнение инертным газом, оксидный самокалящийся катод и теплоизолирующая рубашка). Именно поэтому натриевая лампа является одним из совершеннейших современных источников искусственной радиации. Ее расчетная световая отдача излучения составляет 60 лм/вт, а световой коэффициент полезного действия 80%. Правда, практическая световая отдача излучения значительно ниже расчетной, так как очень велики потери энергии в довольно сложных пусковых устройствах. Срок службы натриевых ламп 2000—3000 часов. Несмотря на высокую стоимость их, натриевые лампы являются очень интересным и важным источником искусственной радиации при выращивании растений, особенно для светобиологических исследований, так как характеризуются относительно монохроматическим излучением.

Ртутные лампы обладают по сравнению с другими электрическими излучателями повышенной отдачей света, поэтому они достаточно экономичны, но цвет их неприятен для зрения. Поверхность излучения их больше, чем у ламп накаливания, так как они в большинстве случаев представляют собой трубки или, во всяком случае, удлиненные светящиеся объемы. Такая форма делает их более удобными при выращивании растений.

Особенного внимания ртутные лампы заслуживают как дополнительный источник синего и фиолетового света, находящегося в минимуме в лучистом потоке ламп накаливания. Распределение энергии по спектру в видимой области для ртутно-кварцевой прямой трубки в 1000 *вт* (ПРК-7) таково, что почти 40% энергии излучения падает на две длины волны: в 405 и 436 *мкм* (табл. 8). Опыт показал, что за счет излучения только этих двух монохроматических участков спектра можно без труда получать мощности не менее 78—80 *вт/м²*, т. е. больше чем в прямом солнечном излучении при его общей мощности 500 *вт/м²*. Понятно, что добавление излучения ртутных ламп к радиации ламп накаливания в общей осветительной установке приблизит спектральный состав искусственного света к солнечному. Кроме того, все газосветные лампы, и упомянутые выше, и другие, например гелиевые, аргоновые, криптоновые, ксеноновые и т. д., выгодно использовать для выделения отдельных областей спектра при изучении их влияния на рост и развитие растений.

Таблица 8

Распределение энергии по спектру в видимой области излучения ртутно-кварцевой лампы ПРК-7

Части спектра видимого излучения					
синие-фиолетовая		желто-зеленая		красно-оранжевая	
длина волны (мкм)	энергия (процент)	длина волны (мкм)	энергия (процент)	длина волны (мкм)	энергия (процент)
405	14,6	546	25,6	691	0,6
436	23,4	577	34,5		
492	1,3				
Сумма	39,3	Сумма	60,1	Сумма	0,6

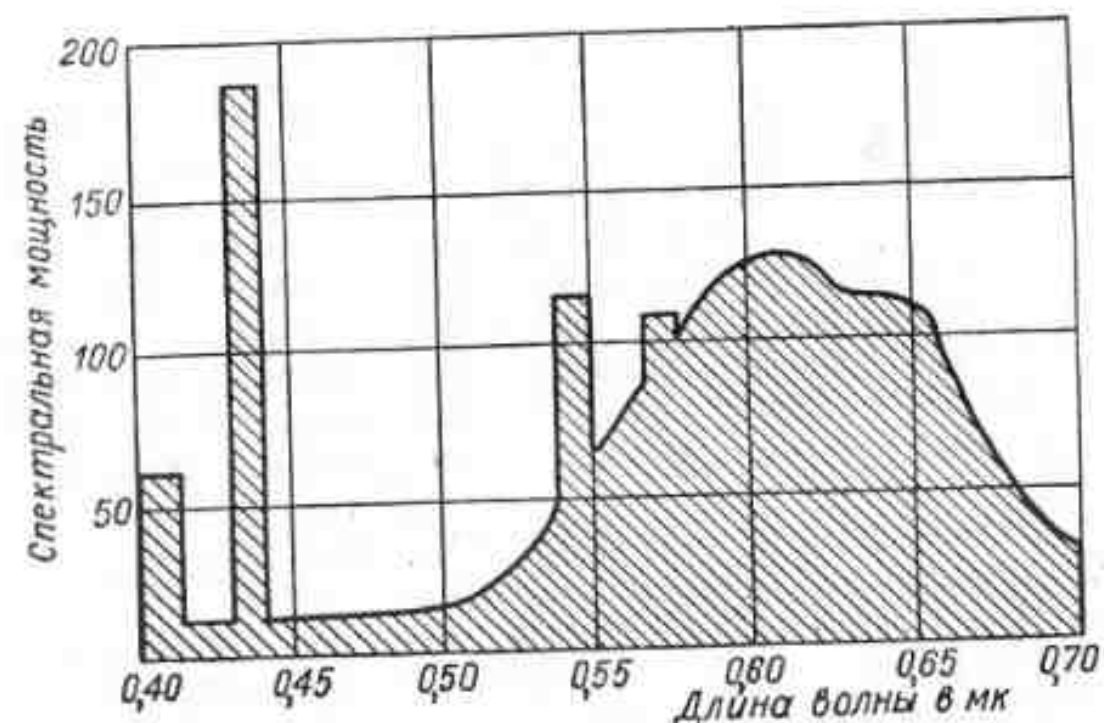


Рис. 11. Спектральное распределение излучения люминесцентной трубки (белый свет).

Вообще газосветные лампы представляют в этом отношении очень большой интерес для многих светобиологических исследований, некоторые из них находят и уже нашли практическое применение в светокультуре растений.

Люминесцентные трубки являются фотолюминесцентными газосветными лампами. От обычных газосветных ламп они отличаются тем, что на внутренние стенки газоразрядных трубок нанесено порошкообразное кристаллическое вещество — люминофор. Люминофором является всякое вещество (газообразное, жидкое, твердое), обладающее свойством фотолюминесценции. Применяют люминофоры для улучшения световой отдачи и цветности газосветных ламп. В состав их входят окислы металлов, соли кислот, сернистые и селенистые соединения, а также тяжелые металлы и редкие земли (самарий и празеодий).

Спектральная характеристика люминофоров определяется их спектрами поглощения и излучения, состоящими из ряда полос различной интенсивности.

Кроме свечения люминофора, в радиации фотолюминесцентных ламп всегда присутствуют характерные

спектральные линии видимого ртутного излучения, не поглощаемого люминофором.

Наиболее распространенной является люминесцентная лампа белого цвета. Спектр ее характеризуется следующими особенностями (табл. 9). Наибольшим количеством энергии обладает красно-оранжевый участок спектра (до 45%). Мало уступает ему и желто-зеленый участок излучения. Зато в сине-фиолетовом конце энергии меньше всего (только 16%). Такое распределение энергии по спектру люминесцентной лампы белого света (рис. 11) несколько роднит ее с тем же качеством лампы накаливания.

Таблица 9

Распределение энергии по спектру в видимой области излучения люминесцентной лампы белого света

Части спектра видимого излучения					
сине-фиолетовая		желто-зеленая		красно-оранжевая	
длина волны (мкм)	энергия (процент)	длина волны (мкм)	энергия (процент)	длина волны (мкм)	энергия (процент)
394—400	1,4	500—520	2,4	600—620	12,9
400—420	3,3	520—540	6,1	620—640	11,6
420—440	6,1	540—560	9,3	640—660	8,5
440—460	3,4	560—580	10,1	660—680	5,7
460—480	1,0	580—600	11,8	680—700	3,5
480—500	0,9			700—720	1,7
				720—730	0,7
Сумма	16,1	Сумма	39,7	Сумма	44,6

Принципиальное отличие люминесцентных ламп от ламп накаливания заключается в ограниченной мощности лучистого потока с единицы излучающей поверхности.

С незначительными мощностями излучения люминесцентных ламп связана и низкая их температура, обычно не превышающая 50°. Благодаря такой пониженной температуре трубок растения не получают ожогов, даже соприкасаясь с ними. Зато люминесцентные лампы сами чувствительны к температуре воздуха и плохо горят в холодных помещениях.

В настоящее время, кроме люминесцентных ламп обычного типа, появились специально для культуры растений люминесцентные лампы с зеркальным покрытием одной половины трубки, что устраняет необходимость заботиться об отражательной установке.

В 1959 г. в лаборатории светофизиологии АФИ была проведена работа по изучению возможностей использования для выращивания растений дуговых ртутно-люминесцентных ламп (ДРЛ). Эти лампы выпускаются отечественной промышленностью на номинальные мощности 250, 500, 750, 1000 вт.

Устройство ламп ДРЛ следующее: в стеклянной дынеобразной колбе, покрытой изнутри люминофором, способным под влиянием ультрафиолетового возбуждения излучать в красной области спектра, вмонтирована ртутно-кварцевая горелка высокого давления, подобная тем, что находятся в кварцевых лампах (ПРК). Благодаря люминофору лампы ДРЛ имеют улучшенную цветность по сравнению с лампами ПРК. Световой поток люминофора в пределах длин волн 610—770 мкм составляет 6% от общего излучения лампы. Световая отдача ламп ДРЛ равняется 38—46 лм/вт.

Некоторым недостатком ламп ДРЛ, вытекающим из того, что они не предназначались для растениеводства, является их конструкция, при которой большая часть светового потока проходит через боковые стенки колбы и для получения верхнего освещения растений требуется вводить специальный отражатель (софит). Нижний торец лампы светит слабо из-за формы самой горелки и наличия установочных деталей последней, бросающих на торец тень.

Нам кажется, что для растениеводства нужно было бы изготавливать специальные лампы по типу ДРЛ, имеющие горелку либо в виде спирали, либо в виде дуги с токоподводящими концами, выведенными в направлении цоколя так, чтобы они не затеняли нижнюю часть лампы. Это не исключает необходимости иметь софит или иной отражатель для концентрации потока в одном направлении. При такой конструкции лампы освещенность, создаваемая ею, будет более равномерной.

Выпуск ламп ДРЛ знаменует собой прогресс в области светотехники, но не является пределом желаемого. С освоением долговечных ксеноновых ламп сверх-

высокого давления, особенно если отпадет необходимость в балластных дросселях, можно будет получать еще лучшие результаты при выращивании растений.

Отечественные ксеноновые лампы, выпускаемые в опытном порядке, имеют сплошной спектр, приближающийся к солнечному (рис. 12). Наибольшее количество энергии в излучении ксеноновых ламп приходится на ближнее инфракрасное излучение. Кроме того, у них имеется излучение в ультрафиолетовой области до 300 мкм, что при сплошном спектре во всей видимой области делает радиацию ксеноновых ламп наиболее близкой к солнечной, доходящей до поверхности земли.

Колбы ксеноновых ламп (обычно 6 кВт) изготовляют из кварца. Внутри колбы размещаются два электрода, и она заполняется газом ксеноном под давлением 10 ат и более. Колба помещается в стеклянную трубку, через которую непрерывным потоком течет вода.

Выпуск отечественной промышленностью новых типов электрических ламп показывает, какие огромные возможности таятся в светотехнике для создания специальных растениеводческих ламп, появление которых, наряду с отбором растений и разработкой новых приемов их возделывания, позволит внедрить выращивание растений на искусственном освещении в широкую практику растениеводства.

При сравнительной оценке светотехнических качеств упомянутых выше электрических ламп для выращи-

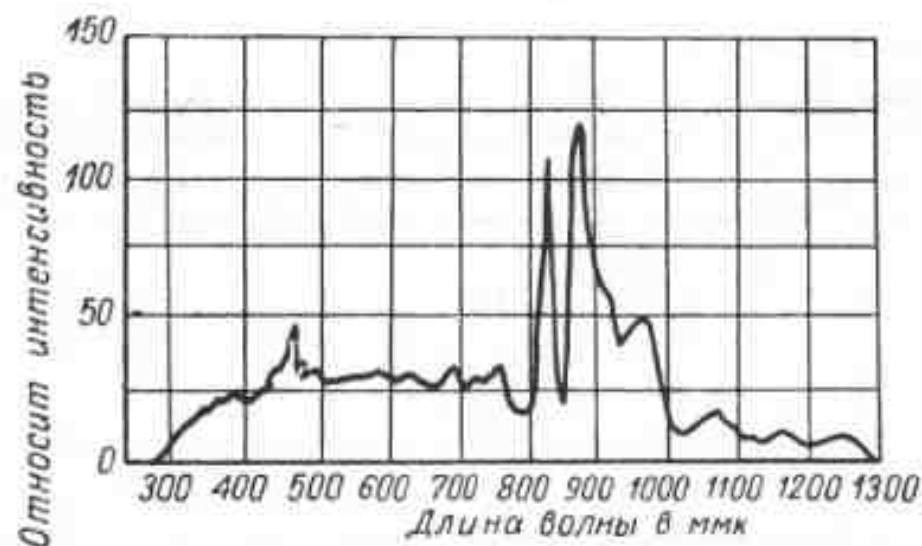


Рис. 12. Распределение энергии в спектре излучения ксеноновой лампы высокого давления ХВ-6000 фирмы Осрам (по Нюренбергу).

ния растений на искусственном освещении необходимо признать важную роль газополных зеркальных ламп накаливания. Они являются и, вероятно, долго еще будут являться, особенно в соединении с газосветной лампой, ценным и мощным источником радиации для выращивания самых светолюбивых видов растений.

Кроме того, несомненно большое значение должны иметь ксеноновые лампы. Вероятно в ближайшем будущем они окажутся, впредь до появления еще более совершенных ламп, наиболее подходящими для культуры растений с применением искусственного освещения.

Что касается люминесцентных ламп и ламп ДРЛ, то они, как показано при описании соответствующих опытов, дают хорошие результаты при выращивании некоторых теневыносливых видов и особенно для создания бокового освещения и при размещении среди растений.

ИЗМЕРЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ

Еще в конце прошлого века К. А. Тимирязев писал: «Я был первым ботаником, заговорившим о законе сохранения энергии и соответственно с этим заменившим слово «свет» выражением «лучистая энергия». Это не было простой заменой одного слова другим, но существенно изменяло основную точку зрения и вызывало сомнение в верности самих фактов. Став на точку зрения учения об энергии, я первый высказал мысль, что логичнее ожидать, что процесс разложения углекислоты должен зависеть от энергии солнечных лучей, а не от их яркости»*. Говоря же о способах оценки количества лучистой энергии, необходимой для фотосинтеза, К. А. Тимирязев прямо указывал: «Мы имеем только один способ измерения энергии, живой силы данного луча; он заключается в определении их теплового напряжения»*.

* К. А. Тимирязев. Сочинения, т. 1. Сельхозгиз, 1937, стр. 190, 340 и 341.

Несмотря на такие давнишние и категорические указания К. А. Тимирязева, не только зарубежные, но, до недавних дней, и советские исследователи для оценки действия лучистых потоков на рост и развитие растений пользовались не энергетическими, а светотехническими единицами. Это обстоятельство не прошло без вреда для развития представлений о роли света или, точнее, различных излучений в жизни растительных видов.

Основным свойством всякого излучения, независимо от источника (солнце, лампа), является перенос им определенного количества энергии, заключенного в каждой пучке его лучей. Перенесенная таким образом в единицу времени энергия составляет меру интенсивности пучка, каковы бы ни были качества составляющих его излучений. Интенсивность пучка может быть выражена количеством энергии в единицу времени — мощностью.

Пока энергия находится в виде излучения, она совершенно недоступна измерению. Поэтому ее необходимо превратить в другую форму, доступную измерению. Проще всего лучистую энергию превратить в теплоту. Зная механический эквивалент тепла, можно легко найти значение лучистого потока в любых механических единицах.

Поток энергии можно выразить в ваттах на единицу площади, в эргах или калориях на единицу площади и в единицу времени. Между этими единицами измерения существует определенное соотношение (табл. 10).

Таблица 10

Соотношения между единицами измерения потока энергии

Единицы измерения	вт/см ²	эрг/см ² · сек	кал/см ² · сек
вт/см ²	1	10 ⁷	0,239
эрг/см ² · сек	10 ⁻⁷	1	2,39 · 10 ⁻⁸
кал/см ² · сек	4,19	4,19 · 10 ⁷	1

Энергия солнечного лучистого потока на уровне земли на перпендикулярную к солнечным лучам поверхность при выражении ее в вышеуказанных единицах может иметь следующие значения: 1 кВт/м², или 0,1 вт/см², что равно 0,023 кал/см² · сек, или 10⁶ эрг/см² · сек.

Из приведенных цифр, показывающих соотношение между различными энергетическими единицами, можно видеть, что практически удобнее всего пользоваться электрическими единицами, да, пожалуй, они и всего привычнее для широкого круга людей.

Кроме того, видимую часть излучений часто характеризуют в светотехнических единицах: фотах, люменах, люксах и т. п. Наблюдения показывают, что в том случае, когда солнце близко к зениту и атмосфера чиста, каждый гектар земной поверхности получает 10 000 кВт солнечной энергии. Что касается освещенности, то она в этих же условиях составляет около 100 000 лк*. Но стоит измениться спектральному составу излучения — сейчас же изменяется и соотношение между мощностью лучистого потока и освещенностью, вызываемой им. В светофизиологических исследованиях часто пользуются и светотехническими единицами, характеризуя освещенность растений в люксах, что приводило и приводит к путанице в основных представлениях о значении лучистой энергии для жизни растений.

Непригодность светотехнического метода учета лучистой энергии для растениеводческих целей вытекает из его физической сущности. Прежде всего, исторически единицы измерения «силы света» возникли из изучения зрительных впечатлений человека и соответственно этому были долгое время визуальными, т. е. о силе света судили на основании личных зрительных впечатлений.

Основой для определения «силы света» служит так называемая международная свеча, представленная группами ламп с угольной нитью. Единицей светового потока является поток, испускаемый источником в 1 международную свечу внутри телесного угла в 1 стерадион. Эта единица называется люмен.

Единицей освещенности является люкс, равный одному люмену на 1 м², или освещенности, создаваемой одной свечой на расстоянии 1 м. Отсюда частое название этой единицы — метросвеча. Следовательно, люкс, так широко используемый в физиологической литературе, по своему существу является единицей, совершенно непригодной для измерения энергии.

* По данным Н. Н. Калитина, эта величина может достигать 290 000 лк.

Понятно, что для измерения общей, как говорят интегральной, мощности любого лучистого потока выгоднее всего пользоваться приборами, имеющими своей приемной частью тело, наиболее полно поглощающее всякое излучение. Лучшее всего для этих целей подошло бы абсолютно черное тело. Опыт показывает, что неплохим заменителем абсолютно черного тела является хорошо приготовленная сажа, которая в этом случае поглощает до 98% падающей на нее лучистой энергии. Поэтому все наиболее точные (абсолютные) актинометрические приборы своей приемной частью имеют слой сажи. В частности, такой неселективной в видимой области приемной частью обладает пиранометр Янишевского, широко используемый в работах лаборатории вместо принятого ранее для этих же целей объективного люксметра и фотометра, которые являются селективными приемниками. Приемник называется неселективным, если при равенстве лучистых потоков он одинаково реагирует на все монохроматические излучения. Неселективными приемниками являются различные термобатареи, приемная часть которых покрыта сажей. Все остальные приемники и, в частности, широко распространенные сейчас фотоэлементы весьма селективны, т. е. неодинаково чувствительны к различным монохроматическим излучениям. Основой фотометрических приборов чаще всего являются селеновые фотоэлементы со спектральной чувствительностью, повторяющей довольно хорошо кривую чувствительности глаза, что и делает их очень хорошими светотехническими приборами, но мало пригодными для целей светофизиологии.

Существенное несоответствие в сравнительной оценке различных излучений селективными и неселективными приемниками хорошо иллюстрируется сравнением лучистых потоков солнца и ламп накаливания при измерении их в люксах и ваттах.

Как уже указывалось выше, освещенность, создаваемая солнечными лучами, может достигать 100 000 лк; освещенность же, создаваемая при помощи обычных ламп накаливания, не превышает 20 000 лк, т. е. оказывается в пять раз меньшей. Чаще же всего приходится иметь дело с освещенностью, получаемой от электрических ламп, не превышающей 15 000 лк, т. е. меньшей по сравнению с солнечной почти в 7 раз. Отсюда и воз-

никло представление о несравнимости освещенностей прямым солнечным светом и светом электрических ламп, а следовательно, и о принципиальной невозможности получения вполне нормальных растений на искусственном освещении. Совсем по-иному выглядит сравнение лучистых потоков солнца и ламп накаливания при оценке их в единицах мощности, например в ваттах.

Солнечное излучение на 1 см² перпендикулярной к лучам поверхности достигает мощности 0,1 вт и такую же интегральную мощность дает лучистый поток 300—500-ваттных ламп накаливания на расстоянии 10 см от нити.

Все дело сводится к тому, что люкметры не измеряют инфракрасной радиации и мало чувствительны в красной области, а спектр ламп накаливания состоит на 85—90% из этой радиации (в полуденном солнечном излучении инфракрасной радиации не выше 55%). Большие ошибки неизбежны и при использовании люкметров для сравнения лучистых потоков, различных по своему спектральному составу.

Учитывая все вышесказанное, мы считаем правильным измерять всякие лучистые потоки приборами, имеющими в своей основе неселективные приемники, и оценивать их в ваттах на квадратный сантиметр.

Следовательно, оценка лучистого потока может производиться в единицах мощности: эрг/сек, кал/сек, в ваттах и киловаттах, приходящихся на определенную единицу площади (мм², см², м²).

При измерении солнечной радиации выбор размерности площади не имеет существенного значения благодаря равномерности ее распределения на очень больших площадях. Практически в пределах 1 м² или даже гектара открытой горизонтальной земной поверхности на каждую единицу площади приходится равное количество энергии.

Несколько сложнее обстоит дело с выбором размерности площади при измерении лучистых потоков искусственных источников радиации. Дело в том, что все они, будь это лампы накаливания или люминесцентные и другие газоразрядные трубки, способны дать равномерное освещение только на очень незначительной площади. Поэтому воспринимающая поверхность используемых измерительных приборов также освещается неравно-

мерно. Следовательно, показания приборов являются усредненными. В частности, рабочая поверхность пирометра обычно составляет 16 см^2 . Данный прибор измеряет лучистую энергию, приходящуюся на 16 см^2 . Так как такая единица площади неудобна для измерений, остается отнести падающую энергию к 1 см^2 , для чего полученная величина должна быть уменьшена в 16 раз, или к 1 м^2 , для чего величина измеренной мощности лучистого потока должна быть увеличена в 625 раз. Обычно этот пересчет производят при градуировке. Мы сочли более удобным выражать мощность лучистого потока в ваттах на 1 м^2 . При использовании одной 500-ваттной лампы можно сконцентрировать излучаемую ею энергию на очень малой площади и получить высокие значения мощности лучистого потока, численно превосходящие величину электрической мощности лампы. Однако это не будет очевидно означать, что каждая точка поверхности 1 м^2 будет освещаться равномерно с такой мощностью одной 500-ваттной лампой.

Полагаем, что из сказанного становится понятным, каким образом лучистый поток одной 500-ваттной зеркальной лампы может на известном расстоянии от нити накаливания характеризоваться величиной в 800 вт/м^2 без нарушений закона сохранения энергии. Для действительного равномерного облучения таким потоком площади в 1 м^2 требуется большое число соответствующих ламп и много киловатт электроэнергии.

Неудобством определения мощности лучистого потока электрических источников освещения в вт/м^2 является то обстоятельство, что затраты электроэнергии также принято выражать в ваттах на 1 м^2 , что иногда приводит к путанице между этими двумя различными понятиями. Чтобы избежать ее в дальнейшем, мы предлагаем перейти на характеристику мощности лучистых потоков в милливаттах на квадратный сантиметр. Тогда средняя величина солнечного лучистого потока в полуденные часы будет составлять 100 мвт/см^2 , а мощность лучистого потока, равная, например, 800 вт/м^2 , выразится величиной в 80 мвт/см^2 .

Однако при этом никогда нельзя забывать, что действие измеряемой лучистой энергии на прибор и на живое растение будет далеко не одинаковым. В первом случае вся энергия излучения, упавшего на приемную

часть прибора, превращается в тепло, а во втором случае не только в тепло, но и в живую растительную массу — в тело растения. Необходимо помнить, что растения, живя за счет света, в отличие от всех других организмов активно усваивают его так же, как и минеральные элементы, углекислоту, воду и т. п. Конечно, термин питание в его обычном значении применительно к растениям теряет свое первоначальное значение, взятое из физиологии животных, и должен связываться совсем с другими процессами. Пока сущность этих процессов не будет вскрыта гораздо полнее, пока не выяснится действительная роль света в жизни растений, трудно с необходимой точностью разработать метод количественного учета используемого растением света.

ОТРАЖЕНИЕ, ПРОПУСКАНИЕ, ПОГЛОЩЕНИЕ И УСВОЕНИЕ СВЕТА РАСТЕНИЯМИ

Лучистая энергия, падающая на любое физическое тело, частично отражается, частично проходит через него и только некоторое ее количество оказывается поглощенным. Не являются в этом отношении исключением и листья растений. Они также поглощают только часть дошедшей до них лучистой энергии. Поглощенная листьями лучистая энергия не может быть измерена непосредственно.

При точных определениях поглощения света растениями нельзя избежать измерения трех совершенно обязательных величин: мощности лучистого потока, падающего на растения, его части, отраженной и рассеянной в пространстве поверхностью растения, и количества энергии, прошедшей через тело растения, например через листовую пластинку. Многократное измерение этих величин привело к представлению, что в большинстве случаев растения пропускают и отражают только около 10—15 или 20% падающего на них видимого света и, следовательно, поглощают около 80—90%. Если же учитывается весь лучистый поток солнца, то величина поглощения снижается до 45—55%. Но есть в литературе и другие данные. Например, Зейбольд (H. P. Seibold, 1932)

показал, что зеленая кожица лука толщиной в одну клетку пропускает 85%, отражает 10% и поглощает не более 5% видимого света.

Поглощенная растением (листом) лучистая энергия в основном превращается в тепловую и либо затрачивается в процессе транспирации на перевод воды в паровое состояние, либо, нагревая лист, рассеивается в окружающем его пространстве в виде длинноволновых тепловых лучей. На эти процессы затрачивается более 90% поглощенной энергии.

Количество же энергии, действительно использованной растением в процессе фотосинтеза, оказывается чрезвычайно низким и обычно не превышает 1—5% и лишь в исключительных случаях 10% от всей энергии, поглощенной растением.

Отражающая способность листьев (альбедо) определяется состоянием их поверхностей. Прежде всего имеют значение окраска листа, светлая или темная, характер его опушения, слабое или сильное, наличие или отсутствие воскового покрова и состояние поверхности, гладкая или морщинистая. Все эти особенности поверхности листьев делают их или блестящими, или матовыми, что сильно влияет на судьбу падающего на них лучистого потока.

Для определения количества отраженного и рассеянного растением света долго пользовались следующим методом: на зачерненные поверхности от 1 до 3 м² сплошным слоем укладывались сорванные листья определенного вида растения, а в центре над ними укреплялся измерительный прибор, обычно пиранометр, обращенный своей приемной частью вниз, к листьям. Недостатком данного метода, помимо громоздкости, является использование для измерения альбедо сорванных и, следовательно, начинающих вянуть листьев и далеко не полное улавливание всей отраженной энергии.

В последние годы для измерения отраженной листом энергии пользуются наиболее совершенным методом, применяя интегрирующую сферу (сферу Ульбрихта).

Пропускание листом лучистой энергии зависит от оптической плотности его, определяющей характер прозрачности для данной длины волны. Поэтому на размерах пропускания лучистого потока листом сильно сказываются его толщина, число и характер расположения клеток и пигментов внутри клетки, количество и качество

различных оптически активных пигментов и других поглощающих излучение веществ и т. д. Говоря короче, пропускание растения определяется поглощающей способностью среды, составляющей лист.

Измерение величины света, прошедшего через листья растений, не составляет труда и делается с достаточной точностью многими способами. Прежде всего измерение этой величины достигается путем наложения на приемную часть прибора листьев растений. Для более точных определений пропускания листом света используется интегральная сфера Ульбрихта.

Количество поглощенной листом энергии определяется как разность между мощностью лучистого потока, падающего на лист, и суммой рассеянной и пропущенной листом энергии по формуле:

$$A = S - (R + T),$$

где: A — поглощенная энергия;

S — мощность лучистого потока, приходящаяся к поверхности листа;

R — количество рассеянной энергии;

T — количество радиации, прошедшей через лист.

Основное значение для величины урожая растений имеет та часть энергии лучистого потока, которая связывается растениями в процессе фотосинтеза. Ее количество учитывается различными методами. Один из них заключается в том, что определяется общее количество сухого вещества, накопленного растением за определенный отрезок времени, и полученная величина сопоставляется с теплотой сгорания этого вещества. Зная теплоту сгорания, можно вычислить количество накопленной энергии. Располагая значением мощности поглощенного лучистого потока, нетрудно определить процентное соотношение между его энергией и энергией, усвоенной в процессе фотосинтеза.

При данном способе удобно пользоваться половинками одного и того же листа. Метод был применен в работах Ф. Н. Крашенинникова (1901) и К. А. Пуревича (1913), причем последний получил следующие результаты: листья клена использовали в процессе фотосинтеза только 0,6—2,7% всей падающей на лист энер-

гии, листья сахалинской гречихи — 1,9—7,7%, а листья подсолнечника — до 4,5%.

Иной метод был применен в работах Броуна и Эскомба (H. T. Brown and F. Escomb, 1902). Он заключается в определении количества углекислоты, разложенной листом за определенный отрезок времени. На основании полученных данных высчитывается количество энергии, необходимое для этого процесса (справочные данные), и найденная величина сопоставляется с общим количеством энергии, полученной листом. Используя этот метод, авторы установили, что в процессе фотосинтеза листья растений связывают от 0,5 до 4,5% всей падающей на них энергии.

Еще один метод определения энергии, идущей на фотосинтез, предложил К. А. Пуриевич (1913). Он основан на вычислении разности в поглощении лучистой энергии листьями растения за равные отрезки времени в атмосфере с нормальным содержанием CO_2 и в воздушном потоке, лишенном ее. Результаты в этом случае аналогичны двум предыдущим.

Все эти методы нуждаются в дальнейшем уточнении. Тем не менее следует признать, что растительные организмы усваивают незначительный процент доходящей до них лучистой энергии. Очевидно, основное количество поглощенной тканями растений лучистой энергии тут же затрачивается на физиологические процессы, возможно не связанные непосредственно с накоплением растительной массы.

Можно предположить, что самым непроизводительным видом расхода поглощаемой лучистой энергии является теплообмен с внешней средой. Быть может, в нем и кроется причина медленного роста большинства растений при невысоких температурах воздуха.

Несомненно, могут быть значительными и затраты поглощенной растениями лучистой энергии на транспирацию или, точнее, на поглощение, передвижение и испарение воды. Но прежде всего возникает вопрос, действительно ли растения поглощают столько лучистой энергии, сколько им приписывают. Не очень ли занижается количество отражаемого солнечного излучения?

Как бы то ни было, характер и величина использования растениями лучистого потока остаются очень неясными и нуждаются в серьезном изучении.

Начиная с 20-х годов нашего века, в работах по энергетике фотосинтеза для определения количества связанной в этом процессе энергии стали пользоваться понятием «квантовый выход» фотосинтеза. Концепция квантового выхода фотохимического процесса возникла в результате применения Эйнштейном (1913 г.) квантовой теории к фотохимии*. Развивая представления Планка о квантах колебательной энергии электронов в атомах и молекулах, Эйнштейн высказал мысль, что всякое вещество, подвергающееся фотохимическим изменениям, поглощает лучистую энергию в строго определенном количестве, по одному кванту (фотону) на молекулу. Естественно, что фотосинтез как наиболее важный фотохимический процесс в природе начал рассматриваться также с точки зрения квантового выхода. Напомним, что фотоны неизменны для каждого рода лучей, но различны для отдельных участков спектра. Чем больше длина волны, тем меньше величина фотона и, наоборот, с уменьшением длины волны возрастает энергия фотона. Поэтому общее количество лучистой энергии, поглощенное при фотохимическом преобразовании одной грамм-молекулы вещества, в разных областях спектра не будет равным. Так, для синих лучей ($\lambda = 486$ мкм) оно будет составлять 58 ккал, для желтых ($\lambda = 589$ мкм) — 48 ккал, для красных ($\lambda = 700$ мкм) — 38 ккал и для инфракрасных ($\lambda = 800$ мкм) — 3 ккал.

Синтез растениями органического вещества из углекислоты и воды обычно изображается при помощи формулы:



причем $\text{H} \cdot \text{COH}$ является, как считают, основной элементарной единицей, входящей во все углеводы, образующиеся в растениях в процессе дальнейших биохимических превращений. Подобная реакция может проходить при затрате 112 ккал энергии на создание каждой такой элементарной единицы ($\text{H} \cdot \text{COH}$). Это доказывается тем, что именно 112 ккал выделяются в виде тепла при обратном соединении данной единицы с кислородом.

* Е. Рабинович. Фотосинтез, т. II. Пер. с англ., изд-во иностранной литературы, 1953, стр. 516.

Следовательно, для превращения одной молекулы двуокиси углерода и одной молекулы воды в звено углеводной цепи и молекулу кислорода требуется около 112 ккал/моль. Нетрудно видеть, что на этот процесс недостаточно одного фотона с доступной энергией 40—60 ккал/эйнштейн*.

Стало очевидным, что для восстановления одной молекулы двуокиси углерода требуется затрата нескольких квантов света (фотонов). Поэтому начались работы по определению наименьшего числа фотонов, необходимых для восстановления молекулы двуокиси углерода, так как этот процесс определяет максимальную величину квантового выхода в наиболее благоприятных условиях. Из анализа кривых светового насыщения фотосинтеза следовало, что чем меньше интенсивность света, тем выше эффективность превращения энергии и квантовый выход. О насыщении световых кривых фотосинтеза стали говорить после работ Рейнке (J. Reinke, 1883), сделанных им вслед за русским ботаником А. Волковым (1866).

Сущность этого явления заключается в том, что сперва с увеличением интенсивности освещения величина фотосинтеза возрастает и, дойдя до определенного значения, становится постоянной или иногда даже падает. Графически кривые насыщения (рис. 13) первоначально, вслед за возрастанием интенсивности света, выгнута изгибаясь, идут вверх, а затем становятся горизонтальными. Переход кривой в горизонтальное положение характеризует момент полного светового насыщения. Достигнув уровня насыщения, скорость фотосинтеза перестает зависеть от любого переменного фактора, в данном случае интенсивности освещения. Но переменным фактором может быть и температура среды, и количество двуокиси углерода, воды и т. д.

Первыми исследователями, определившими в 1929 г. максимальный квантовый выход при низкой интенсивности света, были Варбург (C. Warburg) и Негелейн (E. Negelein). Их работа является началом нового этапа количественных исследований фотосинтеза. Объектом их исследований была суспензия одноклеточной зеленой водоросли — хлореллы (*Chlorella*). Для определения фотосинтеза они пользовались точным манометрическим

* Эйнштейном называют энергию граммолярного числа квантов.

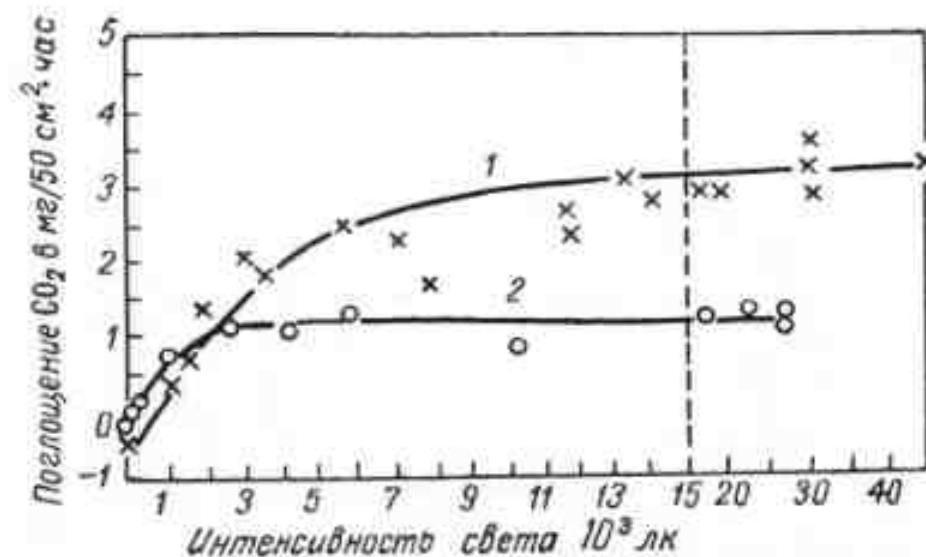


Рис. 13. Световые кривые насыщения листьев бука.
1 — насыщение наступает при 30 000 лк, 2 — при 3 000 лк (по Е. Рабиновичу).

методом, измеряющим выделение кислорода в специальном аппарате, предложенном Варбургом в 1919 г. Желая избежать трудности учета рассеянной радиации, авторы использовали в своих опытах насыщенные суспензии хлореллы, поглощающие практически весь падающий на них свет. Благодаря большой толщине слоя клеток часть их была настолько затенена, что не могла участвовать в фотосинтезе, но это не мешало их интенсивному дыханию. Интенсивность света в опыте Варбурга и Негелейна составляла всего около 1000 эрг/см²·сек, поэтому общий объем газообмена дыхания был выше газообмена фотосинтеза. При этом они заметили, что длительное освещение не уменьшает, а, наоборот, усиливает дыхание.

Для того, чтобы свет не стимулировал дыхание, Варбург начал чередовать периоды света с периодами темноты. Длительность периодов равнялась 10 минутам. В результате этого и других подобных опытов Варбург и Негелейн высчитали квантовый выход, близкий к 1/4. Для определения квантового выхода используют следующее уравнение:

$$\gamma = P/Ja,$$

где: γ — квантовый выход;

P — выход фотосинтеза (в молях восстановленной двуокиси углерода или выделившегося кислорода);

Ja — поглощение света (в эйнштейнах).

Высокое значение квантового выхода фотосинтеза, полученное в первой работе Варбурга и Негелейна, близкое к $\frac{1}{4}$, с первого взгляда хорошо совпадало с тем, что восстановление двуокиси углерода водой заключается в переносе четырех водородных атомов. Если бы величина $\frac{1}{4}$ не была столь вероятна с химической точки зрения, то она сразу подверглась бы широкой критике как очень высокая и полученная в очень специфических условиях опыта. Как бы то ни было, из данных Варбурга выходило, что наименьшее число квантов красного света, достаточное для покрытия затраты энергии при реакции $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + (\text{H}_2\text{CO})$, равно 3 и максимум 4.

В течение первых полутора десятков лет теория «четырёхквантового механизма» фотосинтеза вполне устраивала всех, кто хотел подойти к проблеме фотосинтеза с точки зрения превращения энергии. Но затем, в течение последующих лет, в ряде работ как с хлореллой, так и с другими растениями, в том числе и высшими, квантовый расход увеличился до 9—16 квантов на молекулу восстановленной двуокиси углерода.

По данным Эмерсона (R. Emerson) и Льюиса (C. M. Lewis), истинная величина квантового выхода фотосинтеза у разных видов растений варьирует в очень незначительных пределах. Об этом свидетельствует

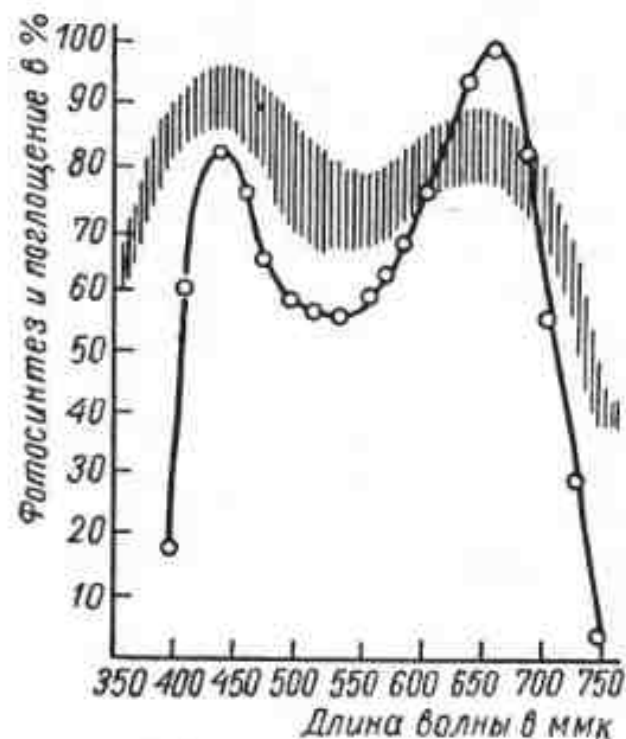


Рис. 14. Кривая спектра действия фотосинтеза листьев пшеницы (по Гуверу). Заштрихована зона расположения кривых спектров поглощения света живыми листьями разных растений (по Ничипоровичу).

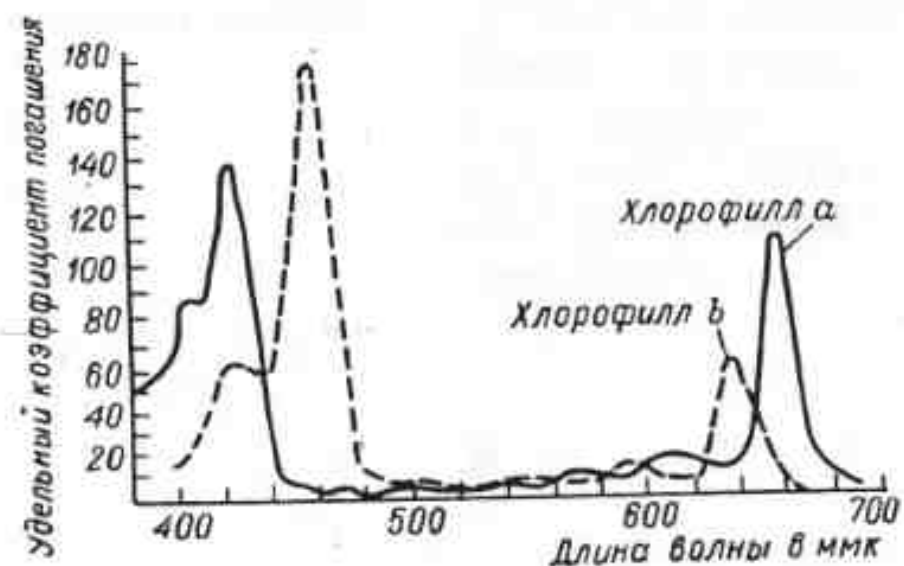


Рис. 15. Спектры поглощения света хлорофиллами a и b в эфирных растворах (по Цшейле и Комар).

сходство результатов по определению квантового выхода фотосинтеза, полученного Габриэльсеном (E. K. Gabrielsen) для листьев высших растений. Так, еще в 1935 г. Габриэльсен, работая с листьями белой горчицы (*Sinapis alba*), получил, на основании газометрических измерений и путем экстраполяции световых кривых к нулевой освещенности, величины, соответствующие максимальному квантовому выходу, около $0,1 \pm 0,02$.

Наиболее распространенная в настоящее время 12-квантовая схема фотосинтеза, кажущаяся ряду исследователей наиболее реальной, в действительности также имеет немало уязвимых мест. Не разбирая их, ограничимся указанием на очевидную недостаточность наших современных представлений о таком важном процессе, как фотосинтез.

Одним из примеров, иллюстрирующих это положение, могут являться недавно полученные материалы о наличии у растений пигмента фитохрома. Это вновь открытое вещество существует в двух формах, отличающихся между собой своими оптическими свойствами. В одном состоянии максимум поглощения этого вещества находится при длине волны, равной 660 мкм, а в другом состоянии максимум поглощения перемещается в область дальнего красного спектра с длиной волны 735 мкм. Эти сравнительно совсем недавно установленные факты вводят физиологию в русло новых представлений, свидетельствуя о том, что, помимо фотосинтеза

в его современном представлении, существуют другие, столь же важные для жизни растений, физиологические процессы, идущие за счет усвоения световой энергии.

В последние годы воззрение на первичные реакции фотосинтеза не остается постоянным. В частности, появились доказательства в пользу чисто химических процессов фотосинтеза, идущих в темноте (темновые реакции). Но и представление о чисто световых реакциях не остается неизменным. Так, все большего внимания заслуживают взгляды американского ученого Арнона (D. Арнон), доказывающего, что важным этапом связывания растениями энергии света и преобразования ее в энергию химических связей является, возможно, образование богатых энергией фосфатных связей, что подтверждается процессом энергичного образования растениями под воздействием света аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ).

Нельзя также не отметить, что еще совсем недавно, исходя из оптических характеристик растворов хлорофилла, считали, что фотосинтез растений почти не идет в зеленой части солнечного спектра, а теперь получено много фактов, свидетельствующих, что и в зеленых лучах фотосинтез может идти достаточно хорошо. Поэтому «классическая» кривая фотосинтеза ныне выглядит совсем иной: в ней нет глубокого провала в зеленой области (рис. 14), характерного для поглощения света растворами хлорофилла (рис. 15).

Нам кажется, что в связи с только что сказанным следует вернуться к серьезному разбору квантовых оценок фотосинтеза. Ведь в их основе лежит представление, что для фотосинтеза исключительно важными являются красно-оранжевые лучи с максимумом λ около 650 мкм.

Разработка новых представлений о фотосинтезе и фотобиологии растений должна стать широким полем важнейших открытий и теоретических обобщений, связанных с одной из капитальнейших проблем естествознания — превращения материй из одной формы существования в другую. С этой точки зрения исследование поглощения растениями лучистой энергии и превращения ее в энергию органических соединений представляет исключительный по важности раздел фотобиологии.

ОСНОВНЫЕ ЗВЕНЬЯ ИСКУССТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ РАСТЕНИЙ

ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ

Для выращивания растений при электрическом освещении используют как отдельные лампы, так и группы ламп, собранные в определенные осветительные установки.

Излучение отдельных электрических ламп рационально только в комбинации с естественным освещением, т. е. в тех случаях, когда электрическое освещение применяют для досвечивания.

В этом случае отдельные, достаточно мощные лампы размещают на определенном расстоянии одну от другой и, как правило, на достаточно большой высоте над растениями (около 100 см). При этом следует заботиться об отражателях для каждой лампы. Целью этих отражателей, например типа «Глубокоизлучатель» или «Универсаль», является, с одной стороны, собрать излучение лампы и направить его вниз на освещаемую площадь и, с другой стороны, предохранить лампу от попадания на ее нагретую поверхность воды. В последнем случае, особенно при использовании зеркальных ламп накаливания, не нуждающихся в дополнительной арматуре для направления лучистого потока, в теплицах можно с успехом употреблять легкие и дешевые металлические диски (кружки), надеваемые на патрон.

Они (эти диски) надежно предохраняют горящие лампы от конденсата с кровли теплиц.

Для досвечивания растений в теплицах отдельными лампами наиболее пригодны ксеноновые и ДРЛ, но они нуждаются в специальной арматуре, которая, к сожалению, не выпускается в массовом количестве. При использовании для досвечивания ламп ДРЛ, как показала практика, их лучше всего располагать горизонтально, а не вертикально, как рекомендуется заводской инструкцией.

Осветительные установки для выращивания растений, собранные из различных ламп, могут применяться и в тепличных условиях, и в специальных темных помещениях. Чаще всего они состоят из ламп люминесцентных, люминесцентных и ламп накаливания, из различных ламп накаливания и из ламп ДРЛ.

Люминесцентные трубки 30, 40 и 80 вт монтируют на общие металлические или еще лучше пластмассовые прямоугольные каркасы, одну из сторон которых определяет длина ламп, а другая устанавливается в зависимости от назначения данной установки.

Располагают люминесцентные трубки на каркасе параллельно друг другу с интервалами между осями 40—100 мм.

Такие рамы, различные по размерам, можно располагать как горизонтально над растениями, так и вертикально между ними. В последнем случае их лучше размещать так, чтобы трубки находились параллельно освещаемой поверхности, а не перпендикулярно к ней.

При размещении люминесцентных ламп среди растений нет нужды в дополнительных отражающих свет устройствах.

Выбор того или иного способа досвечивания зависит от характера культуры.

Так, например, при шпалерной культуре огурцов и томатов верхнее освещение менее рационально, чем боковое.

Для его осуществления, особенно при наличии достаточно высоких температур воздуха, могут быть использованы с большим успехом люминесцентные трубки дневного и белого света.

Указанные трубки 30- или еще лучше 40-ваттные,

имеющие длину от 95 до 125 см, размещаются в виде заборов между рядами растений.

Пока растения невелики, можно пользоваться незначительным количеством трубок, а по мере роста растений поднимать и высоту заборов. Если нижние листья опадают, то нижние трубки становятся ненужными, и их вынимают.

Вертикальное расположение трубок делает такую регулировку невозможной.

Люминесцентные трубки крепятся на рамах при помощи специальных патронов с вставленными в них стартерами. Дроссели монтируют отдельно. Расстояние между осями трубок определяет их количество на каждый квадратный метр вертикальной плоскости, а следовательно и на всю подлежащую досвечиванию кубатуру теплицы. Чем хуже условия естественного освещения, тем меньшие расстояния должны быть между осями трубок; наоборот, чем больше света в теплицах, тем реже могут быть расположены трубки.

Общая облученность растений установками, состоящими из люминесцентных трубок, невелика и зависит от числа ламп, расстояния между ними и главным образом от расстояния самой установки от поверхности растений.

Из-за малой мощности излучения с поверхности люминесцентной лампы для освещения рассады огурцов или томатов на 1 м² в теплице используют от 10 до 15 40-ваттных трубок.

Для того, чтобы по мере улучшения естественного освещения можно было наиболее просто, не изменяя самих установок, сократить количество трубок, их лучше всего располагать на расстоянии 50 мм одна от другой. Точнее, расстояние между осями трубок должно быть 50 мм.

Тогда, размещая трубки подряд, через одну или две, можно тем самым создавать «заборы» с различной частотой трубок — через 50, 100, 150 мм и т. д. Такая система освещения очень лабильна и не мешает использованию растениями естественного света. Лучистый поток люминесцентных ламп при таком их размещении в пространстве используется наиболее полно.

В случае применения осветительных установок для освещения растений сверху, для чего они располагаются

над растениями, полезно в установку ввести общий верхний отражатель света.

Лучше всего для этой цели использовать алюминиевую фольгу. Она не утяжеляет и не усложняет установку, так как вес ее незначителен, и она легко сворачивается в трубку в конце рамки. Это позволяет использовать одну и ту же раму и для верхнего и для бокового освещения.

При верхнем освещении рамы с люминесцентными трубками размещают над вершинами растений на высоте 2—5 см.

Такого типа установки из люминесцентных ламп обычно располагают в теплицах, но во многих случаях их рациональней размещать в темных помещениях, особенно если речь идет о выращивании рассады.

Наконец, при выращивании растений полностью на электрическом освещении люминесцентные лампы рационально использовать для освещения растений с трех сторон (рис. 16).

В этом случае растения получают наиболее равномерное и полное освещение и поэтому лучше растут и увеличивают урожай плодов.

Осветительная установка, состоящая из зеркальных ламп накаливания и водяного экрана, дает лучшие результаты, чем используемые в практике рамы с люминесцентными трубками, как при получении урожаев плодов, так и при выращивании рассады томатов и огурцов.

При выращивании рассады томатов на люминесцентном освещении на одно растение затрачивается почти 5 кВт·ч, а при выращивании в установке с зеркальными лампами накаливания — около 8 кВт·ч электроэнергии. Последняя рассада значительно лучше первой и дает урожай плодов в более короткий срок. Но главное различие в способах выгонки рассады томатов заключается в неодинаковой производительности этих двух видов установок.

В установке, состоящей из люминесцентных ламп и освещающей 1 м² площади пола, за месяц (30 суток) можно вырастить только сто растений при продолжительности ежедневного освещения 20 часов.

В осветительной установке, состоящей из зеркальных ламп накаливания, за то же время, на той же площади

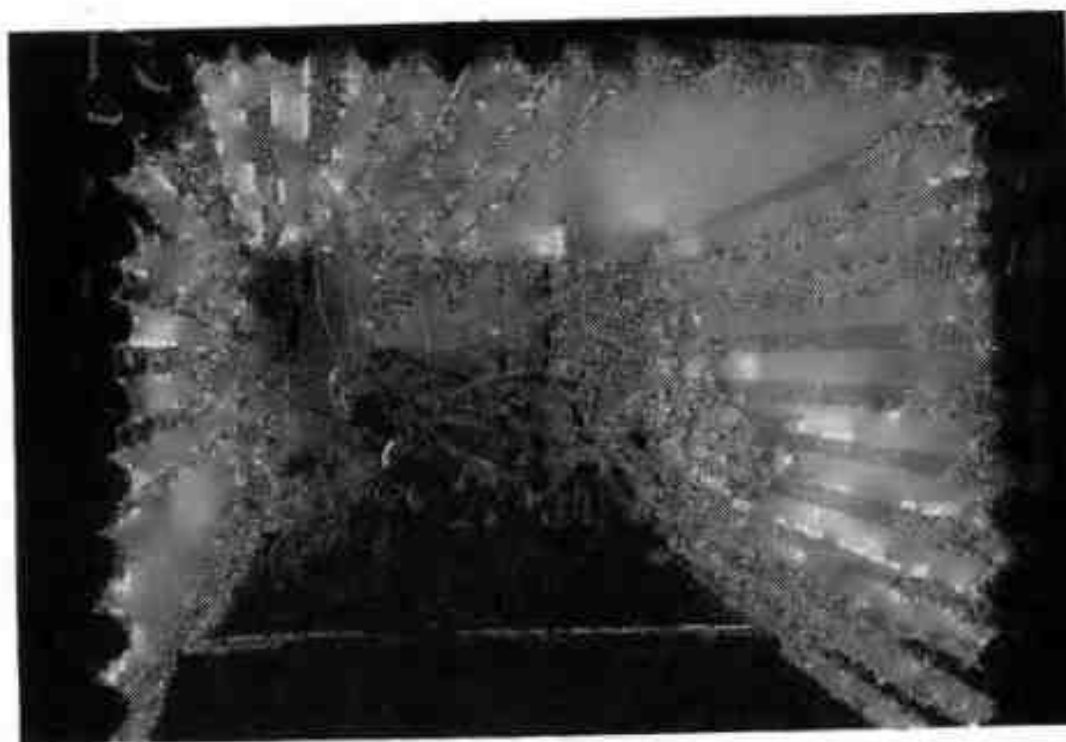


Рис. 16. Трехстороннее освещение томатов светом люминесцентных ламп.

можно получить 400 растений рассады. Это происходит потому, что период ежедневного освещения сокращается до 12 часов, что дает возможность использовать одну установку для выращивания двойного количества растений (200 штук), а получение рассады не за 30—40 суток, как это наблюдается при использовании люминесцентного света, а всего за 14—15 дней, позволяет использовать одну и ту же установку 2 раза за 30 дней.

Таким образом, общее количество рассады томатов, полученной за месяц при использовании установок из зеркальных ламп накаливания, увеличивается в четыре раза по сравнению с люминесцентными установками.

Установка из ламп накаливания с водяным потолком пригодна для выращивания любых видов растений. В этой установке используются 300-ваттные зеркальные лампы накаливания.

Конструктивно и по расходу электроэнергии эта осветительная установка значительно отличается от установки, состоящей из люминесцентных трубок.

Установка с зеркальными лампами накаливания и водяным потолком (рис. 17) состоит из: крюков для подвешивания рамки с лампами 1; троса 2; зажима для регулировки высоты ламп над резервуаром 3; металлического отражателя с вмонтированными в него электропатронами (каркас на рисунке не показан) 4; электроламп 5; кюветы для воды, с дном из зеркального стекла

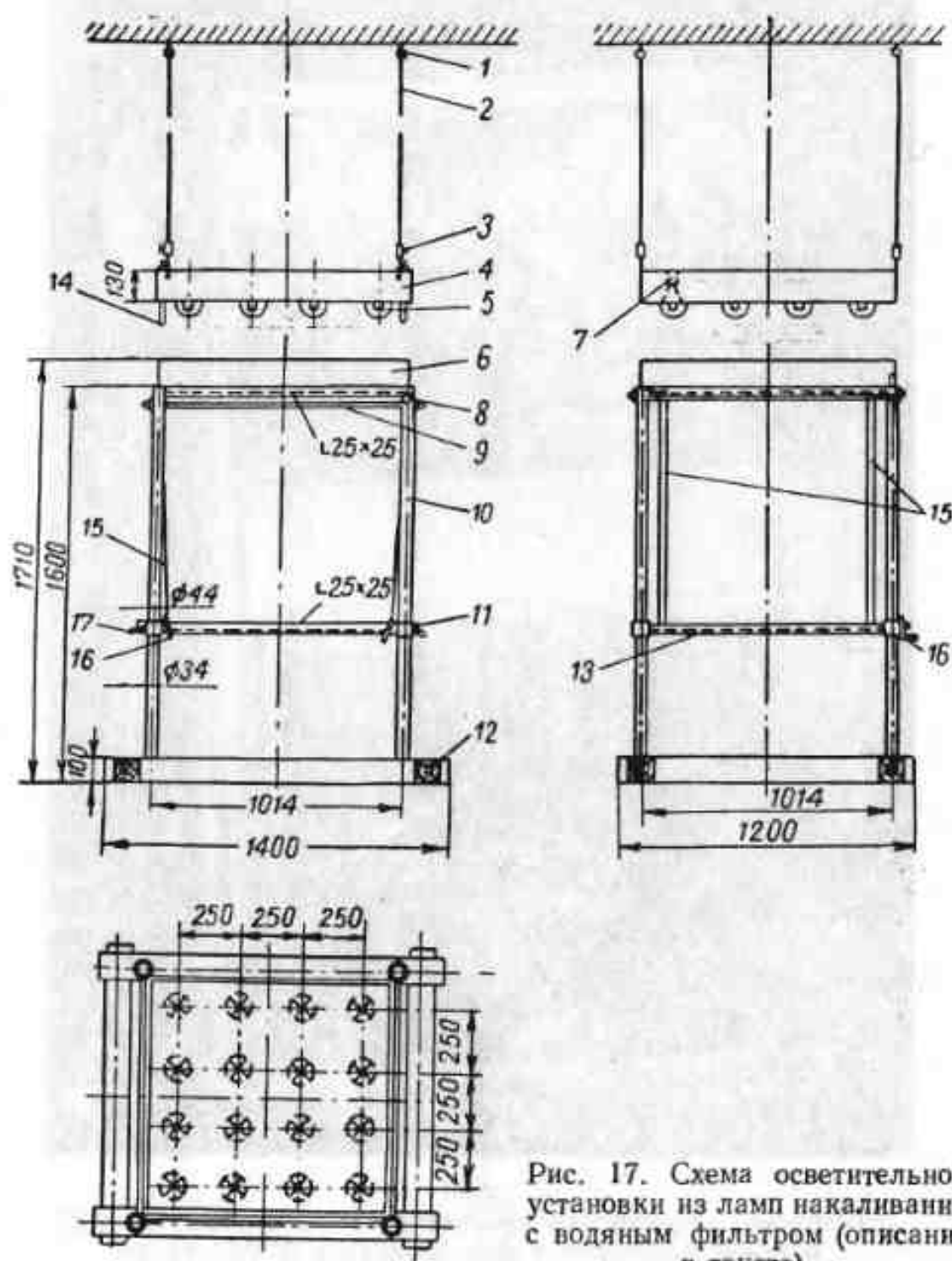


Рис. 17. Схема осветительной установки из ламп накаливания с водяным фильтром (описание в тексте).

толщиной 6—7 мм 6; лампового патрона 7; стекла 8; стяжки 9; штанги высотой в 1,5 м (4 шт.) 10; втулки подъемного стола 11; металлического основания для крепления установки 12; подъемного стола для растений, который может подниматься и опускаться по мере надобности 13; упора для фиксирования высоты ламп над стеклом 14; подъемной ленты 15; рукоятки подъема стола 16; стопора 17. Если сеть трехфазная, то лампы распределяют на группы для более равномерной нагрузки фаз. Общий вид осветительной установки в рабочем состоянии показан на рис. 18.

Электрическое напряжение данной установки стандартное: 127—220 в — в зависимости от рабочего напряжения электроламп. В простейшем случае для освещения 1 м² на рамке монтируют 16 электроламп. Таким образом, расход электроэнергии на 1 м² составляет: $16 \times 300 = 4800$ вт (4,8 кВт). Возможно также и смешанное использование ламп разной мощности, если размеры их колб равны между собой.

Очень важной частью этих осветительных установок является водяной экран со слоем проточной воды 10—15, максимум 20 мм. Такой слой воды, отрезая инфракрасную радиацию с длиной волны более 1200 мкм, достаточно хорошо пропускает ближнюю инфракрасную радиацию, которая несомненно полезна растениям и уж во всяком случае не вредна. Лучистый поток 300-ваттной зеркальной лампы накаливания, имеющей температуру нити около 2800° К, пройдя через слой воды в 10 мм, очень напоминает спектр прямого солнечного излучения (рис. 19).

Основой водяного фильтра, его дном, является зеркальное стекло толщиной 6—7 мм. Оно зажимается при помощи соответствующих болтов между двумя железными уголками. Между стеклом и железом прокладываются сырая резина, или мягкие резиновые трубки, или, в крайнем случае, простые резиновые трубки с небольшим количеством находящегося в них воздуха. Высота железного уголка под стеклом должна быть не менее 30—40 мм.

Колбы ламп при слое воды 10—15 мм находятся непосредственно над водой. В случае более глубокого водяного экрана колбы ламп следует погружать в воду



Рис. 18. Осветительная установка лаборатории светофизиологии (АФИ) в рабочем виде с культурой томатов.

так, чтобы между ними и стеклом был слой воды 15—20 мм.

Для поддержания температуры воды в фильтре на уровне от 20 до 40° в осветительную установку включается автомат, состоящий из соленоидного вентиля, соответствующего реле-пускателя и контактного термометра. Назначением этого автомата является включение и выключение подачи в фильтр водопроводной воды в зависимости от температуры водяного потолка осветительной установки.

Общая характеристика лучистого потока данной осветительной установки, состоящей из 16 зеркальных ламп накаливания и водяного фильтра на расстоянии 6 см от стеклянного потолка, дана на рис. 20. Непосредственно под центром ламп мощность излучения может достигать 1,0 квт/м², т. е. приблизится к солнечной. В среднем она держится на уровне 800 вт/м². Это также очень высокая мощность излучения. Между лампами, расположенными на расстоянии 25 см одна от другой, мощность лучистого потока падает до 350 вт/м². Обычная средняя мощность лучистого потока, при которой используются осветительные установки, в нашей лаборатории составляет около 450 вт/м².

Из анализа только что приведенных материалов, характеризующих лучистый поток нашей осветительной установки, напрашивается вывод о полезности испытания

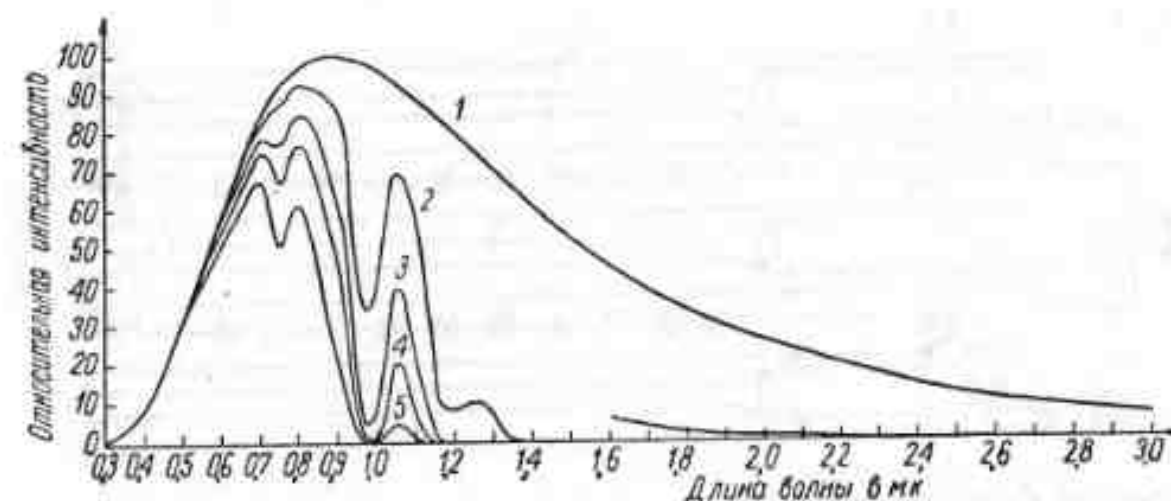


Рис. 19. Распределение энергии в спектре лампы накаливания мощностью 300 вт (с температурой нити 2800° К) без водяного фильтра и с водяным фильтром при различных по толщине слоях воды.

1 — без водяного фильтра, 2 — с водяным фильтром толщиной 1 см, 3 — то же 3 см, 4 — то же 5 см, 5 — то же 10 см.

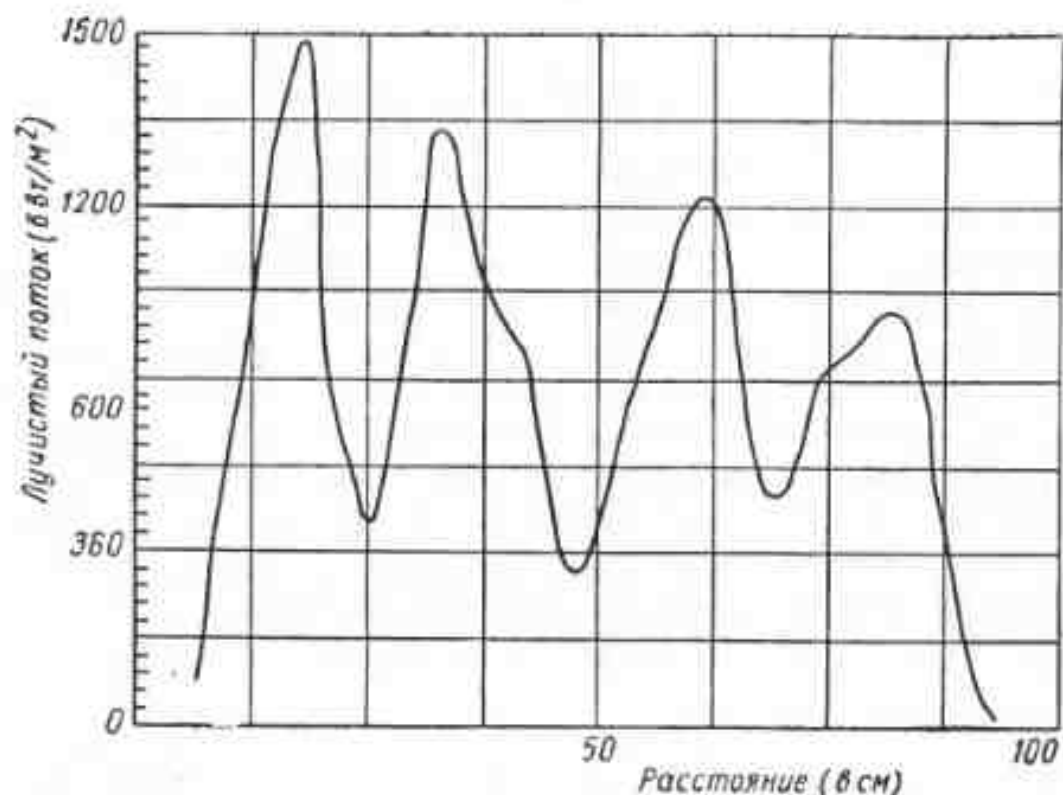


Рис. 20. Распределение лучистого потока в осветительной установке лаборатории светофизиологии АФИ.

200-ваттных и даже 100-ваттных зеркальных ламп накаливания, особенно при более частом их расположении. Такие установки создадут более равномерный и, вероятно, вполне достаточный для растений лучистый поток.

При использовании в установке 300-ваттных зеркальных ламп накаливания световые условия для растений по мере их роста не остаются постоянными. Они постепенно распределяют свои листья по всей плоскости осветительной установки, в результате чего различные части одного и того же растения или даже листа его находятся в различных (по мощности излучения) световых условиях. В настоящее время подобные осветительные установки путем их значительной переделки и совершенствования превращены в лабораторные камеры искусственного климата.

Для производственных условий установки, состоящие из зеркальных ламп и водяного потолка, рекомендуется доводить в ширину до 1,5 м, а в длину до 20 м и более. В этом случае будет меньше краевых растений,

дающих некоторое понижение урожая из-за худших условий освещения.

Комбинированные установки (рис. 21), состоящие из люминесцентных трубок и различных ламп накаливания, впервые стали использоваться в лаборатории светофизиологии АФИ. Первая установка такого типа была сконструирована в 1946 г. из 15-ваттных люминесцентных трубок и мелких автомобильных ламп накаливания. Общая электрическая мощность такой установки составляла от 0,9 до 1,2 кВт/м².

Электрическая схема такой установки должна иметь две фазы, создающие между собой напряжение 220 в для питания люминесцентных ламп, и нулевой провод.

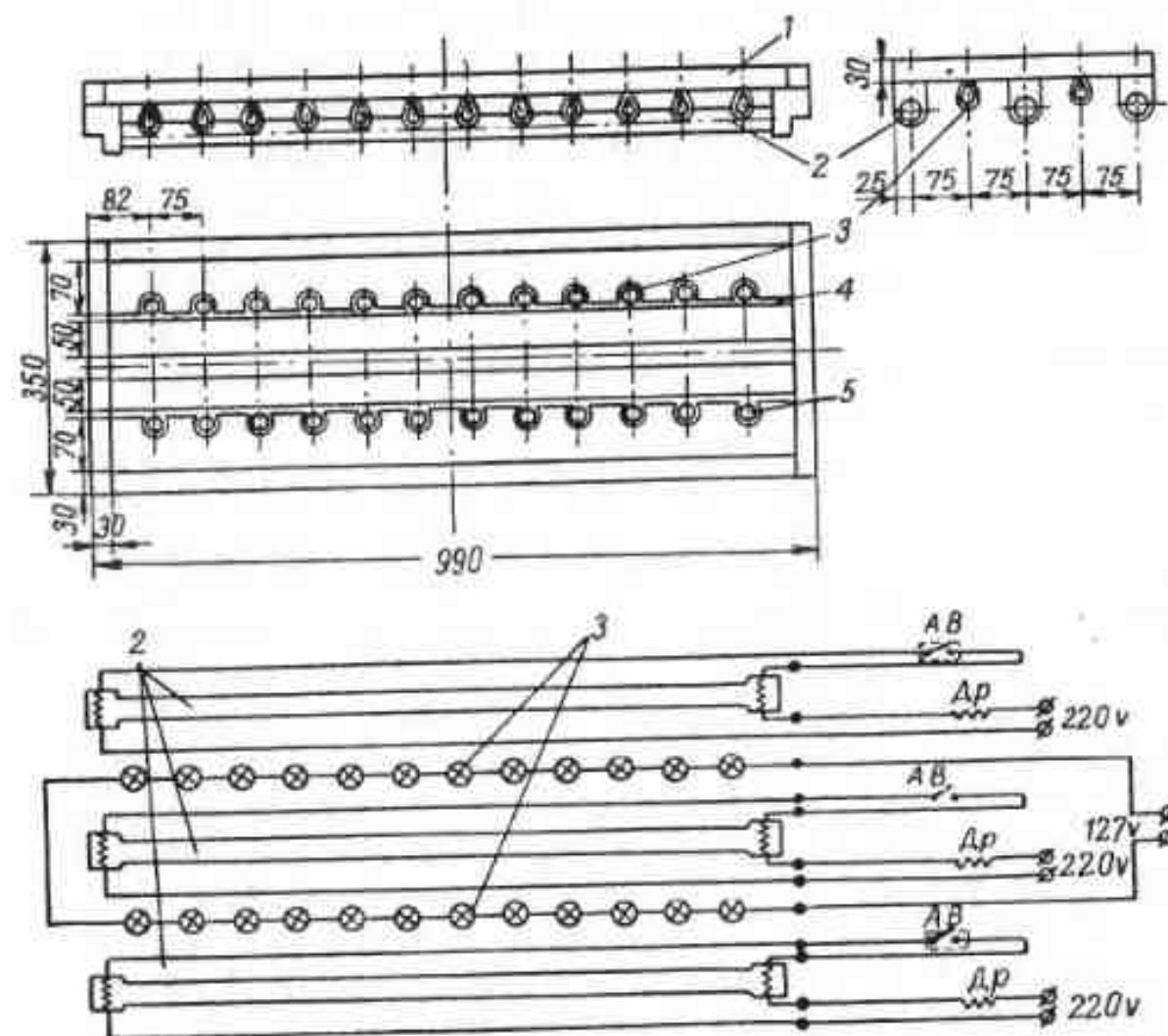


Рис. 21. Схема комбинированной осветительной установки из мелких автомобильных и люминесцентных ламп.

1 — каркас, на котором монтируются лампы, 2 — лампы люминесцентные 30 и 40 вт, 3 — автомобильные лампы (6 в, 21 вт), 4 — держатель ламповых патронов, 5 — ламповый патрон; АВ — автоматический выключатель, Др — дроссель.

Напряжение между этим проводом и любой фазой будет равно 127 в для питания мелких автоламп.

Для освещения 1 м² необходимы три таких установки, которые включаются так, чтобы нагрузка на каждую отдельную фазу была одинакова.

Как видно, схема такой установки более сложна, чем при использовании только одних ламп накаливания. Кроме того, для 6-вольтных лампочек требуется специальная арматура, без этого пользование ими опасно, так как они питаются от нормальной осветительной сети при последовательной схеме включения. По этой причине совершенно недопустимо использование автолампочек с арматурой, при которой возможен контакт человека с неизолированным проводником, находящимся под напряжением. Люминесцентные лампы следует использовать только в стандартной, хорошо изолирующей арматуре.

Расстояние между осями крайних люминесцентных ламп (ширина установки) — 35 см, а длина определяется длиной люминесцентной лампы. Освещаемая площадь равна 0,3 м². Мощность всей установки определяется суммой мощностей, затрачиваемых на питание люминесцентных ламп $30 \times 3 = 90$ вт и около 300 вт на автомобильные лампочки, всего примерно 400 вт на 0,3 м², или 1,2 кВт на 1 м².

В установках комбинированного освещения хорошо растут многие виды растений. Во всяком случае включение излучения ламп накаливания в лучистый поток люминесцентных ламп значительно улучшает результат выращивания.

Позже этот же принцип соединения в одной установке ламп накаливания и люминесцентных (причем последние, кроме источника освещения, одновременно являются и индуктивным балластом — дросселем) использовали и другие исследователи; в частности, проект такой промышленной установки был разработан Гипросельхозом Министерства сельского хозяйства СССР в 1960 г.

Выше, при изложении основных этапов развития светокультуры растений, говорилось об опытах французских исследователей Трюфо и Турнейсена (1929) и более позднем предложении И. Н. Финкельштейна об использовании сконструированной им подвижной освети-

тельной установки. Одно время эта установка начала довольно широко внедряться в практику досвечивания растений в теплицах. Но в связи с появлением новых электрических ламп интерес к ним значительно упал, хотя они и давали удовлетворительные результаты при досвечивании рассады в теплицах.

Осветительная часть подвижной установки должна быть проста и легка. Лучше всего этой цели удовлетворяют зеркальные лампы накаливания без всякой дополнительной арматуры, если не считать небольшого круглого щитка, предохраняющего лампу от капель конденсата с кровли теплиц. Лампы могут быть смонтированы (в один или два ряда) с расстояниями 20—25 см одна от другой на легких деревянных или металлических каркасах. В течение всего времени досвечивания такая установка находится в возвратно-поступательном движении над вершинами растений. Движение ее осуществляется с различными скоростями, обычно 1 м за 5 сек., за счет мотора, дополнительно снабженного автоматическим переключателем и редуктором, регулирующим скорость.

Опасный для растений перегрев при использовании в теплицах для досвечивания стационарных установок из ламп накаливания может быть устранен двумя способами. Во-первых, снижением температуры воздуха, окружающего растение, за счет меньшего отопления теплиц или их лучшей вентиляции и, во-вторых, путем рассредоточения мощностей лучистых потоков ламп накаливания.

Последнее достигается заменой крупных ламп в 500, 300 и 200 вт мелкими низковольтными (6-вольтными) автомобильными лампочками мощностью в 21 вт. Часто бывает выгодной замена одной 200-ваттной лампы 12 низковольтными лампочками при горении их с некоторым недокалом. В этом случае мощность 200-ваттной лампы распределяется между 12 мелкими, и понятно, что растение не получает ожогов (если отсутствует непосредственный контакт его с лампой). Используя такие мелкие лампы, надо заботиться уже не о снижении температуры воздуха, а о ее повышении.

В заключение описания основных осветительных установок следует подчеркнуть, что они еще далеки от со-

вершенства и нуждаются в значительных конструктивных изменениях, направленных на более полное использование лучистого потока имеющихся в них различных типов электрических ламп.

ЛАБОРАТОРНЫЕ КАМЕРЫ ИСКУССТВЕННОГО КЛИМАТА

Выращивание растений в условиях искусственного освещения особенно эффективно при регулировании внешней среды и прежде всего температуры. Выявление закономерностей в онтогенезе и в продуктивности растений неосуществимо без контроля за всем комплексом внешних факторов. Отсюда возникла необходимость в камерах искусственного климата (микрофитотроны), которые и были спроектированы и выполнены специалистами АФИ.

Основой камеры искусственного климата является осветительная установка лаборатории светофизиологии, состоящая из блока зеркальных ламп накаливания и водяного фильтра. Кроме светового режима, в камере, где находятся растения, регулируются температура воздуха, корнеобитаемой среды, воды в фильтре, а также влажность воздуха.

Ниже приводится краткое описание первой модели лабораторной камеры искусственного климата, ставшей основой для всех последующих отечественных камер подобного типа как в АФИ, так и в других научно-исследовательских учреждениях СССР.

Лабораторная камера искусственного климата (рис. 22) состоит из: 1) камеры для выращивания растений; 2) кондиционера; 3) пульта управления; 4) холодильной машины и 5) распределительного силового щита. Камера для выращивания растений соединена с кондиционером разъемными воздуховодами, в которых находятся вентиляторы. Кондиционер имеет съемную боковую стенку для монтажа. Внутри его находятся по две испарительных батареи холодильной машины и электрические нагреватели. Холодильные машины (ИФ-49)



Рис. 22. Общий вид камеры искусственного климата 1-го типа (слева — пульт управления).

ставятся около кондиционеров и соединяются с батареями.

В потолке кондиционера размещают два воздуховода с задвижками, позволяющими устанавливать различные циклы воздухообмена между камерами и средой: 1) замкнутый между камерами; 2) полузамкнутый с частичным подсосом наружного воздуха и 3) вентиляционный с проходом воздуха на проток.

Камера для выращивания растений имеет стеклянный потолок из зеркального стекла толщиной 6—8 мм, зажатого между двумя прямоугольными рамами, сваренными из стальных уголков. Между стеклом и рамами проложены мягкие резиновые трубки, обеспечивающие достаточную герметизацию водного экрана и предохраняющие стекла от неравномерного давления, перекосов и как следствие этого растрескивания. Крепятся стекла специальными болтами, стягивающими верхнюю и нижнюю рамы, зажимающие стекло. К верхнему уголку рамы герметически прикреплены стенки из оцинкованного железа около 15 см высоты, являющиеся боками водяного фильтра. По стеклу (потолок осветительной установки) протекает слой водопроводной воды около 20—50 мм толщиной. Вода поступает туда через трубки с мелкими отверстиями, проложенные вдоль длинных бортов водяного фильтра. Назначение водяного фильтра — регулировать температуру потолка и поглощать длинноволновую (от 1000 мкм) инфракрасную радиацию. Скорость поступления воды в водяной фильтр регулируется соленоидным вентилем.

Сама камера выполнена в виде деревянного каркаса, заполненного теплоизолирующим пенопластом толщиной около 100 мм. Внутренние стены камеры облицованы слоистым пластиком молочно-белого цвета с хорошими, отражающими свет свойствами. Наружные стены камеры покрыты влагостойкой декоративной фанерой. Дно камеры обито оцинкованным железом, хорошо пропаянным по всем швам. Оно имеет уклон к центру и сливное отверстие. На передней стенке камеры расположена дверь, снабженная специальным герметическим замком. В первых камерах двери были одностворчатыми, в последующих с двумя створками почти во всю ширину стены.

На нижней раме водяного фильтра при помощи четырех стальных тросов подвешен подвижной стол, на котором размещаются опытные растения или лизиметры, в которых они выращиваются. По мере роста растений стол опускается с помощью редуктора и электродвигателя типа АОЛ-027Т. Данным подъемным механизмом можно изменять любое расстояние между вершинами растений и стеклянным потолком установки, что позволяет регулировать мощность лучистого потока. Ход стола, обеспечиваемый мотором, редуктором и подъемно-тросовым механизмом, составляет 1,2 м, что равно наибольшему расстоянию от поверхности пола до стекла. Наименьшее расстояние — 300 мм. Полезная площадь стола — 1 м². Управление движением стола производится кнопкой, находящейся на передней стенке камеры или на пульте управления.

В верхней части наружных боковых стен камеры, где выращиваются растения, закреплена над водяным фильтром стальная П-образная стойка. К стойке на стальном тросике через вращающиеся ролики подвешена металлическая рама с 15 патронами «Голнаф» для зеркальных ламп накаливания. Лампы располагаются над стеклянным потолком установки равномерно в 5 рядов, по 3 лампы в ряд. Рама с лампами может подниматься и опускаться над водой фильтра (потолок установки) с помощью ручного ворота с редуктором, установленного на боковой стенке камеры.

При использовании 300-ваттных зеркальных ламп накаливания электрическая мощность освещения равна 4,5 кВт, а общая максимальная мощность всей установки с холодильным агрегатом около 10 кВт.

В каждом воздуховоде, соединяющем кондиционер с камерой, установлены на металлических рамках по два осевых вентилятора с электродвигателями ДТ-75Т. Назначение вентиляторов — обеспечение постоянной циркуляции воздушной смеси между климатической камерой и кондиционером. Проектная скорость движения воздуха в камере, составляющая 30—40 см/сек, может изменяться при изменении режима работы вентиляторов.

Пульт управления микрофитотрона состоит из металлического каркаса, верхней панели с индукторами и органами управления, блока автоматики и внутреннего

силового щита. Каркас облицован слоистым пластиком. Для доступа к блоку автоматики и клеммным колодкам пульт имеет съемные стенки или специальные дверцы. Кроме того, верхняя панель может подниматься для лучшего доступа к шасси пульта. На верхней панели пульта размещены: измерительные приборы, часы и тумблеры для установки программы «день» — «ночь», ручки потенциометров для выполнения программы температуры и влажности воздуха и почвы на день и ночь, там же находятся переключатель регулятора температуры водного фильтра, кнопки переключения диапазонов температуры, выключатели для ручного включения программы чередования светлых и темных периодов суток, сигнальные лампочки и рукоятка переключения датчиков к измерительному прибору.

На левой стороне внутреннего силового щита смонтированы переключатели систем (сверху вниз): нагрева, охлаждения и увлажнения воздуха, включения и выключения света и охлаждения воды в фильтре. Все они имеют три положения: ручное управление, выключено и включено через автоматы. Ниже расположены тумблеры для включения и выключения вентиляторов в воздуховодах.

На правой стороне силового щита установлены клеммные колодки. Они соединяются кабелем с клеммными колодками, установленными на задней стенке климатической камеры. К колодкам на камере присоединяются датчики и все исполнительные органы, установленные на микрофитотроне и управляемые с пульта.

В микрофитотронах, предназначенных для выращивания растений в контролируемых условиях не только воздушной, но и корнеобитаемой среды, на подвижном столе помещается термостатированный лизиметр. Он представляет собой металлическую коробку с двойными стенками высотой около 300 мм. Внутренние стенки почвенного термостата (лизиметра) выполнены из кислотостойкой стали и покрыты битумным лаком. В пространстве между внутренним и наружным дном расположено шесть трубчатых электрических нагревателей. Для охлаждения стенок лизиметра используется вода, заполняющая межстенные пространства. Она поступает на дно лизиметра и уходит в канализацию через трубку, находящуюся в верхней части боковой стенки. Описан-

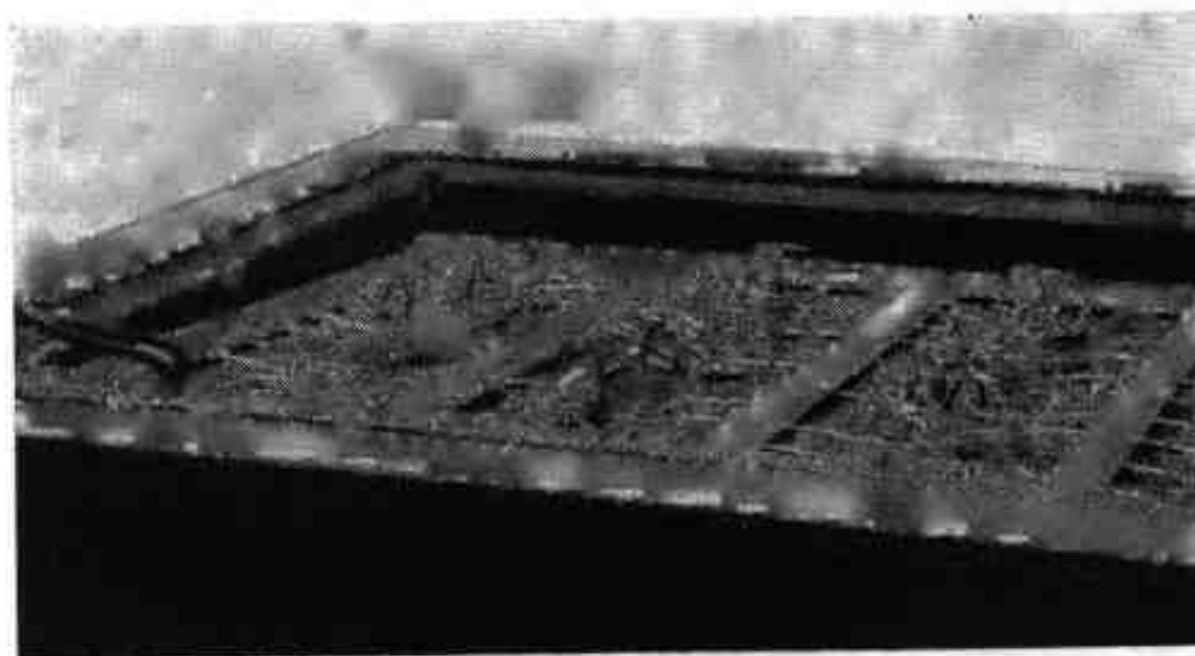


Рис. 23. Термостатированный бак для корнеобитаемой среды растений с автоматической подачей раствора на поверхность в камере искусственного климата 2-го типа.

ный термостат корнеобитаемой среды помещен в специальном термоизоляционном кожухе из пенопласта.

Система подачи питательного раствора (рис. 23) определенной температуры состоит из термоизолированного бака с двойными стенками, в который заливается необходимое количество раствора. Между двойными стенками бака с раствором протекает вода из термостат-лизиметра, соединенного с ним водопроводными шлангами. Благодаря этому устройству температура в баке и в корнеобитаемом термостате может поддерживаться примерно на одном уровне. Кроме того, бак для питательного раствора снабжен дополнительным электрическим нагревателем.

Подача питательного раствора из бака в термостат-лизиметр осуществляется автоматически при помощи реле времени, включающего в действие всю специальную систему по заданной программе. В системе находится центробежный насос ОЦН-5, нагнетающий раствор в корнеобитаемую среду через винипластовые трубки-оросители с многочисленными мелкими отверстиями. После заполнения корнеобитаемого субстрата (обычно керамзита) питательный раствор через трубку в дне лизиметра стекает снова в бак с раствором. Ав-

томатическое поступление раствора в термостат может осуществляться до 6 раз в сутки.

В качестве датчика температуры корнеобитаемого субстрата используется полупроводниковое термосопротивление ММТ-4. Если температура корнеобитаемой среды становится выше заданной, то автоматически открывается электромагнитный вентиль, холодная вода начинает протекать через межстенную полость лизиметра (термостата) и тем самым охлаждать находящийся в нем субстрат. Если же температура субстрата понизится ниже заданной, вентиль закрывается и включаются электрические нагреватели, повышающие температуру воды, а следовательно, и субстрата, до заданной величины.

Световой режим в климатической камере регулируется изменением мощности лучистого потока, достигающего вершин растений, и установлением в пределах 24-часовых суточных циклов любых соотношений между светом и темнотой. Иными словами, растения можно выращивать при различной длине дня, не превышающей 24 часов.

Варьирование мощности лучистого потока достигается: а) использованием зеркальных ламп накаливания различной мощности; б) введением нейтральных фильтров между вершинами растений и стеклянным потолком камеры; в) изменением высоты подвеса ламп над водяным фильтром и г) изменением расстояния между вершинами растений и потолком камеры.

Продолжительность периодов ежесуточного чередования света и темноты (любое в пределах 24 часов) задается на пульте управления включением и выключением 24 тумблеров, связанных с контактным полем шагового искателя. При прохождении минутной стрелки через контакт часов срабатывает шаговый искатель и подключает один из 24 тумблеров. При подключении к контактирующему направлению включенного тумблера цепь катушки пускателя будет замыкаться и включать лампы, дающие свет. При подключении же разомкнутого тумблера лампы будут выключаться и свет гаснуть. За сутки ножи шагового искателя поочередно подключат к цепи катушки пускателя каждый из 24 тумблеров, и тем самым выполнится полный цикл заданной программы. При нормальной работе часов эта схема

автоматического включения и выключения света действует вполне удовлетворительно и позволяет проводить опыты в различных актиноритмических условиях.

Некоторые изменения спектрального состава излучений могут достигаться введением соответствующих пленочных, стеклянных или жидких светофильтров.

Температура воздуха в камере с растениями может изменяться каждый час от -5 до $+40^{\circ}\text{C}$. В качестве задающих элементов использованы проволочные переменные сопротивления, шкалы которых проградуированы в градусах Цельсия. Шаговый искатель типа ШИ-25/8 в комплексе с контактными часами является автоматическим переключателем. Между двумя контактирующими направлениями подключены 24 переменных проволочных сопротивления (задающие элементы). Каждый конец этих сопротивлений подключен к ломелю шагового искателя, а их движки соединены вместе и подключены к нуль-органу. Контактующие направления подключены к регулирующему мосту. Как только минутная стрелка часов проходит через контакт часов, шаговый искатель срабатывает и подключает очередную пару ломелей. Таким образом получается, что через каждый час к регулирующему мосту подключается следующий задающий элемент, а за 24 часа ножи шагового искателя поочередно подключат к мосту каждый из 24 задающих элементов. Тем самым следящая система будет управлять температурным режимом по намеченной программе.

Для регулирования относительной влажности воздуха в климатической камере использованы смоченные полупроводниковые термосопротивления ММТ-4 с регулирующим мостом и чувствительным нуль-органом. Смачивание термосопротивления происходит за счет одетого на нем батистового мешочка.

При уменьшении относительной влажности воздуха увеличивается температура влажностного термосопротивления, и мост разбалансируется. Тогда нуль-орган через промежуточное реле включает парообразователь. Воздух будет увлажняться до тех пор, пока влажное термосопротивление не достигнет заданной температуры, что будет соответствовать заданной относительной влажности воздуха. Осушение воздуха достигается включением холодильной машины.

Очень большое значение для правильной работы лабораторной камеры искусственного климата имеет температура стеклянного потолка камеры. Горячий потолок является дополнительным источником длинноволновой инфракрасной радиации, могущей перегревать растения и даже вызывать отмирание их верхних листьев. Холодный потолок при непрерывном токе водопроводной воды конденсирует на себе водяные пары, которые оседают на нем и, превращаясь в крупные капли, ухудшают световые условия, а, главное, создают высокую влажность в камере. Для поддержания температуры потолка на нормальном уровне, от 20 до 30°С, служит простая система регулирования. Она состоит из контактного термометра и соленоидного вентиля, связанных между собой через пульт управления.

Температура воды в фильтре повышается за счет нагрева ее горящими лампами накаливания. Если она становится выше заданной, автоматически открывается соленоидный вентиль, и водопроводная вода, протекая через фильтр, охлаждает его.

Перед началом каждого опыта испытывается вся система микрофитотрона и после этого устанавливается программа внешних условий, намеченная для проведения данного исследования. При этом режимы среды, установленные по программе, контролируются дистанционными специальными измерительными приборами, расположенными на передней панели пульта автоматического управления.

В качестве основного измерительного прибора взят стрелочный микроамперметр типа М-24. Он включен в диагональ неравновесного моста. В одно из плеч этого моста включено полупроводниковое термосопротивление типа ММТ-4, являющееся чувствительным элементом. Таких чувствительных элементов несколько. Один из них контролирует температуру воды в фильтре, где и помещается, второй следит за температурой воздуха в камере и находится там среди растений, третий — в корнеобитаемой среде лизиметра и т. д.

В ходе опыта можно не только контролировать режим среды, окружающей растение, и вести непрерывную запись ее основных параметров (температуры, длительности дня, влажности воздуха и т. п.), но одновременно проводить и непрерывную регистрацию таких

физиологических процессов, как температура самих растений, транспирация, рост и ростовые движения и т. д. Для непрерывной записи всех этих величин применяются электронные самопишущие потенциометры. К каждому микрофитотрону следует подключать один или несколько 3—6- или 12-точечных электронных самопишущих потенциометров типа ЭПИ-09. В этом случае, используя датчики для регистрации различных физиологических процессов, сделанные в лаборатории светофизиологии и в других лабораториях АФИ, можно вести непрерывные наблюдения за физиологическим состоянием растений и характером его изменений.

Несомненным достоинством описанных микрофитотронов АФИ является их сравнительная простота и незначительные габариты. Максимальная площадь, занимаемая всей установкой в целом, не превышает 9 м² при высоте 2800 мм. Самым громоздким оборудованием, входящим в состав микрофитотрона, является малая фреоновая холодильная машина. Все остальное оборудование не громоздко.

При установке таких микроклиматических камер не требуется дополнительных расходов на строительные работы, связанные с монтажом воздухопроводов, труб для подачи охлаждающей смеси и т. д. Их можно ставить в любые помещения, где имеются водопровод, канализация и достаточное количество электроэнергии. В лаборатории светофизиологии АФИ в одном помещении полностью устанавливаются четыре микрофитотрона. Никаких других подсобных помещений для этого не требуется.

Небольшой полезный объем микрофитотрона (1 м³) вполне удовлетворителен для проведения многих физиологических исследований. В камере такого объема быстро устанавливается заданный климатический режим, отличающийся своей устойчивостью и минимальными градиентами температуры и влажности по всему объему камеры. Малый объем камеры для выращивания растений делает ее мало инерционной, что позволяет с максимальной скоростью изменять температурные условия вокруг растений.

Конечно, лабораторные микрофитотроны АФИ, как и всякие новые сложные машины, находящиеся в процессе испытания, имеют некоторые конструктивные и другие недостатки. Эти недостатки будут постепенно устра-

няться как вследствие дальнейшей эксплуатации, так и потому, что при помощи исследований, проведенных в них, будут уточняться наши представления о физиологических процессах, для изучения которых они и предназначаются.

Во всяком случае, проведение достаточно серьезных физиологических экспериментов, направленных на выяснение условий, необходимых для получения в кратчайшие сроки высоких урожаев, невозможно без наличия в распоряжении исследователей хороших камер искусственного климата.

ЗАМЕНИТЕЛИ ПОЧВЫ В УСЛОВИЯХ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Для успешного выращивания растений в лабораториях искусственного климата (фитотронах), т. е. в таких условиях, где естественные, природные факторы заменяются их аналогами, созданными руками человека, наибольшее значение после света занимает корнеобитаемая среда. Обычно в хозяйственных посевах это различные типы почв. Однако в искусственных условиях они являются не только не обязательными, но во многих случаях и нежелательными.

Нежелательны они прежде всего потому, что почвы часто очень неоднородны, а главное нуждаются в тщательной стерилизации для уничтожения всевозможных возбудителей болезней и вредителей. Поэтому за последние четверть века все чаще и чаще прибегают к культуре растений в «беспочвенной» среде. В этом случае химические питательные элементы, обычно получаемые растениями из почвы, даются им в виде различных водных растворов солей, необходимых для нормальной жизни. При этом, начиная с конца прошлого века, растения нередко выращивают в так называемых водных культурах, где корни растений находятся все время в воде. Вследствие некоторых технических трудностей такого «беспочвенного» способа выращивания он часто

заменяется культурой растений на различных заменителях почвы (песке, гравии, торфе, шлаке, битом кирпиче, опилках, вермикулите, перлите и т. д.). Все эти материалы служат механической опорой корней и наполнителями, которые периодически смачиваются различными типами питательных растворов.

Использование в практике выращивания растений различных наполнителей и питательных растворов вместо почвы и водной среды приводит к значительной рационализации культуры в условиях интенсивного растениеводства. В этих случаях исключаются затраты на прополку, ручной полив растений, борьбу с вредителями и т. п. и, кроме того, здесь становится доступной автоматизация таких процессов, как перекачивание питательного раствора и пропитка им наполнителя.

За последнее время накапливается все больше и больше материалов, показывающих, что при выращивании растений, особенно овощных, на питательных растворах с такими наполнителями, как гравий, песок и т. д., урожай получается более высоким, да к тому же и созревающими в более ранние сроки. Поэтому различные виды выращивания растений без почвы, получившие общее название «гидропоники», за последнее время все шире внедряются в земледелие различных стран (СССР, США, ГДР, Индия, Япония и т. д.).

Если искусственное освещение делает растениеводство независимым от солнечного света, то культура растений без почвы устраняет их зависимость от земной поверхности (почвы). Возникают совершенно реальные возможности для культуры растений в любых условиях, создаваемых человеком. Поэтому подбор для растений искусственной корнеобитаемой среды в условиях культуры их на электрическом освещении приобретает особое значение.

Чаще всего в качестве основного заменителя почвы в «гидропонике» применяют речной гравий. Иногда к нему добавляют верховой торф, что значительно увеличивает влагоемкость субстрата. В последнее время накапливается много данных, говорящих о постепенном изменении гравия, о его выщелачивании, что делает трудным поддержание нужного pH питательного раствора. Поэтому сейчас ведутся поиски новых наполнителей или делаются попытки вообще отказаться от них.

причем, помимо возврата просто к водной культуре, в ГДР, например, проводятся опыты по выращиванию растений в траншеях, где их корни находятся просто в воздухе, а питательный раствор периодически разбрызгивается в виде мелкой водяной пыли (аэропоника).

Возникает вопрос, каким же должен быть идеальный наполнитель для выращивания растений на питательных растворах. Очевидно, прежде всего, служа достаточно надежной опорой для растений, т. е. включая в себя как основу твердую фракцию, он в то же время должен, при полном насыщении водой, содержать и достаточное количество воздуха, совершенно необходимого для нормального функционирования растений. Кроме того, идеальный заменитель почвы должен быть достаточно инертен и стабилен.

Поисками такого идеального заменителя почвы и занялся в руководимой автором лаборатории Е. И. Ермаков. Прошли они довольно успешно, и теперь в наших опытах заменителем почвы является дробленый керамзит, который имитирует по водно-физическим свойствам «идеальную» почву, обеспечивая растение достаточным количеством одновременно воды и воздуха.

Исходным материалом для керамзита служат бескарбонатные глины, которые обрабатываются методом вспучивания при температуре 1200°C .

Поры у керамзита имеют ячеистую форму и поэтому не являются сквозными.

Керамзит (рис. 24) выпускается для строительных целей специальными заводами по цене 4 руб. за 1 м^3 и поэтому вполне доступен для использования в растениеводстве. Для успешного выращивания растений его следует раздробить на фракции от 2 до 4 мм. Объемный вес таких агрегатов при свободной засыпке составляет 0,5—0,6, а механическая прочность их на раздавливание достигает 60—80 $\text{кг}/\text{см}^2$, т. е. по прочности керамзит значительно превосходит вспученный вермикулит.

Удельная поверхность раздробленного керамзита ничтожно мала по сравнению с почвой, поэтому емкость поглощения практически почти отсутствует. Сравнительная физическая характеристика дробленого керамзита, гравия и шлака дана на рис. 25. Сопоставление трех основных фаз — твердой, жидкой и газообразной — при насыщении данных материалов водой говорит о значи-

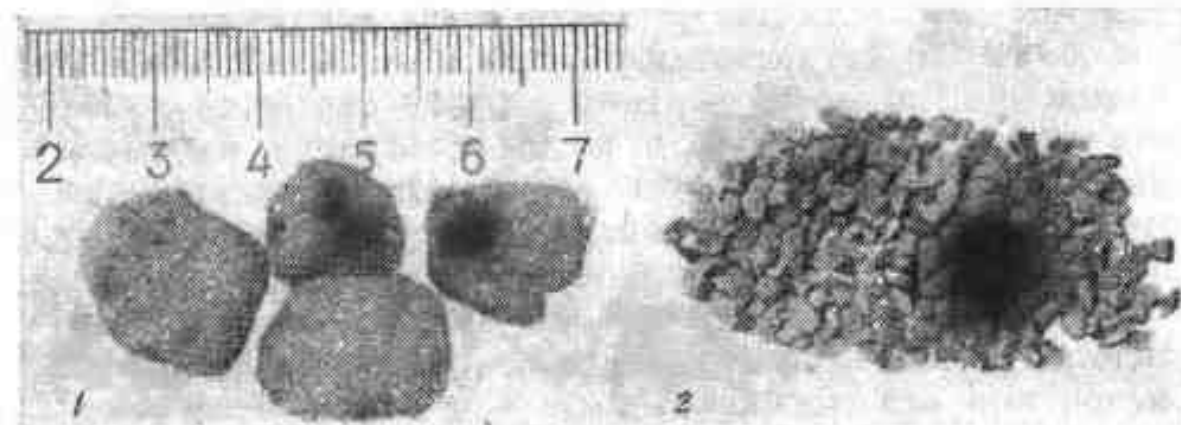


Рис. 24. Керамзит.

1 — заводского изготовления, 2 — размолотый на фракции в 2—3 мм для использования в качестве наполнителя.

тельным преимуществом керамзита перед гравием. Если вспомнить к тому же, что в химическом отношении керамзит значительно стабильнее гравия, то его ценность для культуры растений становится особенно очевидной.

Химическая инертность керамзита дает возможность регулировать состав питательного раствора по фазам развития растений и изучать при оптимальном водно-воздушном режиме поглотительную деятельность корней.

Корневая система различных видов растений на дробленом керамзите развивается равномерно и быстро, что позволяет в широких размерах использовать пересадки молодых растений при выращивании рассады и т. д. Очевидно, что, выявив наиболее оптимальные составы питательных растворов и применяя культуру растений на керамзите, а может быть и на других подобных, но еще более совершенных материалах, можно будет значительно повысить продуктивность растений.

Таким образом, теперь можно считать доказанным, что для успешной культуры растений нужны, с одной стороны, электрическая энергия, превращенная в свет, и, с другой стороны, минеральные вещества в виде солей и наполнителя. Располагая ими, человек всегда обеспечивает себя необходимыми растительными продуктами питания, лишь бы были семена необходимых видов растений.

В то же время нельзя забывать, что и в самых лучших световых и температурных условиях продуктивность

растений будет низкой, если они не будут получать необходимого количества воды и всех других элементов, из которых и при помощи которых строится их тело (растительная масса).

Главное место в группе этих факторов принадлежит, конечно, воде, ибо она не только составляет 90% живой растительной массы, но и затрачивается растениями в больших количествах в процессе транспирации. Последняя (транспирация) является важным фактором в теплообмене растений с внешней средой и предохраняет растительные ткани от перегрева и гибели.

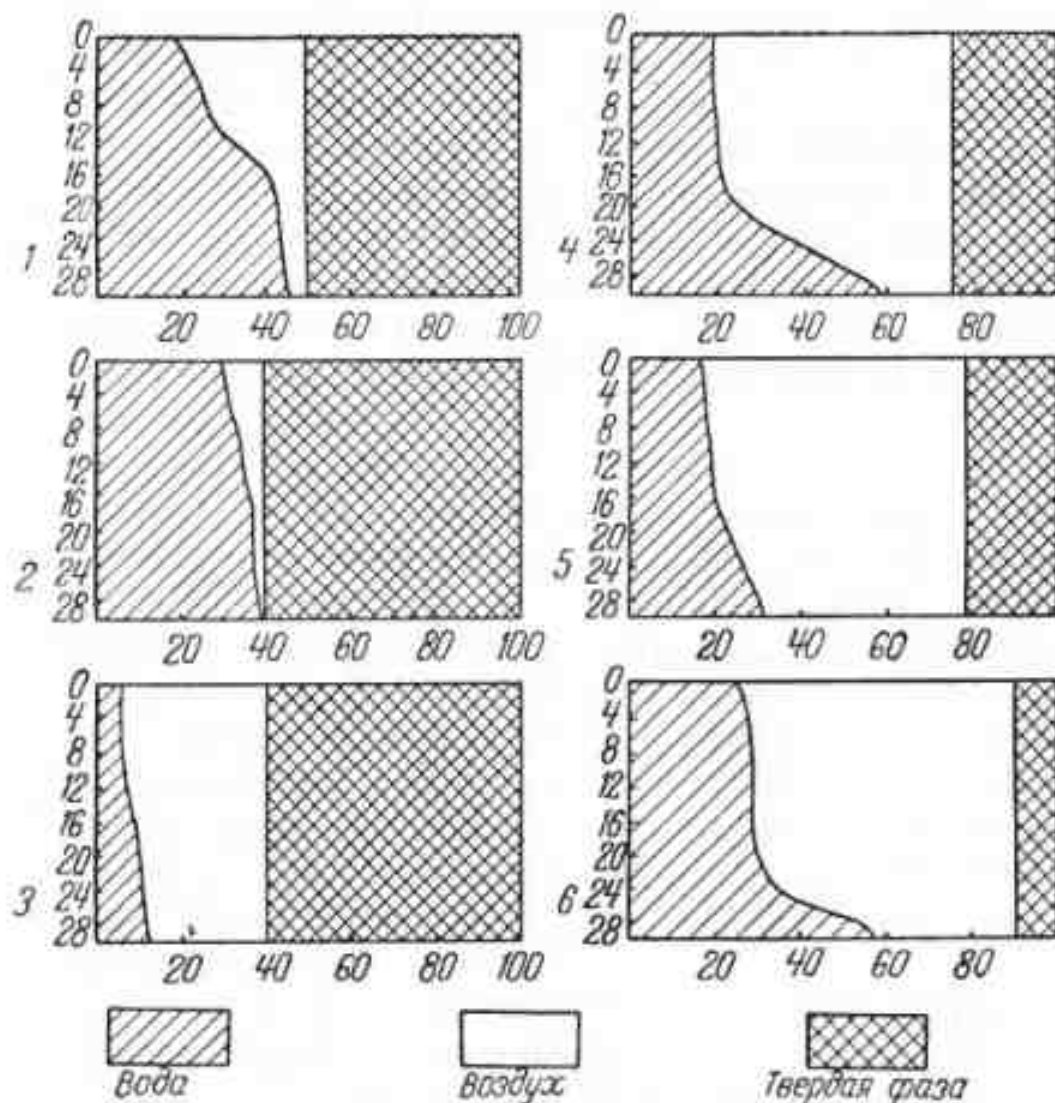


Рис. 25. Сравнительная физическая характеристика различных наполнителей для беспочвенной культуры растений.

1 — супесчаная почва, 2 — кварцевый песок (0,25—0,5 мм), 3 — гравий (2—3 мм), 4 — ПКС (2—3 мм), 5 — керамзит (2—3 мм), 6 — пеношамот (1—5 мм).

Очевидно, что чем мощнее лучистый поток, получаемый растениями, чем больше нагревается растение, тем больше воды оно должно иметь в своем распоряжении. Малейший недостаток воды особенно недопустим при выращивании растений на искусственном освещении. Обеспечить необходимое количество воды труднее всего в том случае, если хорошо сформированное растение выращивается в малом объеме почвы.

Многочисленные наблюдения за развитием растений в горшках, сосудах и т. д. показывают, что при искусственном освещении увеличение объема почвы часто приводит к улучшению результатов. Конечно, малый объем сосуда может оказывать неблагоприятное влияние и сам по себе, действуя механически на корневую систему, ограничивая ее рост и создавая тем самым несоответствие между надземной и подземной массами растений. Наконец, при малом объеме сосуда может сказаться недостаток минеральных питательных веществ, а дополнительное внесение их повысит концентрацию почвенного раствора и тем самым изменит водоснабжение растений в худшую сторону.

Таким образом, вопрос о водоснабжении растений в условиях искусственного освещения является комплексным и включает в себя всю проблему питания растений.

Прежде чем перейти к описанию опытов, направленных на выяснение условий, благоприятных для корневых систем растений, получающих электрическое освещение, напомним данные элементарного анализа растений. Сухое вещество в среднем составляет около 10% от сырого веса растений. Обычно оно состоит из 45% углерода, 42% кислорода, 6,5% водорода, 1,5% азота, 5% золы. Зола содержит: фосфор, калий, натрий, серу, кальций, магний, железо и все так называемые микроэлементы.

Средний сырой вес томатного растения с красными плодами в 60-дневном возрасте, выращенного полностью на электрическом освещении, обычно колеблется в пределах от 500 г до 1 кг. Если принять вес среднего растения за 800 г, тогда на долю воды придется 720 г, а на сухое вещество только 80 г. Эти 80 г сухого вещества составляют: углерод 36 г, кислород 33,6 г, водород 5,2 г, азот 1,2 г и зола 4 г.

Сумма золы и азота равна всего 5,2 г, иными словами, это количество в форме минеральных солей при нормальной концентрации раствора может быть дано в 5 л воды.

Еще показательнее абсолютные величины химического состава выглядят, если взять данные, относящиеся к 15-дневной рассаде томатов, выращенной полностью на электрическом освещении. Обычно такая рассада (хорошо развитое растение) весит около 30 г. На долю сухого вещества в нем приходится 3 г; из них азот и зола составляют только 6%, или 180 мг. Такое количество минеральных веществ может быть дано в 250 см³ воды.

Из только что приведенных расчетов вытекает, что минеральные питательные вещества сами по себе не могут быть препятствием при культуре растений в искусственной обстановке. Что касается кислорода и водорода, то их источником для растений являются вода и воздух, а источником углерода — угольная кислота и некоторые другие его соединения, находящиеся в воздухе, почве и воде. Кислород и углекислота не только поглощаются, но и выделяются растениями в процессе фотосинтеза и дыхания, составляющих общий газообмен растений со средой.

Количество углекислоты в помещениях, где растения выращивались на искусственном освещении, всегда было несколько выше нормы, поэтому растения вряд ли испытывали недостаток в углероде. Прямые опыты с добавлением в воздух углекислоты не дали положительных результатов. Все эти факты показывают, что наибольшее внимание при культуре растений на искусственном освещении должно быть уделено воде. Что касается минеральных веществ, то изучение их влияния на растения может оказаться наиболее перспективным, если оно будет проводиться не в количественном, а в качественном направлении.

Практически решение задачи о наиболее рациональном водоснабжении растений в условиях искусственного освещения началось в лаборатории светофизиологии АФИ с выяснения вопроса об объеме сосудов и концентрации растворов. Нет надобности в пространном объяснении того, что для выращивания растений на электрическом освещении размещение максимума рас-

тений на освещаемой площади имеет чрезвычайно большое значение. Оно должно лимитироваться только объемом полезной надземной массы растений, а отнюдь не размерами сосудов, в которых они выращиваются.

Предварительные наблюдения за растениями томатов показали, что в одних и тех же условиях освещения и температуры при выращивании их в одной и той же почве они растут по-разному в зависимости от объема сосудов. За один и тот же отрезок времени растения, находившиеся в более крупных сосудах, давали лучший урожай. Добавление минеральных удобрений в почву в малых сосудах не давало значительного эффекта, но установка их в поддонники, всегда наполненные водой, сейчас же улучшала их состояние.

Стало очевидным, что в небольшом объеме почвы нельзя дать растениям столько воды, сколько им необходимо для обеспечения высокой продуктивности. В условиях достаточно мощного лучистого потока при высокой температуре растений они расходуют за сравнительно короткое время больше воды, чем ее вмещается в небольшом объеме почвы. Компенсация небольшого объема почвы частыми поливами не всегда возможна, а главное, последняя может иметь и неблагоприятные последствия: уплотнение почвы и обеднение ее свободным кислородом, а также вымывание из нее необходимых питательных элементов.

Как бы то ни было, возникла необходимость выяснить экспериментальным путем, почему в сосудах с малым объемом растения развиваются хуже, чем в более крупных. Для упрощения задачи основные опыты на эту тему проводились с водными, а не с почвенными культурами. Прежде всего было показано, что сам объем сосудов очень долгое время не сказывается на состоянии растений.

В опытах, доказавших это важное положение, растения (рассада томатов и черенки лимонов) выращивали в сосудах различной емкости (0,25, 0,5 и 2 л), но при проточной культуре. Для этого сосуды соединялись мягкими резиновыми трубками последовательно по четыре, а затем каждая такая группа параллельно с верхним баком, в котором находился раствор Гельригеля половинной концентрации. Из сосудов раствор самотеком поступал в нижний бак и из него при помощи

шарового крана, реле и мотора перекачивался снова в верхний бак и т. д. Все опытные растения выращивали в одной осветительной установке с лампами накаливания и водяным фильтром, дававшей мощность лучистого потока около 150 вт/м^2 .

В этих опытах, длившихся для рассады томатов 25 суток, а для лимонов год, объем сосудов никак не сказывался на росте и накоплении сухой растительной массы. Таким образом, стало совершенно очевидным, что продуктивность растений ограничивалась не малым объемом сосудов как таковым. Однако как только растворы не были проточными, объем сосудов начинал сказываться на продуктивности растений.

Что же при этом изменялось? Прежде всего — общий объем воды, а следовательно, и растворенного в ней кислорода, и суммарное количество минеральных элементов.

Кроме того, в условиях непроточной культуры, даже при частых сменах раствора (например, через сутки), в малых сосудах может изменяться состав раствора за счет корневых выделений. Последние способны вызывать процессы, близкие к самоотравлению растений, а иногда и изменять pH раствора. Именно поэтому при выращивании растений гидропонным способом следует пользоваться большими объемами растворов и, если не делать их проточными, чаще проводить заполнение ими корнеобитаемой среды.

При выращивании же растений в лабораторных опытах хорошие результаты получаются даже при переносе растений в течение суток с питательного раствора на воду. В этом случае в ряде наших опытов наблюдалось заметное улучшение в состоянии растений.

Периодическое питание растений в опытах с водными культурами осуществляется просто: растения перемещают из одного сосуда в другой через известные промежутки времени.

Пользуясь подобной методикой, удалось наблюдать увеличение сухого веса томатной рассады, выращиваемой при различных световых режимах. Так, например, рассада томатов (сорт Короткостадийный), выращиваемая на 12-часовом дне, создаваемом за счет лучистого потока ламп накаливания в установке с водяным фильт-

ром мощностью 100 вт/м^2 , имела сухой вес выше почти на 12%, если в ночные часы ее переносили на воду. Контролем служили растения, находившиеся все время (т. е. 24 часа в сутки) на нормальном растворе Кнопа. Перевод одной группы растений в темный период суток на воду, а затем днем снова на раствор Кнопа, ежедневно менявшийся, дал упомянутое выше увеличение сухого вещества и повысил его процентное отношение к сырому весу растений по сравнению с контролем.

Положительный результат с выращиванием томатов сорта Короткостадийный получался даже и в том случае, когда чередование раствора и воды происходило через 24 часа. В этом опыте рассаду томатов выращивали на растворе Кнопа тройной концентрации в фаянсовых сосудах емкостью 250 см^3 , применяя осветительную установку из ламп накаливания с водяным фильтром и лучистый поток в 100 вт/м^2 . Растворы менялись ежедневно. Продолжительность дня во всех случаях была 20 часов.

Существенное значение, особенно для некоторых культур, имеет тепловой режим корнеобитаемой среды. Известно, что при температурах около 0, 3 и 5°С корневая система плохо усваивает воду, и растения, особенно при повышенной температуре воздуха и значительных нагревах листьев за счет лучистой энергии, вянут.

Для теплолюбивых видов неблагоприятны более высокие температуры почвы и питательных растворов, чем указанные выше. Из овощных растений в повышенных температурах корнеобитаемой среды особенно нуждаются огурцы. При выращивании их на искусственном освещении они давали наилучшие результаты при температуре питательного раствора около 25°С. Понижение температуры, даже до 20°С, уже снижало их продуктивность. Понятно, что выращивание таких растений в растворах с недостаточной температурой, а равно и полив их прохладной водой ведут к задержке роста.

Развитие исследований способов корневого питания растений в условиях искусственного освещения представляет одну из важнейших задач всей проблемы повышения коэффициента использования растениями находящейся в их распоряжении лучистой энергии.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА УСВОЕНИЕ СВЕТА РАСТЕНИЯМИ

ЗАВИСИМОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТЕНИЯМИ СВЕТА ОТ НАПРАВЛЕННОСТИ ЛУЧИСТЫХ ПОТОКОВ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ЛИСТЬЕВ В ПРОСТРАНСТВЕ

Солнечный свет у поверхности земли в вертикальном направлении имеет одинаковую интенсивность. Поэтому любое растение, не исключая и самых высоких деревьев, если они растут на открытом месте, находится сверху донизу в лучистом потоке равной мощности. Это равенство световых условий возрастает еще больше в случае отсутствия прямого солнечного излучения и при наличии только рассеянной и отраженной солнечной радиации.

Солнечная радиация, рассеянная облаками и атмосферой, не имеет характера строго направленных излучений и приходит к растениям равномерно с юга и севера, с запада и востока.

Радиация, отраженная от горизонтальных поверхностей, в частности от почвы и растительного покрова, практически также равномерна и не направлена. Другое дело, когда солнечный свет отражается, например, от белой стены. В этом случае на растения, находящиеся вблизи, свет будет падать только с одной стороны, обращенной к стене. Но, говоря об отраженной радиации, обычно имеют в виду радиацию, отраженную естественными земными образованиями.

Прямая солнечная радиация всегда имеет определенное направление, зависящее от географической широты данного пункта и от вращения земли вокруг своей оси. Только солнце, стоящее в зените (90° над го-

ризонтом), освещает растения равномерно сверху. При склонении солнца к горизонту и при изменении его положения на небе от востока к западу прямые солнечные лучи освещают высокие растения уже не равномерно, а лишь с одной стороны. Другая их сторона освещается в это время только рассеянной и отраженной радиацией.

В результате одностороннего облучения деревьев в зимнее время в умеренных широтах, обычно с южной стороны ствола, часто наблюдаются так называемые морозобоины (растрескивания коры). Причиной этого явления служит оттаивание нагретых солнцем участков ствола и затем их новое замерзание. На стороне ствола, обращенной на север, морозобойн не наблюдается.

Особенно неравномерно (односторонне) прямыми солнечными лучами освещаются растения в утренние и вечерние часы. Аналогичные явления наблюдаются в течение почти всего дня в высоких северных и южных широтах, где солнце всегда стоит низко над горизонтом. В этих случаях мощность прямого солнечного излучения будет всегда более высокой на стороне, обращенной к солнцу.

Постоянное одностороннее освещение, например, деревьев на опушке леса приводит к тому, что они нагибаются в сторону света, как принято говорить, тянутся к свету, приобретая совершенно особую форму роста.

В процессе длительной эволюции у растительных организмов возник ряд приспособлений к самопроизвольному регулированию собственного светового режима.

Сюда относятся такие биологические явления, как движение листьев и цветов, изменяющее их положение в пространстве и позволяющее растениям следовать за лучистым потоком или, наоборот, уходить от него. Известно также, что многие растения, особенно тропических широт, в полуденные часы располагают свои листья перпендикулярно к горизонту и параллельно к солнечным лучам, которые благодаря этому не попадают на листовые пластинки.

Кроме того, многие растительные виды имеют листья, расположенные почти под прямым углом к горизонту, что приводит к весьма незначительному использованию ими лучистого потока солнца, находящегося около зенита в полуденные часы летом. К таким растениям

относятся прежде всего многие представители класса однодольных, например луки, нарциссы, ландыши, ирисы, а также отчасти злаковые, осоковые и т. д.

У луков, нарциссов, ирисов и многих других подобных им видов листья с самого начала растут почти вертикально вверх и поэтому, вероятно, мало используют прямую полуденную солнечную радиацию.

Злаки и осоки в первый период жизни, во время кушения, способны хорошо усваивать прямую радиацию солнца, стоящего высоко над горизонтом, но по мере роста листья их все больше и больше располагаются в вертикальной плоскости и должны все хуже и хуже использовать отвесные и близкие к ним солнечные лучи.

Наоборот, возможно, что освещение лучами солнца, приближающегося к горизонту, становится и для этой группы растений наиболее полезным. Лучи солнца, стоящего под незначительным углом к горизонту, падают на листья злаков под наиболее прямым углом и должны лучше всего поглощаться ими. В густых травостоях приход таких лучей к листьям затрудняется, и рост растений должен ухудшаться. Вероятно именно поэтому любые растения, и особенно культурные злаки, например пшеница и кукуруза, дают гораздо большую растительную массу и урожай зерна, если они находятся в разреженных посевах или выращиваются в виде отдельных растений.

Для прямого доказательства этого несомненного физического явления были проведены в 1948—1950 гг. специальные опыты как с естественным, так и с искусственным освещением.

Один из опытов с солнечным освещением заключался в выращивании пшеницы (ветвистой) в полевых условиях под Ленинградом, но не прямо в почве, а в специальных сосудах, вкопанных в почву на различных расстояниях друг от друга. Сосуды в полевом опыте использовались для того, чтобы при различных разреживаниях растений уравнивать условия их корневого питания и тем самым выделить воздействие на них определенных световых режимов.

Для постановки данного опыта были сделаны сосуды из листового железа диаметром 10 см и высотой 100 см, покрытые и снаружи и внутри битумным лаком. После набивки землей, взятой здесь же на поле, сосуды зака-

пывали в почву на полную высоту, т. е. на глубину в 100 см.

На первой делянке было закопано 100 сосудов вплотную один к другому, чтобы получить расстояние между растениями, равное 10×10 см. На следующей опытной делянке было закопано 100 сосудов, но с расстоянием между ними в 25×25 см. Наконец, на третьей опытной делянке закопали 100 сосудов с расстоянием 50×50 см.

Вокруг сосудов, вкопанных в землю, высевалась также ветвистая пшеница, причем на каждой делянке соблюдались свои расстояния между отдельными растениями, равные расстояниям между растениями, находящимися в сосудах.

В каждом сосуде выращивали по одному растению до полного вызревания.

Как и следовало ожидать, лучший средний урожай на одно растение наблюдался у пшеницы, находящейся в наиболее разреженном посеве, независимо от того, были ли они в сосудах или прямо в почве поля. Наименьший урожай дали растения пшеницы в наиболее загущенном посеве.

Если принять средний вес зерен с одного растения пшеницы в сосудах из загущенного посева (10×10 см), равный 5 г, за 100%, то соответствующие величины урожая в других вариантах, также для сосудов, выразятся в 180% (25×25 см) и 240% (50×50 см).

Измерения прямой солнечной радиации показали, что чем больше на данной площади было растений, тем скорее, благодаря смыканию листьев, началась задержка лучистого потока и ослабление его в травостое пшеницы.

Так как в сосудах, в которых находились опытные растения пшеницы, условия корневого (почвенного) питания были выравнены, различия урожаев растений в разных вариантах опыта могут быть с полным правом отнесены за счет различного освещения. Понятно, что при редком стоянии растений и при равномерном распределении их на площади и рассеянная радиация, и прямые лучи невысокого солнца (утреннего и вечернего) доходили к таким растениям в большем количестве.

Неравнозначность использования полуденного и вечернего освещения пшеницей была показана в специальных исследованиях автора еще в 1947—1948 гг. Объек-

том опыта служила яровая пшеница сорта Память Урала. Она была высеяна на небольших делянках площадью, равной 1 м² на опытном участке в Лесном (Ленинград). Контрольные делянки в течение всего вегетационного периода находились в обычных условиях освещения. На опытных делянках растения пшеницы в солнечные дни лишались света на 3 часа. В первом варианте — в утренние часы, с 6 до 9 часов, во втором варианте — в дневные часы, с 10 час. 30 мин. до 13 час. 30 мин. и в третьем варианте — вечером, с 17 до 20 часов.

Для выключения света на делянки с опытными растениями надвигали светонепроницаемые фанерные кабины, которые после трехчасового периода снова сдвигали, и опытные растения оказывались на свету. В пасмурные дни кабины не надвигали.

Основными показателями состояния растений в различных условиях данного опыта служили вес и состояние зерна в 100 средних колосьях пшеницы после полного созревания.

Вес зерен в ста колосьях контрольных растений, т. е. не лишавшихся света, равнялся 140 г, или 100% урожая. Выключение света в дневные часы привело к незначительному снижению продуктивности растений, а именно, вес зерен в 100 колосьях в этом варианте достигал 110 г, т. е. был меньше по сравнению с контролем только на 18%. Близкие данные получились и для варианта, где растения лишались утреннего освещения. Зато урожай пшеничных растений резко снизился в том случае, когда они не получали прямого солнечного света в вечерние часы. В этом варианте средний вес зерна, находившегося в 100 колосьях, составлял всего 70 г, т. е. был в два раза меньше, чем в контроле. Характерным отличием этих зерен были их «щуплость» и меньшая величина как в длину, так и по среднему диаметру.

Таким образом, значительное понижение продуктивности пшеничных растений наблюдалось только при лишении их трех часов вечернего освещения (с 17 до 20 часов), в то время как выключение утреннего и дневного света сказалось на урожае пшеницы в очень незначительной степени. В основе этого явления может лежать только различное использование листьями пшеницы утреннего, дневного и вечернего освещения.

Дневное освещение, когда солнце находится под наибольшим углом к горизонту и ближе всего к зениту, используется растениями пшеницы и многими другими однодольными видами несколько хуже потому, что его лучи падают на листья под небольшим углом и благодаря этому далеко не полностью поглощаются их тканями. Напротив, в вечерние часы солнечная радиация падает на листья пшеницы под углом, наиболее близким к прямому, что способствует большему ее поглощению. В это же время, т. е. в послеполуденные часы, обычно наблюдается достаточно высокая температура воздуха, также способствующая наиболее полному использованию растениями поглощенной лучистой энергии.

В результате благоприятного сочетания угла падения лучистой энергии на лист со средними значениями воздушной температуры вечернее освещение оказывается весьма полезным для пшеничных растений.

Что касается утренних часов, то в это время большей частью наблюдаются недостаточно высокие воздушные температуры, мешающие хорошему использованию растениями падающей на них лучистой энергии.

Можно считать несомненным, что в северных широтах пшеницы и подобные им растения полнее всего используют прямой солнечный свет в послеполуденные и вечерние часы.

Для более полного доказательства наилучшего использования растениями пшеницы «бокового» освещения были проведены лабораторные опыты с электрическим освещением. Источником радиации служили как мелкие лампы накаливания (21 вт, 6 или 12 в), так и особенно удобные для этих опытов люминесцентные лампы. Для каждого источника радиации (лампы накаливания и люминесцентные) было установлено три варианта освещения. В первом варианте растения освещались только сверху, во втором — с двух сторон (двойное боковое освещение) и в третьем — с одной стороны (одностороннее боковое освещение).

Количество электроэнергии, затраченное на выращивание растений при верхнем и боковом одностороннем освещении, было одинаковым. При боковом освещении с двух сторон затраты электроэнергии в приводимом ниже опыте были двойными. В других же опытах при боковом освещении с двух сторон, но с затратой электро-

ства этого с луком был проведен специальный опыт в лаборатории в условиях искусственного освещения.

Сеянцы лука, начиная с появления всходов, выращивали на люминесцентном освещении, верхнем и боковом. В обоих случаях для этого использовали по 6 люминесцентных трубок. В одном варианте они составляли общий светящийся потолок, а в другом — два боковых «забора», состоящих из 3 трубок каждый. Электрические мощности в каждой установке были равными. Освещение непрерывное.

В результате за 30 суток сеянцы лука под верхним освещением образовали только 40 г сухого вещества, а сеянцы в условиях бокового освещения 110 г сухой массы, т. е. почти в 3 раза больше.

При верхнем люминесцентном освещении, длившемся около 3 месяцев, сеянцы лука так и не сформировали лукович, тогда как при боковом освещении луковичи начали образовываться в двухмесячном возрасте.

Использование двустороннего бокового освещения люминесцентными трубками позволяет выращивать лук на искусственном освещении с хорошими результатами.

Совершенно очевидно, что для многих однодольных растений искусственное освещение следует делать не верхним, а боковым. В этом случае не только улучшается их рост, но также удваивается и использование лучистого потока люминесцентных трубок, так как освещение ими становится двусторонним вместо одностороннего при верхнем освещении. Люминесцентные трубки особенно пригодны для бокового освещения.

Естественно, что те растительные виды (а их большинство), у которых листья расположены в горизонтальной плоскости, в искусственных условиях должны освещаться сверху. Таковы томаты, земляника, хризантемы, огурцы, фасоль и многие другие весьма разнообразные растительные виды. В природных условиях все растения используют и рассеянный и прямой солнечный свет как в полуденные, так и в другие часы дня, так как их листья в большинстве случаев не остаются все время в одном положении, а, напротив, изменяют его. Причиной изменения положения листьев являются как их автономные движения, так и колебания их перемещающимися массами воздуха.

[В условиях защищенного грунта или, тем более, в лабораторных условиях, где нет факторов, вызывающих механические колебания листьев, виды с горизонтально расположенными листьями значительно лучше растут при верхнем освещении. Одно боковое освещение по сравнению с верхним понижает их общую продуктивность. Вместе с тем введение в осветительные установки с верхним расположением ламп дополнительного бокового освещения или даже просто хорошо отражающих свет боковых экранов улучшает световой режим растений, делая его более равномерным.]

Так, в одном из наших опытов, проведенных совместно с А. М. Ковальчук, были использованы осветительные установки, имеющие верхнее расположение ламп накаливания, горевших над водяным экраном. В одном варианте (контрольные условия) боковые стенки установки были сделаны из простого оконного стекла, а в другом варианте такие же боковые стенки представляли собой зеркала, обращенные внутрь установки. Следовательно, в последнем, опытном, варианте растения получали одновременно и верхнее освещение от светящегося потолка установки и боковое в виде отраженного зеркалами верхнего освещения. Естественно, что обычные стекла в контрольной установке не отражали верхнего света и их основным назначением было поддержание температуры и влажности воздуха на том же уровне, что и в зеркальных установках. Мощность лучистого потока верхнего прямого излучения и в опытах и в контроле равнялась 200—250 Вт/м².

Один из опытов в этих осветительных установках был проведен с огурцами (сорт Клинский местный). Проростки их в состоянии неразвернувшихся семядолей были посажены в вегетационные сосуды и поставлены в камеры. Температура воздуха в камерах поддерживалась во время горения ламп на уровне 25—27° и в темноте около 22—24° С. Влажность воздуха была 70—75%, ежесуточное освещение 18 часов в сутки. Опыт продолжался 15 суток. В камерах, где боковыми стенками было простое стекло, растения имели вытянутые междоузлия и более бледную окраску листьев (рис. 27). Растения в камерах с зеркалами были в два раза ниже при том же числе междоузлий, имели более крупные листья, отчего они выглядят компактными и ничем

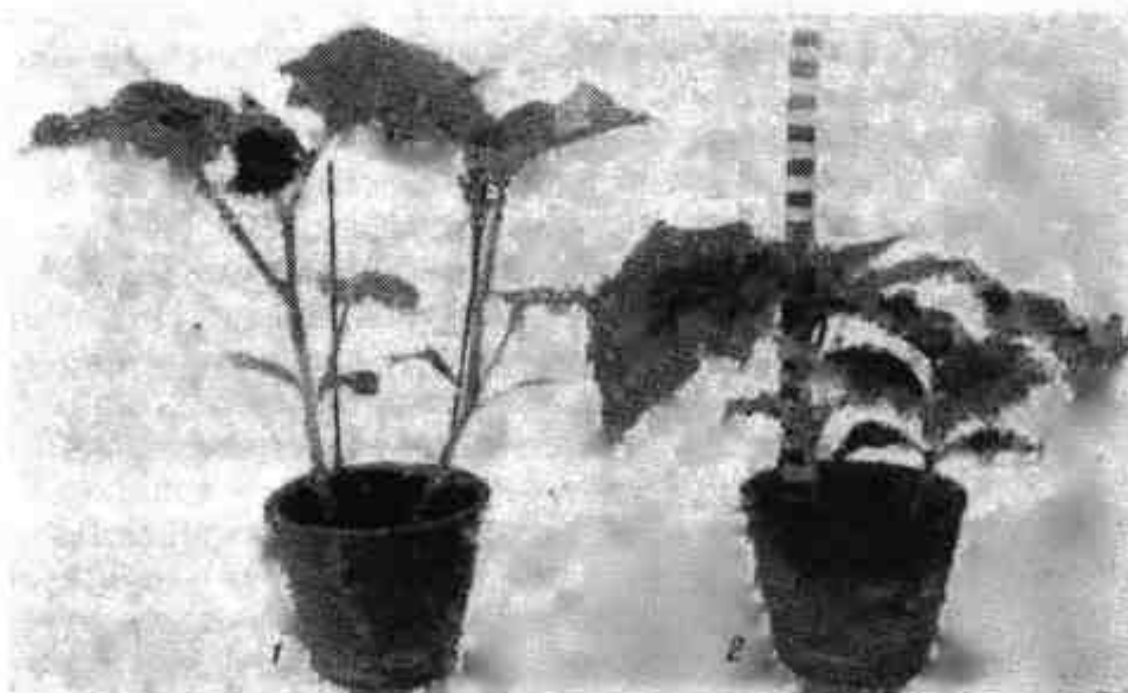


Рис. 27. Растения огурцов сорта Клинский местный в 15-дневном возрасте.

1 — выращено в обычной осветительной установке, 2 — в такой же установке, но с боковыми зеркалами.

не отличаются по внешним признакам от растений, выросших в естественных условиях на прямом солнечном освещении.

Аналогичные результаты получились и в опыте с томатными растениями, доведенными в описанных выше камерах до плодоношения. Проростки томатов — сорт Пушкинский 1853 — в состоянии нераспустившихся семядолей были посажены в сосуды с 3 кг почвы и поставлены в зеркальную и стеклянную камеры на 18-часовой световой режим. Растения, росшие в осветительной установке с зеркальными стенами, были приземисты, имели меньшую высоту, более темную окраску листьев и, что особенно интересно, сохраняли к уборке урожая зелеными не только все листья, но даже и семядоли, тогда как у контрольных растений к этому времени жизнеспособными остались лишь по три листа. Цветение и созревание плодов шло одновременно, но свет, отраженный от зеркальных стенок, заметно повысил продуктивность томатных растений.

Если у контрольных растений было по 7 плодов с общим весом 310 г, то растения, росшие в осветитель-

ных установках с зеркальными боковыми стенками, дали вдвое больше плодов (14 штук) общим их весом 560 г. Приведенные выше материалы о значении отраженного от зеркал света в осветительных установках с верхним освещением имеют большое практическое значение и лишний раз свидетельствуют в пользу «объемного» освещения растений.

При решении вопроса о том, каким способом следует освещать растения, надо прежде всего исходить из особенностей расположения их листьев в пространстве, имея в виду, что выгоднее всего лучистый поток направлять на листья растений под прямым углом или, во всяком случае, с не очень большим отклонением от него.

В условиях искусственного освещения можно и нужно добиваться наиболее равномерного и рационального освещения растений, что будет способствовать значительному увеличению урожая и снижению затрат электроэнергии на единицу растительной продукции.

В естественных условиях этого сделать нельзя, но в специальных помещениях, приспособленных для получения высоких урожаев, необходимо исправлять все недостатки природы и, в частности, в первую очередь научиться повышать коэффициент использования растениями падающей на них лучистой энергии.

АКТИНОРИТМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ РАСТЕНИЙ

Во взаимоотношениях растения и среды наибольшее значение принадлежит факторам, имеющим строго определенную суточную, сезонную и годовую ритмику.

Фотопериодизм, или, как предлагает его называть автор этих строк, актиноритмизм, присущ всему живому, начиная от растения и кончая человеком. Имеются многочисленные работы и у нас и за рубежом, расширяющие понятие фотопериодизма далеко за пределы растительного мира.

Насекомые, птицы, рыбы, животные и, наконец, люди все в той или иной степени реагируют на суточные ритмы

лучистой энергии. Реакция всего живого на суточные ритмы лучистой энергии может быть отнесена к числу безусловных рефлексов.

Естественно, что актиноритмизм охватывает собой все стороны жизнедеятельности живых организмов и поэтому не может быть сведен к какому-нибудь одному, хотя бы и очень важному, биологическому явлению. Но зато вполне закономерно каждое отдельное проявление жизни оценивать с актиноритмических позиций. Ведь любая актиноритмическая реакция является ответом живых организмов на определенные периодически повторяющиеся чередования света и темноты.

Физиологические процессы, идущие в темноте, несомненно связаны в общем метаболическом цикле с фотосинтетическими и фотобиологическими процессами, протекающими под воздействием лучистой энергии во время светлой части суточного цикла. Поэтому конечный биологический и хозяйственный эффект выращивания растений определяется характером суточного метаболизма, обусловленного процессами, проходящими как на свету, так и в темноте.

В этом кроются основные трудности изучения актиноритмической реакции растений, но они свойственны почти любому биологическому явлению.

Биологические явления, лежащие в основе актиноритмической реакции растений и зависящие от вращения земли, могут с полным правом быть названы актиноритмическими. В таком аспекте они охватывают все стороны жизнедеятельности растений и определяются физиологическими процессами, идущими как на свету, так и в темноте.

Итак, актиноритмизм — это реакция растений на периодические чередования или отличающихся друг от друга лучистых потоков, или же, в более типичном случае, света и темноты, связанные с вращением нашей планеты вокруг своей оси с 24-часовым суточным циклом.

Как термин актиноритмизм является сочетанием двух греческих слов: актино (*aktis, aktinos* — луч) — в сложных словах указывает на отношение данных слов к лучам, излучению, лучистой энергии и ритм (*rhythmos*) — закономерное чередование соизмеримых и чувственно ощутимых элементов.

Еще в работах Гарнера (W. W. Garner) и Алларда (H. A. Allard) было с достаточной убедительностью показано, что фотопериодическая реакция растений зависит не от фотопериода, а скорее, наоборот, от темного периода суток.

При выращивании растений на 24-часовом цикле, где на свет и темноту приходится по 12 часов, растения короткого дня цветут, а растения длинного дня не переходят к цветению. При чередовании света и темноты также в 24-часовом цикле через час, когда растения за сутки, так же как и в первом случае, получают в сумме по 12 часов света и темноты, растения короткого дня не цветут, а растения длинного дня быстро переходят к цветению.

Если причина такого поведения растений кроется в свете (фотопериод), то следовало бы сделать вывод, что для растений короткого дня нужен более длинный день, чем для растений длинного дня. Но это странное несоответствие быстро устраняется, если чередовать свет и темноту через час только в течение 12 часов, а затем дать растениям сплошную 12-часовую ночь. В этом случае растения короткого дня цветут, а растения длинного дня не цветут.

Значит, длина светлых периодов времени сама по себе ничего не определяет. И положение становится совершенно ясным, когда в 24-часовом цикле на часовые отрезки света и темноты разбивается ночь, а не день. День остается равным 12 часам. В этом случае растения короткого дня не цветут, но зато растения длинного дня цветут так же, как на длинном дне.

Следовательно, фотопериодическую реакцию растений определяет не фотопериод, а темный период суток — ночь (по-гречески «никт»), как же такую реакцию растений можно называть фотопериодической? В данном случае она явно никтопериодическая.

Далее будет показано, что именно никтопериодическая реакция в основном определяет состояние растений в различных актиноритмических условиях, поэтому классифицировать растения по их отношению к актиноритмическим условиям обитания следует исходя из характера их никтопериодических реакций. По данному признаку все растительные организмы легко разделяются на две группы: на растения, нуждающиеся для нормального

онтогенеза в суточных периодах темноты, и растения, не нуждающиеся в таких периодах. У таких растений суточные периоды темноты, при их определенной длительности, задерживают онтогенез.

Растения первой группы, называемые растениями короткого дня, следует называть никтофильными (любящими ночь). Растения второй группы, у которых темнота задерживает онтогенез и которые обычно называются растениями длинного дня, автор предлагает называть никтофобными (враждебными ночи).

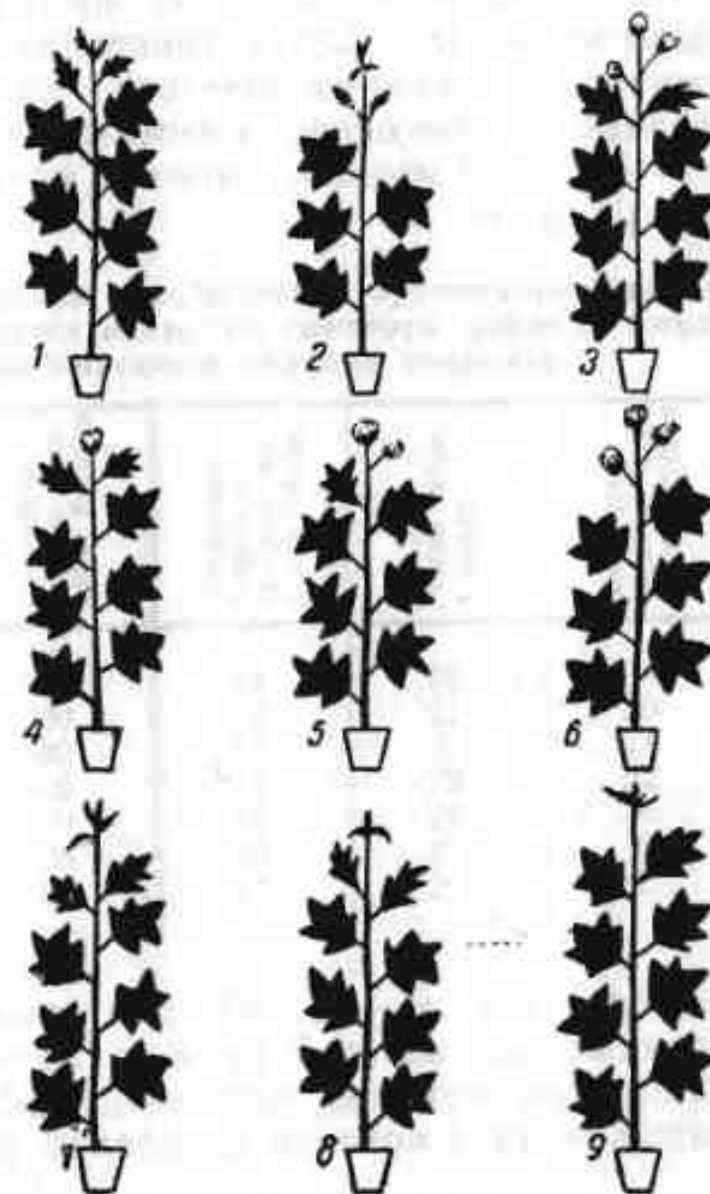
Наши специальные опыты с достаточной убедительностью показали, что онтогенез растений короткого дня определяет не темнота, а именно ее чередование со светом в течение определенных суточных циклов. Например, крупноцветная хризантема, не переходящая к цветению на непрерывном освещении и цветущая на коротком дне в том случае, когда воздействие производится только на одни вершины растения с 4—5 распустившимися листьями, не переходит к цветению, если вместо короткого дня дается сплошная темнота. Больше того, для цветения хризантемы достаточно всего 10-дневного воздействия коротким днем на 5 верхних листьев. Цветение растений начинается еще скорее, если вершины получают 15 и 20 коротких дней, причем до начала воздействия и после него хризантема находится на непрерывном освещении. Но если вместо короткого 10-часового дня на вершины растений хризантем воздействовать только темнотой в течение 140, 210 и 280 часов в условиях непрерывного освещения, то все растения остаются в вегетативном состоянии (рис. 28).

Отсюда вытекает неизбежный вывод, что темнота, данная растениям короткого дня без определенных чередований со светом, не обеспечивает их нормального онтогенеза и, следовательно, не определяет фотопериодической реакции растений. Значит, фотопериодическая реакция растений в действительности является актиноритмической, а не просто темновой, или никторацией. Ни свет, ни темнота, взятые в отрыве друг от друга (т. е. не соединенные в определенные актиноритмические циклы), не вызывают реакции растений, носящей давно изжившее себя название «фотопериодизм».

Какими же должны быть суточные циклы — свет — темнота, обеспечивающие актиноритмическую реакцию

Рис. 28. Реакция хризантемы (НФИ — вид) на различные способы актиноритмического воздействия.

1 — непрерывное освещение, 2 — вершина в непрерывной темноте, 3 — вершина на коротком дне, 4, 5, 6 — вершины получали соответственно 10, 15 и 20 коротких дней, 7, 8, 9 — вершины растений получали соответственно 140, 210 и 280 часов темноты.



растений? На этот вопрос отвечают результаты многочисленных опытов с различными растительными видами. Не имея возможности изложить их, автор вынужден ограничиться результатами своих исследований, проведенных при участии Н. И. Плотниковой на типичном «короткодневном», т. е. никтофильном, растении — перилле масличной.

При выращивании ее на 24-часовом цикле, начиная с непрерывного освещения и кончая 3-часовым днем, было установлено (табл. 12), что перилла масличная начинает цвести с 15-часового дня, кончая 4-часовым днем. Это означает, что для ее цветения необходимо не менее 9 часов темноты и не менее 4 часов света. Если это так, то, очевидно, сочетание 4 часов света с 9 часами темноты

(13-часовой цикл) должно обеспечить семянное размножение периллы. И первый же опыт, в котором перилла масличная выращивалась на искусственных суточных циклах в 13 часов, из которых на долю света приходилось 4 часа, а на долю темноты 9 часов, показал правильность нашего предположения. У растений периллы в этом опыте, как и во многих других, освещение было искусственным (250-ваттные лампы ДРЛ), а включение и выключение света автоматическим.

Таблица 12

Влияние различных актиноритмических циклов на репродуктивное развитие периллы масличной

Продолжительность (часов)		Состояние растений	Продолжительность (часов)		Состояние растений
день	ночь		день	ночь	
24	—	Вегетативное	11	13	Цветут
20	4	То же	10	14	То же
18	6	>	9	15	>
17	7	>	8	16	>
16	8	>	7	17	>
15	9	Цветут	6	18	>
14	10	То же	5	19	>
13	11	>	4	20	>
12	12	>	3	21	Вегетативное

Некоторое запаздывание (на 2 недели) в появлении бутонов по сравнению с оптимальными актиноритмическими условиями характерно для всех случаев, когда света значительно меньше, чем темноты. В данном случае отношение света к темноте близко к 1:2. Аналогичные результаты получаются и в том случае, когда растения периллы масличной выращиваются при нормальных 24-часовых актиноритмических циклах с тем же отношением 1:2, что составляет 8 часов света и 16 часов темноты. В этом случае бутоны появляются также на 32—34-й день.

Для выявления наиболее оптимальных сочетаний света и темноты, способствующих скорейшему переходу периллы масличной к цветению, было проведено большое число лабораторных опытов с самыми разнообраз-

ными суточными циклами. В частности, прежде всего были проведены исследования (табл. 13), в которых выяснялось влияние на онтогенез периллы различных по продолжительности световых периодов, чередовавшихся всегда с периодом темноты, равным 9 часам.

Таблица 13

Скорость перехода периллы масличной к бутонизации в зависимости от продолжительности светлого периода цикла при постоянном 9-часовом периоде темноты

Продолжительность светлого периода (часов)	Число часов в цикле	Количество дней до появления бутонов	Продолжительность светлого периода (часов)	Число часов в цикле	Количество дней до появления бутонов
4	13	34	11	20	20
5	14	30	12	21	20
6	15	30	13	22	21
7	16	26	14	23	22
8	17	20	15	24	36
9	18	20	16	25	49
10	19	20	17	26	53

Из анализа данных табл. 13 следует, что длительность светового периода от 4 до 7 часов задерживала появление бутонов. Зато доведение светлого периода до 8 часов обеспечивало появление бутонов в кратчайший срок (20 дней).

Появление бутонов через 20 суток после начала опыта для молодых растений периллы, имеющих тот же возраст, является нормальным для самых лучших световых условий. Дальнейшее наращивание светлого периода актиноритмических циклов, вплоть до 13—14 часов, не мешало нормальному онтогенезу периллы, и она во всех этих вариантах образовывала бутоны через 20 суток после начала опыта. Но как только длина светлого периода доходила до 15 часов (в 24-часовом цикле), снова наблюдалась сильная задержка в появлении бутонов (на 16 дней против нормы). В двух следующих вариантах опыта эта задержка продолжала нарастать и, по-видимому, при длине светлого периода в 18—20 часов последующая 9-часовая ночь не может в данных условиях обеспечить развития периллы масличной.

Таким образом, 9-часовой период темноты вызывает быстрое развитие периллы только после светлого периода, длящегося от 8 до 14 часов.

В другом нашем опыте перилла масличная получала 7-часовой период темноты в различных циклах, начиная с 12-часового и кончая 24-часовым (табл. 14). В этом случае все растения периллы остались до конца опыта,

Таблица 14

Влияние на онтогенез масличной периллы 7-часового периода темноты в различных циклах

Продолжительность (часов)		Состояние растений	Продолжительность (часов)		Состояние растений
цикла	светлого периода		цикла	светлого периода	
12	5	Вегетативное	19	12	Вегетативное
13	6	То же	20	13	То же
14	7	>	21	14	>
15	8	>	22	15	>
16	9	>	23	16	>
17	10	>	24	17	>
18	11	>			

длившегося 60 суток, в вегетативном состоянии. Отсюда неизбежен вывод, что 7-часовой период темноты в цикле недостаточен для нормального онтогенеза типичного никтофильного растения периллы масличной.

Для масличной периллы намечается четкий интервал, равный двум часам, между периодами темноты, способствующей и не способствующей цветению.

В случаях, когда масличная перилла получает 8 часов темноты в нормальном 24-часовом цикле и остается вегетативной, интервал между активным и пассивным периодами темноты сокращается до одного часа. Результаты сочетаний 8-часового периода темноты с различными периодами света при выращивании периллы показаны в табл. 15.

При любой продолжительности светлого периода от 5 до 8 часов перилла переходила к бутонизации, хотя и значительно позже, чем в оптимальных условиях. Но, как только период света становился длиннее на час

8-часового периода темноты, цветение периллы не осуществлялось. Значит, сокращение ночного 9-часового периода на один час приводит или к сильной задержке в репродуктивном развитии периллы, или вообще делает его невозможным. Вероятно, 8 часов являются критической продолжительностью темного периода цикла, пригодного для нормального онтогенеза периллы.

Таблица 15

Влияние на онтогенез масличной периллы 8-часового периода темноты в различных циклах

Продолжительность (часов)		Состояние растений	Продолжительность (часов)		Состояние растений
цикла	светлого периода		цикла	светлого периода	
13	5	Бутоны на 43-й день	17	9	Вегетативное
14	6	То же на 46-й день	18	10	То же
15	7	> на 49-й день	20	12	>
16	8	> на 55-й день	24	16	>

Любопытно, что при 8-часовой ночи появление бутонов наблюдается тем скорее, чем короче светлый период. Не служат ли эти факты прямым указанием на зависимость идущих в темноте процессов от количества лучистой энергии, связанной растениями за светлый период суток? Может быть, в процессе длительной эволюции у периллы, да и других типичных никтофильных растений, возник суточный цикл метаболизма, в котором фото- и никторреакции находятся в оптимальных отношениях, если периоды света и темноты равны друг другу.

Чтобы проверить возможное значение этих равенств различных периодов света и темноты, проводились опыты с масличной периллой в условиях искусственного освещения с автоматическим включением и выключением ламп ДРЛ. Было испытано 15 различных циклов, начиная с 8-часового и кончая 52-часовым, с равными периодами света и темноты (табл. 16).

Таблица 16

Влияние различных циклов свет — темнота на репродуктивное развитие периллы масличной

Продолжительность (часов)			Состояние растений	Количество дней до образования бутонов
светлого периода	темного периода	всего цикла		
4	4	8	Вегетативное	
5	5	10	То же	
6	6	12	"	
7	7	14	"	
8	8	16	Цветут	55
9	9	18	То же	20
10	10	20	"	22
11	11	22	"	22
12	12	24	"	22
13	13	26	"	28
14	14	28	"	32
16	16	32	Вегетативное	
20	20	40	То же	
24	24	48	"	
26	26	52	"	

Актиноритмические циклы 4:4, 5:5, 6:6, 7:7, данные перилле в течение 80—90 календарных суток, не обеспечили репродуктивного развития растений, и все они оставались в вегетативном состоянии. В условиях 16-часового цикла с равными периодами света и темноты бутоны появились очень поздно, на 55-й календарный день после начала опыта. Зато в последующих циклах 9:9, 10:10, 11:11, 12:12 бутонобразование наблюдалось в нормальные сроки. При цикле 13:13 бутоны появились на 5—6 суток позже, а при цикле 14:14 опоздание еще увеличилось и дошло до 10 суток. Наконец, во всех следующих циклах, начиная с 26-часового и кончая 52-часовым, растения периллы за все время опыта оставались в вегетативном состоянии.

Далеко не все циклы, содержащие равное число часов света и темноты, вызывают переход растений периллы масличной от вегетации к репродуктивному развитию. Обычно при выращивании периллы в условиях 24-часового цикла она дает наибольшие урожаи сухой массы и семян при равных (12-часовых) периодах света и темноты. Однако в условиях 20- и 18-часовых циклов общий урожай периллы оказывается более высоким.

Причем в иных случаях прибавка в весе сухой массы и семян доходила до 20—30%, что может иметь существенное практическое значение для культуры растений в условиях искусственного освещения, так как в этих случаях несомненно повышается коэффициент использования растениями и лучистого потока, и электрической энергии.

Весьма любопытным оказалось поведение растений периллы масличной при выращивании ее на двух вариантах 16-часового цикла. В одном случае, когда на долю света и темноты приходилось по 8 часов, перилла дала бутоны только на 55-й календарный день, т. е. более чем с месячным опозданием против нормы. В другом случае, где на светлый период цикла приходилось 7 часов, а остальные 9 часов цикла растения находились в темноте, бутоны появились почти в нормальный срок — на 25-й календарный день, задержавшись по сравнению с оптимальными условиями на 3—5 дней. В результате такого значительного различия в сроках появления бутонов 50-дневные растения этих, казалось бы таких близких по условиям, групп 16-часового цикла резко отличались друг от друга (рис. 29). Перилла масличная, получавшая по 8 часов света и темноты, находилась в вегетативном состоянии, а получавшая 7 часов света и затем 9 часов темноты была покрыта почти созревшими семенами. Онтогенез этих растений периллы, выросших при 16-часовом актиноритмическом цикле, зависел от одного часа, отнятого от светлого периода и добавленного к темному периоду. Очевидно, 16-часовой цикл, так же как и многие другие циклы, вполне пригоден для быстрого репродуктивного развития периллы, если светлый и темный периоды находятся в определенном соотношении друг к другу. Если же этого нет, то перилла, как правило, или совсем не переходит к цветению, или зацветает очень поздно.

Естественно возникает предположение, что по аналогии со старыми данными исследований автора критическая граница между активными и пассивными для онтогенеза актиноритмами лежит в пределах значительно меньших, по сравнению с часом, интервалов времени. Поэтому с помощью специального автомата, изготовленного О. В. Ивановым, включавшего и выключающего свет в строго заданное время, были проведены экспери-

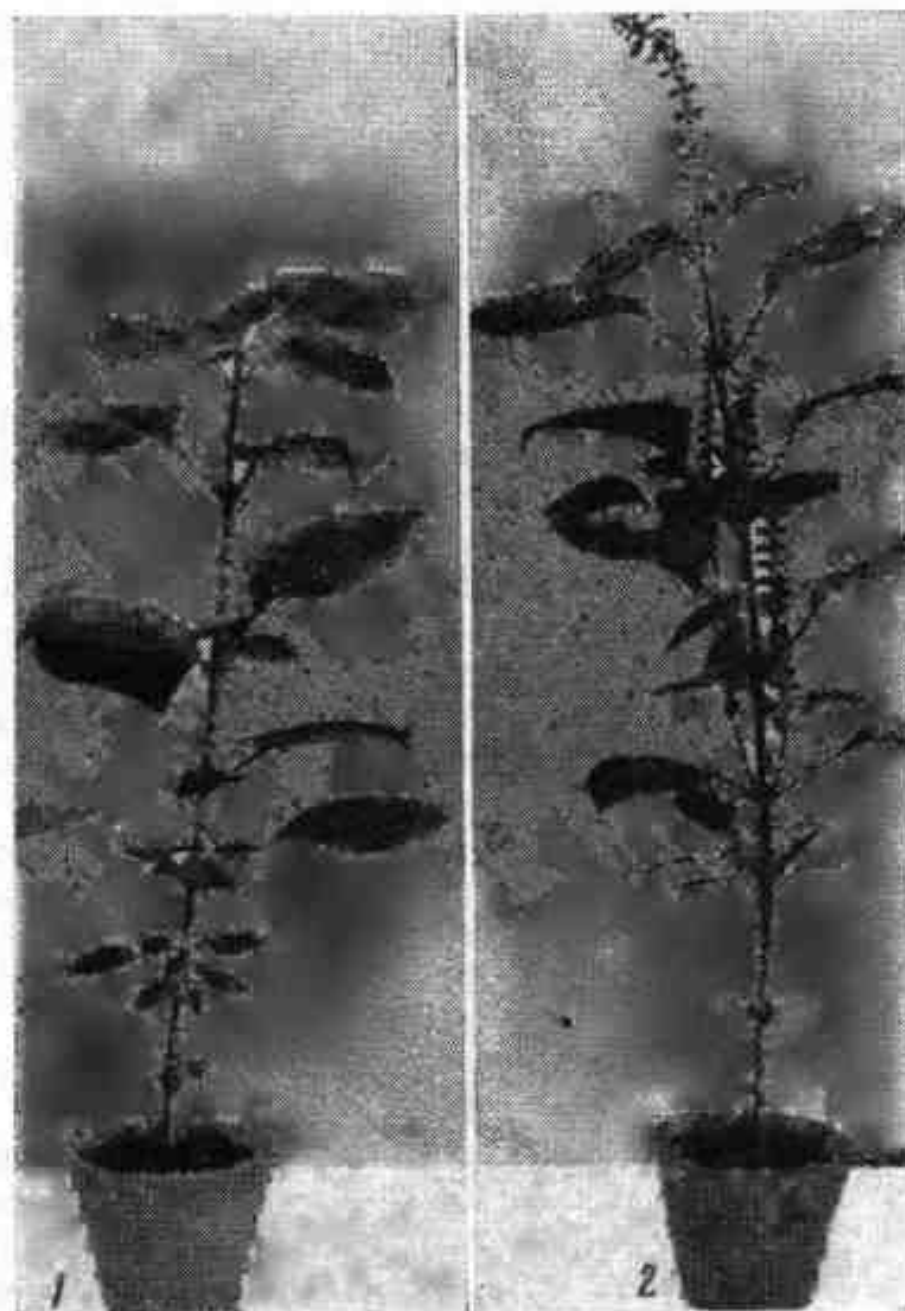


Рис. 29. Перилла масличная в возрасте 55 дней, выросшая в условиях 16-часовых актиноритмов.

1 — светлый и темный периоды по 8 часов, 2 — светлый период 7 часов, темный — 9 часов.

менты, в которых выяснялось значение 5-минутных интервалов времени в пределах часа, определяющего судьбу периллы масличной в 16-часовом цикле. Схема опыта и его результаты представлены в табл. 17.

Она составлена на основании описания всех опытных растений периллы масличной в возрасте 50 календарных суток. В это время все растения пяти первых групп,

имевших продолжительность ночи от 8 час. до 8 час. 20 мин., находились в вегетативном состоянии. Растения следующих трех групп (6, 7, 8), с длиной темного периода от 8 час. 25 мин. до 8 час. 35 мин., имели крупные бутоны, и в то же время растения остальных пяти групп (9, 10, 11, 12, 13), с длиной темного периода от 8 час. 40 мин. до 9 час., были покрыты готовыми к уборке семенами. В пределах часа, лежащего на границе активного и неактивного 16-часовых актиноритмов, обнаружилось четкое значение 5-минутных интервалов, которые в зависимости от того, приходятся ли они на светлую или темную часть 16-часового цикла, определяют характер онтогенеза растений периллы масличной.

Таблица 17

Характер онтогенеза 50-дневных растений периллы масличной в зависимости от 5-минутных интервалов в пределах часа, лежащего на границе критических актиноритмов

Продолжительность периода (час. — мин.)		Состояние растений	Продолжительность периода (час. — мин.)		Состояние растений
светлого	темного		светлого	темного	
8—00	8—00	Вегетативное	7—25	8—35	Бутонизация
7—55	8—05	То же	7—20	8—40	Семьеобразо-
7—50	8—10	"			вание
7—45	8—15	"	7—15	8—45	То же
7—40	8—20	"	7—10	8—50	"
7—35	8—25	Бутонизация	7—05	8—45	"
7—30	8—30	То же	7—00	9—00	"

Теперь можно, с большей точностью, чем прежде, сказать, что минимальным периодом темноты в актиноритмических циклах, вызывающих быстрое зацветание периллы, является не 9 час., а 8 час. 40 мин. Если длительность темного периода уменьшается на 5 минут, то развитие задерживается. А если период темноты равен 8 час. 20 мин., то растения периллы или совсем не цветут, или дают бутоны не менее чем на 55-й день после начала жизни.

Думается, что рассмотренные факты говорят об очень тонких и четких границах никтопериодов, определяющих никтопериодическую реакцию растений.

Результаты изложенных выше исследований, а также и хорошо согласующиеся с ними литературные данные приводят нас к неизбежному выводу о решающей роли темных периодов актиноритмических циклов в так называемой фотопериодической реакции растений. Несомненно, что важные физиологические процессы, определяющие характер реагирования растений на суточные циклы смены света темнотой, проходят не только на свету, но и в темноте.

Процессы, определяющие актиноритмическую реакцию растений, проходящие в темноте, так же как и вообще темновые реакции растений, изучены очень мало.

Еще в старых опытах американских исследователей (R. H. Roberts, B. E. Struckmeyer) было показано, что при понижении температуры воздуха некоторые короткодневные виды растений перестают реагировать на короткий день, становятся как бы длиннодневными. Позже, в течение ряда лет, много внимания температурным условиям выращивания растений уделил Вент (F. W. Went), предложивший новое представление о термопериодизме растений. Теперь становится ясным, что для выяснения никтопериодической реакции растений, так же как и для многих других процессов, идущих в темноте, температура воздуха, окружающего растение, является часто решающим фактором.

В табл. 18 приведены результаты одного из наших опытов, проведенных в камере искусственного климата при строгом соблюдении как светового, так и температурного режима. Объектом его была все та же масличная перилла, дающая четкие и быстрые ответы на никтопериодические режимы выращивания. В условиях 24-часового цикла с продолжительностью ночи 10 часов и при неизменной температуре воздуха, равной в течение всего опыта 28° , перилла быстро переходит к цветению, выявляя тем самым свою несомненную никтофильность. Но если перилла выращивается в камере, где температура воздуха в течение всего времени равна 15° , она не переходит к репродукции и ведет себя как на непрерывном освещении или так же, как никтофобное растение в условиях короткого дня. Температура среды, окружающей периллу, в 15° устраняет ее способность реагировать на никтопериодические режимы выращивания. То же самое явление наблюдается и в тех вариантах опыта, где

перилла находится в течение 14 светлых часов при температуре среды 28° , а в темноте при 15° . Значит, не дневные температуры ответственны за никтопериодическую реакцию растений периллы. И действительно, в вариантах опытов, где растения периллы находятся днем при температуре 15° , а ночью при температуре 28° , они быстро переходят к цветению.

Таблица 18

Значение температуры для темновой фазы фотопериодической реакции периллы

Температура воздуха (градусов) в течение периода		Состояние растений	Температура воздуха (градусов) в течение периода		Состояние растений
светлого 14-часового	темного 10-часового		светлого 14-часового	темного 10-часового	
28	28	Цветение Вегетативное	15	28	Цветение Вегетативное
15	15		28	15	

Слишком высокая температура также неблагоприятна для нормального хода темновых процессов. Исследованиями аспиранта А. П. Михайлова было показано, что перилла масличная не переходит к цветению при оптимальных суточных сочетаниях света и темноты, например при 24-часовом цикле с 12 часами света и темноты, если температура воздуха в темной камере держится выше 38° . Более того, А. П. Михайлову удалось показать, что при определенных чередованиях в течение темного периода актиноритмического цикла различных температур наблюдается их противоположное действие.

При выращивании масличной периллы в условиях 12-часового чередования света и темноты она быстро (на 20-й день) дает бутоны при ночной температуре среды в 25° . При ночной температуре в 15° и 38° перилла масличная не образует бутонов и остается в вегетативном состоянии. Но неблагоприятное действие как низкой, так и высокой температуры в течение темного периода цикла может быть снято последующим действием оптимальной температуры.

Так, если после 9 часов темноты, сопровождающейся температурой воздуха в 15° , делающей цветение периллы невозможным, добавлять еще три часа темноты, но уже

при температуре в 25°, перилла переходит к репродукции. Переходит она к репродукции и в тех случаях, если в середину 12-часовых ночей с температурой 15° вставляются трехчасовые теплые (25°) периоды темноты. Двухчасовой теплый (25°) период темноты в вариантах опыта, аналогичных предыдущим, не снимает действия пониженной температуры.

Высокая температура (38°) в течение темного периода суток оказывается столь же неблагоприятной, как и низкая (15°). Девять и даже 8 часов высокой температуры в 12-часовом периоде темноты приводит растения масличной периллы к вегетативному состоянию. Очевидно, температура темного периода более 38° оказывается неблагоприятной.

Если допустить, что при температуре как 15°, так и 38° какие-то темновые процессы идут очень медленно или даже не идут совсем, то при температуре около 25° они, очевидно, проходят быстро и обеспечивают нормальный ход онтогенеза масличной периллы. Возможно, что в этих интересных опытах выявлена двойная роль темноты. С одной стороны, темнота — это просто отсутствие света, с другой стороны, темнота, сопровождаемая оптимальными температурами, — это необходимая среда для определенных физиологических процессов.

Следовательно, определенный температурный режим для выявления никтопериодической реакции никтофильных растений необходим не вообще, а в ночные часы актиноритмических циклов. И это вполне естественно. Ведь растения, относящиеся к данной группе, в основном имеют южные ареалы, характеризующиеся длинной и теплой ночью. Именно поэтому для их нормального онтогенеза имеет такое большое значение продолжительность темного периода суток и температура среды в ночное время. Экспериментальное доказательство того факта, что температура среды является решающей в темные, а не в светлые часы циклов, еще раз свидетельствует в пользу никтопериодической, а не фотопериодической сущности интересующего нас явления.

Несомненно, что под действием света (лучистой энергии) в зеленых растительных организмах проходит не только один физиологический процесс — фотосинтез, напротив, с действием света связываются и такие процессы, как транспирация, фототропические движения и различ-

ные фотобиологические реакции. С темнотой же ассоциируются представления только о росте, связанном с растяжением клеток, и о дыхании. Причем представления об этих процессах, особенно о дыхании, очень приближительны и нуждаются в серьезных дополнениях.

Еще более скромны наши знания о физиологических процессах, проходящих в темный период актиноритмических циклов и определяющих никтопериодическую реакцию растений. Выше мы видели, что один из этих процессов зависит от температуры воздуха, а другие, по-видимому, протекают в очень широких температурных пределах. Из литературы, еще со времен первых работ В. И. Разумова, известно, что фотопериодическая реакция растений легко изменяется или не осуществляется вовсе под воздействием кратких периодов слабого освещения, данного в ночное время. Более поздние работы, наши и других авторов, показали, что темновая фаза фотопериодической реакции ослабляется даже 10-минутным действием света, если тем самым укорачивается сплошной отрезок темноты до предела, не обеспечивающего прохождения темновых процессов никтопериодической реакции растений.

Например, если в нормальном актиноритмическом цикле растения периллы масличной получают 9-часовую ночь, они не будут цвести в нормальный срок, если эта ночь будет прерываться в любой своей части краткими периодами даже слабого света.

В то же время, как показали многочисленные опыты нашего сотрудника П. А. Дегтярева, интенсивные вспышки света, длительностью в $1/1000$ сек., даваемые растениям периллы с часовыми интервалами в течение 10-часовых периодов темноты, не нарушали нормальной актиноритмической реакции.

Из сопоставления результатов различных опытов у автора возникает предположение, что для нарушения никтопериодической реакции периллы необходима определенная незначительная доза лучистой энергии. Но не исключена возможность, что, помимо дозы излучения, на разрыв темновой фазы цикла влияет и продолжительность светового разрыва как фактора, обуславливающего начало процесса, противоположного темновому.

Выше, определяя понятие актиноритмической реакции растений, автор отметил, что данное явление

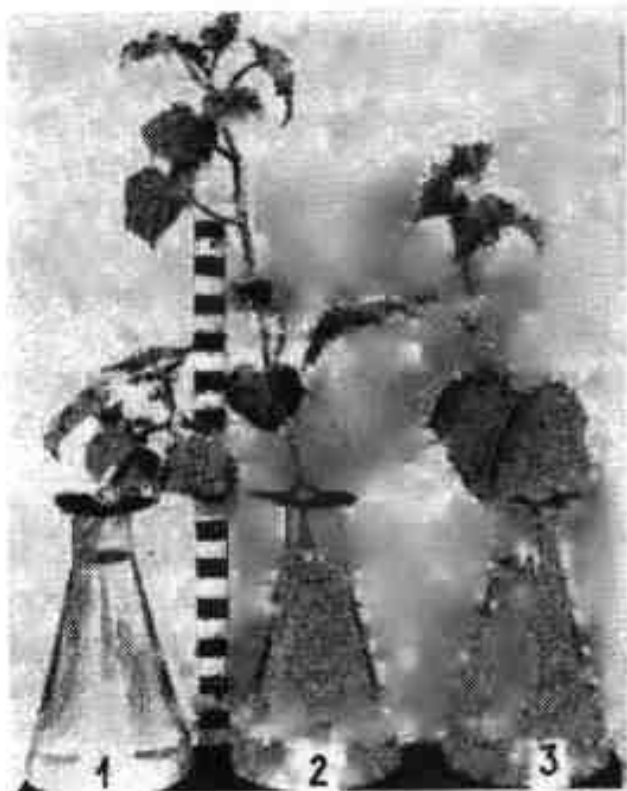


Рис. 30. Огурцы в 20-дневном возрасте, выращенные на искусственном освещении. 1 — непрерывное освещение, 2 — 12 часов света, затем 12 часов ближняя инфракрасная радиация, 3 — 12 часов света, остальные 12 часов — темнота.

наблюдается не только при смене света темнотой, но также иногда при замене одного излучения другим.

Иллюстрацией этого положения являются данные специального опыта автора и А. М. Ковальчук. Объектом исследования были огуречные растения. Растения первой группы находились все время на непрерывном освещении в осветительных установках, состоящих из ламп накаливания. Растения второй группы в течение такого же периода выращивались в условиях чередования через 12 часов света (в той же установке, где находились растения первой группы) и темноты. В третьей группе вместо темноты растения получали ближнюю инфракрасную радиацию, которая в течение всего срока опыта чередовалась со светом.

Состояние растений из этих групп опыта было таково. Растение первой группы (рис. 30, 1) находилось все время на непрерывном освещении. Оно самое низкое, компактное, с наиболее мелкими листьями и хорошо развитыми бутонами. Растение второй группы (рис. 30, 3) в результате чередования света и темноты имеет более нормальный вид. Листья его достаточной величины, бутоны хорошо развиты и имеются характерные для обычных растений усы-прилистники — приспособление для

поддержания плетей в вертикальном положении. Растение третьей группы, выращенное в условиях, когда свет чередовался с ближней инфракрасной радиацией, резко отличалось от растений двух первых групп. Оно имело наибольшие размеры и наибольший вес. У него не было усов, зато оно обладало наиболее устойчивым прямым стеблем. Но, главное, что растение не образовывало органов плодоношения. Оно не давало бутонов. Ближняя инфракрасная радиация при чередовании ее со светом задерживала нормальный ход онтогенеза огуречных растений и тем самым ее воздействие отличалось от действия как света, так и темноты.

Столь же интересные результаты наблюдались и в другом опыте с этим же сортом огурцов, где чередование света и темноты, света и инфракрасной радиации проводилось через час в течение 20 суток. Результаты этого интересного и трудного по выполнению опыта можно видеть на рис. 31.

И в этом случае, как и в предыдущем, различие огуречных растений поразительно. Они совершенно разные. Характер их роста и развития, морфология — все совершенно иное. Глядя на эти растения, трудно поверить, что инфракрасная радиация не является физиологически активной, она несомненно имеет и формообразовательное и актиноритмическое значение.

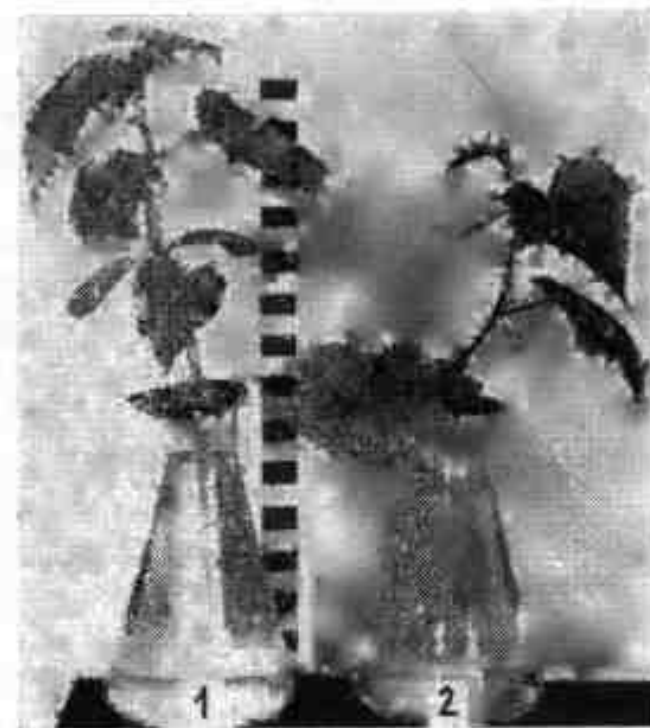


Рис. 31. Растения огурцов в 20-суточном возрасте.

1 — выращенные при чередовании через один час света и ближней инфракрасной радиации, 2 — при чередовании света и темноты.

Кроме того, эти факты свидетельствуют, что актиноритмизм характеризует не только реакцию растений на периодические чередования света и темноты, но также и поведение их в условиях, где периодически чередуются различные по спектру и мощности лучистые потоки. В последнем случае уже нельзя говорить о данных явлениях как о никтопериодических.

В обычном ходе физиологических процессов, связанных с актиноритмической реакцией растений, значительная роль принадлежит темноте. Физиологические процессы, идущие в темноте, пока еще остаются тайной окружающей нас природы.

Сейчас можно сказать с уверенностью лишь о том, что имеются факты, говорящие о двух различных по своей природе физиологических процессах, идущих в темноте.

Одними мы занимались выше. Они относятся к актиноритмическим закономерностям, связанным с переходом растений от роста к воспроизведению. Для полного завершения этого процесса необходимо пребывание листьев растений, направляющих онтогенез контролируемых ими точек роста, в условиях оптимальных актиноритмов в течение определенного времени. Пока это время не истекло, укорачивание темного критического периода цикла или прерывание его светом приводят к неиспользованию темноты и нарушению актиноритмической реакции.

Другая группа фактов касается актиноритмической реакции растений, выражающейся такими процессами, как движение листьев, стеблей (нутации), венчиков и чашелистиков цветков, суточного хода процесса транспирации и т. д. Для этих явлений многочисленными работами как за рубежом (Е. Виппинг и др.), так и в СССР (И. И. Гунар и его сотрудники), а также в исследованиях руководимой автором лаборатории (Б. С. Мошков, В. Г. Карманов, С. В. Пумпянская) можно считать установленным, что замена темноты светом в ночные периоды оптимальных актиноритмов не сразу изменяет характер суточного хода указанных выше процессов. Больше того, в работах В. Г. Карманова и С. В. Пумпянской, относящихся к изучению суточного хода транспирации у южных сортов фасоли, совершенно четко показано, что уже на 14-часовом дне с последу-

ющей 10-часовой ночью растения фасоли завершают дневной ход транспирации за 11 часов и последние три часа, находясь по-прежнему на свету, не транспирируют. Об этом свидетельствует постоянство влажности воздуха, прилегающего непосредственно к нижней стороне листа. Именно это явление и было использовано В. Г. Кармановым для создания прибора, при помощи которого растения сами выключали свет после того, как процесс транспирации оканчивался, и вновь включали его при возобновлении транспирации. Очевидно, по этой же причине растения фасоли не транспирируют и в том случае, если вместо привычной темноты остаются в тех же световых условиях, что и в дневное время цикла. В этом случае темновая фаза актиноритмической реакции растений оказывается достаточно инерционной, чем резко отличается от очень изменчивой реакции, определяющей характер онтогенеза растений.

Консервативный характер темновой фазы актиноритмической реакции растений, выражающийся суточными ритмами движений, транспирации и т. д., и привел Бюннинга к представлению об эндогенных суточных ритмах различных физиологических процессов и к объяснению актиноритмической реакции растений наличием у последних этих эндогенных суточных ритмов. Действительно, в некоторых определенных актиноритмических условиях дневной ход транспирации оканчивается еще на свету и контролируется не темнотой, а внутренними факторами, которые возникли под воздействием предшествовавших актиноритмов на базе эволюционно сложившихся и наследственно закрепившихся индивидуальных свойств по использованию актиноритмических условий выращивания. Поэтому возможно, что для подобных процессов темные периоды циклов являются лишь сигналами к изменению направленности характера определенных, но далеко не всех, физиологических процессов.

Как бы то ни было, весь сорокалетний опыт изучения актиноритмической реакции растений, этого капитальнейшего процесса в биологии, показывает, что в темноте происходят сложные и разнообразные процессы жизнедеятельности, о которых мы знаем еще меньше, чем о тех, что проходят под воздействием лучистой энергии. Их изучение заслуживает самого пристального внимания

и физиологов, и биохимиков и, вероятно, является самым надежным и коротким путем к познанию сущности не только всего онтогенеза растений, но и многих отдельных физиологических процессов.

ЗНАЧЕНИЕ АКТИНОРИТМИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В РАЗВИТИИ РАСТЕНИЙ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ИХ В ИСКУССТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Актиноритмические исследования начинают приобретать все большее значение как для развития физиологии растений, так и для практического растениеводства.

Используя искусственное освещение для культуры растений, нельзя не считаться с продолжительностью светового периода. Многие растительные виды дают наилучший хозяйственный эффект при длине дня, не превышающей 14—16 часов. Понятно, что выращивание их при большей длине дня, с использованием электрического освещения, является совершенно нерациональным. Ведь чем короче ежесуточный период освещения, тем меньше затрачивается электроэнергия и, следовательно, тем больше удешевляется растительная продукция. Таким образом, для меньшего расхода электроэнергии, при одинаковой мощности лучистого потока, выгодно пользоваться предельно короткими периодами освещения. Конечно, при одинаковой длине дня затраты электрической энергии будут тем ниже, чем меньше мощность лучистого потока, получаемого растением.

Для наиболее рационального использования электрической энергии следует знать реакцию растений не только на мощность лучистого потока и на продолжительность его действия, но также и на определенные сочетания этих факторов. Только в результате правильно подобранных сочетаний мощности лучистого потока с продолжительностью ежесуточного освещения предельно повышается коэффициент использования растением света, что приводит к наибольшей урожайности растений и, следовательно, к снижению затрат электрической энергии на

единицу растительной продукции. При выращивании растений полностью на искусственном освещении подбор оптимального для данного вида сочетания мощности лучистого потока с ежесуточной продолжительностью является одной из важнейших проблем.

Вместе с тем, эти важные для практики данные могут быть получены только в искусственных условиях, т. е. при использовании электрического освещения. Точно так же, только в искусственных условиях, могут быть выяснены такие явления, как зависимость влияния продолжительности суточного периода освещения от мощности и спектрального состава излучения. Наконец, подробное выяснение актиноритмической реакции растений возможно только в условиях искусственного освещения. Для пояснения сказанного ниже приводится актиноритмический опыт с ветвистой пшеницей, где выяснялось значение для скорости ее репродуктивного развития небольших периодов суточной темноты.

Опыт включал в себя пять вариантов по продолжительности ночи и дня. Первый вариант составляли растения, находившиеся все время на непрерывном освещении. В последующих четырех вариантах растения получали темноту по 2, 4, 6 и 8 часов в сутки или, иными словами, выращивались при длине дня в 22 часа (2-й вариант), 20 часов (3-й вариант), 18 часов (4-й вариант) и 16 часов (5-й вариант). Все растения выращивались в осветительной установке, состоявшей из обычных ламп накаливания и водяного экрана. На период темноты растения переносились в темное помещение. Через 20 дней после всходов и начала опыта конуса нарастания основных побегов имели размеры и развитие, показанные на рис. 32.

Если длину точки роста фактически совершенно сформированного колоса на непрерывном освещении принять за 100%, то размеры конусов нарастания других растений выразятся следующим рядом: 22 часа — 56%, 20 часов — 28%, 18 часов — 12%, 16 часов — 7%. Даже на таком длинном дне, как 22-часовой, развитие ветвистой пшеницы сильно задерживается по сравнению с непрерывным освещением. Два часа темноты, включенные в 24-часовой суточный цикл, замедляют ход онтогенеза пшеницы и понижают интенсивность ростовых процессов. Понятно, что относительно короткий 16-ча-

совой день значительно задерживал развитие ветвистой пшеницы по сравнению с непрерывным освещением.

Полного выколашивания растения ветвистой пшеницы достигали на непрерывном дне за 25—27 суток, на 20-часовом дне за 35—40 суток, а на 16-часовом дне за 55—65 суток. Так как все остальные условия выращивания пшеницы были одинаковыми, мы вправе сделать вывод об исключительном значении для ускорения ее развития продолжительности периода ежесуточного освещения.

Проведение аналогичного опыта в природных условиях встречает немало затруднений и результаты его могут оказаться искаженными из-за непостоянства температурных условий. Вместе с тем постановка подобных исследований, где выясняются максимальные длительности темных периодов суток, не задерживающих развитие растений, имеет большое практическое значение. Кроме того, постепенное, на 1 час, увеличение темного периода суток в различных вариантах опыта характеризует отношение растения к темноте и выявляет различие актиноритмической реакции даже у растений, входящих в одну и ту же актиноритмическую группу.

Например, Абиссинская капуста, так же как и ветвистая пшеница, входит в группу никтофобных растений, но реагирует на темноту в суточных циклах иначе, чем пшеница, хотя все фазы ее онтогенеза проходят скорее всего на непрерывном освещении; включение в сутки небольшого отрезка темноты не сказывается на их замедлении.

В описанном ниже опыте Абиссинская капуста выращивалась в осветительной установке, состоящей из ламп накаливания и водяного фильтра, в следующих актиноритмических циклах: непрерывное освещение, 22 часа света и 2 часа темноты, 20 часов света и 4 часа темноты, 19 часов света и 5 часов темноты, 18 часов света и 6 часов темноты, 17 часов света и 7 часов темноты, 16 часов света и 8 часов темноты, 15 часов света и 9 часов темноты, 14 часов света и 10 часов темноты.

Зацветала она одновременно при длине дня от 24 (непрерывное освещение) до 19 часов. Следовательно, в отличие от ветвистой пшеницы даже 5 часов суточной темноты при 24-часовом цикле практически не задержи-

вают ее репродуктивного развития. На 18-часовом дне цветение и плодоношение несколько задерживались, а на 17-часовом дне цвели уже не все растения. Тем самым обнаруживается, что данный образец Абиссинской капусты составляет биологически неоднородную популяцию. Зато при длине дня в 16 часов и короче все растения Абиссинской капусты оставались вегетативными.

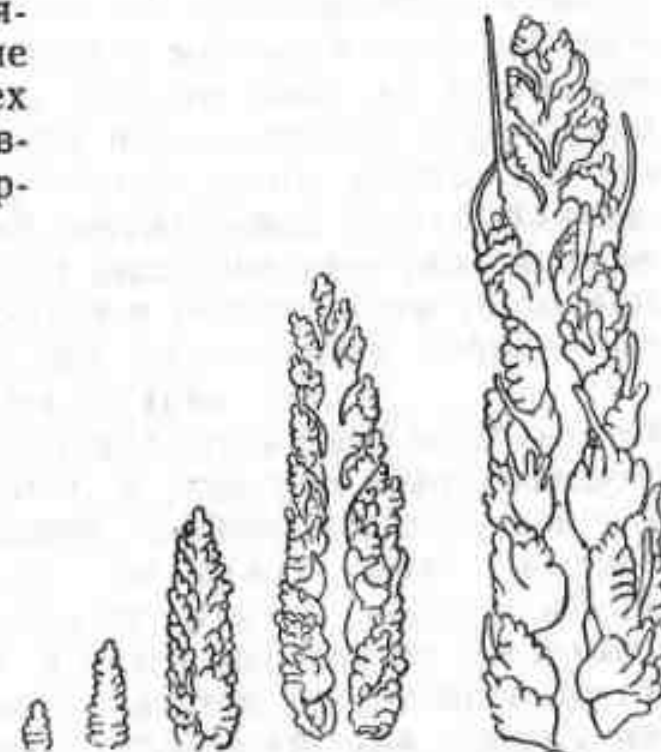
Очевидно, что Абиссинскую капусту в отличие от ветвистой пшеницы нет смысла выращивать на непрерывном освещении, ибо такой же или почти такой же хозяйственный эффект дает и 20-часовой день.

Еще интереснее и практически важнее установление оптимальных суточных чередований света и темноты для никтофильных (короткодневных) видов растений. Типичным представителем этой группы растений может служить декоративное южное растение колонхоэ, являющееся объектом многочисленных актиноритмических исследований последнего времени. Этот представитель растительного мира интересен тем, что хорошо размножается вегетативным путем — черенкованием листьев.

В нашем опыте растения колонхоэ, являющиеся фактически одной вегетативно размноженной особью, выращивались в осветительной установке, состоящей из ламп накаливания и водяного экрана, при длине дня, начиная от четырех часов и кончая непрерывным освещением с интервалами в 1 час.

Рис. 32. Точки роста ветвистой пшеницы в возрасте 22 дней, выращенной при электрическом освещении.

Слева направо: 16, 18, 20, 22 и 24-часовое освещение.



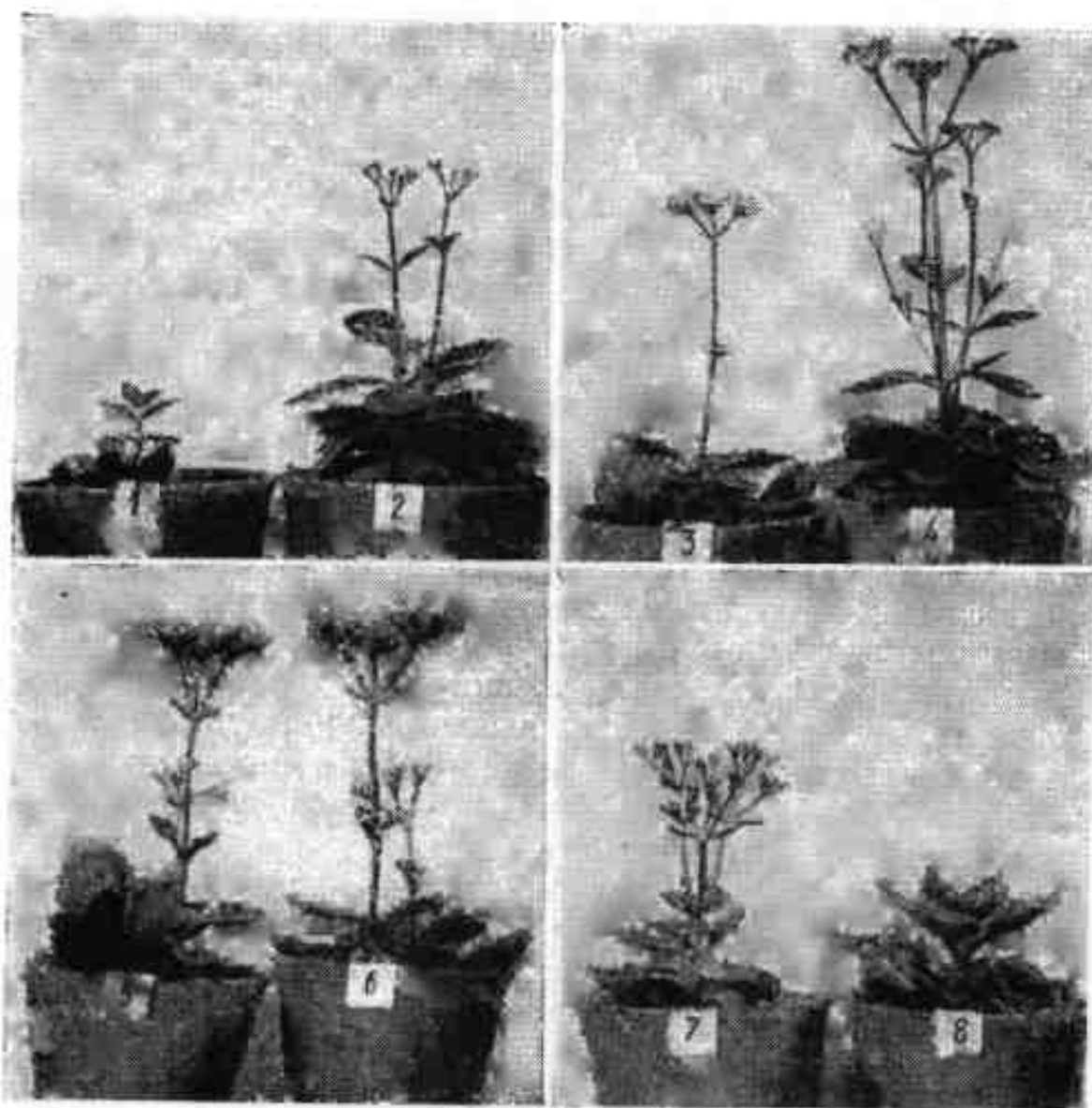


Рис. 33. Колонхоэ выращено в осветительной установке, состоящей из ламп накаливания и водяного фильтра, при различной длине дня.
1 — 4 часа, 2 — 5 часов, 3 — 6 часов, 4 — 7 часов, 5 — 8 часов, 6 — 9 часов,
7 — 11 часов, 8 — 12 часов.

На 4-часовом дне растения плохо росли и не цвели, но уже 5 часов света при последующих 19 часах темноты было достаточно для хорошего роста и цветения колонхоэ (рис. 33).

Далее, на 6, 7, 8, 9, 10 и 11-часовых днях растения колонхоэ цвели почти одновременно и неизменно оставались вегетативными на 12-часовом дне и во всех других вариантах с еще более длинными днями. Цветение растений колонхоэ на 11-часовом дне и нецветение ее на 12-часовом дне, где подавляющее число типичных

никтофильных видов цветет, является чрезвычайно интересным и важным для практики фактом. Возможно, что колонхоэ представляет собой такую группу никтофильных видов растений, которые могут цвести только в таких актиноритмических режимах, где на световую часть приходится менее половины суточного 24-часового цикла. Естественно, что, выращивая подобные виды на электрическом освещении, следует пользоваться предельно короткими днями, например для колонхоэ 7-часовым днем, что очень снизит стоимость их культуры в связи с малым суточным расходом электроэнергии. Ведь развитие вегетативной массы и количество цветков у колонхоэ в пределах, оптимальных для цветения актиноритмов, почти не зависит от длины дня.

Однако подобное явление, очень интересное для практической культуры колонхоэ и подобных ей видов в условиях электрического освещения, встречается далеко не у всех короткодневных видов. Напротив, среди них есть много таких, у которых цветение скорее всего начинается также на достаточно коротких днях, но при этом подавляется процесс образования растительной массы и растения остаются карликовыми. Характерным представителем таких видов растений может быть уральская шандра гребенчатая из семейства губоцветных. При выращивании ее на электрическом освещении, начиная с непрерывного и кончая 8-часовым днем, этот вид начинает цвести раньше всего на 8—10-часовом дне, имея всего по две пары листьев. Естественно, что такие растения дают очень малое количество как семян, так и вообще всей растительной массы. Начиная с длины дня в 16 часов и выше шандра уже не переходит к цветению и остается в вегетативном состоянии. Зато в этих условиях она накапливает значительно большую вегетативную массу (рис. 34).

Выращивая виды растений, подобные гребенчатой шандре (*Elsholtzia patrinii*), в условиях электрического освещения даже ради семян, следует пользоваться или 14-часовым днем, или же, что может быть выгоднее, сперва некоторое время выдержать на длинном, например на 20-часовом, дне, а затем переводить на 8-часовой день. Тогда, возможно, удастся осуществить достаточно быстрое получение хорошего урожая семян с не-

большими затратами электроэнергии. Приведенные примеры говорят о необходимости выяснения актиноритмической реакции растений при помощи электрического освещения для получения наилучших результатов культуры растений в искусственных условиях, особенно если они выращиваются ради цветов и семян.

Но продолжительность ежесуточного освещения сказывается не только на процессах репродуктивного развития. Она, кроме того, определяет и иные стороны физиологического состояния растений и в результате продуктивность синтеза органического вещества. Нет и не может быть ни одного растительного вида, который оказался бы в этом отношении нейтральным к продолжительности периода ежесуточного освещения.

Томатные растения, например, способны зацветать при самых разнообразных продолжительностях дня. Встречающиеся в литературе указания на их «короткодневность» просто неверны. Объясняются они тем, что некоторые сорта томатов в условиях коротких дней лучше растут. Вообще же, скорее всего бутоны у большинства сортов появляются на непрерывном освещении, но это опережение часто не превышает нескольких дней (2—3). Поэтому по переходу от роста к плодоношению томаты, по общепринятой актиноритмической классификации, должны относиться к «нейтральным» растениям. И вот для этого «нейтрального» вида продолжительность ежесуточного освещения имеет в действительности самое решающее значение. Как показали многочисленные опыты, продуктивность томатных растений находится в самой тесной зависимости от продолжительности ежесуточного освещения.

Все авторы, изучавшие действие электрического освещения на томатные растения, отмечали, что они хуже всего растут на непрерывном освещении. Действительно, в этих условиях у всех сортов, у одних в большей степени, а у других в меньшей, отмечается плохое развитие листовых пластинок, бледная окраска, появление пятен, а затем и отмирание их. При этом некоторые сорта, благодаря указанным явлениям, на непрерывном освещении совсем не доходят до урожая плодов. Например, Грибовский скороспелый при мощности лучистого потока ламп накаливания 200 вт/м^2 в установке с водяным фильтром обнаружил резко от-

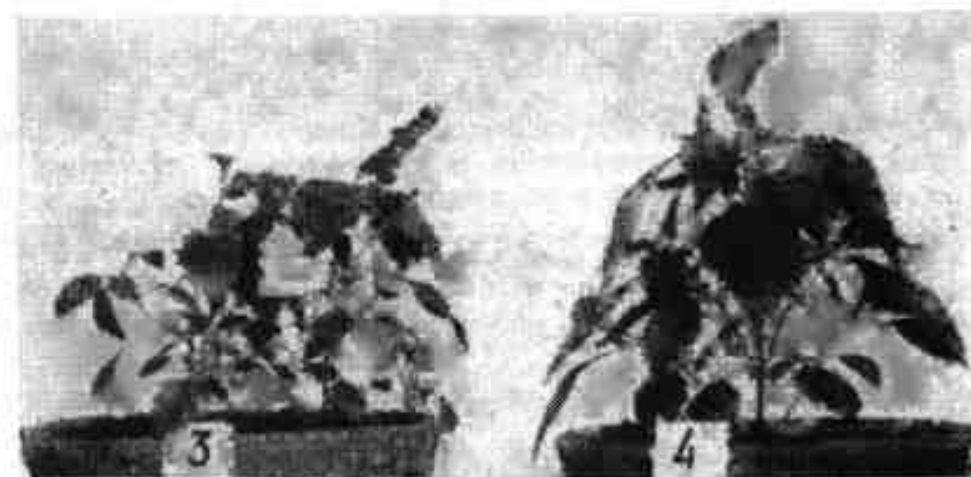
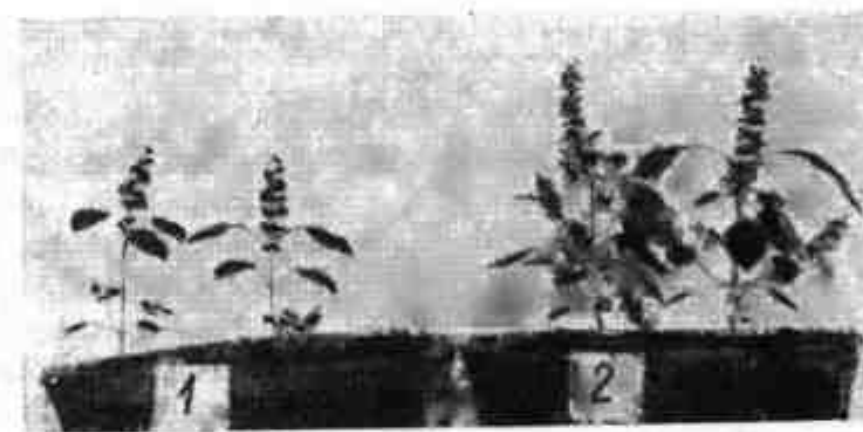


Рис. 34. Шандра гребенчатая, выращенная на искусственном освещении при длине светового периода суток. 1 — 10 часов, 2 — 12 часов, 3 — 14 часов, 4 — 16 часов, 5 — 20 часов, 6 — непрерывное освещение.

рицательное отношение к непрерывной радиации. Так, если принять сухую растительную массу его на непрерывном освещении за 100%, то в других вариантах ежесуточного освещения она выразится следующими величинами: при 20 часах — 240%, при 12 часах — 222%, при 10 часах — 194%.

Близкий к только что описанному характер использования лучистого потока в зависимости от продолжительности ежесуточного освещения обнаружили и сеянцы лимона. Они также в подавляющем большинстве хуже накапливали растительную массу на непрерывном освещении по сравнению с условиями, где в суточные ритмы включалась темнота даже в количестве 12 часов в сутки (рис. 35).

Наименьшая вегетативная масса наблюдалась у растений, получавших непрерывное освещение. На 18-часовом дне характер роста лимонов был близок к непрерывному освещению, но вегетативная масса значительно большей. При 12-часовом ежесуточном освещении прирост сеянцев был наибольшим, а форма роста несколько иной, чем в двух других вариантах опыта. Но такой характер зависимости между длиной дня и величиной приростов не остается постоянным. Стоит только уменьшить мощность лучистого потока и соотношения оказываются другими. Так, при использовании света мелких ламп накаливания наибольший



Рис. 35. Лимоны, выращенные из черенков одного сеянца на искусственном освещении.

1 — 24-часовой день, 2 — 18-часовой, 3 — 12-часовой день.

прирост дали растения лимона, получавшие 18-часовой день.

Примеры с сеянцами лимона и с рассадой томатных растений показывают значение периода ежесуточного освещения для накопления ими растительной массы.

Выяснение актиноритмической реакции «нейтральных» растительных видов также имеет большое практическое значение. Познакомиться с ней ближе можно на примере садовой земляники. Последняя (сорт Мысовка — осенние усы) на свету ламп накаливания в осветительной установке с водяным фильтром и мощностью лучистого потока 120—150 Вт/м² дала почти одинаковые результаты при самых разнообразных продолжительностях периода ежесуточного освещения (табл. 19).

Таблица 19

Влияние ежесуточной продолжительности освещения на скорость образования и количество (весовое) ягод у земляники сорта Мысовка при посадке осенних усов

Период ежесуточного освещения (часов)	Число дней от начала опыта до			Урожай ягод с одного растения (г)
	бутонизации	цветения	созревания ягод	
24	13	20	40	33
20	14	21	42	25
18	14	19	42	27
16	12	19	42	23
14	14	21	42	43
12	22	29	51	31

Если в пределах ежесуточного освещения от непрерывного до 14-часового и сроки созревания ягод и величина их урожая остаются одинаковыми, ясно, что для целей выращивания земляники надо пользоваться самым коротким, в данном случае 14-часовым, днем, что приводит к значительному сокращению количества электроэнергии, затрачиваемой на единицу растительной продукции.

Каким бы ни был характер актиноритмической реакции растений, знание его и правильное использование при культуре растений в условиях искусственного освещения совершенно обязательно. Этот фактор представляет

наибольшее значение для онтогенеза и продуктивности растений и без его учета невозможно подобрать оптимальные световые условия для выращивания любой культуры.

ЗНАЧЕНИЕ МОЩНОСТИ СВЕТОВОГО ПОТОКА ДЛЯ КУЛЬТУРЫ РАСТЕНИЙ

По отношению к мощности лучистого потока или, что то же, к интенсивности освещения растения делятся на светолюбивые и теневыносливые. Первые плохо или совсем не растут при слабом освещении и не боятся сильного света, а вторые могут расти при меньших мощностях лучистого потока и иногда страдают от избыточного освещения.

Во всяком случае у всех видов фотосинтезирующих растений от мощности лучистого потока зависит их продуктивность, начиная с накопления сухой растительной массы и кончая урожаем плодов и семян. Именно из-за недостатка света многие растительные виды не могут расти в лесах, в густых травостоях и, наконец, зимой в теплицах, находящихся в северных широтах. Очень может быть, что светолюбивые растения отличаются от теневыносливых меньшей чувствительностью к световым раздражениям.

Относительной оценке светолюбия растений уделялось немало внимания. В начале нашего века Визнер (J. Wiesner) определял относительный минимум света, при котором еще могло жить то или иное растение. Для этого измерялась интенсивность света в наиболее затененных местообитаниях изучаемого вида в полуденные часы и сравнивалась с интенсивностью освещения на открытом месте. Получавшееся при этом дробное число указывало, какой частью солнечного света может довольствоваться изучаемый вид. Данные Визнера и его последователей значительно обесцениваются тем, что они пользовались для определения интенсивности радиации фотографическим методом, т. е. о силе света судили по скорости почернения фотографической бумаги.

В 1937 г., занимаясь выяснением световых потребностей хинного дерева в условиях естественного освещения черноморского побережья (Сухуми), мы использовали для этих целей очень простой и, пожалуй, наиболее отвечающий задаче прием. Последний заключался в создании различных мощностей естественного лучистого потока при помощи марлевых притенков. Над делянками с растениями одного клона хинного дерева в полевых условиях натягивали различное число слоев марли, полностью закрывающих доступ непосредственному солнечному освещению. В различных вариантах одного опыта испытывали затеняющее действие одного, двух, трех, четырех и пяти слоев марли.

Если принять мощность лучистого потока в полдень под одним слоем марли за 100%, а световые условия остальных вариантов затенения выразить в процентах к нему, получится такой ряд цифр: 100, 70, 51, 33 и 22. Они характеризуют в относительных величинах зависимость интенсивности освещения растений от степени их затенения марлей.

Чем меньше была мощность лучистого потока, тем лучше она использовалась хинным деревом в процессе образования сухой растительной массы. Очевидно, подобные показатели и должны быть основными при решении вопроса об относительном светолюбии растительных видов.

Такое экспериментальное определение светолюбия растений мы считали в то время, а для естественного освещения и сейчас, вполне надежным. Крупным недостатком этого метода является длительность периода, необходимого для проведения оценки отношения растения к мощности лучистого потока. Кратковременные опыты в этом случае непригодны, так как они мало усредняют погодные и другие условия, весьма непостоянные в природной обстановке.

В условиях искусственного освещения оценка светолюбия растений может быть значительно сокращена, так как при этом лучистый поток не изменяется, а фон выращивания растений устанавливается по желанию экспериментатора.

Кроме того, в лабораторных условиях можно регулировать по желанию не только количество, но и качество лучистой энергии.

Что касается термина «светолюбие», а также и противоположного ему «теневыносливость», то оба они, как кажется автору, достаточно неудачны и нуждаются в замене одним общим. Ведь по существу в обоих случаях речь идет об отношении растений к свету, которое может быть экспериментально определено для каждого растительного вида и выражено в определенных относительных или абсолютных величинах.

Исходя из этого положения, в наших работах принята следующая методика первой оценки отношения растений к мощности лучистого потока. Источником постоянной радиации являются лампы накаливания в 500, 300 и 200 *вт*. Лучистый поток ламп накаливания (без водяного фильтра) экранировался калькой для его равномерного распределения по площади. Определенные мощности лучистых потоков (*вт/м²*) устанавливались у вершин опытных растений при помощи пиранометра путем регулирования высоты подвеса ламп.

Опытные растения выращивались или в сосудах с песком, или в водных культурах на растворах Прянишникова или Гельригеля. Каждый опыт протекал от 15 до 25 суток. Объектами исследования были томаты, огурцы, сеянцы лука, земляника садовая и Абиссинская капуста. С каждым из этих видов опыты неоднократно повторялись, а результаты по своему общему характеру оставались неизменными.

В первой серии опытов наибольшая мощность лучистого потока ламп накаливания устанавливалась примерно в 500—560 *вт/м²*, т. е. она приравнивалась к половине мощности естественной солнечной радиации, наблюдаемой при безоблачном небе около полудня.

Затем, после того как оказалось, что для некоторых растений наилучшей была самая высокая интенсивность освещения, во второй серии опытов максимальная мощность была увеличена до 800—900 *вт/м²*. В этом случае потребовались специальные меры предохранения молодых растений, особенно в состоянии проростков, от ожогов корневой шейки, которая в случае контакта с сильно нагретыми поверхностями оказывалась поврежденной.

После окончания опытов растения высушивали и взвешивали. Количество сухого растительного вещества, варьиовавшего в зависимости от мощности лу-

чистого потока, служило основным показателем потребностей растительных видов в мощностях излучений и характеризовало использование последних.

Объектом одного из первых опытов была рассада огурцов сорта Неросимый 40. Растения, начиная с появления всходов, в течение 17 суток выращивали при шести различных мощностях, начиная от 500 и кончая 50 *вт/м²* в песчаной культуре на растворе Прянишникова. В конце опыта был определен вес каждого растения (табл. 20). В лучших условиях освещения сухой вес растений достиг 35 г, что за 17 суток является неплохим результатом, показывающим высокую продуктивность огурцов в условиях электрического освещения. За время опыта на всех растениях появились цветы, но почти все они были мужскими.

Таблица 20

Характер использования молодыми растениями огурцов (сорт Неросимый 40) интегрального лучистого потока ламп накаливания в зависимости от его мощности

Мощность лучистого потока		Средний сухой вес одного растения	
<i>вт/м²</i>	процент	г	процент
500	100	4,37	100
400	80	3,38	77
300	60	2,56	59
200	40	1,58	36
100	20	0,53	12
50	10	0,11	2

В пределах четырех первых вариантов снижение мощности лучистого потока приводило почти к такому же уменьшению сухого веса растений.

В другом опыте с огурцами сорта Клинский местный, продолжавшемся 30 суток, источником освещения были зеркальные лампы накаливания, горевшие по 12 часов в сутки над водяным экраном. Мощность лучистого потока регулировалась высотой подвеса ламп над водяным фильтром. Схема и результаты этого опыта представлены в табл. 21.

Чем большей была мощность лучистого потока, тем интенсивнее шло накопление растительной массы и скорее завязывались плоды. Особенно большое различие



Рис 36. Растения огурцов сорта Клинский местный в 30-дневном возрасте.

1 — выращенное в лучистом потоке лампы накаливания мощностью 300 вт/м^2 ,
2 — то же 600 вт/м^2 .

в завязывании плодов наблюдалось у растений, получивших 300 и 600 вт/м^2 (рис. 36).

Результаты приведенных опытов с огуречными растениями свидетельствуют, во-первых, об их относительном светолюбии (чем выше мощность лучистого потока, тем больше растительная масса) и, во-вторых, об одинаковом характере использования лучистых потоков как в случае исключения водяным фильтром дальней инфракрасной радиации, так и в ее присутствии под нейтральным фильтром из бумаги (калька).

Еще большее светолюбие обнаружила представительница семейства крестоцветных Абиссинская капуста. Этот дикорастущий абиссинский вид оказался самым светолюбивым из всех испытанных культур. Абиссинская капуста выращивалась при шести мощностях лучистого потока лампы накаливания без водяного фильтра в сосудах с песком на питательном растворе Прянишникова (табл. 22).

При ослаблении максимальной мощности лучистого потока на 20% прирост сухой растительной массы

Абиссинской капусты снизился почти на 50% и продолжал сокращаться по мере ослабления излучения.

Освещение во всех вариантах описанного опыта было непрерывным, что привело Абиссинскую капусту к очень быстрому бутоннообразованию в условиях достаточно мощных лучистых потоков.

Высокое «светолюбие» Абиссинской капусты вполне согласуется с условиями ее естественного местообитания на открытых местах в предгорных и горных районах Эфиопии, а также и с общими представлениями об отношении к свету большинства представителей семейства крестоцветных.

Таблица 21

Состояние растений огурцов сорта Клинский местный в возрасте 30 суток на 12-часовом дне в зависимости от мощности лучистого потока (лампы накаливания с водяным фильтром)

Мощность лучистого потока (вт/м^2)	Сырой вес среднего растения (г)		Число дней от начала опыта до завязывания плодов
	вегетативной массы	плодов или завязей	
100	113	0	—
300	189	20	27
600	249	113	22
900	284	115	20

Таблица 22

Характер использования Абиссинской капустой интегрального лучистого потока лампы накаливания в зависимости от его мощности (продолжительность опыта 15 суток)

Мощность лучистого потока		Сухой вес одного растения		На какой день появились бутоны
вт/м^2	процент	г	процент	
500	100	1,35	100	15
400	80	0,73	54	15
300	60	0,44	33	15
200	40	0,14	10	25
100	20	0,06	4	40
50	10	0,02	2	Бутонов нет

Полную противоположность Абиссинской капусте в наших опытах обнаружил лук, оказавшийся мало «светолюбивым» видом.

Опыт с луком был проведен на сеянцах сорта Бессоновский местный, которые выращивались в условиях шести вариантов интегральной мощности лучистых потоков ламп накаливания в сосудах с почвой.

Таблица 23

Характеристика использования сеянцами лука (сорт Бессоновский местный) интегрального лучистого потока ламп накаливания в зависимости от мощности

Мощность лучистого потока		Сухой вес одного растения	
вт/м ²	процент	мг	процент
800	100	17	100
600	75	32	190
400	50	51	300
300	25	31	180
100	12	16	90
50	6	14	82

За 45 дней опыта наибольшего веса достигли растения, получавшие лучистый поток мощностью 400 вт/м² (табл. 23). Как с понижением, так и с повышением указанной мощности лучистого потока накопление сухого вещества резко снижалось. Средний вес лука в крайних по мощности вариантах был достаточно близким. Луковицы образовались всюду, так как освещение было непрерывным, но самые крупные и плотные наблюдались у сеянцев, находившихся в условиях лучистого потока мощностью 400 вт/м². Эти же растения имели наибольшее число листьев (пять). В условиях лучистого потока мощностью 800 вт/м² сеянцы лука дали только по одному листу, не имевшему внутренней полости, что, однако, не помешало образованию мелких луковиц (рис. 37).

Аналогичный характер использования света в зависимости от мощности лучистого потока наблюдался и у садовой земляники. С этой культурой, как с разными сортами (клонами), так и с сеянцами, было проведено много опытов, давших сходные результаты. Примером их может служить опыт с сортом Мысовка. Последняя

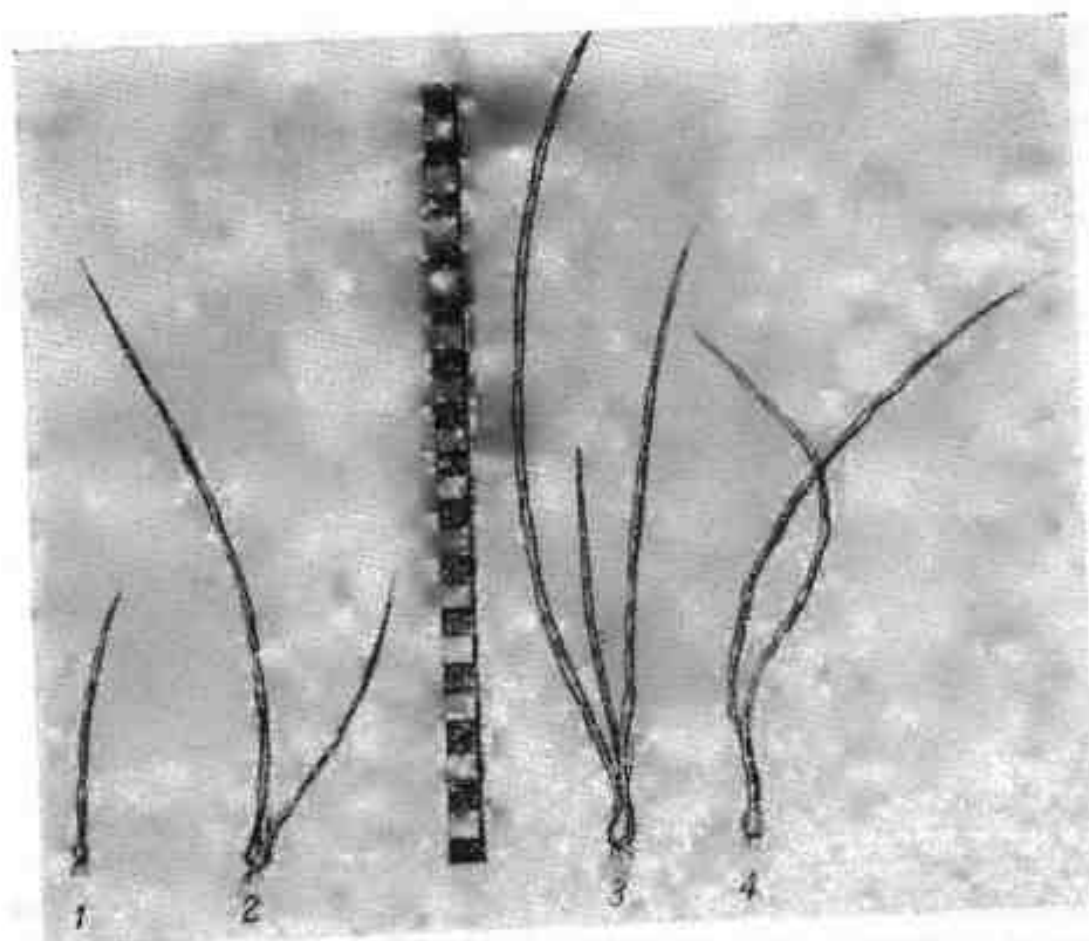


Рис. 37. Сеянцы лука (сорт Бессоновский).

1 — выращенный в лучистом потоке ламп накаливания мощностью 800 вт/м², 2 — то же 600, 3 — то же 400, 4 — то же 200 вт/м².

в виде неукоренившихся усов была подобрана по весу. Выращивалась она на питательных растворах Гельригеля в фарфоровых сосудах емкостью 250 см³ в течение 50 суток при различных мощностях интегральных лучистых потоков ламп накаливания. За этот период во всех вариантах опыта земляника успела дать зрелые ягоды, после чего опыт был прекращен. Освещение во всех случаях было непрерывным. Все остальные условия культуры одинаковы во всех вариантах. Результаты опыта (табл. 24) показали, что сухая растительная масса и урожай ягод с понижением мощности лучистого потока вначале оставались примерно на одном уровне, но при двух наименьших мощностях снизились почти в два раза.

Большое значение для наших работ представляла оценка светолюбия томатных растений. Серия опытов была проведена с растениями сорта Пушкинский 1853.

Таблица 24

Характер использования растениями земляники (сорт Мысовка) интегрального лучистого потока лампы накаливания в зависимости от мощности

Мощность лучистого потока		Сухой вес одного растения		Средний урожай с одного растения (г)
вт/м ²	процент	г	процент	
800	100	4,76	100	14
600	75	4,76	100	14
400	50	5,09	106	14
200	25	3,13	66	5
100	12	2,73	56	4

В одном из опытов сеянцы томата выращивались после всходов в течение 20 суток в условиях 18-часового облучения интегральным лучистым потоком ламп накаливания мощностью 800, 600, 400 и 200 вт/м². Растения находились по одному в фаянсовых сосудах емкостью 250 см³ на растворе Гельригеля. Наибольшая сухая масса среднего растения наблюдалась в условиях максимального излучения. С уменьшением мощности излучения постепенно падал и сухой вес растений (табл. 25).

Таблица 25

Характер использования растениями томатов (сорт Пушкинский 1853) интегрального лучистого потока ламп накаливания в зависимости от мощности

Мощность лучистого потока		Сухой вес одного растения	
вт/м ²	процент	г	процент
800	100	1,065	100
600	75	0,987	92
400	50	0,780	73
200	25	0,505	47

Интересен факт уменьшения прироста растительной массы в два раза при сокращении мощности излучения в четыре раза.

Несколько иной результат наблюдался у растений томатов сорта Эрлиана 20. В условиях точно такого же опыта по интенсивности и продолжительности облуче-

ния, продолжавшегося 14 дней, растения, находившиеся в сосудах с почвой, наибольший прирост растительной массы дали при мощности лучистого потока в 400 вт/м² (табл. 26).

Таблица 26

Характер использования растениями томатов (сорт Эрлиана 20) интегрального лучистого потока ламп накаливания в зависимости от его мощности

Мощность лучистого потока		Сухой вес одного растения	
вт/м ²	процент	г	процент
800	100	310	100
600	75	310	100
400	50	570	183
200	25	260	84

Если вообще говорить о томатах, вне зависимости от сорта, то на основании результатов ряда опытов можно сделать вывод об их широкой приспособляемости к мощности лучистых потоков. Они хорошо используют и такие высокие мощности, как 800—600 вт/м², и в то же время, по крайней мере некоторые сорта, мирятся и с очень незначительными мощностями излучений, которые используют даже лучше, чем более мощные.

Последняя особенность сохраняется ими и в том случае, если спектральный состав лучистого потока ламп накаливания изменяется за счет устранения значительного количества инфракрасной радиации. Так, при культуре растений сорта Пушкинский 1853 в условиях осветительных установок с водяными фильтрами при трех различных мощностях потока, относящихся друг к другу как 100:63:33, средний сухой вес растений соответственно равнялся 100, 80 и 60%. Следовательно, в данном случае закономерность использования томатными растениями сорта Пушкинский 1853 лучистого потока осталась по характеру одинаковой как при наличии всей инфракрасной радиации ламп накаливания, так и в том случае, когда часть ее поглощается водой.

Влияние мощности лучистого потока на форму роста молодых 16-дневных растений томатов можно



Рис. 38. Рассада томатов в возрасте 16 дней.

1 — выращенная на электрическом освещении при мощности лучистого потока 100 вт/м^2 , 2 — то же 200, 3 — то же 400 вт/м^2 .

видеть на рис. 38, на котором представлены средние растения, выросшие в осветительных установках с мощностью излучения в 100, 200 и 400 вт/м^2 . Чем выше мощность лучистого потока, тем ниже растения и тем крупнее на них бутоны.

Таким образом намечаются две группы растений, различные по своему отношению к мощности лучистого потока. У одной вслед за ее уменьшением понижаются приросты растительной массы, а у второй, наоборот, при снижении мощности лучистого потока до некоторого предела прирост массы возрастает. Очевидно, растения первой группы могут считаться более светолюбивыми, чем растения второй группы.

Обращает на себя внимание факт очень хорошего накопления растительной массы почти у всех видов испытанных растений при мощности лучистого потока, близкой, примерно, к $1/2$ или $1/4$ прямого солнечного излучения, падающего на перпендикулярную к лучам поверхность в полуденные часы.

Именно в этих условиях все виды растений имеют наиболее компактную форму роста, нормально развитые листья и хорошую продуктивность. Особенно сильно мощность лучистого потока сказывается на вытягивании осевых органов растений и на размерах листьев.

Чем хуже световые условия, тем ближе растения к этиолированному состоянию. На рис. 39 изображены шестидневные растения редиса (сорт Розовый с белым кончиком), выращенные в темноте и в лучистом потоке ламп накаливания с водяным экраном различной мощности: 25, 50, 100, 200 и 400 вт/м^2 . В темноте наблюдается полная этиоляция растений. Они имеют предельно вытянутый гипокотиль и почти неразвитые семядоли. По мере возрастания мощности лучистого потока, в котором выращиваются остальные растения, признаки этиоляции пропадают и растения приобретают нормальный вид. Вполне нормальными можно считать растения редиса, получавшие лучистый поток мощностью 200 и 400 вт/м^2 .

Конечной задачей светофизиологических исследований является нахождение такого комплекса внешних условий, который обеспечивает наилучшее использование лучистого потока при сравнительно невысоких его мощностях.

Это важно для практических целей и не может не иметь высокого познавательного значения. Во всяком случае, потребность растительных видов в определенных

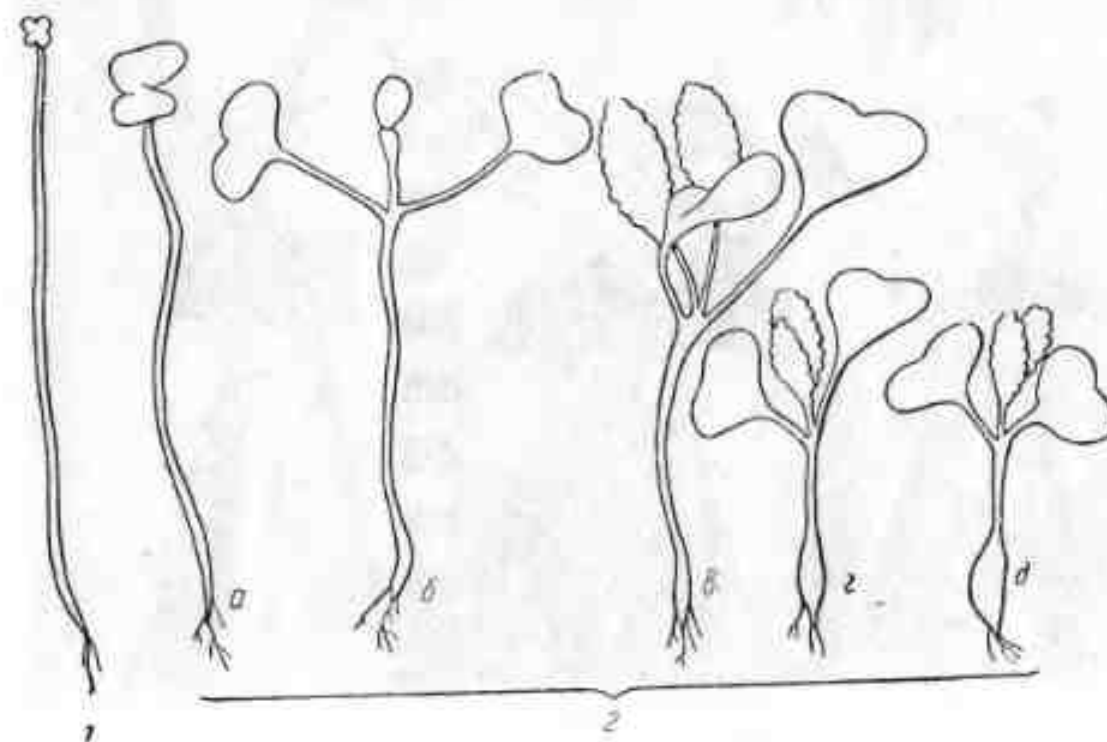


Рис. 39. Проростки редиса в 6-дневном возрасте.

1 — выращенные в темноте, 2 — выращенные в лучистом потоке ламп накаливания мощностью: а — 25 вт/м^2 , б — 50, в — 100, г — 200, д — 400 вт/м^2 .

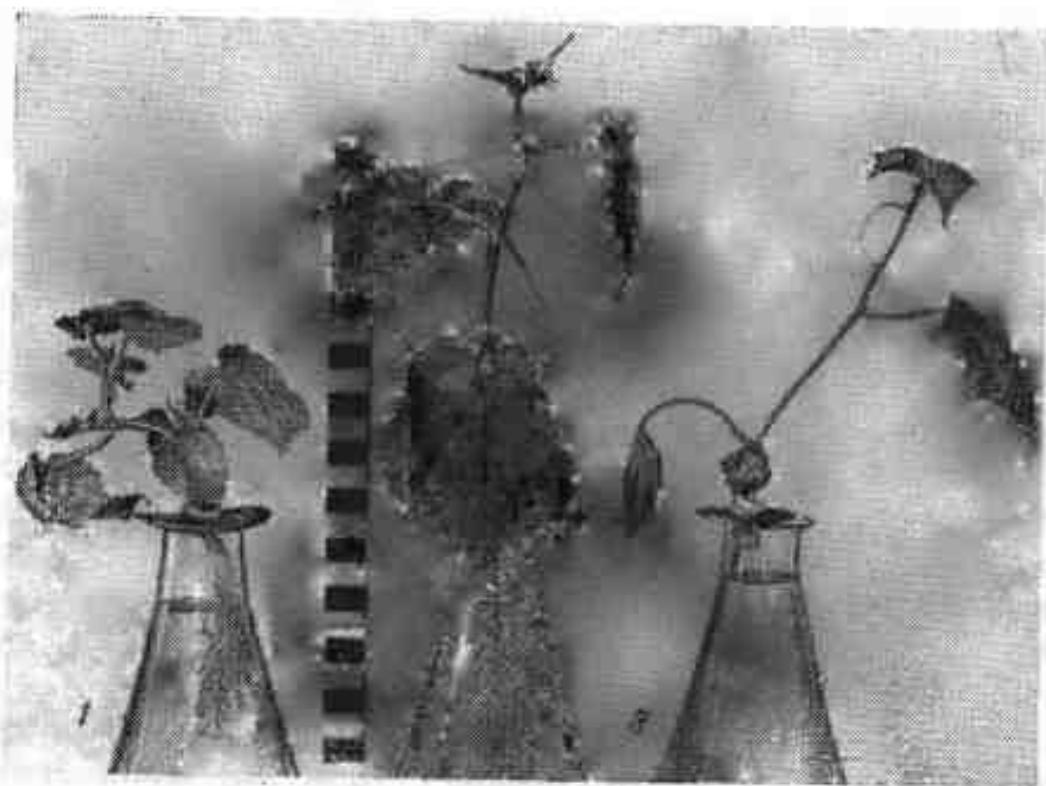


Рис. 40. Растения огурцов сорта Клинский местный в возрасте 20 дней, выращенные на электрическом освещении.

1 — мощностью 700 вт/м^2 , 2 — при чередовании через один час сильного и слабого света, 3 — мощностью 100 вт/м^2 .

количествах лучистой энергии, в конкретных условиях их выращивания, всегда в значительной мере определяющая успех культуры, неодинакова не только у различных видов, но даже и у сортов. Знать ее и уметь управлять ею в нужном для практики направлении совершенно необходимо.

В самом деле, зачем выращивать лук при высоких мощностях лучистого потока, если он лучше растет при более низких. Или почему не найти таких условий, в которых земляника, имеющая высокие коэффициенты использования света при его малой интенсивности, будет давать хорошие урожаи под воздействием незначительных по мощности лучистых потоков. Вообще, нахождение причин, мешающих растениям в условиях невысоких мощностей лучистых потоков проявлять высокую продуктивность, заслуживает исключительного внимания.

Вместе с тем, очевидно, существуют и такие растительные виды, для высокой продуктивности которых выгодно повышать мощность лучистых потоков. Нако-

нец, ведь ясно, что для полного знакомства с энергетическим процессом связывания растением различных излучений нельзя обойтись без выяснения количественных показателей.

Особого внимания заслуживает вопрос о выращивании растений при переменных мощностях излучений. В естественных условиях интенсивность излучения может меняться вслед за изменением состояния атмосферы (различная облачность и т. д.), но эти изменения всегда случайны и не поддаются регулированию. Другое дело при использовании искусственного освещения. В этом случае вполне возможно произвольно изменять мощность облучения растений в течение любых периодов времени.

Любопытные данные были получены в проведенном нами совместно с А. М. Ковальчук опыте, где в течение

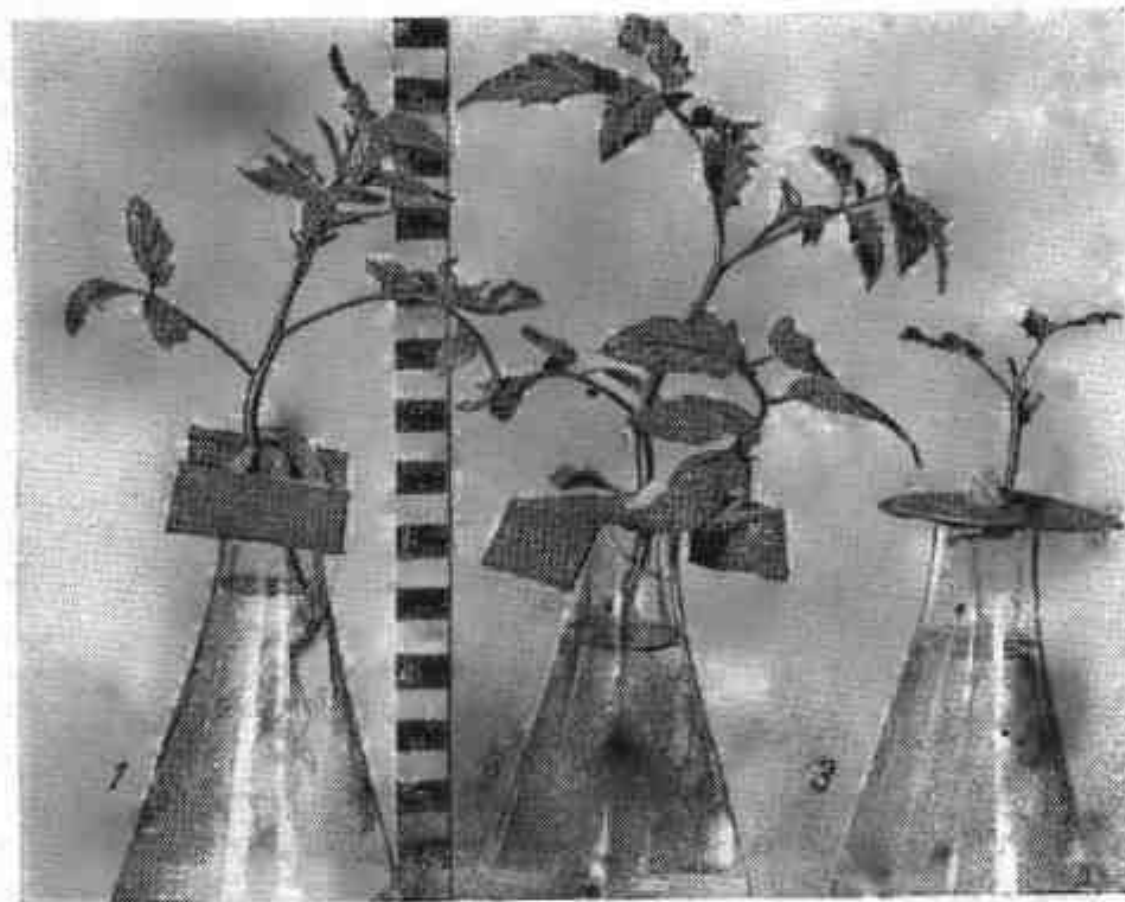


Рис. 41. Томаты в 15-дневном возрасте, выращенные на искусственном освещении.

1 — сильный свет, 2 — чередование через один час сильного и слабого света, 3 — слабый свет.

18-часового дня через час чередовались относительно сильный свет с относительно слабым.

Этот опыт, проведенный с молодыми растениями огурцов сорта Клинский местный, заключался в следующем: в одном варианте в течение всего времени проростки огурцов выращивались при мощности лучистого потока 700 вт/м^2 , во втором при 100 вт/м^2 , а в третьем — проростки огурцов получали в течение часа лучистый поток в 700 вт/м^2 , а следующий час — лучистый поток в 100 вт/м^2 . Источником освещения в случае сильного света служили 200-ваттные лампы накаливания, а в случае слабого света также лампы накаливания, но малые автомобильные (21 вт, 6 в). В обоих случаях водяной экран не применялся, и растения находились под воздействием интегрального потока ламп накаливания. Растения выращивались в пробирках на питательном растворе Гельригеля. В результате опыта к 20-дневному возрасту самыми лучшими растениями оказались те, которые получили переменную мощность лучистого потока: 1 час сильный свет и 1 час слабый (рис. 40).

То же мы наблюдали и в аналогичном опыте с томатными растениями (рис. 41). И в этом случае чередование различных по мощности лучистых потоков ламп накаливания дало положительные результаты.

Эти предварительные данные свидетельствуют о том, что в чередовании резко отличных мощностей лучистого потока при культуре растений в условиях искусственного освещения таится, возможно, значительный резерв экономии электрической энергии. К сожалению, такой способ освещения растений еще мало изучен и не вышел на широкую практическую дорогу.

ЗНАЧЕНИЕ СВЕТОВЫХ СУТОЧНЫХ ДОЗ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ

Интенсивность и продолжительность освещения имеют чрезвычайно большое значение для жизнедеятельности растений. Они характеризуют общее количество лучистой энергии, получае-

мой растениями за определенный период. Интенсивность, или, точнее, мощность, лучистого потока характеризует количество лучистой энергии, получаемой растением в единицу времени. Продолжительность освещения как в пределах суток, так и за любой более длительный период времени дает представление о длительности светового воздействия. Понятно, что общее количество лучистой энергии, получаемой растением за любой отрезок времени (световая доза), характеризуется двумя этими факторами, т. е. мощностью лучистого потока в единицу времени, помноженную на время воздействия.

Отсюда ясна необходимость знания реакции растений как на каждый из этих факторов, так и на их определенные сочетания.

Выяснение характера реагирования растений на продолжительность ежесуточного освещения в зависимости от мощности лучистого потока представляет самостоятельный интерес. Особенно большое значение эта проблема приобретает при выращивании растений полностью на электрическом освещении. В этом случае она является практически важной, ибо мощность лучистой энергии и продолжительность периода ежесуточного освещения определяют собой количество затрачиваемой электрической энергии. Понятно, что чем меньшая мощность лучистого потока пригодна для культуры данного вида растения, тем выгоднее это для практики; точно так же ясно, что сокращение продолжительности периода ежесуточного освещения до предела, без вреда для выращиваемого вида, также является весьма желательным по экономическим соображениям. А так как оба эти фактора действуют всегда сопряженно, возникает необходимость выяснения, в каком сочетании они наиболее благоприятны для любого конкретного вида.

Томаты в подавляющем большинстве своих сортов относятся к нейтральным в актиноритмическом отношении видам, т. е. они переходят от роста к бутонобразованию почти одновременно как на длинном, так и на коротком дне. Однако, как это будет показано ниже, это не мешает им неодинаково накапливать сухую растительную массу и, что еще важнее, по-разному использовать лучистую, а следовательно, и электрическую

энергию, затрачиваемую на их выращивание в зависимости от продолжительности периода ежесуточного освещения. Что касается мощности лучистого потока, она для всех растений имеет первостепенное значение. Вопрос же о том, какой должна быть зависимость между мощностью лучистого потока и ежесуточной продолжительностью его воздействия на растения, остается еще нерешенным. Очевидно, что в условиях естественного солнечного освещения решение его вообще невозможно. Зато при работе с искусственным освещением оно не только возможно, но и совершенно необходимо.

В описываемом опыте для получения двух, кратных по мощности, лучистых потоков были использованы осветительные установки с полезной площадью 0,25 м², освещаемой в одном случае девятью 100-ваттными лампами, а в другом случае таким же числом 200-ваттных ламп накаливания. Следовательно, электрическая мощность первой установки равнялась 900, а второй — 1800 вт.

Вода в кюветах, составляющих потолок осветительных установок, имела в обоих случаях температуру 40—45°. Мощность лучистого потока около вершин растений, измеряемая пиранометром, в одном случае равнялась 100, а в другом — 200 вт/м². Продолжительность ежесуточного освещения была принята в 10, 12 и 20 часов в сутки и, кроме того, в обоих вариантах растения выращивались еще на непрерывном освещении. Таким образом, кратными друг другу были не только мощности лучистых потоков, но и продолжительность ежесуточных освещений. Температура воздуха была одинаковой как на свету, так и в темной камере и колебалась от 22 до 25°. Томатные растения, начиная с разворачивания семядолей, выращивались в питательных растворах Гельригеля в фаянсовых сосудах емкостью 750 см³. Растворы половинной (от нормального) концентрации менялись через один-два дня. Опыт продолжался 25 суток. За это время почти все растения дали бутоны, а некоторые и зацвели. В каждом варианте было по 4 растения. В конце опыта была определена сухая растительная масса всех растений и для среднего растения высчитаны затраты электроэнергии на образование 1 мг сухого вещества (табл. 27).

Характер использования света томатными растениями в зависимости от мощности лучистого потока и продолжительности периода ежесуточного освещения при выращивании их на электрическом освещении

Электрическая мощность осветительной установки (вт)	Период ежесуточного освещения (часов)	Общая затрата электроэнергии на 1 растение (вт · ч)	Мощность лучистого потока (вт/м ²)	Вес одного растения (г)		Количество электрической энергии (вт · ч), затрачиваемой на 1 мг сухого вещества	Количество сухого вещества, приходящегося на единицу электрической энергии (мг/вт · ч)
				сырой	сухой		
900	10	14 062	100	9,720	0,620	22,68	0,044
900	12	16 875	100	13,530	0,900	18,75	0,053
900	20	28 124	100	21,320	1,970	14,27	0,070
900	24	33 750	100	17,050	1,270	26,57	0,037
1800	10	28 124	200	17,530	1,400	20,09	0,049
1800	12	33 750	200	17,440	1,550	21,77	0,046
1800	20	56 248	200	19,700	2,300	24,45	0,041
1800	24	67 500	200	18,080	1,870	36,09	0,028

Примечание. Для расчета принималось, что на 1 м² размещается 64 растения, поэтому общее количество лучистой энергии, приходящейся на 1 м² за 25 суток, делилось на 64.

Скорее всего зацвели растения, получавшие непрерывное освещение в осветительной установке с электрической мощностью 1800 вт, т. е. в условиях, где было затрачено наибольшее количество электроэнергии (67,5 кВт · ч). С запозданием на 2 дня зацвели растения, получавшие 20-часовой день в той же осветительной установке, при затрате на одно растение 56,2 кВт · ч электроэнергии.

За 25 суток не дали бутонов растения, на выращивание которых было затрачено меньше всего электроэнергии (16,8 и 14,1 кВт · ч). Растения остальных четырех групп дали бутоны, но еще не зацвели. Таким образом, чем больше растения томатов получали электроэнергии и, следовательно, света, тем скорее они приступали к цветению.

Наибольшей сухой растительной массой обладали томаты, выросшие в условиях 20-часового дня, причем как сокращение его, так и продление приводили к снижению

продуктивности растений. Интенсивность освещения в 200 Вт/м^2 по сравнению с вдвое меньшей (100 Вт/м^2) во всех случаях способствовала увеличению сухой растительной массы.

Наиболее интересными являются данные, относящиеся к характеристике использования электроэнергии, затраченной на освещение растений в зависимости от интенсивности освещения и длины дня. Учет электроэнергии (в ватт-часах), затраченной на 1 мг сухого вещества среднего растения, обнаружил, что электроэнергия и, следовательно, свет лучше всего использовались растениями томатов в варианте, где они получали 20-часовой день за счет девяти 100-ваттных ламп. В установке с 200-ваттными лампами также на 20-часовом дне затраты электроэнергии на 1 мг сухой растительной массы возросли на 70%. Самыми неэкономными в смысле накопления растительной массы были условия непрерывного освещения. Особенно любопытен факт значительных затрат электроэнергии и света на единицу растительной продукции в варианте, где сухой вес растений был максимальным (20-часовой день при мощности лучистого потока 200 Вт/м^2). Очевидно, что между высокой продуктивностью и экономичным использованием света растениями нет прямой связи. Аналогичные явления постоянно наблюдаются при изучении интенсивности фотосинтеза методом регистрации газообмена.

Необходимо найти новые подходы к пониманию значения подобных явлений для процесса фотосинтеза.

Таким образом, продолжительность ежесуточного освещения не имеет постоянного, независимого от мощности лучистого потока значения для использования растениями томатов лучистой энергии. Наоборот, этот фактор в своем влиянии на коэффициент использования света растениями неразрывно связан с мощностью лучистого потока. Если откинуть непрерывное освещение, непригодное для нормального роста томатов, то наихудшим окажется коэффициент использования лучистой энергии, полученный при меньшей мощности лучистого потока и при самом коротком (10-часовом) дне, т. е. в тех условиях, где количество затраченной лучистой и электрической энергии было наименьшим. При этом возникает очень важный для практики вопрос, каким путем выгоднее идти для его повышения. Ведь можно, не удли-

няя периода ежесуточного освещения, удвоить мощность лучистого потока или же, наоборот, оставить прежнюю мощность, но удвоить продолжительность ежесуточного освещения. В обоих случаях количество затраченной энергии будет одинаковым, что позволяет получить и одинаковое количество лучистой энергии. Отсюда не исключена возможность получения и в том и в другом случае одинаковых результатов. Однако они оказались различными: в первом случае при удвоении мощности лучистого потока коэффициент использования энергии увеличился на 40%, тогда как во втором случае при удвоении периода ежесуточного освещения он возрос на 58%. Совершенно очевидно, что удвоение количества лучистой энергии, а следовательно и затрат электроэнергии, было более рациональным при удлинении периодов ежесуточного освещения, а не при увеличении мощности лучистого потока.

Продолжительность ежесуточного освещения при большей его интенсивности может быть меньшей по сравнению с условиями, где лучистый поток слабее. Совершенно очевидно, что коэффициент использования лучистого потока, зависящий от общего количества лучистой энергии, получаемой растением, определяется и соотношением между мощностью лучистого потока и периодом времени его воздействия на растение. В данном опыте наилучшим сочетанием мощности лучистого потока и продолжительности периода ежесуточного освещения оказались: мощность лучистого потока 100 Вт/м^2 и 20-часовой период освещения при последующих четырех часах темноты. В этих условиях на каждый ватт-час электроэнергии приходилось по 0,07 мг сухого вещества. Однако абсолютное количество сухого вещества в данных условиях не было наивысшим, а занимало 2-е место. Наибольшее количество сухого вещества образовалось у растений 7-го варианта, где на каждую единицу затраченной электроэнергии приходилось по 0,04 мг сухой массы, что соответствовало и значительно меньшему коэффициенту ее использования. Иными словами, на получение лишних 17% сухого вещества растения 7-го варианта затрачивали электрической энергии в два раза больше, чем растения 3-го варианта. Понятно, что для практических целей выгоднее всего использовать такие условия искусственного освещения, при которых на еди-

ницу затрачиваемого лучистого потока, а следовательно и электроэнергии, будет приходиться наибольшее количество сухого вещества, что и определяет собой наилучший коэффициент использования лучистого потока. Мощность лучистого потока и продолжительность его действия на растения в течение суток, а также и соотношение этих двух факторов определяют собой использование лучистой энергии растительными видами.

Именно поэтому, помимо томатов, в аналогичные по схеме опыты были включены в качестве объектов: хлопчатник сорта Одесский № 7 и редис сорта Розовый с белым кончиком.

Источником радиации во всех указанных ниже опытах служили сушильные 500-ваттные лампы накаливания. Они имеют более толстую нить накала, что допускает их эксплуатацию в режиме с довольно значительным перекалом (например, 170 в вместо полагающихся 127). В результате вслед за возрастанием температуры нити повышалась мощность лучистого потока и изменялся его спектральный состав в сторону увеличения коротковолновой радиации. Параболическая форма колбы и зеркальная поверхность ее внутренней верхней части позволяют собирать энергию на сравнительно ограниченной площади.

Указанные выше изменения в режиме горения сушильных ламп позволяли получать от них мощные лучистые потоки, достигавшие более $1,5 \text{ кВт/м}^2$, что превышает мощность солнечного излучения в полуденные часы. Непосредственно под колбами сушильных ламп помещались водяные фильтры с проточной водой, температура которой колебалась от 40 до 45°. Толщина водяного слоя составляла 2,5—3 см. Соотношение между видимой и инфракрасной радиацией было примерно одинаковым.

Для того чтобы сделать излучение, доходящее до растений, более рассеянным, на его пути, непосредственно под стеклянным дном водяного фильтра, натягивалась в один слой матовая бумага (калька). Она и служила фактическим потолком осветительных установок.

Мощность лучистого потока регулировалась изменением высоты подвеса ламп над водяным фильтром или изменением расстояния между вершинами растений и потолком осветительной установки.

Приемной частью прибора, регистрировавшего мощность лучистого потока, служил пиранометр с плоским стеклом. Градуировка прибора была выполнена в ваттах на 1 м^2 .

Опыты с хлопчатником начались после того, как было выяснено, что в условиях электрического освещения хлопчатник обнаруживает повышенную скороспелость и продуктивность по сравнению с естественными условиями культуры. Так, в обычной осветительной установке лаборатории светофизиологии, состоящей из ламп накаливания и водяного фильтра, хлопчатник дал 3 зрелые коробочки за 80—85 дней после появления всходов.

В первом варианте опытов выяснялось влияние мощности лучистого потока при прочих равных условиях на синтетическую деятельность растений хлопчатника.

Спектральный состав лучистого потока и продолжительность ежесуточного освещения во всех вариантах этих опытов были одинаковыми, освещение непрерывное. В опыт были включены следующие мощности: 100 Вт/м^2 , или 0,1 солнечного полуденного освещения, 200, 400, 600, 800 и, наконец, 1000 Вт/м^2 , что равно полному количеству солнечной лучистой радиации.

В этих условиях растения хлопчатника выращивали в течение 15 дней, начиная с появления всходов. В конце этого периода, т. е. ровно через 15 дней, все растения высушивали до абсолютно сухого состояния. Сухой вес растений характеризовал реакцию хлопчатника на соответствующие световые условия.

Характер зависимости накопления сухой растительной массы хлопчатником от мощности лучистого потока можно видеть из следующих данных:

Мощность (Вт/м^2)	100	200	400	600	800	1000
Сухой вес растений (г)	0,38	0,83	1,96	1,61	1,46	0,74

Хлопчатник считается одной из самых светолюбивых культур. Однако, как видно из опыта, накопление растительной массы шло лучше всего при мощности лучистого потока 400 Вт/м^2 , т. е. примерно при половинной мощности прямого солнечного излучения. Во всяком случае совершенно ясно, что хлопчатник можно выращивать и при мощности лучистого потока 400 Вт/м^2 и что дальнейшее увеличение этой мощности может быть не только бесполезным, но даже вредным. Правда, удвоение этой

оптимальной мощности (800 вт/м^2) мало снижает продуктивность хлопчатника и тем самым указывает на его приспособленность переносить и высокие мощности солнечного излучения.

Нет ничего удивительного, что 0,1 прямого солнечного излучения не может обеспечить той же высокой продуктивности, какую обеспечивает интенсивность освещения, в пять раз большая. Однако при мощности лучистого потока 200 вт/м^2 получают растения более продуктивные, чем при естественном освещении.

После выяснения отношения хлопчатника к мощности лучистого потока ламп накаливания были проведены опыты, выявляющие реакцию его на продолжительность периода ежесуточного освещения. Для этого были использованы те же осветительные установки, что и в предыдущих опытах. Мощность лучистого потока для всех вариантов актиноритмического опыта была установлена 500 вт/м^2 . Продолжительность периода ежесуточного освещения равнялась 12, 15, 18 и 21 часам. Кроме того, был и 5-й вариант, где растения получали освещение непрерывно в течение всего опыта, длившегося до появления бутонов у всех растений. После бутонизации отстающих по развитию растений все они одновременно, в возрасте 27 суток, были убраны и помещены в сушильный шкаф для определения их веса в абсолютно сухом состоянии.

Влияние длины дня на накопление сухого вещества и скорость развития молодых (27-дневных) растений хлопчатника характеризуют следующие данные:

Время ежесуточного освещения (часов)	12	15	18	21	24
Сухой вес (г)	2,76	3,88	4,29	5,46	5,91
Число дней от всходов до появления бутонов	27	24	23	22	21

Прежде всего вслед за удлинением периода ежесуточного освещения при мощности лучистого потока 500 вт/м^2 увеличивается накопление сухой растительной массы, достигающей наибольшего размера на непрерывном освещении.

Образование значительной вегетативной массы растениями короткого дня на непрерывном освещении — явление обычное, но оно всегда сопровождается задержкой в развитии. В описанном опыте с хлопчатником этого не

произошло, и раньше всего бутоны появились на непрерывном освещении. Растения, получавшие 12-часовой день, образовали первые бутоны на 6 суток позже.

По результатам опыта никак нельзя считать данный сорт хлопчатника (Одесский № 7) растением короткого дня. Его скорее следует отнести к растениям или нейтральным, или длинного дня.

Нужно отметить, что, вероятно, среди хлопчатника есть немало сортов, имеющих такой же тип актиноритмической реакции. Поэтому, говоря о хлопчатнике как о виде вообще, его нельзя относить к растениям короткого дня.

Следует также подчеркнуть, что в литературе нет указаний на получение бутонов хлопчатника на 20-й день после всходов. Этот срок бутонизации является пока, очевидно, рекордно ранним. И тот факт, что наблюдается он не на коротком дне, а при непрерывном освещении, свидетельствует о наших далеко не полных представлениях о физиологии развития даже культурных растений.

Во всяком случае теперь стало ясно, что в некоторых случаях хлопчатник лучше всего растет и скорее всего развивается в условиях непрерывного освещения, создаваемого за счет лучистого потока мощностью $400—500 \text{ вт/м}^2$, состоящего из видимой и инфракрасной радиации в отношении 1:1 или 2:1 (две части видимой и одна инфракрасной).

Что касается вопроса, почему южное растение хлопчатник реагирует на длину дня не по типу короткодневных видов, то в данное время он остается открытым. Напомним, что это далеко не первый случай расхождения актиноритмической реакции с современным ареалом вида или географическими районами культуры сельскохозяйственных растений.

При выращивании хлопчатника на непрерывном освещении хорошие результаты получились при мощности лучистого потока 400 вт/м^2 . Из испытанных длин дня с мощностью лучистого потока 500 вт/м^2 наихудшие результаты наблюдались при 12-часовом периоде освещения. Естественно возник вопрос, можно ли получить увеличение продуктивности хлопчатника на коротком дне за счет удвоения мощности лучистого потока, оказавшегося оптимальным при непрерывном освещении.

Схема опытов, выясняющая этот вопрос с хлопчатником, была составлена в расчете на получение материалов, позволяющих сравнивать результаты увеличения общего количества лучистой энергии в одном случае за счет мощности лучистого потока, а в другом — путем удвоения светового периода. При этом использовались те же осветительные установки, состоящие из сушильных ламп с водяными фильтрами. Продолжительность опыта составляла 15 суток. В первом варианте растения хлопчатника выращивали при лучистом потоке 400 вт/м^2 и длине дня 11 часов. Во втором варианте длину дня сохраняли прежней, но мощность лучистого потока увеличили вдвое (до 800 вт/м^2). В третьем варианте опыта мощность лучистого потока была та же, что и в первом, но длина дня была увеличена в два раза (до 22 часов). Таким образом, растения хлопчатника во втором и третьем вариантах получали лучистой энергии в два раза больше, чем в первом: в одном случае за счет увеличения мощности лучистого потока, в другом — за счет увеличения продолжительности освещения.

Через 15 дней все растения были высушены и взвешены. Результаты этого опыта оказались следующие:

Длина дня (часов)	11	11	22
Мощность лучистого потока (вт/м^2)	400	800	400
Сухой вес растений (г)	0,58	0,56	2,13

В данном случае увеличение продолжительности периода ежесуточного освещения дало несоизмеримо лучшие результаты, чем удвоение мощности лучистого потока.

Точно такие же результаты получились и в другом опыте, отличавшемся от предыдущего только тем, что исходная мощность лучистого потока была не 400, а 500 вт/м^2 . И на этот раз наилучшие результаты были достигнуты при удвоении ежесуточного периода освещения.

Таким образом, для выращивания хлопчатника на искусственном освещении следует пользоваться длительным периодом ежесуточного освещения при мощностях лучистого потока от 200 до 400 вт/м^2 . Недостаток света при коротком дне не может быть компенсирован увеличением мощности лучистого потока, если последний превышает 200 вт/м^2 .

Несколько в ином плане протекали опыты с редисом. Последний выращивался в тех же осветительных установках, что и хлопчатник.

Редис (сорт Розовый с белым кончиком) является длиннопериодным растением. В условиях непрерывного освещения он очень быстро переходит к цветению, не образуя корнеплодов, имеющих товарную ценность. Для получения хороших корнеплодов редис следует выращивать на коротком дне, который сильно задерживает его цветение, а рост корнеплодов идет интенсивно. Как и большинство представителей семейства крестоцветных, редис является растением весьма светолюбивым. При недостатке освещения он сильно вытягивается, не образует корнеплодов и запаздывает с переходом к цветению.

В условиях искусственного освещения, пользуясь высокими мощностями лучистого потока, неоднократно удавалось получать корнеплоды редиса весом в 30 г всего за 12—14 суток от появления всходов. При этом оказалось, что высокие мощности лучистого потока, даже при непрерывном освещении, задерживали цветение, что способствовало образованию хороших корнеплодов.

В приводимом ниже опыте сравнивается актиноморфическая реакция редиса на непрерывное освещение и на короткий 12-часовой день в зависимости от мощности лучистого потока. Как на непрерывном освещении, так и на 12-часовом дне было по пять вариантов опыта, которые отличались друг от друга различными мощностями лучистого потока (200, 400, 600, 800 и 1000 вт/м^2).

Редис, начиная со всходов, выращивали в глиняных сосудах с большим объемом почвы, что предохраняло растения от недостатка воды. Температура воздуха около растений держалась на уровне $22-25^\circ$. Опыты продолжались 10—25 суток.

В самом начале опыта обнаружилось, что в данных условиях мощность лучистого потока в 1000 вт/м^2 при непрерывном освещении является для редиса неприемлемой: всходы редиса быстро погибали.

В то же время на 12-часовом дне мощность лучистого потока 1000 вт/м^2 не оказалась избыточной. Общее состояние растений редиса через 10 дней после начала опыта показывают рис. 42 и 43. Сделанные в одном масштабе, они позволяют сравнивать между собой все представленные на них растения.

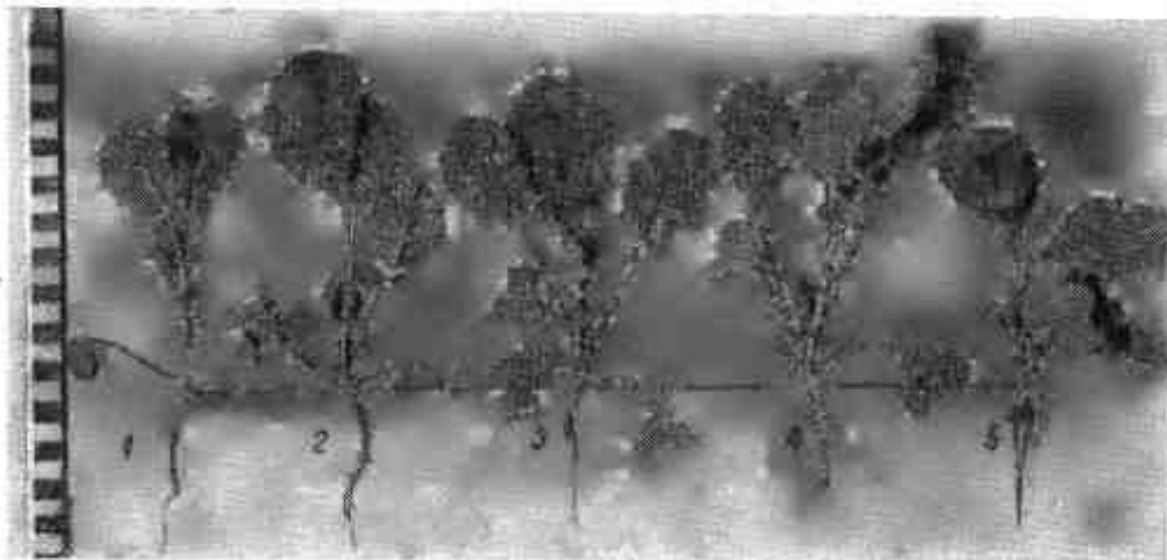


Рис. 42. Редис в 10-дневном возрасте, выращенный на 12-часовом дне. 1 — при мощности лучистого потока 200 вт/м^2 , 2 — 400, 3 — 600, 4 — 800, 5 — 1000 вт/м^2 .

На коротком дне растения редиса тем лучше, чем больше мощность лучистого потока. За 10 дней корнеплоды стали образовываться только у растений, получавших лучистые потоки мощностью 800 и 1000 вт/м^2 . В дальнейшем все растения на 12-часовом дне образовали корнеплоды, причем наибольшими они были у растений, получавших лучистый поток 800 вт/м^2 .

Естественно, что до конца опыта, продолжавшегося 25 суток, на коротком дне редис оставался вегетативным и накопление растительной массы у него увеличивалось вслед за повышением мощности лучистого потока. Иная зависимость роста и развития редиса от этих же мощностей лучистого потока наблюдается на непрерывном освещении (см. рис. 43). Как уже отмечалось выше, при непрерывном освещении всходы редиса не выдерживали мощности лучистого потока в 1000 вт/м^2 и погибали.

Значение мощности лучистого потока в условиях непрерывного освещения для редиса выступает еще ярче, чем на коротком дне. В 10-дневном возрасте на непрерывном освещении в зависимости от мощности лучистого потока все растения оказались различными и по росту, и по развитию.

Общей закономерностью, наблюдавшейся как на коротком дне, так и на непрерывном освещении, является

сперва возрастание веса растений редиса с увеличением мощности лучистого потока до определенной величины, а затем его снижение (табл. 28). В условиях различной продолжительности суточных периодов освещения изменяются и величины оптимальных мощностей лучистых потоков. На коротком дне мощность лучистого потока в 1000 вт/м^2 не является летальной, напротив, в этих условиях лучше всего шло образование корнеплодов, и их вес в сухом состоянии составлял около 25% от общего веса растений. При всех прочих меньших мощностях лучистого потока образование корнеплодов шло в течение первых 12 суток жизни хуже. В условиях непрерывного освещения накопление сухой массы и образование корнеплодов проходило интенсивнее всего при мощности лучистого потока 600 вт/м^2 .

На примере редиса хорошо видно, что при сравнительно небольших мощностях лучистого потока общее количество лучистой энергии, получаемое растениями за определенный период времени, выгоднее увеличи-



Рис. 43. Редис в 10-дневном возрасте, выращенный на непрерывном освещении.

1 — при мощности лучистого потока 200 вт/м^2 , 2 — 400, 3 — 600, 4 — 800 вт/м^2 .

вать за счет мощности, а не продолжительности действия потока.

Так, например, сухой вес растений, получавших лучистый поток мощностью 200 вт/м^2 в течение 12 часов в сутки, равнялся 0,21 г. При сохранении той же мощности лучистого потока, но при доведении продолжительности освещения до 24 часов, т. е. при удвоении его за счет срока воздействия, сухой вес растений был доведен до 0,35 г, т. е. повышен на 70%. При сохранении той же продолжительности освещения (12 часов в сутки), но при удвоении мощности лучистого потока в единицу времени сухой вес растений возрос в два раза.

Таблица 28

Значение мощности лучистого потока для накопления редисом сухой массы на непрерывном освещении и на коротком дне

Мощность лучистого потока (вт/м^2)	12-часовой день		Непрерывное освещение	
	общий сухой вес растений (г)	процент корнеплодов к общему весу растений	общий сухой вес растений (г)	процент корнеплодов к общему весу растений
200	0,21	14	0,35	14
400	0,41	12	1,35	13
600	0,42	12	1,89	44
800	0,53	12	0,68	17
1000	0,45	25	—	—

Наоборот, в случае достаточно высокой мощности лучистого потока для повышения продуктивности редиса значительно выгоднее увеличивать период освещения, а не интенсивность. Например, растения редиса, получавшие мощность лучистого потока 400 вт/м^2 в течение 12 часов в сутки, имели сухой вес, равный 0,41 г. При увеличении мощности лучистого потока в два раза (800 вт/м^2) вес растений увеличился на 30% (0,53 г), а при удвоении продолжительности ежесуточного освещения — на 230%, достигнув 1,35 г, хотя мощность лучистого потока оставалась равной 400 вт/м^2 .

Из приведенных фактов следует, что при недостаточных мощностях лучистого потока продуктивность растений может быть повышена прежде всего за счет увеличения мощности лучистого потока, хотя и увеличение

продолжительности освещения также повышает продуктивность растений.

Если же растения выращивались при мощности лучистого потока, близкой к половине нормального солнечного (400 вт/м^2), то дальнейшее возрастание продуктивности растений следует в гораздо большем размере за удлинением периода ежесуточного освещения, а не за увеличением мощности лучистого потока.

При рассмотрении опытных растений редиса (см. рис. 43) бросается в глаза их резкое отличное морфологическое состояние. Растения, получавшие относительно малую мощность лучистого потока (200 вт/м^2), плохо росли и потому медленно развивались. Они не имеют корнеплода и еще не перешли к стеблеванию. Цветочный стебель у таких растений без образования корнеплодов появился только через 25 дней после начала опыта. На удвоенной мощности лучистого потока (400 вт/м^2) при непрерывном освещении растения редиса образовали цветочный стебель скорее всего, т. е. уже через 8 дней после появления всходов. Очевидно, в этих условиях и накопление растительной массы, и развитие шли одинаково интенсивно. Или, точнее, у растений редиса на непрерывном освещении при мощности лучистого потока 400 вт/м^2 развитие шло так же быстро, как и при больших мощностях, но при этом его морфологическое выявление не задерживалось вместе с задержкой роста стебля в высоту, как это наблюдалось при увеличении мощности лучистого потока до 600 вт/м^2 . В этом случае рост стебля в высоту был задержан сильным светом и поэтому сперва формировался корнеплод и только позже, через 20 дней после начала опыта, появилось соцветие.

При мощности лучистого потока 800 вт/м^2 рост стебля и процессы репродуктивного развития были сильно задержаны, поэтому в этом варианте шло интенсивное нарастание новых листьев, а затем и разрастание корнеплода, достигшего к 25-дневному возрасту наибольшего размера и веса. Таким образом, не всякое непрерывное освещение способствует быстрейшему израстанию редиса. Очень существенное значение при этом приобретает мощность лучистого потока. Только в том случае, если она оптимальна для процессов репродуктивного развития и не задерживает при этом роста стебля в вы-

соту, наблюдается быстрое израстание молодых растений редиса. Любая интенсивность освещения меньше оптимальной задерживает и накопление растительной массы, и развитие. Мощности лучистых потоков, превышающие оптимальную, задерживают главным образом рост стебля в высоту, однако не исключена возможность, что они способны задерживать и процессы репродуктивного развития, на что указывает факт нарастания большого числа листьев у растений редиса, непрерывно получавших лучистый поток в 800 вт/м^2 .

Результаты наших опытов с томатами, хлопчатником и редисом оказались в полном соответствии со сделанными в начале этой главы предположениями. Действительно, и мощность излучения, и продолжительность периода светового воздействия на растения тесно связаны друг с другом и определяют собой «дозу» света, получаемую растениями за определенный отрезок времени. Эти «дозы» имеют, несомненно, большое практическое значение и должны подробно изучаться.

ВЛИЯНИЕ НА РАСТЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА

При переходе к выяснению роли спектрального состава света в жизни растений возникают наибольшие трудности. Во-первых, потому что нелегко выделить монохроматические или приближающиеся к ним участки спектра, несущие достаточное количество энергии, и, во-вторых, в связи с отсутствием точных приборов, позволяющих проводить надежную оценку энергии в различных областях видимого и сопутствующих ему ближнего инфракрасного и ультрафиолетового спектров, отраженных и рассеянных растениями.

После открытия значения солнечного света в питании зеленых растений естественно встал вопрос о значении качества света для разложения листом углекислоты. Еще Сенебье (1788), придумавший для этого специальный прибор, известный теперь как колокол Сенебье, сделал первую экспериментальную попытку выяснить зна-

чение красно-оранжевой и сине-зеленой частей спектра для разложения CO_2 .

Пользуясь, так же как и Сенебье, определенными светофильтрами, Добени (Chr. Daubeny, 1836) проводил опыты по выяснению влияния спектрального состава света на энергию фотосинтеза. В результате своих исследований Добени пришел к заключению, что энергия разложения CO_2 листьями растений в процессе фотосинтеза пропорциональна яркости лучей. Это было, пожалуй, первое четко сформулированное представление о зависимости энергии фотосинтеза от спектрального состава света.

Через несколько лет Драпер (S. W. Draper, 1843, 1844) для той же цели кроме цветных фильтров впервые применил призматический спектр. По его данным, наивысший эффект фотосинтеза наблюдался в желтых лучах.

Крупным недостатком работ Добени и Драпера было то, что листья сухопутных растений при изучении фотосинтеза они погружали в воду.

А. Н. Волков (1866), пользуясь стеклянными цветными светофильтрами, впервые обнаружил отсутствие фотосинтеза за зелеными стеклами.

В 1869 г. вышла первая работа К. А. Тимирязева, в которой он высказал предположение, что лучше всего фотосинтез должен проходить в красном участке спектра, хорошо поглощаемом хлорофиллом. Напротив, Пфеффер (W. Pfeffer, 1871), применяя цветные светофильтры и определяя энергию фотосинтеза газометрическим методом, снова получил данные, говорящие за наибольшее значение для фотосинтеза самых ярких желтых лучей.

Крупную роль в дальнейших исследованиях, посвященных фотосинтезу, сыграли выступления в печати в 1871 и 1872 гг. физика Ломмеля (E. Lommel), указавшего, что, как и во всякой фотохимической реакции, решающими являются лучи, поглощаемые данной средой. Так, в фотосинтезе следует отдавать преимущественное значение тем участкам спектра, которые наиболее полно поглощаются хлорофиллом. Последующие работы Мюллера (N. J. Müller, 1872, 1876) и К. А. Тимирязева (1875) были направлены на экспериментальное доказательство этого физического явления.

Мюллер в ряде опытов с призматическим спектром показал, что поглощение листом углекислоты из атмосферы осуществляется интенсивнее всего в красных лучах и между фраунгоферовыми линиями В и С которые особенно полно поглощаются растворами хлорофилла.

К. А. Тимирязев обнаружил, что разложение углекислоты листом осуществляется в очень значительных масштабах и в сине-фиолетовом участке спектра. В крунианской лекции он писал: «...если мы примем количество угольного ангидрида, разложенное в желтой половине (в среднем из шести опытов), за 100, то действие синей половины будет 54. Главный результат, следовательно, сводится к тому, что синим и фиолетовым лучам до сих пор приписывали слишком слабое действие» *.

Таким образом, К. А. Тимирязеву принадлежит крупная заслуга в показе большого значения для фотосинтеза растений наиболее коротковолновой части видимого спектра. Необходимо также помнить, что в своих исследованиях К. А. Тимирязев имел дело с призматическим спектром, значительно более растянутым в сине-фиолетовой части по сравнению с красно-оранжевой (рис. 44), а это означает, что в последней области спектра на единицу площади приходится лучистой энергии примерно в два раза больше, чем в первой.

Учитывая все это, следует признать приводимое К. А. Тимирязевым соотношение разложения углекислоты в желтой и синей части 100:54 очень высоким, указывающим на значительную активность синей части спектра. К. А. Тимирязев хорошо знал недостатки призматического спектра и поэтому пытался в своих первых опытах заменить его дифракционным (нормальным), «...но, — пишет он, — ряд опытов, сделанных мною при помощи превосходной роуландовской решетки, дал только отрицательные результаты. Как в опытах Мюллера, напряжение света не было достаточно для обнаружения разложения углекислоты. Пришлось вернуться к спектру призматическому» **.

В историческом развитии современных представлений о значении спектрального состава света для фотосинте-

* К. А. Тимирязев Сочинения, т. I. Сельхозгиз, 1937, стр. 410.

** Там же, стр. 407.

за растений значительную роль сыграли оригинальные исследования Энгельмана (Т. W. Engelmann, 1882, 1884), определявшего фотосинтез по поведению бактерий, зависящему от количества выделенного зелеными клетками кислорода. Энгельман, так же как и К. А. Тимирязев, отметил наличие второго максимума фотосинтеза в сине-фиолетовом участке спектра и связал его с наличием значительной полосы поглощения хлорофилла, лежащей в этой же области излучения.

Несмотря на совершенную очевидность этого явления, оно долго оспаривалось многими физиологами растений и, в частности, особенно упорно Рейнке (J. Reinke, 1884, 1885), который, работая с построенным им прибором «спектрофор», не обнаружил разложения CO_2 сине-фиолетовым участком светового излучения.

Наконец, весьма интересными являются результаты исследований Книпа и Миндера (Н. Кnier и F. Minder, 1910), приведшие их к выводу, что энергия фотосинтеза зависит только от количества энергии, поглощенной пластидами, а не от спектрального состава света.

За последние годы получено много новых экспериментальных данных, говорящих, что фотосинтез может осуществляться во всех монохроматических участках видимой области излучений с длиной волн от 400 до 750 мкм. Так, например, Гувер (W. H. Hoover, 1937) получил вполне достоверные данные о хорошем фотосинтезе листьев пшеницы даже в зеленом излучении, которое многими авторами считается совершенно непригодным для фотосинтеза.

Габриэльсон (E. K. Gabrielsen, 1940) опубликовал результаты опытов с листьями белой горчицы (*Sinapis alba*), в которых было показано, что фотосинтез в трех различных по спектру участках видимой радиации мо-

Синий	Зеленый	Желт.	Оран.	Красный
28	23			55
51		30		30
Синий	Зеленый	Желт.	Оран.	Красный

Рис. 44. Сравнение спектров видимой области. Вверху — дифракционный (нормальный), внизу — призматический.

жет быть доведен до одного уровня при варьировании мощностей излучения. Так, для полного светового насыщения на $50 \text{ см}^2/\text{час}$ потребовалось: в красно-оранжевом излучении примерно 400 кал, в желто-зеленом примерно 600 кал и в сине-фиолетовом около 1200 кал.

Следовательно, по результатам эксперимента Габриэльсона можно считать, что для фотосинтеза белой горчицы желто-зеленое излучение оказалось не только вполне благоприятным, но, что еще интереснее, оно значительно превышало фотосинтетическую активность сине-фиолетового излучения. Данные Габриэльсона, так же как и результаты исследований некоторых других, более поздних, авторов, показывают, что использование вышними растениями для фотосинтеза излучений с различными длинами волн в значительной степени зависит от мощности этих излучений.

Если выращивать растения в излучениях монохроматических участков видимого спектра высокой мощности, при которой, вне зависимости от длины волн, будет достигаться полное световое насыщение, то интенсивность фотосинтеза станет одинаковой во всех частях спектра, если опыты проводятся в совершенно аналогичных условиях. Это происходит потому, что в светонасыщенном состоянии скорость фотосинтеза зависит только от скорости темновых процессов. Следовательно, можно предположить, что структура спектра действия обнаруживается лишь тогда, когда мощность излучения станет ниже насыщающего значения.

При этом имеется еще одно важное обстоятельство, на которое впервые указывал Энгельман, — оптическая плотность образца. Для толстого листа или для нескольких листьев, так же как и для концентрированной клеточной суспензии, спектры поглощения и действия оказываются иными, чем в среде с малой оптической плотностью тех же веществ. Многие авторы, например Рабинович, считают, что в случае оптически плотных сред спектры действия оказываются искаженными, как это было в первых опытах Варбурга (O. Warburg) и Негелейна (E. Negelein) по определению квантовых выходов.

Такая точка зрения на биологический процесс мне кажется не совсем правомочной. Ведь в природе у растений одного и того же вида и даже клона, находящихся в различных условиях выращивания и прежде всего

освещения, листья резко отличаются по своей оптической плотности, и что является в этом случае нормой — сказать трудно. Кроме того, оптически прозрачное вещество остается прозрачным вне зависимости от толщины его слоя. Если же с возрастанием оптической плотности листа или отдельных его пигментов возрастает величина поглощения любого по спектру света, это является прямым указанием на поглотительную способность в данной области спектра.

Поэтому на основании литературных данных можно утверждать, что фотосинтез растений проходит успешно во всех участках видимой части спектра, если имеется налицо соответствующая оптическая плотность поглощающей среды и достаточная по мощности интенсивность монохроматического излучения. При этом остается невыясненным до конца вопрос, что является основным: определенное ли количество энергии или определенное число квантов.

Помимо длины волн качество света характеризуется его поляризацией. К сожалению, значение этого фактора для фотосинтеза и вообще для фотобиологических процессов растений почти не изучалось. В литературе имеются отрывочные и противоречивые указания на значение поляризации света для процесса фотосинтеза. Основываясь на результатах первых работ, можно сказать, что данная область исследований еще ждет своего часа.

Если результаты работ о значении спектрального состава света для фотосинтеза остаются все еще часто спорными или, как пишет Е. Рабинович (E. Rabino-witch), «чисто описательными и непригодными для качественной интерпретации»*, то вопрос о значении спектрального состава света для накопления сухой растительной массы является почти открытым. В литературе до начала работ по выращиванию растений при искусственном освещении по этому поводу почти ничего не было. Объяснением этому может служить трудность получения достаточно близких к монохроматическому спектру излучений, пригодных по своей мощности для нормального существования растений. Именно поэтому

* Е. Рабинович. Фотосинтез, т. II. Пер. с англ., изд-во иностранной литературы, 1953, стр. 586.

одной из задач исследований мы считали получение экспериментальных данных о влиянии спектрального состава света на накопление растительной массы.

Для проведения этих работ прежде всего потребовалось подобрать соответствующие источники искусственного освещения и различные светофильтры для выделения необходимых участков видимого спектра.

При комбинации лучистых потоков различных электрических ламп с определенными стеклянными фильтрами удалось вырастить некоторые виды растений в трех участках спектра: красно-оранжевом, желто-зеленом и сине-фиолетовом. Источниками радиации в этих исследованиях служили: неоновые маячные лампы для выделения красно-оранжевого и прямые ртутно-кварцевые лампы для выделения желто-зеленого и сине-фиолетового излучения спектра.

Спектры излучения этих ламп приведены выше в разделе «Электрические источники излучения».

Спектры пропускания стеклянных фильтров даны на рис. 45. Максимум пропускания синего стекла (СС-14) лежит в пределах длины волны около 400 мкм и обрывается около 500 мкм. При λ от 500 и почти до 700 мкм наблюдается полное поглощение энергии и только в области дальнего красного излучения вновь наблюдается незначительное пропускание.

Собрав небольшую осветительную установку, состоящую из прямой ртутно-кварцевой трубки ПРК-7 мощностью 1000 вт, и двух синих стекол, положенных одно на другое в кювету с проточной водой (толщина слоя 50 мм), удалось получить излучение, состоящее только из синих и фиолетовых участков видимого спектра. Главные линии его характеризовались длиной волн: 435,8; 404,6; 407,8; 434,8 мкм. Крайние пределы фона по длине волны колебались от 403 до 437 мкм. В дальней красной части за пределами волн длиной 700 мкм интенсивность излучения была ничтожной, во всяком случае в 600 раз слабее, чем в синей области. Практически растения в этой установке находились в сине-фиолетовом излучении. Синие стекла находились в воде, имеющей температуру 25° С. Для поддержания этой температуры дистиллированная вода прогонялась через термостат ТС-15. Цикл циркуляции воды был замкнутым. Потолком установки является обычное оконное стекло.

Чтобы не повторяться, отметим, что и в других цветных установках цветные стекла находились в таких же условиях и температура светящегося потолка была всюду одинаковой.

При помощи зеленого и желтого стекол, положенных одно на другое, из спектра прямой ртутно-кварцевой лампы ПРК-7 (1000 вт) выделялись зеленые и желтые линии спектра. Находясь на дне стеклянной кюветы в 5-сантиметровом слое проточной дистиллированной воды, эти два цветных стекла пропускали следующие главные линии: 579,1; 577,0; 546,1 мкм. Слабый фон наблюдался в пределах λ от 543 до 583 мкм. В красной части имелось лишь слабое просвечивание, в 150—300 раз более слабое, чем линия 546,1 мкм.

Красное стекло (КС-7), лежащее в 5-сантиметровом слое воды, выделяет из спектра маячной неоновой лампы оранжевые и красные полосы в пределах λ от 600 до 750 мкм.

Оценивая выделенные нами три участка видимого спектра с точки зрения обычных представлений о роли спектрального состава света в жизни растений, отметим, что в случае сине-фиолетового и красно-оранжевого из-

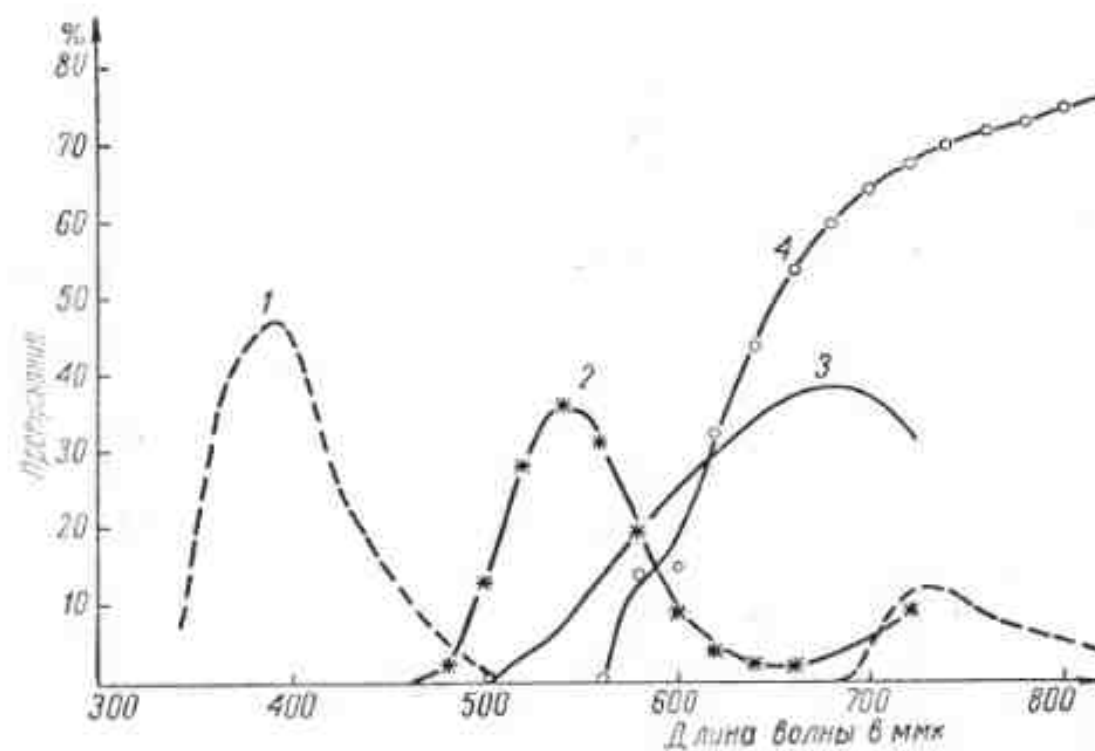


Рис. 45. Спектры пропускания стеклянных фильтров.
1 — синий, 2 — зеленый, 3 — желтый, 4 — красный.

лучений растения получали наиболее поглощаемые хлорофиллом участки спектра, а в случае желто-зеленого излучения, наоборот, наименее поглощаемые лучи. Поэтому в ряде опытов наибольшее значение для исследователя имело выяснение поведения растений именно в желто-зеленом свете.

Сложным остается вопрос и о дозировке мощности лучистых потоков различного спектрального состава. Наиболее правильным было бы выравнивание их по величине поглощения листьями, но для этого необходима возможность точного учета наряду с пропусканием рассеивания и отражения света листом, а последнее представляет нелегкую задачу. Не решив ее практически, мы были вынуждены выравнивать мощности цветных лучистых потоков по показаниям пиранометра около вершин опытных растений и тем самым создавать наихудшие условия в смысле количества лучистой энергии для растений, получающих желто-зеленое излучение.

Таким образом, методика наших опытов с изучением влияния спектрального состава света на жизнь растений несовершенна и нуждается в дальнейших улучшениях.

Однако ни К. А. Тимирязев, да и никто из более поздних исследователей не выращивали растений в таких постоянных по спектру световых условиях, какие были использованы в наших опытах. Поэтому результаты их представляют несомненный интерес.

Основным недостатком наших цветных установок является относительно невысокая мощность излучения, позволяющая вести выращивание растений только при слабом освещении, не превышающем 20 вт/м^2 .

Тем не менее, пользуясь непрерывным освещением и температурой воздуха около $25^\circ \text{C} \pm 1-2^\circ$, удается выращивание многих видов растений с совершенно определенными результатами (табл. 29).

Продолжительность опытов с различными культурами не была одинаковой и зависела от состояния растений. Самым длительным (30 суток) был опыт с томатами и брфофиллумом, самым коротким — с периллой масличной (15 суток). Из приведенных в табл. 29 растений перилла росла хуже, а брфофиллум лучше других. Длительность опыта с фасолью и огурцами составляла 20 суток.

Таблица 29

Влияние спектрального состава света на образование сухой растительной массы

Культура	Участки спектра								
	синие-фиолетовый			желто-зеленый			красно-оранжевый		
	сухой вес растений (г)	площадь листьев (см ²)	сухого вещества на единицу площади листьев (г/см ²)	сухой вес растений (г)	площадь листьев (см ²)	сухого вещества на единицу площади листьев (г/см ²)	сухой вес растений (г)	площадь листьев (см ²)	сухого вещества на единицу площади листьев (г/см ²)
Огурцы	110	54	2	110	79	1,4	100	71	1,4
Брфофиллум	360	64	5,6	480	85	5,6	220	37	6,0
Перилла масличная . . .	24	10	2,4	44	23	1,9	37	18	2,0
Фасоль	240	107	2,3	430	157	2,7	420	162	2,5
Томаты	70	21	3,3	400	160	2,5	440	109	4,0

Малые приросты сухой массы определялись незначительными мощностями лучистых потоков, колебавшихся в пределах от 16 до 20 вт/м^2 .

Наиболее интересным результатом этих опытов является получение высокой продуктивности растений в условиях желто-зеленой радиации. У всех пяти культур приросты сухой растительной массы не только не падали на желто-зеленом излучении, но были у брнифиллума, периллы и фасоли самыми высокими. По-видимому, есть все основания считать, что желто-зеленая радиация, и, вероятно, в первую очередь желтая, является вполне пригодной для выращивания растений с хорошими хозяйственными показателями. Это означает, что для культуры растений можно использовать самые экономичные натриевые лампы, являющиеся лучшими преобразователями электрической энергии в видимую радиацию. У фасоли, масличной периллы и у томатов наименьшие приросты сухой растительной массы получились в сине-фиолетовом излучении, тогда как в красно-оранжевом и желто-зеленом их величина была достаточно близкой. Эти данные в случае их постоянных повторений могут быть весьма интересными для квантовых подходов к теории фотосинтеза.

Вторым, не менее интересным результатом этого опыта является значительное изменение под воздействием цветного света площади листьев, причем у всех растений, за исключением фасоли, она оказалась наибольшей в желто-зеленом излучении. Любопытно, что у всех пяти видов площадь листьев в сине-фиолетовом излучении меньше, чем в желто-зеленом.

Не меньшее значение имеет и третья группа фактов, вытекающая из этих же опытов. Она говорит о почти одинаковой синтетической активности листьев данного вида растений в трех различных областях видимого спектра. Пересчет сухого растительного вещества на 1 см^2 листовой поверхности приводит к получению очень сходных цифр. Это свидетельствует о том, что синтез сухой растительной массы осуществляется примерно на одном уровне в любом участке использованного в опыте видимого спектра.

Очевидно, что в основном различный спектральный состав света влияет на характер морфогенеза листьев и уже через него на общую продуктивность растений.

Это важный вывод, так как он влечет за собой необходимость пересмотра ряда теоретических представлений, а главное может служить основой для получения высоких урожаев растений в условиях искусственного освещения.

Близкие к «обычным» представлениям о значении спектрального состава света результаты получились в опыте с томатными растениями. Наибольшее количество сухого вещества томаты образовали в условиях красно-оранжевого излучения, причем количество сухого вещества на 1 см^2 листовой поверхности у них было также наивысшим. Но общая листовая площадь томатных растений была максимальной, так же как и у других культур, за исключением фасоли, в установке с желто-зеленым излучением. Помимо размера поверхности, листья томатов в желто-зеленом излучении отличались своим темно-зеленым цветом и отсутствием пятнистости, что наблюдалось у растений двух других групп.

Определение хлорофилла в листьях томатных растений обнаружило самую высокую его концентрацию ($2,56 \text{ мг/дм}^2$) в условиях желто-зеленого излучения. Листья томатов в красно-оранжевом освещении содержали хлорофилла в два раза меньше ($1,05 \text{ мг/дм}^2$).

В случае с томатами наблюдается компенсация несколько худших условий освещения (менее благоприятный спектр света) увеличением листовой поверхности и возрастанием количества хлорофилла. Это хороший пример приспособляемости растений к различным световым режимам выращивания.

При исследованиях действия слабых монохроматических излучений на растения удобно пользоваться фототропическими явлениями.

Из литературы известно, что фототропические изгибы возникают скорее всего под воздействием фиолетового и синего излучений, красный свет является наименее активным для этого процесса. Для проверки данного положения проростки растений нескольких видов после двух дней пребывания в темноте облучали в течение суток слабым монохроматическим излучением. Для этих целей на общей оси универсального монохроматора после призм и конденсоров помещали небольшую фототропическую камеру с узкой щелью. Последнюю подготавливали с возможно большей плотностью к выходной щели

монохроматора, имеющей точно такие же размеры, как и щель камеры. Недостатком этого, а равно и следующего опыта является то обстоятельство, что в них не было устранено действие геотропического фактора, поэтому ростовой изгиб явился итогом двух действующих на проростки сил.

Результаты, полученные в опыте с действием монохроматического излучения, даны в табл. 30.

Таблица 30

Влияние различных монохроматических участков излучения на фототропическую и геотропическую активность проростков

Культура	Угол изгиба проростков (градусов) под воздействием монохроматических излучений с длиной волны (мкм)							
	410	470	520	570	600	640	680	700
Редис	50	60	40	0	0	0	0	0
Томаты, сорт Урожайный	60	90	70	60	20	10	0	0
Огурцы	70	80	60	50	40	10	0	0
Гречиха	70	90	80	60	30	60	40	20
Капуста	70	90	70	60	40	40	30	20

В полном соответствии с литературными данными находятся факты наибольшего фототропического эффекта в сине-фиолетовой части спектра. В самом деле, все испытанные виды (редис, томаты, огурцы, гречиха и капуста) дали наибольшие изгибы в монохроматических излучениях с длиной волны от 410 до 520 мкм.

Проростки редиса, обладающие наибольшим геотропическим эффектом, в нашем опыте совсем не изгибались при длинах волн от 570 до 700 мкм. Аналогичные результаты получились и во втором опыте, где этиолированные проростки подвергались одностороннему цветному освещению. Варьирование спектрального состава излучений в этих опытах достигалось применением соответствующих стеклянных оптических фильтров. Характеристика их дана в табл. 31, посвященной результатам этого опыта.

Мощность лучистых потоков была во всех случаях примерно одинаковой и равнялась 60 вт/м². Источником

света служили лампы накаливания. Одностороннее световое воздействие продолжалось в течение 24 часов, после чего измерялись углы изгиба.

Таблица 31

Влияние спектрального состава излучений на фототропическую и геотропическую активность проростков при одностороннем освещении

Культура	Угол изгиба проростков (градусов) в лучах с длиной волны (мкм)							
	420—500	480—500	520—500	560—500	600—500	660—580	740—3000	860—3600
Подсолнечник	80	50	30	0	0	0	10	0
Редис	80	50	40	0	0	0	10	0
Томаты	80	40	20	20	0	0	40	0
Огурцы	80	50	40	20	20	0	50	0
Капуста	80	70	40	30	30	20	50	20
Гречиха	80	70	40	10	20	30	50	20

Из материалов табл. 31 следует, что у проростков всех видов растений изгибы были наибольшими в тех вариантах, где в световом потоке излучения присутствовали участки спектра с длиной волны от 420 до 500 мкм, т. е. опять-таки сине-фиолетовая часть спектра.

И снова редис и подсолнечник, обладающие наибольшей геотропичностью, не дали изгибов в лучистых потоках, лишенных сине-фиолетового излучения. Такое поведение проростков этих растений особенно любопытно, так как мощность лучистых потоков была во всех случаях достаточно высокой. Отсюда можно сделать заключение о преимущественном значении сине-фиолетовой области спектра для фототропической активности растений и, особенно, для видов, подобных редису и подсолнечнику. Кроме того, значительный интерес представляет наличие фототропических изгибов у проростков всех видов под воздействием ближней инфракрасной радиации.

Последний факт служит еще одним существенным доказательством в пользу представления о ближней инфракрасной радиации как о физиологически активной радиации.

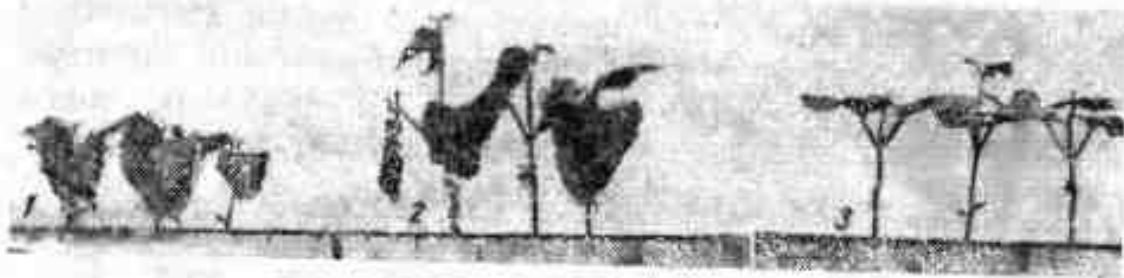


Рис. 46. Проростки фасоли, поставленные после нахождения их в условиях интенсивного белого света в установки с цветным излучением. 1 — красно-оранжевым, 2 — желто-зеленым, 3 — сине-фиолетовым.

В полном соответствии с влиянием отдельных областей спектра на ростовые изгибы находится и воздействие цветного света на опускание листьев растений при переносе их с интенсивного лучистого потока ламп накаливания в условия цветных излучений.

Так, при ежедневном перемещении молодых растений фасоли, начиная с появления всходов, из лабораторной осветительной установки, состоящей из ламп накаливания и водяного фильтра, в определенное время в цветные установки, описанные выше, наблюдалось различное поведение фасоли по опусканию листьев.

При переносе в установку с красно-оранжевым излучением листья фасоли, так же как и в темноте, быстро опускались. В установке с желто-зеленым излучением листья опускались медленнее и не так полно. В условиях сине-фиолетового излучения опускания листьев совершенно не наблюдалось (рис. 46). Опираясь на эти факты, можно предположить, что сине-фиолетовый свет является наиболее активным «раздражителем», определяющим возникновение физиологических процессов, связанных с ростовыми явлениями.

Сравнительно совсем недавно, уже в нашем столетии, начались работы, посвященные выяснению роли спектрального состава света в репродуктивном развитии растений. Одним из первых исследователей этого вопроса был Г. Клебс (1918). Проведя серию опытов с молодым при помощи электрического освещения и специальных фильтров, он пришел к выводу, что наибольшее значение для перехода растений от роста к плодоношению имеют красно-оранжевые лучи.

Сине-фиолетовые лучи, по Клебсу, наоборот, задерживают цветение, вне зависимости от их интенсивности, и даже, больше того, способны уничтожить уже имеющееся «предрасположение» к цветению. Сине-фиолетовые лучи по отношению к переходу растений от роста к цветению являются антагонистами красных.

Клебс же, вероятно первым, высказал мысль, что электрический свет ламп накаливания, благодаря обилию красных лучей, должен быть более благоприятным для заложения цветов, чем диффузный естественный, более богатый сине-фиолетовыми лучами.

Впервые вопрос о значении спектрального состава света в актиноритмической реакции растений был поднят в работе В. И. Разумова, вышедшей в 1930 г.

В основном В. И. Разумов пользовался двумя жидкими светофильтрами — раствором двуххромокалиевой соли, пропускавшей свет с длиной волны от 720 до 540 мк, и раствором медного купороса, дававшего спектр от 570 до 400 мк. Объектом служили злаки и некоторые другие длиннодневные и короткодневные виды. Днем растения находились на естественном освещении, ночью — в фотопериодическом домике, где некоторые из растений получали вместо темноты цветной слабый свет порядка 3—21 лк.

В результате опытов В. И. Разумов пришел к выводу, что красный свет действует в фотопериодической реакции как день, а синий свет как темнота. В. П. Мальчевский (1938), излагая многолетние исследования, проведенные в лаборатории светофизиологии АФИ, не согласился с В. И. Разумовым и указал, что его данные говорят в пользу действия красно-желтого света (от 550 до 700 мк) как ускорителя цветения всех видов, в том числе и короткодневных. Что касается действия сине-фиолетовой части спектра, то оно, по В. П. Мальчевскому, не является равноценным темноте и вызывает задержку в развитии растений. Таким образом, В. П. Мальчевский полагал, что красный участок спектра ускоряет развитие всех растений, а синий, наоборот, задерживает его.

Уисроу (R. W. Withrow) и Бенедикт (H. M. Benedict), применяя в 1936 г. цветной свет в дополнение к естественному в оранжерейных условиях, пришли к выводу, что красный свет ускоряет развитие растений

длинного дня и задерживает цветение растений короткодневных видов, в то время как синий свет ускоряет цветение растений короткого дня и оказывает неодинаковое действие на растения длинного дня — у одних ускоряя, а у других замедляя развитие.

Таким образом, выводы этих американских исследователей были близки к заключению В. И. Разумова.

В том же году появились работы Шаппеля (N. A. Scharpell, 1936), который впервые пытался вырастить опытные растения целиком на цветном свете, но это не удалось из-за слабой его интенсивности, что привело к быстрой гибели растений. Тогда Шаппель, как и другие авторы, перешел к выращиванию растений на комбинированном освещении. В его опытах красный и синий свет, данные в дополнение к белому свету, оказали одинаковое действие на растения длинного дня (редис, шпинат, крепис), на салат же, астру и космос более благоприятное действие оказал красный свет.

В. М. Катунский (1937), прибавляя к 12-часовому дню, создаваемому за счет белого света, по 6 часов относительно монохроматического излучения, констатировал, что красный свет у длиннодневных растений ускоряет, а у короткодневных задерживает цветение. Действие синего света проявляется так же, но в несколько ослабленной степени. Другими словами, В. М. Катунский получил факты, показывающие, что цветной свет на фотопериодическую реакцию растений действует так же, как и белый свет.

В работе Е. Я. Ермолаевой и С. А. Щегловой (1940), проведенной с периллой масличной, цветные источники света несколько задержали ее развитие по сравнению с белым светом.

А. Ф. Клешнин на основании своих опытов 1940—1941 гг. с овсом и периллой масличной отмечает для овса, что все участки видимой области спектра действуют на его фотопериодическую реакцию одинаково, как свет. Таково же его заключение и в отношении короткодневного вида периллы. Световой поток любого спектрального состава, если его мощность превышает $50 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек}$, действует на периллу как естественное освещение (интегральное белое освещение).

Наиболее многочисленные и важные работы по выяснению действия спектрального состава света на пре-

рывание темновой фазы актиноритмической реакции растений провели американские исследователи Бортвик (H. Borthwick), Хендрикс (S. Hendricks) и Паркер (M. Parker). Работая с уникальным монохроматором, они пришли к выводу, что для разрыва темновых процессов наиболее активными являются красные, затем синие, а наименее активными желто-зеленые лучи.

Особняком стоят работы Роденбурга (1939) о значении инфракрасного излучения для получения длиннодневной реакции растений.

Ван дер Вин и Мейер (R. Van der Veen, G. Meijer, 1959) в работе, посвященной значению света в жизни растений, утверждают, что «эффект длинного дня может быть получен путем создания растениям условий длинного дня со светом, содержащим синие или инфракрасные излучения»*.

Естественно, что проблема действия спектрального состава излучений была затронута и в наших исследованиях.

Из старых опытов наибольшего внимания заслуживает факт необычной актиноритмической реакции периллы масличной в условиях освещения ее лучистым потоком натриевых ламп, состоящих только из желтых лучей.

При выращивании периллы в течение 30 суток в лучистом потоке натриевой лампы, горевшей по 14 часов в сутки, перилла осталась в вегетативном состоянии, хотя обычно эта длина дня способствует быстрому переходу ее от роста к воспроизведению. Очевидно, что в этом случае желтый свет (по 14 часов в сутки) задержал репродуктивное развитие масличной периллы. При выращивании периллы в таком же излучении натриевой лампы, но на 10-часовом дне, она перешла к цветению в нормальный срок.

Интересные опыты с масличной периллой проводила под руководством автора М. В. Чулановская. В качестве источника радиации были использованы лампы накаливания, одинаковые по мощности и напряжению. Для выделения различных областей спектра применялись специально изготовленные пленочные светофильтры. Ха-

* Р. Ван дер Вин, Г. Мейер. Свет и рост растений. Пер. с англ., Сельхозгиз, 1962, стр. 123.

рактор их цвета определяли следующие красители: для красно-оранжевого — фильтровый красный, для зеленого — основание зеленого кислотного антрохинонового + + кислотный зеленый + желтый жирорастворимый, для сине-фиолетового — целлитон прочносиний ФФР. Красители были получены от проф. Б. А. Порай-Кошица. Сначала производилась окраска ацето-бутират-целлюлозной массы, а затем уже из окрашенной массы изготовлялись пленки. С помощью такой же технологии можно добиться более равномерного распределения красителя, чем при окрашивании готовых пленок. Спектральные характеристики пропускания описанных светофильтров были получены для видимой области на спектрофотометре СФ-4 (рис. 47) и для ближней инфракрасной — на инфракрасном спектрофотометре (рис. 48).

Пропускание цветных пленок в инфракрасной области практически одинаково и, по-видимому, зависит от пропускания бесцветной основы. Поэтому несомненно, что та часть ближней инфракрасной радиации, которая пропускается водяным экраном, составляет примерно одинаковый процент в разных камерах с «цветными» пленками. Измерения с марблитовым фильтром показали, что содержание инфракрасной радиации в установках цветного и белого света примерно равно и составляет около 40% от общего светового потока. Измерения мощностей лучистых потоков производились во всех случаях

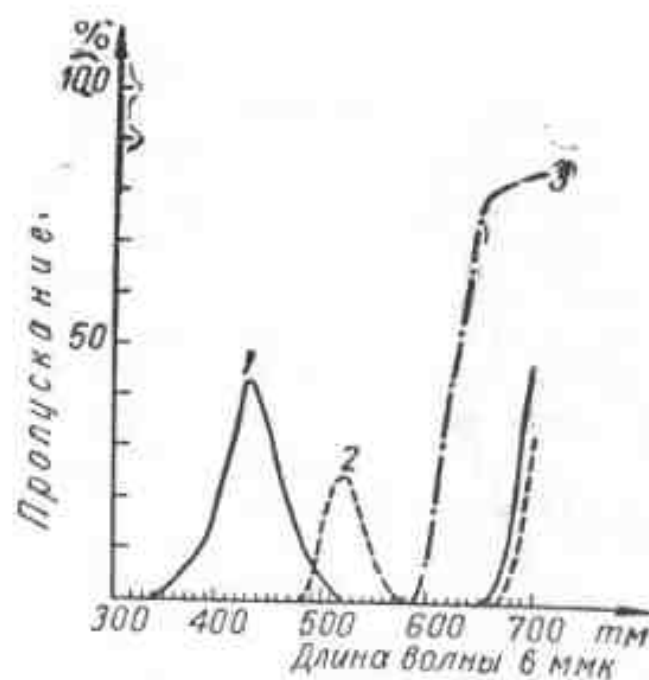


Рис. 47. Спектральная характеристика цветных пленок в видимой области.
1 — сине-фиолетовой, 2 — зеленой, 3 — красно-оранжевой.

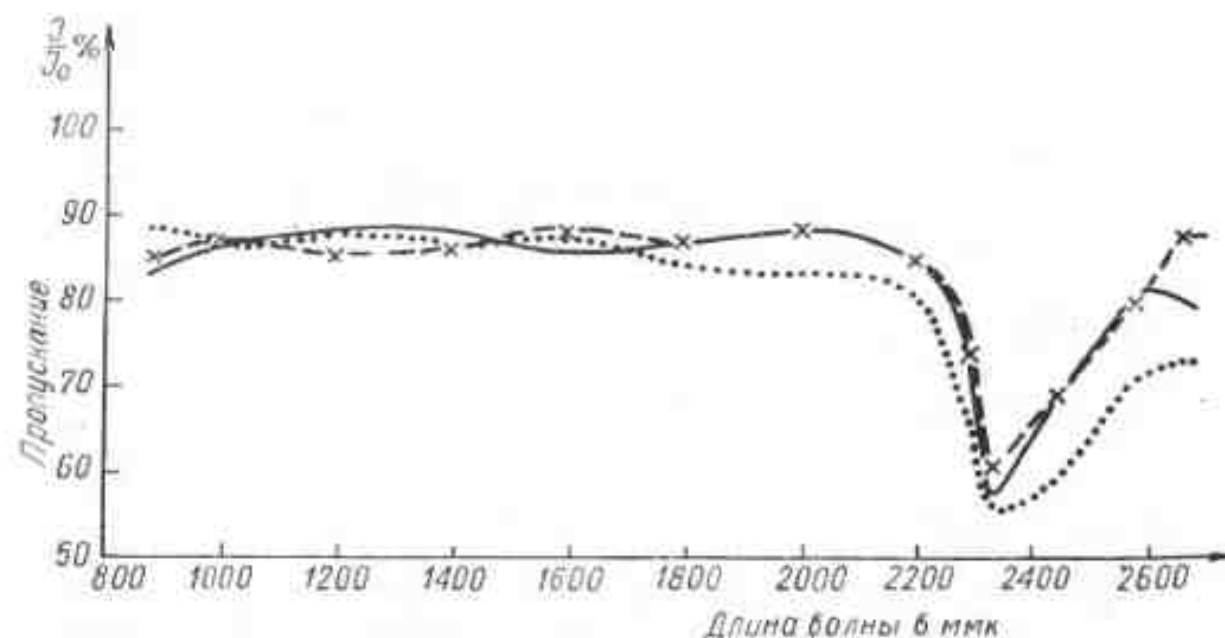


Рис. 48. Спектральная характеристика цветных пленок в ближней инфракрасной области.

сплошная линия — сине-фиолетовая пленка, пунктирная — красно-фиолетовая, точечная — зеленая.

пиранометром Янишевского и выражались в ваттах на квадратный метр.

В данных исследованиях вместо желто-зеленой радиации была использована зеленая радиация с диапазоном длин волн от 490 до 570 ммк. К сожалению, без натриевых ламп и при наличии описанной выше пленки нам не удалось получить желтого излучения, а также и смешанного — желто-зеленого.

Опыты проведены с масличной периллой (*Perilla osymoides*) сорта «Новинка». В одном опыте от посева, в течение 1—1,5 месяцев, растения выращивались при неблагоприятной для развития длине дня (непрерывное освещение) на свету люминесцентных ламп дневного света (ДС). Мощность лучистого потока на уровне вершин растений составляла 20—25 вт/м², температура воздуха — 20—22°С. По мере роста растений рамки с люминесцентными лампами поднимались.

Через 30 суток растения периллы были помещены на 20 дней в установки с цветным светом в актиноритмический режим с 8-часовым днем и 16-часовой ночью, т. е. в условия, вызывающие переход периллы от роста к воспроизведению. Цветная пленка помещалась под стеклянным дном установки, по которому непрерывно протекал слой воды толщиной около 20 мм. Через 20 дней

все растения периллы были помещены вновь на непрерывное освещение лучистым потоком люминесцентных ламп, где они и находились до конца опыта. Результаты наблюдений за репродуктивным развитием периллы даны в табл. 32.

Таблица 32

Актиноритмическая реакция масличной периллы в зависимости от спектрального состава света

(возраст к началу фотопериодического воздействия — 1 месяц, длительность воздействия — 20 дней, длина дня — 8 часов)

Мощность лучистого потока (вт/м ²)	Продолжительность наблюдений от начала фотопериодической индукции (месяцев)	Спектральные условия освещения					
		белый свет (контроль)	красно-оранжевый		зеленый		сине-фиолетовый
		число дней до закладывания зачатков соцветий	число дней до закладывания зачатков соцветий	задержка по сравнению с контролем (дней)	число дней до закладывания зачатков соцветий	задержка по сравнению с контролем (дней)	число дней до закладывания зачатков соцветий
25	3	30	44	14	68	38	54
50	2	22	31	9	56	34	39
100	2	19	23	4	45	26	29
250	1,5	19	22	3	31	12	27

Физиологические процессы, приведшие масличную периллу к цветению, прошли за 20 суток на 8-часовом дне во всех цветных лучистых потоках: красно-оранжевом, зеленом и сине-фиолетовом. По сравнению с белым светом той же мощности всюду в цветном свете наблюдалась задержка в сроках появления бутонов. Наименьшими эти задержки были у растений, находившихся на коротком дне в условиях красно-оранжевого излучения, и наибольшими — в условиях зеленого участка спектра. Сине-фиолетовое излучение дало промежуточные результаты. Таким образом, зеленое излучение, не устраняя возможности прохождения процессов онтогенеза, приводящих периллу к цветению, оказалось менее активным по сравнению с красно-оранжевым и сине-фиолетовым. По мере возрастания мощности лучистого пото-

ка различие в действии цветного света начинает сглаживаться и, вероятно, при какой-то определенной, достаточно высокой мощности, что-нибудь около 400 вт/м², будет совершенно одинаковым. Что касается сравнительно невысоких мощностей цветного излучения, то к эффекту белого света полнее всего приближается действие красно-оранжевого излучения.

В задачу другого опыта входило выяснение действия цветного света во время роста периллы в условиях непрерывного освещения на последующее восприятие короткого дня.

В этом опыте растения масличной периллы в течение 45 дней после всходов выращивались в условиях непрерывного излучения, красно-оранжевого и зеленого. Мощность лучистого потока была на уровне 50 вт/м². Затем все растения из цветных установок были помещены на 20 дней в условия 8-часового дня, созданного за счет лучистого потока люминесцентных ламп (ДС-30) мощностью 25 вт/м². После окончания короткодневного воздействия растения периллы до конца опыта находились в условиях непрерывного освещения лучистым потоком ламп накаливания (прошедшего через водяной фильтр) мощностью в 150 вт/м². Основные результаты опыта показаны в табл. 33.

Таблица 33

Влияние предварительных условий выращивания на актиноритмическую реакцию периллы

Спектральные условия освещения	Число дней до закладывания зачатков соцветий	К началу актиноритмического воздействия		Число репродуктивных органов через 50 дней от начала актиноритмического воздействия		
		число пар листьев	высота (см)	общее	в том числе	
					бутонов	коробочек
Белый свет (контроль)	14	6	25,6	30	22	8
Красно-оранжевый	22	4	28,5	18	10	8
Зеленый	26	2	8,6	11	11	Нет

Как и следовало ожидать, под воздействием 20 коротких дней все растения масличной периллы перешли к репродукции, но чем слабее были растения в момент

переноса их на короткий день, тем медленнее осуществлялось их цветение и плодоношение.

Во всех последующих опытах работа проводилась с декапитированными растениями масличной периллы, на каждом из которых оставались побег и 1—2 верхних листа. В таком виде растения поступали в опыт.

В опытах этой серии были использованы «спектральные» камеры размером $10 \times 10 \times 1$ см, служившие светофильтрами и изготовленные из описанной выше цветной пленки. Для контроля использовались камеры из бесцветной пленки. Камеры были открыты с двух торцовых сторон. Со стороны верхушки листа к ней приваривался косо расположенный козырек из пленки того же цвета, фильтрующий свет, но не ограничивающий доступ воздуха. Черешок у основания листа обертывался ватой во избежание попадания в камеру нефильтрованного света.

Перед началом опыта на листья растений надевались цветные камеры, которые держались на подставках (рис. 49). Короткодневному воздействию листья подвергались путем помещения их на «ночь» в светонепроницаемые конверты (черные внутри и белые снаружи), которые надевались на спектральные камеры и закреплялись у основания листа скрепками. Пазушные побеги с точками роста находились все время на непрерывном освещении, причем все вновь появляющиеся на них листья удалялись.

Для работы использовали осветительные установки из ламп накаливания (16 — по 200 вт и 16 — по 300 вт) и водяного фильтра. На «ночь» растения оставались в тех же осветительных установках, только подъемный пол опускался во избежание перегрева листьев. Для лучшего использования света внутри установок последние снабжались раздвижными белыми шторами.

По окончании актиноритмического воздействия с листьев снимались пленочные камеры и растения оставлялись в тех же осветительных установках из ламп накаливания и водяных фильтров с мощностью лучистого потока 150 вт/м^2 при непрерывном освещении.

Наибольшее количество опытов было посвящено изучению влияния спектрального состава света на актиноритмическую реакцию масличной периллы в зависимости от продолжительности периода ежесуточного освеще-

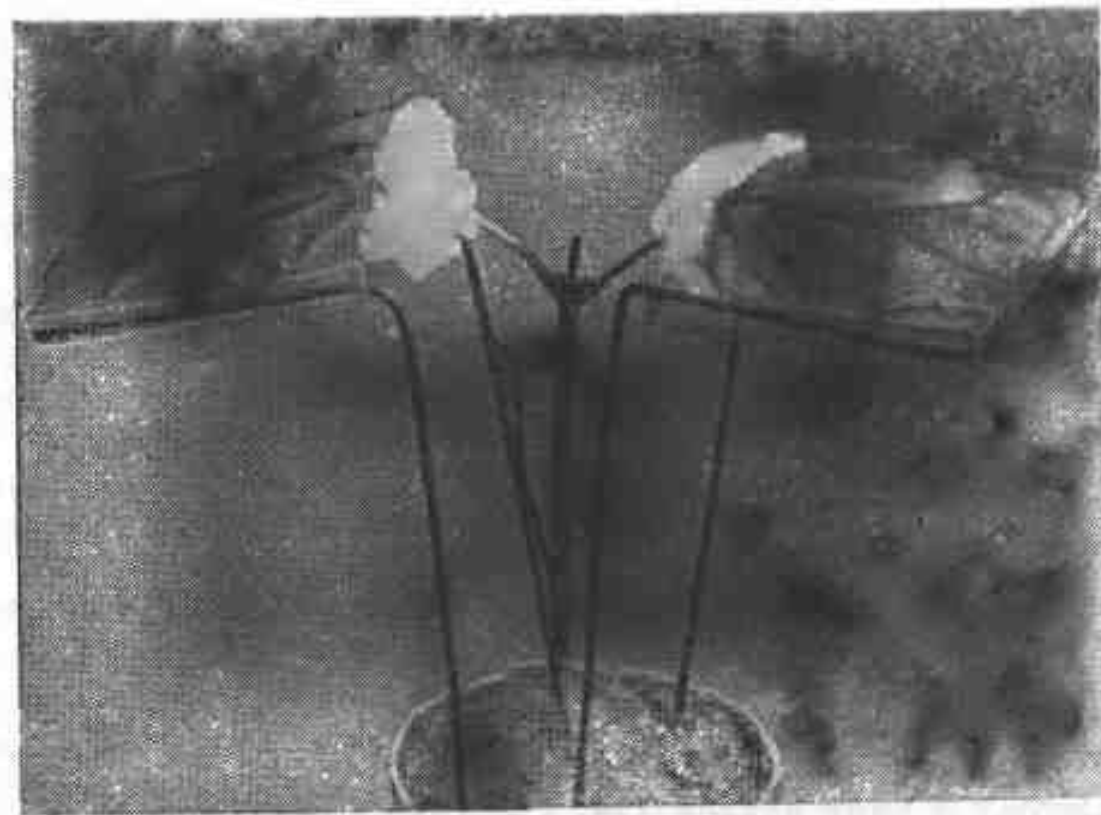


Рис. 49. Растение периллы масличной из опытов с актиноритмическим воздействием цветным светом на отдельные листья.

щения и мощности лучистого потока. Основным показателем реакции опытных растений являлась скорость их перехода от роста к заложению цветочных зачатков.

При мощности лучистого потока 100 вт/м^2 перилла раньше зацвела и дала наибольшее количество семян (табл. 34) в условиях белого освещения по 13 часов в сутки (при 35-дневном воздействии коротким днем). Почти такие же результаты получились в красно-оранжевом излучении в аналогичных условиях. При облучении периллы сине-фиолетовым излучением для достижения подобных результатов потребовалось увеличение мощности излучения до 250 вт/м^2 .

В зеленом излучении мощностью 250 вт/м^2 при оптимальной длине светлой части суток 13 часов бутоны появились с опозданием на 4 дня, а количество семян к концу опыта оказалось в семь раз меньше, чем в других вариантах опыта. Любопытно, что только в зеленом излучении продолжительность дня в 14,5 часов оказалась непригодной для перехода периллы от роста к плодоношению (невольно возникает мысль о сходстве причин,

вызвавших данное явление, как в этом случае, так и в опыте, где перилла масличная находилась на 14-часовом дне за счет натриевого (желтого) излучения и также осталась в вегетативном состоянии).

Общим выводом из результатов данных опытов является очевидность значения для никтофильных видов растений не только ночного периода суток, но также и характера света (его спектра и интенсивности) в течение дня.

Таблица 34

Влияние спектрального состава света на актиноритмическую реакцию листьев периллы масличной

Спектральные условия освещения	Мощность излучения (вт/м ²)	Длина дня (часов)	Количество коротких дней, полученных листьями	Дней до появления цветочных зачатков	Общее количество репродуктивных органов
Белый свет (контроль)	100	8	20	26	0
	100	13	35	22	155
	100	14,5	35	27	75
Красно-оранжевый	100	8	20	28	0
	100	13	35	23	142
	100	14,5	35	33	16
Зеленый	100	8	20	Вегет.	0
	100	13	35	35	6
	100	14,5	35	Вегет.	0
	250	8	20	31	0
	250	13	20	27	18
Сине-фиолетовый	100	8	20	Вегет.	0
	100	13	35	27	19
	100	14,5	35	33	12
	250	8	20	27	0
	250	13	20	23	143

Подбирая для каждого излучения, различного по спектру, соответствующие продолжительности освещения и мощности лучистых потоков, можно, вероятно, получить нормальное развитие периллы в любых спектральных условиях.

Еще в одном опыте у растений периллы было оставлено также по два листа из 4-й пары, считая от семядолей. Оба листа получили короткий 8-часовой день в те-

чение 20 суток за счет лучистого потока мощностью 100 вт/м² по следующей схеме: 1-й вариант — один лист в белом, второй в красно-оранжевом излучении; бутоны появились на 28-е сутки, т. е. в тот же срок, что и у растений с 2 листьями в красно-оранжевом освещении;

2-й вариант — один лист в белом, второй лист в зеленом излучении; бутоны появились на 58-е сутки; в том случае, когда в зеленом излучении были оба листа, бутонов не было и за 100 суток;

3-й вариант — один лист в белом, второй в сине-фиолетовом излучении, бутоны появились через 48 дней после начала короткодневного воздействия.

Таким образом, листья, получавшие 20 коротких дней зеленого и синего излучений, сильно задерживали воздействие на точки роста листьев, получающих белый свет. В этом случае «зеленый» и «синий» листья оказывали противодействие «белому» листу почти в такой же степени, как листья, находящиеся на непрерывном освещении. В других вариантах, где воздействие 8-часовым днем было доведено до 30 суток, листья, получавшие зеленый и сине-фиолетовый свет, не задержали воздействие листа, получавшего белое излучение.

Очевидно, за 30 суток в зеленом и сине-фиолетовом излучении, даже при 8-часовом дне, листья периллы стали актиноритмически активными.

Заслуживают внимания результаты еще одного опыта с масличной периллой. Растения до 45-дневного возраста находились на непрерывном освещении люминесцентными лампами. Затем у них был оставлен только один лист и одна точка роста. В таком состоянии они получили 20 восьмичасовых дней в белом свете мощностью около 100 вт/м². По окончании актиноритмического воздействия у опытных растений были удалены оставленные ранее побеги и на их место привиты новые с растений, росших все время в условиях непрерывного освещения. После прививки растения находились на непрерывном освещении, причем у растений одной группы лист получал белый, у другой — зеленый и у третьей — сине-фиолетовый свет. Привои, под воздействием листьев, получавших короткий день, дали бутоны при нахождении листа в белом свете через 50 дней, в сине-фиолетовом свете — через 60 дней, а в зеленом бутоны так и не появились до конца опыта, продолжавшегося 80 суток

после прививки. Таким образом, зеленый свет оказывается наименее активным во все периоды жизни масличной периллы.

Вполне достоверные результаты получены и в опытах с другим короткодневным видом, также периллой, но краснолистной (*Perilla pampinensis*). До начала опыта растения выращивались на непрерывном люминесцентном освещении, а затем на 20 суток были поставлены в условия коротких дней при различном спектре и мощности излучений. Результаты опыта даны в табл. 35.

Таблица 35

Зависимость цветения красной периллы от спектра излучения

Мощность лучистого потока (вт/м ²)	Длина дня (часов)	Условия спектрального освещения и число дней до появления бутонов			
		белый свет	красно- оранжевый	зеленый	сине- фиолетовый
75	8	16	20	65	35
100	11	16	16	26	18
300	8	16	20	32	25

Наиболее активным для осуществления репродуктивного развития красной периллы является белый свет, т. е. полный спектр видимого излучения. Столь же активным оказывается и красно-оранжевое излучение при 11-часовом дне и мощности лучистого потока 100 вт/м². Наименее активным является зеленое излучение. Характерно, что в случае любого цветного света лучшие результаты получались в условиях 11-часового дня при сравнительно невысокой мощности излучения (100 вт/м²).

Кроме двух видов периллы, в опытах с цветным светом были еще два никтофильных растения: Абельмош и Крупноцветная индийская хризантема. Оба эти вида цвели только в том случае, если при мощности излучения 50—80 вт/м² в течение короткодневного периода получали белый и красно-оранжевый свет.

По-видимому, для масличной периллы столь же, а может быть и более активным по сравнению с красно-оранжевым излучением является и желтый свет. Это заключение напрашивается из результатов опытов как с

натриевым светом, о чем говорилось выше, так и при воздействии на периллу желто-зеленым излучением.

Желто-зеленое излучение выделялось при помощи цветных стекол из радиации 1000-ваттных ртутно-кварцевых ламп. Другие растения периллы для сравнения выращивались в красно-оранжевом излучении, выделенном при помощи красного стекла из лучистого потока маячной неоновой лампы, и в сине-фиолетовом излучении, полученном путем устранения из спектра 1000-ваттных ртутно-кварцевых ламп (при помощи синих стекол) желтой и зеленой радиации. Подробнее данные цветные установки описаны в начале главы. Мощность лучистого потока во всех цветных установках во время опыта составляла 16 вт/м². В течение первых 30 суток масличная перилла выращивалась в условиях непрерывного освещения лучистыми потоками люминесцентных трубок или ламп ДРЛ. Затем они получали 10—15—20 коротких 12- или 14-часовых дней за счет цветного излучения, после чего вновь переносились в прежние световые условия.

После получения 20 коротких дней бутоны появились почти одновременно у всех растений. Запоздывание на 2—3 дня наблюдалось лишь у некоторых растений, бывших на коротком дне в условиях сине-фиолетового излучения. Но при получении 15 и тем более 10 коротких дней в различных по спектру световых условиях растения периллы, находившиеся в установках с сине-фиолетовой радиацией, сильно отставали по срокам бутонизации (на 12, 15 и даже 20 дней) от растений, находившихся в течение тех же периодов времени в красно-оранжевом и желто-зеленом излучении.

Таким образом, типичное никтофильное растение — масличная перилла — в случае малых 10—16 вт/м² лучистых потоков во время короткодневных индуктивных периодов лучше всего использует желтую, оранжевую и красную радиацию с λ до 670 мкм, несколько хуже синюю и фиолетовую и всего хуже чисто зеленую.

Иные результаты наблюдались при исследовании действия спектрального состава света на Абиссинскую капусту (*Brassica carinata*) *. Этот дикорастущий вид

* Опыты по действию спектрального состава света на периллу и абиссинскую капусту проводились Н. И. Плотниковой совместно с автором.

является эндемиком Эфиопии и, следовательно, на родине живет в условиях коротких дней, длина которых не превышает 13—14 часов. Однако в условиях Ленинграда и в наших лабораторных опытах этот вид оказывается типичным никтофобным растением. Быстро переходя к цветению в условиях непрерывного освещения, Абиссинская капуста не цветет в условиях 14—15-часового дня.

В опытах, где цветной свет выделялся из спектра ламп накаливания при помощи цветных пленок, Абиссинская капуста скорее всего зацветала, если в течение периода облучения непрерывным светом находилась в условиях сине-фиолетового, а не красно-оранжевого излучения.

В этих опытах, до начала и после воздействия цветным светом, растения находились на 14-часовом дне в лучистом потоке люминесцентных трубок, где они не цветут даже и на непрерывном освещении.

Действию цветного света, и для контроля белого, Абиссинская капуста подвергалась в возрасте 40—45 дней в течение 15 суток непрерывно. При этом варьировалась мощность излучения, составлявшая 55, 80 и 200 $вт/м^2$. Результаты опыта представлены в табл. 36.

Таблица 36

Влияние спектрального состава света на актиноритмическую реакцию Абиссинской капусты

Мощность лучистого потока ($вт/м^2$)	Длина дня (часов)	Условия спектрального освещения и число дней до появления бутонов			
		белый свет	красно-оранжевый	зеленый	сине-фиолетовый
55	24	10	48	Вегет.	22
80	24	9	45	Вегет.	23
200	24	9	17	18	13

Абиссинская капуста, так же как и все испытанные нами виды, скорее всего приходит к репродуктивному развитию в условиях белого света, сопровождаемого ближней инфракрасной радиацией. Из спектра видимой радиации для Абиссинской капусты наиболее активным

является сине-фиолетовый, а наименее активным зеленый участок.

Воздействуя на растения Абиссинской капусты цветным светом, нам удалось показать принципиальное отличие ее актиноритмической реакции от реакции типичного короткодневного растения — периллы. У периллы любой свет, вне зависимости от его спектрального состава, разбивает течение активных темновых процессов и тем самым задерживает переход от роста к воспроизведению.

Иное явление наблюдается для Абиссинской капусты. После получения 10 часов белого света в мощной осветительной установке растения Абиссинской капусты переносились в установки с цветным светом, описанные в начале этой главы (газоразрядные лампы и стеклянные фильтры), на остальные 14 часов.

Результаты одного из таких опытов представлены в табл. 37.

Таблица 37

Результаты комбинированного воздействия на Абиссинскую капусту белым и цветным светом в течение суток

Варианты опыта	Состояние растений	Число дней до бутонизации	Прирост сухого вещества за сутки (мг)
Белый свет непрерывно	Плодоношение . .	14	50
Белый свет 10 час., затем темнота 14 час.	Вегетативное . . .	—	134
Белый свет 10 час., затем красно-оранжевый свет 14 час.	Цветение	34	70
Белый свет 10 час., затем желто-зеленый свет 14 час.	Вегетативное . . .	—	71
Белый свет 10 час., затем сине-фиолетовый 14 час.	Цветение	31	51

Примечание. Белый свет давался во всех вариантах мощностью 300—400 $вт/м^2$, цветной — 20 $вт/м^2$.

В этом случае желто-зеленое (а не просто зеленое) излучение в отличие от красно-оранжевого и сине-фиолетового, заменяя 14-часовую темноту, не обеспечило

условий, необходимых для цветения Абиссинской капусты в нормальные сроки. Этот факт, помимо свидетельства о меньшей активности желто-зеленого излучения по сравнению с красным и синим, позволяет также сделать вывод, что переходу Абиссинской капусты к цветению на коротком дне мешает не темнота как таковая, а недостаток лучистой энергии в определенной области спектра.

Именно поэтому, в том случае, когда точно такой же цветной свет дается в дополнение к люминесцентному освещению, Абиссинская капуста остается в вегетативном состоянии. При облучении лучистым потоком любых люминесцентных трубок непрерывно в течение 100 суток Абиссинская капуста не цветет. Этот свет, очевидно, несет мало энергии и, возможно, неподходящ по спектральному составу. Чередую 12 часов люминесцентного света с 12 часами красно-оранжевого, желто-зеленого и сине-фиолетового излучений, мы ни разу не наблюдали перехода Абиссинской капусты от вегетации к плодоношению.

Для более полного представления о значении спектрального состава света для онтогенеза Абиссинской капусты следует остановиться на результатах выращивания ее в лучистых потоках различных электрических ламп.

Выше уже отмечалось, что Абиссинская капуста не переходит к цветению в условиях люминесцентного освещения, что может быть объяснено главным образом его малой мощностью. Действительно, в лучистом потоке ламп ДРЛ, которые по спектру очень близки к люминесцентным трубкам, но обладают значительно большей мощностью излучения, Абиссинская капуста, хотя и поздно, но переходит к репродукции. В этом случае значительное запаздывание в ее цветении уже нельзя связать с малой мощностью света, и, вероятно, причиной этого является спектр излучения, почти лишенный ближней инфракрасной радиации.

В лучистом потоке ламп ПРК-7, прошедшем через оконное стекло и воду, растения Абиссинской капусты зацветают скорее, чем в лучистом потоке ламп ДРЛ, но также несколько запаздывают по сравнению с наиболее ранними сроками цветения. В спектре этих ламп имеется энергия в синей области, но также нет ближ-

ней инфракрасной в интервале между длинами волн от 700 до 900 мкм.

В красно-оранжевом свете маячной неоновой лампы, профильтрованного через воду, при мощности излучения около 80 Вт/м² растения Абиссинской капусты остаются в вегетативном состоянии. За 90 суток выращивания при непрерывном освещении они давали свыше 12 г сухой растительной массы, но не переходили к бутонно-образованию.

Так как в свете неоновых ламп нет сине-фиолетового излучения, можно было думать, что это и является причиной задержки развития Абиссинской капусты. Однако устранение сине-фиолетового излучения из лучистого потока ламп накаливания при помощи красного стеклянного фильтра не задерживало цветения Абиссинской капусты при непрерывном облучении и мощности лучистого потока 140—150 Вт/м². Следовательно, возможной причиной нецветения Абиссинской капусты в неоновом излучении может быть отсутствие в нем ближней инфракрасной радиации.

Наконец, особенно интересны результаты выращивания Абиссинской капусты в лучистом потоке зеркальных ламп накаливания, лишенном красной и ближней инфракрасной радиации. Прежде чем попасть на растение лучистый поток профильтровывался через проточную воду слоем в 50 мм (имевшую постоянную температуру 22—25°) для охлаждения стеклянного потолка установки. Под основной водяной фильтр помещались дополнительные фильтры в одном случае с дистиллированной водой (контроль), а в другом с 2-процентным раствором хлорной меди (CuCl₂).

В установке с дополнительным фильтром из хлорной меди была использована 500-ваттная зеркальная лампа, а в установке без цветного фильтра зеркальная лампа в 300 ватт. В результате мощность лучистого потока у вершин растений в обоих случаях была равной и составляла 160—180 Вт/м².

Спектральный состав излучения в обеих установках отличался так, как это показано в табл. 38.

Освещение в обоих случаях было непрерывным. Поэтому в осветительной установке без цветного фильтра Абиссинская капуста хорошо росла и быстро зацветала. В установке же с цветным фильтром растения

Абиссинской капусты в течение 90—100 суток оставались вегетативными, как всегда в случае неперехода к цветению имели сближенные междоузлия и поэтому низкий, сильно облиственный стебель 25 см высоты.

Обработка растений Абиссинской капусты гиббереллином в установке с фильтром из хлорной меди привела к сильному — до высоты 70 см — росту стебля, но не вызвала цветения.

Таким образом, изменение спектра излучения ламп накаливания, приведшее к переносу всей энергии лучистого потока в сине-зеленую часть видимой области и полному выключению ближней инфракрасной радиации, явилось причиной вегетативного состояния Абиссинской капусты в условиях непрерывного освещения вполне достаточной мощности.

Очевидно, Абиссинская капуста для перехода от роста к воспроизведению нуждается в свете, включающем в себя ближнюю инфракрасную радиацию. В этом отношении она ведет себя как типичное длиннопдневное растение по характеристике Ван дер Вина и Мейера.

Таблица 38

Спектральное распределение энергии в лучистых потоках зеркальной лампы накаливания с цветным и водным фильтрами

Участок спектра (мкм)	Энергия (в процентах к общей) лучистого потока		Участок спектра (мкм)	Энергия (в процентах к общей) лучистого потока	
	без цветного фильтра	с фильтром из цветного раствора		без цветного фильтра	с фильтром из цветного раствора
400—500	3,2	23,4	800—900	24,1	0
500—600	8,4	55,5	900—1000	7,8	0
600—700	15,4	20,5	1000—1100	12,2	0
700—800	19,7	0,6	1100	9,2	0

Любопытно, что ближняя инфракрасная радиация, данная сама по себе взамен темноты, не вызывает цветения Абиссинской капусты в условиях короткого дня.

Следовательно, для цветения Абиссинской капусты необходимо сочетание ближней инфракрасной радиации с другими участками видимого спектра.

Таким образом, для репродуктивного развития Абиссинской капусты основное значение имеет белый свет, включающий в себя ближнюю инфракрасную радиацию.

Что касается отдельных участков видимой радиации, то здесь очевидно преимущество сине-фиолетового излучения для развития Абиссинской капусты.

Достовернее всего это положение вытекает из опытов, в которых растения Абиссинской капусты в течение индукционного периода находились на непрерывном освещении в различных цветных установках, состоящих из газоразрядных ламп (ртутных и неоновых) и цветных стекол, т. е. в тех же установках, где проводились аналогичные опыты с периллой. Растения Абиссинской капусты в течение двух недель от начала появления всходов выращивались на 12-часовом дне в осветительной установке, состоящей из зеркальных ламп накаливания и водяного экрана. Затем они ставились на 5, 10 и 15 суток в условия непрерывного освещения цветным светом. После завершения цветного облучения все растения Абиссинской капусты вновь переносились на 12-часовой день в осветительную установку из ламп накаливания и водяного фильтра. Наблюдения за всеми опытными растениями велись в течение 80 суток после конца индукции.

За этот длинный период перешли к цветению только те растения, которые получали непрерывное освещение за счет сине-фиолетовой радиации. Все остальные растения до конца опыта оставались вегетативными.

Признание ведущей роли сине-фиолетового излучения в направлении процессов репродуктивного развития позволяет понять, почему Абиссинская капуста у себя на родине и в лабораторных условиях нуждается в различных актиноритмических режимах.

На родине, в Эфиопии, лежащей между экватором и 15° северной широты, капуста всегда находится в условиях коротких дней, не превышающих 13 часов в сутки. Это значит, что в естественных условиях она является настоящим короткодневным видом, а если бы не была

им, то не могла бы быть эндемическим видом Эфиопии. Однако в северных и искусственных условиях она ведет себя как настоящее длиннодневное растение и не цветет не только на 12-часовом дне, но даже и в условиях 15-часового освещения. Выходит, что один и тот же вид растений не всегда может довольствоваться одинаковыми продолжительностями ежесуточных освещений.

В чем же причина этого явления? Ранее для ответа на этот вопрос выдвигался целый ряд более или менее правдоподобных предположений, сводящихся не к действию самого света, а к влиянию окружающей растении среды.

Теперь, после ряда наших опытов, есть все основания утверждать, что основная причина кроется в самом лучистом потоке. Прежде всего было показано, что с возрастанием мощности лучистого потока появляется возможность использования капусты более коротких дней.

Кроме того, после опытов с выяснением влияния на развитие Абиссинской капусты качества света логично и в этом видеть причину неодинаковых актиноритмических потребностей одного и того же растительного вида в различных условиях освещения. Ведь в Эфиопии и тропиках вообще, особенно в горах, где растет этот вид, синефиолетовой радиации в абсолютных величинах больше, чем, например, под Ленинградом. Естественно, что там за более короткий день, чем в Ленинграде, Абиссинская капуста может усвоить синего света в количестве, достаточном для нормального развития. Под Ленинградом этой радиации меньше, и потому для цветения в тот же срок, что и на родине, капуста нуждается в более длинном дне.

Все изложенные выше факты показывают несомненное влияние качества света на развитие растений, но не дают права, равно как и литературные данные, сделать какие-либо окончательные заключения, касающиеся всех видов растений.

Действие лучистой энергии на растения многообразно, поэтому, говоря о значении спектрального состава света, нельзя сводить его роль к одному какому-нибудь физиологическому процессу, хотя бы такому важному, как фотосинтез.

ВЛИЯНИЕ НА РАСТЕНИЯ ИНФРАКРАСНОЙ РАДИАЦИИ

Принято считать, что из спектра солнечного излучения, доходящего до поверхности земли, необходимой для жизни растений является лишь узкая область, видимая человеческим глазом.

К чести русской науки, первым, понявшим неправильность такого взгляда на значение для растений солнечного излучения, был К. А. Тимирязев. Именно он ввел в ботаническую литературу общее понятие о лучистой энергии, включая в него не только видимую область солнечного излучения, но также и открытые в начале XIX в. инфракрасную и ультрафиолетовую радиации. При этом он указал, что эти области излучений, вызывающие обычно тепловые и химические явления, могут быть существенны для растений как сами по себе, так и во взаимодействии со светом.

Будучи всегда последовательным в своих взглядах и заключениях, К. А. Тимирязев допускал участие инфракрасной радиации даже в процессе фотосинтеза.

К сожалению, многие авторы (забывая, что растения не хлорофилл) судят о значении для растений спектрального состава лучистой энергии только на основании спектрального поглощения различных растворов хлорофилла, которое обрывается в красной области. Однако еще в работе Ван-Гулика (D. Van Gulik, 1915) было показано, что препараты хлорофиллов а и b обладают способностью поглощения в инфракрасной области спектра.

В 1918 г. Уршпрунг (A. Ursprung) наблюдал накопление крахмала под воздействием только одной инфракрасной радиации. Наконец, в 30-х годах роли инфракрасной радиации в фотосинтезе много внимания уделил А. Н. Данилов. На основании своих исследований он считал, что ближней инфракрасной радиации, по-видимому, принадлежит определенное значение в области, близко соприкасающейся с механизмом фотосинтеза. Во всяком случае, от прибавления инфракрасной радиации к видимой он наблюдал увеличение продуктивности единицы света в светопотоках, состоящих из красных и сине-фиолетовых лучей.

К положительной оценке роли инфракрасной радиации в жизни растений позже А. Н. Данилова пришли и некоторые зарубежные авторы. Так, например, в 1940 г. появилась работа Пиршла и Веттштейна (K. Pirschle and F. Wettstein), в которой они прямо указывали, что присутствие в спектре излучения искусственных источников инфракрасной радиации вызвало положительный эффект при культуре многих растений. Последний заключался, прежде всего, в значительном увеличении сырой и сухой растительной массы и в повышении процента выхода сухого вещества. Другими словами, в опытах названных авторов инфракрасная радиация повышала урожайность некоторых культур (например, томатов и кукурузы).

В соответствии с данными Пиршла и Веттштейна находятся результаты исследований Ноддека и Эйхгофа (W. Noddack and H. Eichhoff), показавшие, что квантовый выход хлореллы остается высоким даже при длине волны 832,5 мкм.

Выше уже упоминалось, что Роденбург еще в 1939 г. установил значение инфракрасной радиации для выявления растениями длиннодневного актиноритмического эффекта.

Несколько позже Ульрих (H. Ullrich, 1942) высказал предположение, что инфракрасная радиация играет специфическую роль в процессах созревания растений и потому необходима для их нормального развития.

Столь же часто указываются и отрицательные эффекты, будто бы вызванные инфракрасной радиацией. В работе С. И. Доброхотовой (1938) отмечается, что обилие тепловых лучей (инфракрасных) вызывает перегрев растений и, как результат этого, их вытягивание.

Таким образом, в оценке роли инфракрасной радиации для растений не было и нет единого мнения. Господствовало же представление о ненужности и даже вреде ее. Оно не прошло бесследно для практики растениеводства закрытого грунта, сказавшись на отрицательной оценке ламп накаливания как источника освещения растений.

Естественно возникла необходимость более подробного знакомства с ролью инфракрасной радиации в жизни растений. Этот вопрос имеет не только познава-

тельное значение, но важен и для практики выращивания растений при искусственном освещении.

Нашими опытами было показано, что вытягивание растений, наблюдавшееся при электрическом освещении, вызывается не инфракрасной радиацией, а просто недостатком лучистой энергии, в том числе и инфракрасной.

На рис. 50 представлена фотография двух 20-дневных растений томатов сорта Пушкинский 1853. Оба они выращены полностью на электрическом освещении за счет интегральных потоков лучистой энергии ламп накаливания. Температура воздуха, условия питания и уход в обоих случаях были одинаковы. К моменту фотографирования первое растение достигло высоты 48 см и образовало 8 листьев. Второе растение при том же количестве листьев имело высоту 11 см. Следовательно, длина среднего междоузлия в первом случае равна 6 см, а во втором — только 1,3 см.

Первое растение, выращенное в лучистом потоке мощностью 150 Вт/м², имело по сравнению со вторым сильно вытянутые междоузлия, что и является обычным для культуры томатов при электрическом освещении. О нем можно сказать, что оно вытянуто. А так как до 90% всякого интегрального потока ламп накаливания составляет инфракрасная радиация, в какой-то мере оправдывается и предположение о возможном участии в растяжении междоузлий ее действия. Однако во втором случае растение со сближенными междоузлиями взято из варианта, где они получали такой же электрический свет, только мощностью 600 Вт/м².

Следовательно, второе растение выращивалось в условиях лучистого потока, содержащего то же процентное соотношение инфракрасной радиации, что и в первом случае, но при значительно большем абсолютном ее количестве. Если вытянутости первого растения способствовала инфракрасная радиация, то непонятно, почему ее 4-кратное увеличение в другом варианте (второе растение) привело, наоборот, к компактному росту стебля. Гораздо вероятнее предположение, что первое растение имело несколько вытянутый стебель из-за недостатка общей мощности лучистого потока, а следовательно, и благодаря малому количеству инфракрасной радиации. Увеличение ее при том же соотношении с видимым излучением, за счет возрастания общей мощности радиации

ламп накаливания, способствовало устранению растяжения междоузлий стебля.

Инфракрасная радиация способствует перегреву растений только при относительно высоких температурах воздуха — порядка $25-30^{\circ}\text{C}$. В этих условиях, при полном отсутствии естественного освещения, пользуясь световым потоком мощных ламп накаливания, необходимо принимать меры к устранению перегрева растений.

Применение водяных фильтров приводит к устранению инфракрасной радиации, поглощаемой водой. Но если инфракрасная радиация не вредна сама по себе, то нет нужды в ее удалении, так как перегрев растений может быть устранен и другими способами.

В частности, пользуясь достаточно низкими температурами воздуха, можно выращивать растения непосредственно под 500-ваттными лампами накаливания при мощности лучистого потока в 1 кВт/м^2 и выше без всякого вреда. Примером этому являются опыты, проведенные в нашей лаборатории В. Г. Кармановым еще зимой 1947/48 г. В сарае, имевшем температуру воздуха такую же, как на улице, в самый холодный период (конец января — начало февраля), когда морозы держались на уровне $12-18^{\circ}\text{C}$, в лучистом потоке 500-ваттных ламп накаливания были выращены редис Розовый с белым кончиком и рассада томатов, доведенная до начала цветения. Температура почвы поддерживалась на уровне $10-12^{\circ}\text{C}$ за счет поглощения ею лучистой энергии лампы накаливания. Кроме того, на случай, если бы этой энергии не хватило, почва могла подогреваться накалом спирали, погруженной на дно сосуда. Растения находились в $10-15\text{ см}$ от нити ламп и тем не менее не повреждались и не вытягивались.

В этих опытах нагрев мощным, в основном инфракрасным, лучистым потоком уравнивался большой теплоотдачей с поверхности растений, определяющейся низкими температурами окружающего воздуха. Теплообмен растений с внешней средой был таков, что они не успевали нагреться до губительных для них пределов. В результате за 20 суток опыта были получены очень хорошего качества корнеплоды редиса, достигавшие веса 30 г. Несмотря на то, что освещение было непрерывным (прерывание его привело бы к замерзанию растений), редис стебля не образовал. Больше того, он сформировал

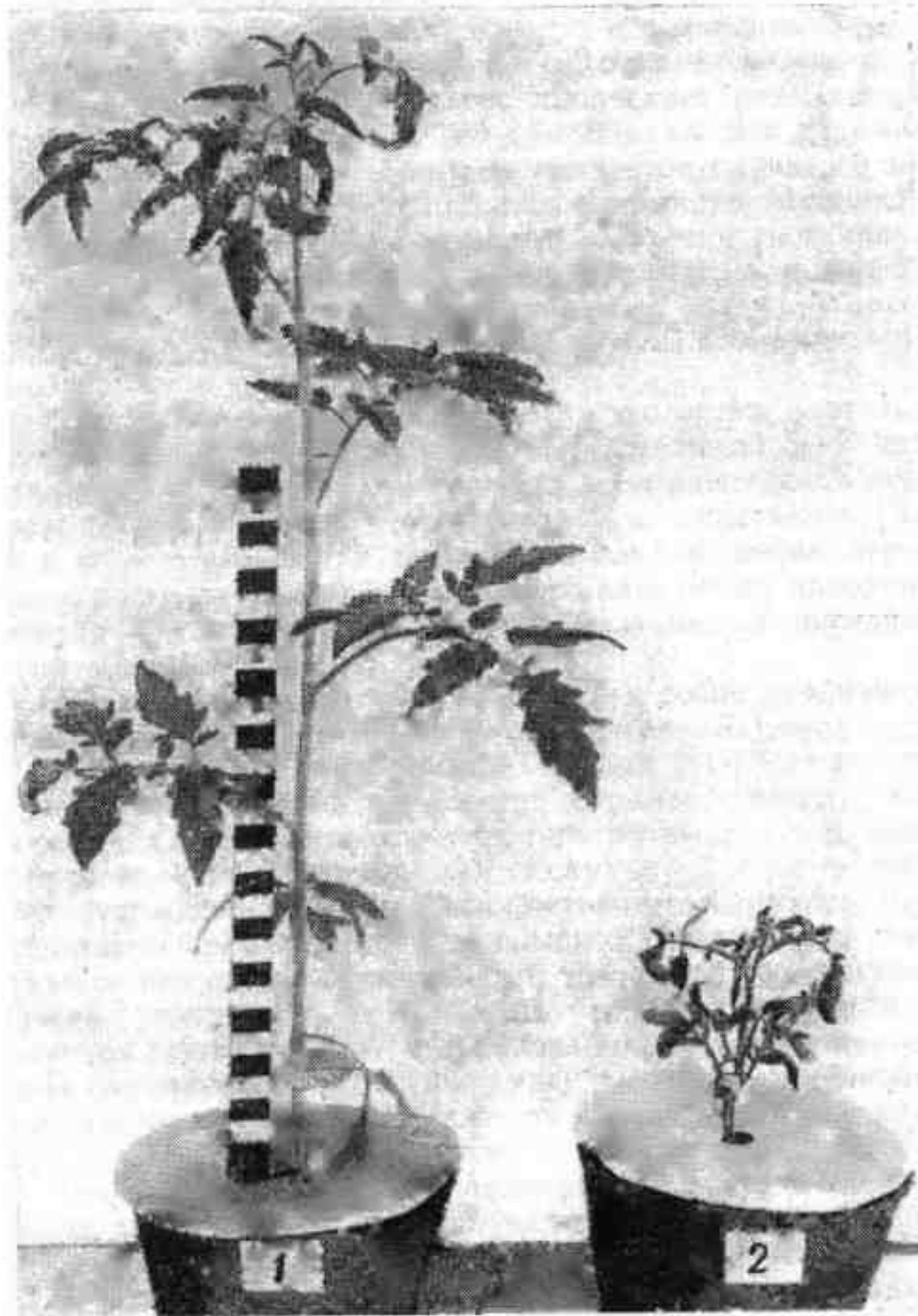


Рис. 50. Растения томатов в 20-дневном возрасте, выросшие в условиях освещения лампами накаливания при одинаковой температуре воздуха.

1 — мощностью лучистого потока 150 Вт/м^2 , 2 — то же 600 Вт/м^2 .

мало листьев (2—3) и до конца сохранил семядоли. Последние разрослись до необычайных размеров и достигли значительной толщины (2,5—3 мм). У отдельных растений корнеплоды образовались только за счет синтеза разросшихся семядолей.

Очевидно, в условиях интенсивного теплообмена растения с воздухом онтогенез его идет по-иному. Однако главным практическим выводом из этих опытов является полная возможность устранения излишнего перегрева растений мощными потоками ламп накаливания выращиванием их в помещениях с пониженными температурами воздуха.

Определяя температуру растений, инфракрасная радиация может быть и полезна и вредна, в зависимости от внешних условий и мощности лучистого потока. Такими же свойствами, хотя, может быть, и в меньшей степени, должна обладать и видимая радиация.

Выше говорилось об инфракрасной радиации вообще, без ее дифференциации, и, по-видимому, температурный эффект ее воздействия в основном связан с дальней инфракрасной радиацией, поглощаемой водой, т. е. с длиной волны 1100 мкм и больше. Как показали исследования последних 20 лет, особенное значение для растений имеет ближняя инфракрасная радиация с длиной волн от 700 до 1000 мкм. Автору принадлежали первые или одни из первых исследований, показавших физиологическое значение этой области спектра. Они состояли в выяснении влияния ближней инфракрасной радиации на характер актиноритмической реакции никтофильных растений при замене ею темного периода суток. Для этого растения масличной периллы, выращенные в течение первых 10 дней в условиях непрерывного освещения в установке, состоящей из ламп накаливания и водяного фильтра, затем были разбиты на четыре группы по 5 растений в каждой. Растения всех групп с начала опыта были поставлены в условия 14-часового дня в той же осветительной установке. Последующие ежедневные 10 часов темноты каждая группа растений получала в различных условиях.

Растения первого варианта получали темноту при температуре воздуха 20—22°С. Растения второго варианта на ночь помещались в термостат с температурой воздуха 30—35°С. Растения третьего варианта ночью

получали инфракрасную радиацию. Для этого использовалась специальная темная камера с потолком из марблитового фильтра, над которым горели 100-ваттные лампы накаливания. Марблит пропускает радиацию в пределах длины волны от 760 до 1000 мкм. Вся видимая радиация поглощается им, так что в этом случае 10 часов в сутки растения находились в темноте. Мощность инфракрасной радиации у вершин растений составляла около 200 Вт/м². Температура воздуха колебалась от 28 до 31°С. Температура верхних листьев растений доходила до 35°С. Растения четвертой группы находились на непрерывном освещении.

Опыт продолжался 25 суток. За это время растения периллы достигли высоты 25 см и имели по 5—7 пар листьев. Их средний сырой вес при этом равнялся: в первом варианте 11 г, во втором тоже 11 г, в третьем — 13 г и в четвертом — 9 г. К цветению и плодоношению перешли растения только двух первых вариантов, находившихся часть суток в темноте, т. е. получавших нормальный короткий день.

Состояние растений через 10 суток после окончания опыта можно видеть на фотографии (рис. 51).

Прежде всего наблюдается хороший рост всех растений, причем особенно у растений третьего варианта, получавших вместо темноты инфракрасную радиацию. Они образовали по 7 пар листьев и самую большую растительную массу. Даже растения четвертого варианта, находившиеся все время на непрерывном освещении, отставали от них по весу. Однако к цветению они не перешли. Очень существенно, что растения первого и второго вариантов опыта перешли к образованию бутонов и цветению одновременно. Это показывает, что они одинаково использовали темноту на фоне температуры воздуха как 20°, так и 30—35°.

Отсюда следует, что не температура воздуха задержала развитие периллы, получавшей темноту в камере с инфракрасным излучением.

Очевидно, инфракрасная радиация не способствовала прохождению темновых процессов развития периллы и, следовательно, она не может быть приравнена к темноте.

Еще один опыт, в котором наблюдалось нарушение актиноритмической реакции масличной периллы под

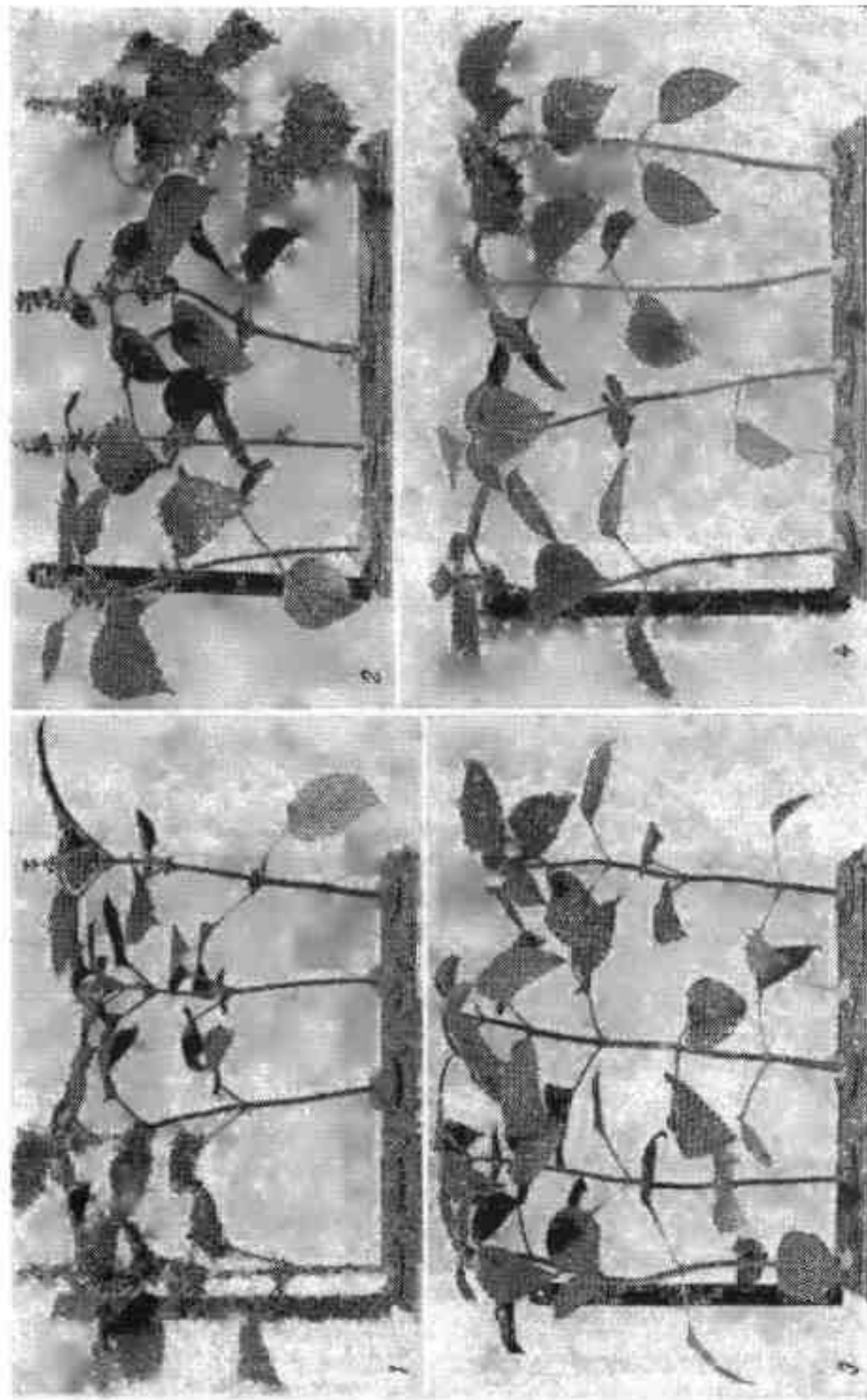


Рис. 51. Перилла масличная, выращенная на электрическом освещении (лампы накаливания, водяной фильтр). 1 — на 14-часовом дне, ночная температура 20—22°, 2 — то же, ночная температура 30—35°, 3 — на 14-часовом дне и 10-часовом воздействии инфракрасной радиации вместо темноты, 4 — на непрерывном освещении.

воздействием ближней инфракрасной радиации (пропущенной марблитом), был проведен следующим образом. Вначале, до образования трех пар листьев, перилла масличная выращивалась на непрерывном освещении люминесцентными 30-ваттными трубками. После полного распускания третьей пары листьев растения были обезвершинены и у них были удалены листья и почки, кроме двух, находящихся на третьем узле, после чего растения были распределены на две группы.

Растения первой группы находились 14 часов под излучением люминесцентных трубок, а затем ставились на 10 часов в камеру с марблитовым потолком, излучавшим ближнюю инфракрасную радиацию (в пределах длины волны от 760 до 1000 мк). Эти растения к цветению не перешли.

Растения второй группы (контрольные) получали также 14-часовой день и на ночь ставились в ту же камеру, что и растения первой группы, но на их листья надевались пакеты из плотной черной бумаги, задерживающие ближнее инфракрасное излучение. В результате растения периллы во второй группе зацвели и дали семена в нормальный срок (рис. 52).

Контрольные растения во время «ночного периода» находились в общей камере с опытными, т. е. при одинаковой температуре воздуха, а их почки подвергались непосредственному воздействию инфракрасной радиации. Различие в условиях «ночного периода» для контрольных и опытных растений создавалось только для их листьев. Вегетативное состояние растений, листья которых получали ближнюю инфракрасную радиацию, свидетельствуют в пользу ее физиологической активности. Результаты и этого опыта с периллой масличной свидетельствуют о том, что ближняя инфракрасная радиация, пропускаемая марблитом, вызывает иной актиноритмический эффект по сравнению с темнотой.

Любопытно, что в аналогичных опытах с Абиссинской капустой, которая не цветет на коротком дне, инфракрасная радиация оказала на ее развитие такое же действие, как темнота.

Таким образом, уже первые опыты обнаружили, что различные виды неодинаково реагируют на инфракрасную радиацию. У одних видов (перилла) она при длительном воздействии снимала темновые процессы, а у

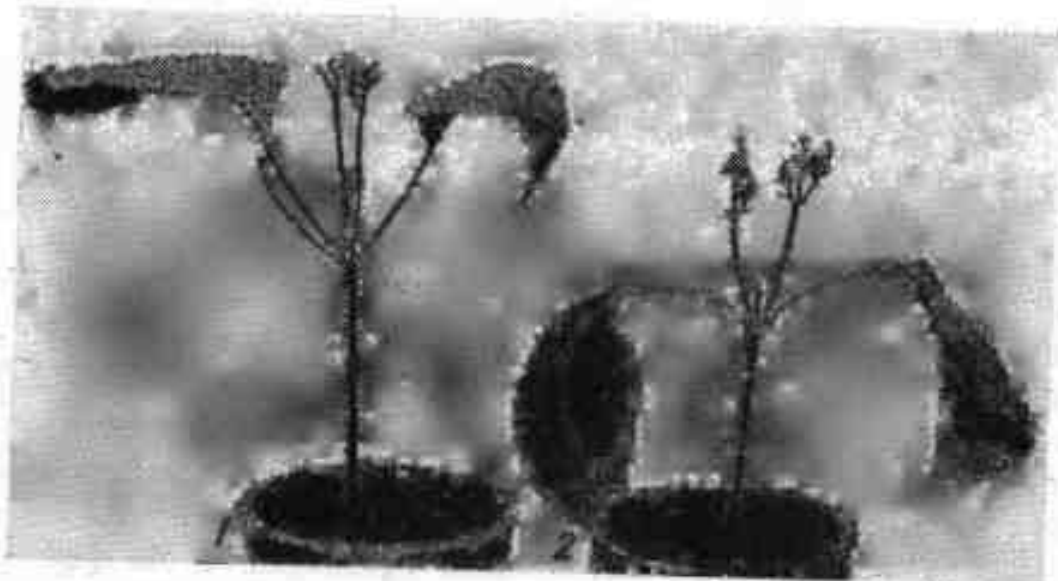


Рис. 52. Перилла масличная, выращенная на 14-часовом дне.
1 — листья растения получали «ночью» ближнюю инфракрасную радиацию, 2 — листья растения находились в темноте.

других (Абиссинская капуста) задерживала репродуктивное развитие так же, как и темнота.

После работ Бортвика и его сотрудников в США, Вассинка (E. Wassink) и Мейера (G. Meyer) в Нидерландах стало очевидным, что ближняя инфракрасная радиация с максимумом излучения на участке с длиной волны 760 мкм обладает легко наблюдаемым эффектом восстановления темновой фазы актиноритмической реакции растений, прерванной кратковременным световым воздействием.

Иллюстрацией сказанного являются результаты опыта, проведенного с масличной периллой. Как известно, это растение быстро переходит к репродукции при выращивании его на коротком 12-часовом дне с последующей 12-часовой ночью.

Если же с начала актиноритмического воздействия каждый темный (12-часовой) период суток разбивать через 6 часов 30-минутным периодом белого света (в нашем опыте излучением люминесцентных ламп мощностью около 20 Вт/м²), темновая фаза не проходит, и перилла остается в вегетативном состоянии.

Этот факт является давно установленным. Но, как было сказано выше, эффект кратковременного светового разрыва может быть ликвидирован последующим облу-

чением ближней инфракрасной радиацией. В нашем опыте растения периллы масличной после 30-минутного облучения светом сразу же в течение 10 минут облучались ближней инфракрасной радиацией, имевшей максимум излучения в области около 760 мкм, мощностью 20 Вт/м². В этом случае растения, несмотря на световой разрыв ночи, перешли к репродукции в срок, близкий к нормальному.

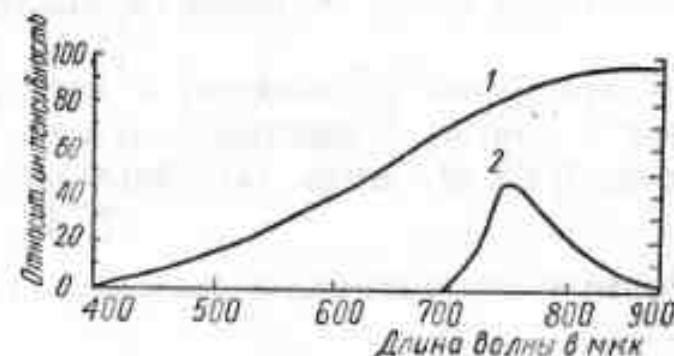
Это поразительное явление заслуживает подробного изучения, поэтому нами были выполнены специальные исследования, давшие интересные результаты, частично изложенные ниже.

В наших опытах ближняя инфракрасная радиация с максимумом излучения около λ 760 мкм выделялась из лучистого потока сушильной лампы накаливания при помощи стеклянного УФС-3 фильтра (рис. 53).

Прежде всего, нам удалось показать, что восстанавливающий эффект ближней инфракрасной радиации обнаруживается лишь после достаточно кратких периодов света, не превышающих 15—20 минут. Если световой разрыв темного 12-часового периода суток продолжался более сорока минут, последующее облучение в течение 5—15 минут ближней инфракрасной радиацией не восстанавливало ход темновых процессов, и растения масличной периллы оставались в вегетативном состоянии. Такой эффект наблюдался даже в опытах, где для светового разрыва продолжительностью 60 минут использовался лучистый поток люминесцентных трубок мощностью всего 0,2 Вт/м².

Отсюда следует, что если процесс, идущий под действием света, даже очень слабого, продолжается более 60 минут, он становится необратимым и не может быть восстановлен ближней инфракрасной радиацией.

Рис. 53. Спектральная характеристика ближней инфракрасной радиации, выделенной из лучистого потока сушильной лампы накаливания (1) при помощи стеклянного фильтра УФС-3 с максимумом пропускания при длине волны около 760 мкм (2).



Во всех опытах, о которых говорилось выше, действие света и ближней инфракрасной радиации проводилось на целое растение. Естественно возник вопрос, как изменится характер их антагонизма при локальном воздействии на различные части листа и растения.

В работах автора было показано, что в пределах листа актиноритмические изменения строго локализованы в той его части, которая находилась непосредственно в оптимальных актиноритмических условиях. При воздействии на различные части листа противоположными актиноритмическими условиями они, эти части листа, реагировали на определенные режимы вне зависимости одна от другой. Например: если одна половина листа получала короткий день, а другая находилась на непрерывном освещении, то они не влияли друг на друга. Аналогичный эффект наблюдался и в том случае, если одна половина листа получала короткий день, а другая непрерывно находилась в темноте. Не влияя друг на друга, половины одного листа, находящиеся в различных условиях, в то же время контролировали характер онтогенеза связанных с ними побегов. Половина листа, находящаяся на непрерывном освещении, задерживала цветение периллы, вызываемое половиной листа, получавшего короткий день. Половина листа, находящаяся в темноте, не мешала короткодневной его половине обеспечивать цветение периллы в нормальный срок.

Именно это явление — локализация актиноритмической реакции листа — мы и решили использовать для изучения восстанавливающего действия ближней инфракрасной радиации на прерванную светом темновую фазу актиноритмической реакции растений.

Объектом опытов была масличная перилла, которая в течение 30 суток выращивалась на непрерывном освещении люминесцентными 40-ваттными лампами, собранными в осветительную установку со сплошным светящимся потолком*.

После 30 суток выращивания включенные в опыт растения были подвергнуты хирургической подготовке, состоящей в удалении листьев и почек, кроме одного листа

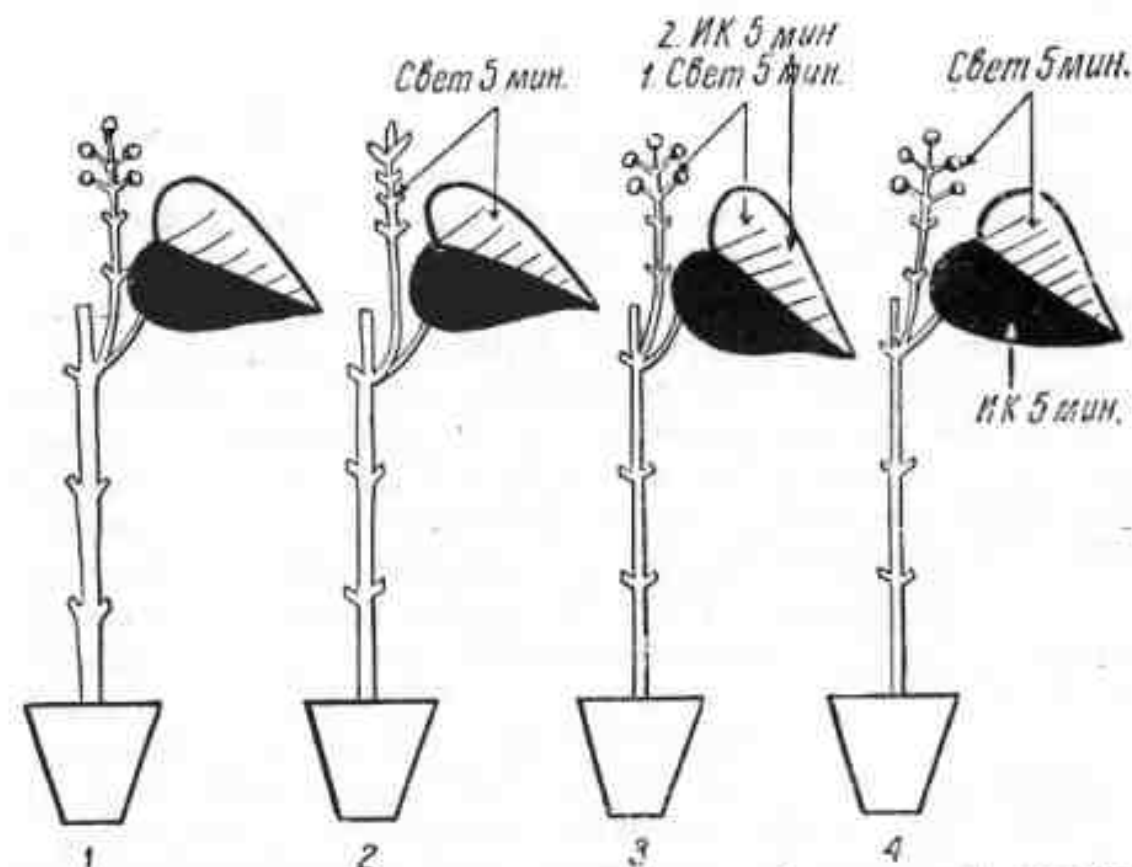


Рис. 54. Схема и результаты опыта с периллой масличной, выясняющего восстанавливающее действие на темновую фазу ближней инфракрасной радиации (объяснение в тексте).

из третьей пары, считая от семядолей, и находящейся в его пазухе почки.

Оставленный лист подвергался одновременному воздействию коротким 14-часовым днем (одна продольная половина) и непрерывной темнотой (вторая продольная половина) в течение 25 суток*. Темнота осуществлялась с помощью заключения половины листа на все время опыта в светонепроницаемый пакет. Источником света по-прежнему служили люминесцентные лампы (20 вт/м^2).

Растения первой, контрольной, группы (одна половина листа на коротком дне, а вторая в непрерывной темноте) перешли к бутонсообразованию через 20 суток после начала воздействия (рис. 54, 1).

Растения второй группы, в отличие от контрольной, в середине 10-часовой ночи получавшие 5-минутный период света тех же люминесцентных ламп, на 20-й день бутонов не дали (рис. 54, 2).

* После этого опыт был прекращен и сделано описание растений, приведенное ниже.

* Опыт выполнялся под руководством автора А. П. Михайловым.

Растения третьей группы, в отличие от растений второй группы, после 5-минутного освещения в середине темного периода суток получали дополнительно 5 минут ближнего инфракрасного облучения, а затем снова помещались в темноту. Они перешли к бутонобразованию одновременно с контрольными растениями (рис. 54, 3).

Четвертый вариант этого опыта представляет особенный интерес. Световому воздействию среди темного периода суток подвергалось все растение, так же как и во второй и третьей группах, но ближнюю инфракрасную радиацию получала только одна половина листа, которая все остальное время находилась в темноте и не подвергалась короткодневному воздействию. Во время облучения ближней инфракрасной радиацией все остальные части растения находились в светонепроницаемых пакетах.

Бутоны у этих растений появились почти в тот же срок, что и у растений первой группы (см. рис. 54, 4). Ранее мы полагали, что актиноритмический эффект всегда связан только с той частью листа, которая непосредственно находилась в оптимальных актиноритмических условиях. Теперь удалось выяснить, что одна половина листа, находящаяся в темноте, оказывает несомненное влияние на вторую, получающую короткий день и световой разрыв в середине ночи. В этом случае уже нельзя говорить об абсолютной локализации актиноритмического эффекта только в тех тканях листа, которые подвергаются непосредственному актиноритмическому воздействию.

Эти наблюдения, как нам кажется, могут иметь важное значение в раскрытии актиноритмических закономерностей онтогенеза растений.

Нельзя не отметить некоторого кажущегося противоречия в результатах наших первых опытов с ближней инфракрасной радиацией, проведенных в середине 40-х годов, с последующими американскими и нашими более поздними исследованиями. В наших первых опытах ближняя инфракрасная радиация, данная после светлого периода суток, не вызывала темнового эффекта актиноритмической реакции растений. В опытах американских физиологов ближняя инфракрасная радиация, даже после коротких периодов света, разбивающих темновые процессы, вновь восстанавливала их. Но ведь темнота

не обладает такой способностью. Значит и в этом случае наблюдается принципиальное различие между действием ближней инфракрасной радиации и темноты. Причем различное воздействие на растения темноты и ближней инфракрасной радиации наблюдается не только в процессах онтогенеза, но также, как это было показано на примере огурцов в главе об актиноритмизме, и в морфогенезе растений. Кстати, очень существенно, что огурцы, получая инфракрасную радиацию вместо темноты, не переходили к цветению, так же как и масляная перилла. Таким образом, напрашивается предварительный вывод, требующий еще специальной проверки, о различном действии на репродуктивное развитие растений ближней инфракрасной радиации при ее чередовании со светом и с темнотой после кратких разрывов последней. Во всяком случае, в этой области новых исследований возможны крупные открытия.

Сопоставляя фактический материал, изложенный как в этом, так и в других разделах книги, касающийся ближней инфракрасной радиации, мы должны констатировать ее несомненное влияние на некоторые фотобиологические и темновые процессы.

Поэтому теперь нет оснований считать крайней границей физиологической радиации длину волн около 700 мкм. Не заменяя эту границу другой (для этого еще мало оснований), мы можем утверждать, что ближняя инфракрасная радиация в пределах длин волн от 700 до 1000 мкм является несомненно физиологически активной радиацией. Этого и следовало ожидать, исходя из эволюционных представлений о филогенезе растений.

ВЛИЯНИЕ НА РАСТЕНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ РАДИАЦИИ

Радиация, лежащая за пределами видимой фиолетовой и ограниченная длиной волн от 400 до 180 мкм, называется ультрафиолетовой. Практически нижней границей ее в солнечном освещении является длина волн около 290 мкм. Всю ультрафиолетовую радиацию солнца, доходящую до земли, принято считать физиологически активной радиацией.

Впервые признаки фотосинтеза в ультрафиолетовой области были обнаружены Уршпрунгом (1918) вплоть до $\lambda = 330$ мкм. Гувер (W. Hoover) и Бернс (G. Burns) наблюдали фотосинтез у пшеницы при длине волн в 365 мкм.

Помимо влияния на фотосинтез, в литературе имеются указания на значение ультрафиолетовой радиации, с длиной волн от 290 до 313 мкм, для таких процессов, как поступление в растения минеральных веществ, образование витамина D, появление некоторых пигментов, в частности антоциана. Полагают также, что эти лучи и даже облученный ими растительный корм (обычно зерно) способны оказывать антирахитическое действие на животные организмы. Хорошо известно бактерицидное действие ультрафиолетовых излучений.

Очень малы и случайны сведения о значении ультрафиолетовой радиации для процессов роста и развития растений.

По литературным данным, у растений, выросших в нормальных световых условиях, ультрафиолетовая радиация в определенных дозах всегда вызывает летальный эффект. Как правило, источниками излучения ультрафиолетовой радиации являются угольно-дуговые и ртутно-кварцевые лампы различных типов. Интегральное излучение этих ламп быстро убивает любые растительные виды.

Однако, как показали многочисленные исследования, действие на живые организмы ультрафиолетового излучения в пределах λ от 240 до 400 мкм далеко не равнозначно.

Поэтому уже в 1952 г. по рекомендации 2-го международного конгресса по физиотерапии и фитобиологии весь спектр ультрафиолетового излучения по своему биологическому эффекту был разбит на три участка: А — длинноволновый ($\lambda = 400—320$ мкм), В — средневолновый ($\lambda = 320—275$ мкм), С — коротковолновый ($\lambda = 275—180$ мкм).

Имеющиеся в нашем распоряжении источники радиации и фильтры позволили нам провести опыты с ультрафиолетовой радиацией, относящейся к этим трем участкам*.

* Опыт производился под руководством автора А. П. Михайловым.

Коротковолновая ультрафиолетовая радиация была выделена при помощи стеклянного светофильтра УФС-1 из лучистого потока бактерицидной лампы БУВ-30П. Фактически в этом случае мы имели дело с почти монохроматической радиацией с длиной волны 253,7 мкм (рис. 55).

Средневолновая радиация ($\lambda = 290—320$ мкм) при помощи стеклянных фильтров УФС-2 и ЖС-3 выделялась из лучистого потока ртутно-кварцевых ламп ПРК-7 (рис. 56).

Длинноволновая радиация ($\lambda = 330—390$ мкм) выделялась при помощи фильтра УФС-3 из лучистого потока ртутно-кварцевых ламп ПРК-7 (рис. 57).

Для измерения облученности растений ультрафиолетовой радиацией использовались уфидозиметр УФД-4 (коротковолновая и средневолновая радиации) и селеновый фотоэлемент с повышенной чувствительностью (тип СФУ-10) для длинноволновой радиации. Фотоэлемент был отградуирован в абсолютных единицах.

Объектами исследований служили масличная перилла и Абиссинская капуста.

Масличная перилла в течение первых 20 дней жизни выращивалась на непрерывном освещении люминесцентных ламп. Затем непрерывное освещение было заменено 14-часовым днем с последующей 10-часовой ночью. Контрольные растения, где ночь не нарушалась включением каких-либо излучений, дали бутоны через 18 дней после начала чередования света и темноты.

Во всех остальных вариантах опыта 10-часовая ночь разбивалась на две равные части включением в нее 60-минутного отрезка, в течение которого опытные растения облучались различными по мощности лучистыми потоками. Если это был белый свет, т. е. излучение в интервале $\lambda = 400—800$ мкм, то темновые процессы актиноритмической реакции растений снимались при мощности лучистого потока, равной всего 0,2 Вт/м².

Ультрафиолетовое излучение с любой длиной волн от 390 до 253 мкм при той же энергии не подавляло процессы развития периллы, идущие в темноте.

Для того чтобы вызвать эффект, аналогичный тому, что вызывается видимой радиацией, мощность излучения в длинноволновом ультрафиолете пришлось повысить до 12 Вт/м², или в 60 раз! Что касается средневолнового и

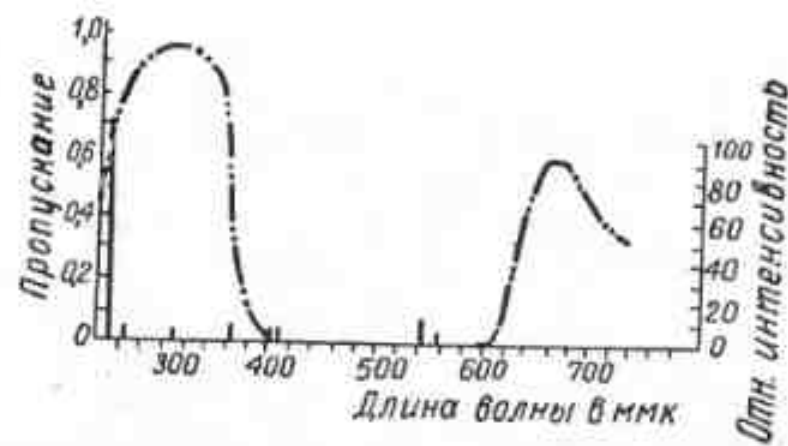


Рис. 55. Спектральная характеристика коротковолновой ультрафиолетовой радиации (линейный спектр бактерицидной лампы БУВ-30П и спектр пропускания стеклянного фильтра УФС-1).

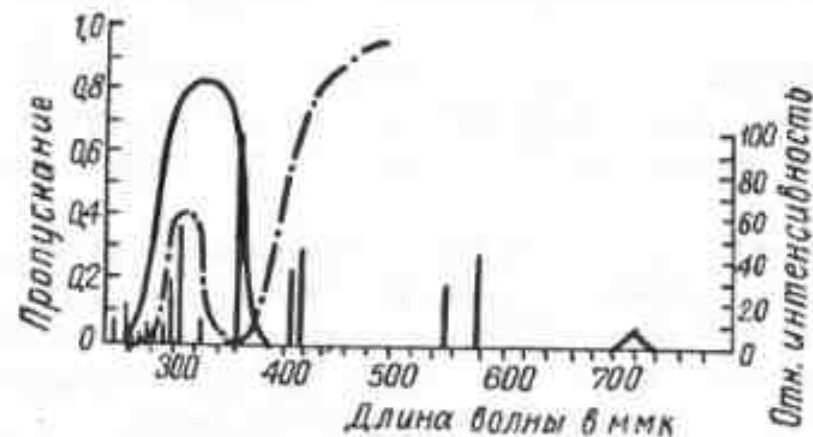


Рис. 56. Спектральная характеристика средневолновой ультрафиолетовой радиации (линейный спектр излучения лампы ПРК и спектр пропускания стеклянных фильтров УФС-2 и ЖС-3).

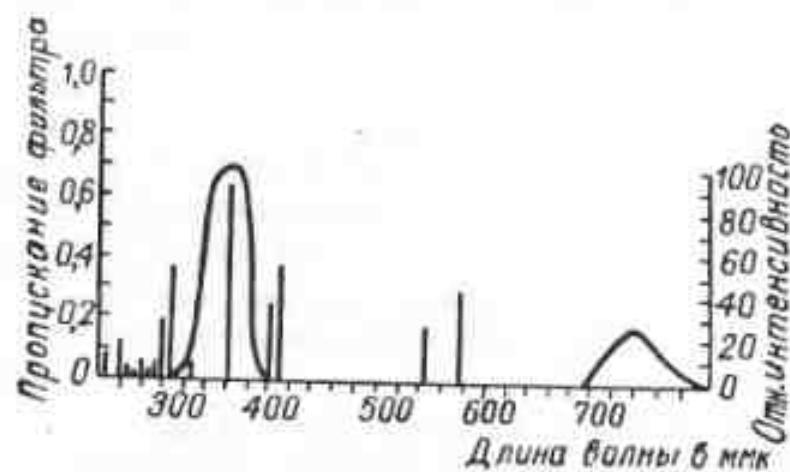


Рис. 57. Спектральная характеристика ближней (длинноволновой) ультрафиолетовой радиации (линейный спектр излучения лампы ПРК и спектр пропускания стеклянного фильтра УФС-3).

коротковолнового ультрафиолетового облучения, то при часовой экспозиции растения гибли уже при мощности лучистого потока $0,6-1 \text{ Вт/м}^2$.

Таким образом, у периллы масличной темновая фаза актиноритмической реакции может быть снята ближней ультрафиолетовой радиацией ($\lambda=330-390 \text{ мкм}$) при мощности излучения 12 Вт/м^2 и при часовой экспозиции. Любопытно, что ближняя ультрафиолетовая радиация не вызывает повреждений даже в том случае, если растения периллы облучались ежедневно по 10 часов в сутки вместо темноты. Естественно, что в этих условиях перилла не цвела, так же как и на непрерывном освещении.

У типичного никтофильного растения — масличной периллы — темновая фаза актиноритмической реакции, снимающаяся слабым светом, при замене его ультрафиолетовым излучением остается неизменной.

Значит, ультрафиолетовое излучение для периллы обладает значительно меньшей физиологической активностью по сравнению с видимой радиацией, но все же при достаточной интенсивности оказывает на темновую фазу действие, аналогичное действию света.

Несколько иная закономерность в действии ближнего ультрафиолетового излучения на темновые процессы актиноритмической реакции наблюдалась у растений Абиссинской капусты.

При выращивании Абиссинской капусты на 14-часовом дне в лучистом потоке зеркальных ламп накаливания, профильтрованном через воду, с общей мощностью не ниже $150-200 \text{ Вт/м}^2$, она хорошо растет, но не переходит к воспроизведению. Для того чтобы в этих условиях Абиссинская капуста перешла от роста к плодоношению, необходимо увеличить длину дня на 150 минут или, что все равно, на такой же период времени сократить темный период суток. При этом мощность дополнительного освещения должна быть не ниже $70-80 \text{ Вт/м}^2$. В опытах, где вместо света 10-часовая ночь разбивалась 150-минутным интервалом ультрафиолетового излучения, наблюдались следующие явления.

Средневолновая и коротковолновая ($\lambda=290-300 \text{ мкм}$ и $253,7 \text{ мкм}$) ультрафиолетовая радиация при 150-минутном ежедневном облучении убивала растения при мощности лучистого потока $0,25-0,50 \text{ Вт/м}^2$. И только

длинноволновая ультрафиолетовая радиация ($\lambda = 330—390$ мкм) не вызвала летального эффекта даже при мощности лучистого потока 90 вт/м^2 . Причем в этом случае растения Абиссинской капусты переходили к цветению в тот же срок, что и растения из варианта, где 10-часовая ночь разбивалась 150-минутным светом ($\lambda = 400—800$ мкм), равным 80 вт/м^2 .

Следовательно, в опытах с Абиссинской капустой действие ближней ультрафиолетовой радиации было вполне аналогичным действию видимой радиации. А отсюда нельзя не сделать заключения, что для южного вида — Абиссинской капусты — ближняя ультрафиолетовая радиация является также светом, т. е. в известных случаях может выполнять те же физиологические функции, что и свет.

В заключение отметим, что результаты наших опытов с заменой суточной темноты ближней ультрафиолетовой радиацией позволяют высказать следующие предположения.

Область физиологически активной радиации в электромагнитном излучении солнца и любых искусственных источников излучения должна быть для растительных организмов расширена не только в инфракрасную, но также и в ультрафиолетовую область. Во всяком случае, в актиноритмической реакции ближнее ультрафиолетовое излучение ($\lambda = 330—390$ мкм) может рассматриваться как физиологически активное, вызывающее те же фотобиологические эффекты, что и видимая радиация.

Темновые процессы актиноритмической реакции у периллы масличной нарушаются излучениями с длиной волн от 400 до 750 мкм при незначительных мощностях излучения. Для получения такого же эффекта за счет ближней ультрафиолетовой радиации мощность лучистого потока должна быть увеличена в 60 раз. Очевидно, что во столько же раз растения периллы менее чувствительны к ультрафиолетовому излучению по сравнению с видимым.

В актиноритмической реакции Абиссинской капусты активность ближней ультрафиолетовой радиации практически равна активности видимого излучения.

Актиноритмические реакции периллы масличной и Абиссинской капусты отличаются друг от друга не только отношением к суточной темноте, но также и по ис-

пользованию ближней ультрафиолетовой радиации. Очевидно Абиссинская капуста, в силу своего географического происхождения, более чем перилла приспособлена к активному использованию ближней ультрафиолетовой радиации. Ранее в наших опытах было установлено, что Абиссинская капуста чувствительна к сине-фиолетовому излучению. Теперь есть все основания расширить наиболее активную область излучения до границ $\lambda = 350—390$ мкм.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТЕНИЯМИ СВЕТА

В овощеводческой и физиологической литературе представления о взаимодействии на растения света и температуры воздуха неясны.

В большинстве случаев рекомендуется при сильном освещении повышать температуру воздуха, а при недостатке света понижать ее.

Несколько иная точка зрения на эту проблему излагается в курсе овощеводства В. И. Эдельштейна (1958). В нем рекомендуется снижать температуру воздуха в теплицах и парниках как при недостатке, так и при избытке света, если избыток ведет за собой перегрев листьев, вызывающих расстройство жизненных процессов растения.

В монографии, посвященной томатам, Д. Д. Брежнев (1955 г.) пишет: «Практика показывает, что в закрытом грунте лучшей температурой является: ночью $10—12^\circ \text{C}$, днем в пасмурную погоду $15—17^\circ \text{C}$, в яркий солнечный день — $25—27^\circ \text{C}$ ».

Между тем клинские огородники, выращивая огурцы в самые темные зимние месяцы, все время поддерживали в своих теплицах высокие температуры и получали хорошие результаты.

Почему при недостатке света рекомендуется понижать температуру воздуха значительно ниже принятого оптимума, а при сильном освещении, наоборот, повышать ее, остается непонятным. Ведь в случае плохого

освещения понижение температуры еще больше затрудняет фотосинтез растений.

Чтобы выяснить эти вопросы, в лаборатории, руководимой автором, были проведены работы, описанные ниже.

Прежде всего были проанализированы возможности обычно применяющихся для измерения температуры растений термопар. Последние не могли быть признаны вполне надежными измерителями температуры растений в силу следующих причин: 1) высокой теплопроводности материалов, употребляемых для изготовления термопар, по сравнению с теплопроводностью листа и 2) большой массой термопары по сравнению с тонким листом. По этим причинам при измерении температур, особенно в тонких листьях, неизбежно получаются значительные преуменьшения истинных их значений. Чтобы избежать этих погрешностей и получить настоящее представление о температуре листьев в условиях светового потока, В. Г. Карманов создал новый прибор с приемной частью из полупроводникового термосопротивления (термистор) в виде шарика диаметром около 0,5 мм. Этот прибор дает возможность измерять температуру живого листа растения без повреждения в любых условиях воздействия.

Регистрация температуры воздуха и растения, а также мощности лучистого потока производится при помощи самопишущего гальванометра или соответствующих потенциометров.

С помощью указанной аппаратуры удалось установить зависимость температуры растения от мощности лучистого потока ламп накаливания и температуры воздуха. Для этого томатные растения, выращенные на электрическом освещении, помещали в лучистый поток ламп накаливания, который медленно, в течение трех часов, изменялся в пределах от 200 до 1000 вт/м^2 сперва возрастающая, а затем понижаясь.

Изменения мощности лучистого потока в указанных пределах достигали перемещая 750-ваттную лампу накаливания вертикально вниз и вверх при помощи синхронного мотора типа СД-2.

Данный метод проведения опыта давал возможность следить за ходом изменений температуры листа томата при переменных мощностях лучистого потока.

Опыт проводился в течение дня в помещениях с температурой воздуха в одном опыте 18°С, а в другом — 6°С ниже 0°. В обоих случаях одновременно регистрировались изменения трех величин: 1) мощности лучистого потока ламп накаливания при помощи пиранометра, 2) температуры воздуха, окружающего растения, и 3) температуры самого листа. Температура измерялась с помощью полупроводниковых термосопротивлений. При этом термосопротивление, при помощи которого измерялась температура воздуха, в лучистом потоке ламп накаливания экранировалось от непосредственного воздействия на него радиации алюминированной стеклянной пластинкой с коэффициентом отражения более 90%. Такое значительное отражение экрана, защищающего термосопротивление, делает возможным достоверное определение температуры воздуха в лучистом потоке мощной лампы накаливания вблизи от растения.

Температура листа измерялась контактом термосопротивления с нижней стороной листа. Результаты этих измерений показали полную зависимость температуры листа томата от мощности лучистого потока, падающего на него, и температуры окружающего растения воздуха (рис. 58).

Из их рассмотрения выясняется: 1) значительное изменение мощности лучистого потока, падающего на лист: сперва нарастание его в связи с опусканием лампы, а затем уменьшение вслед за ее ходом вверх;

2) почти полное постоянство температуры воздуха вблизи листа, что говорит о малой зависимости ее от изменения мощности лучистого потока;

3) весьма высокая зависимость температуры листовой пластинки от мощности лучистого потока при постоянстве воздушной температуры.

Нагрев воздуха за счет почвы устранялся при помощи проточного водяного экрана с постоянной температурой, закрывавшего сосуд с почвой, в котором находилось растение. В последующих опытах выяснилось, что экранирование почвы вообще не имеет существенного значения, когда участвующий в теплообмене объем воздуха достаточно велик.

Самым важным результатом описанного выше опыта является доказательство того, что листья растений могут иметь в мощном лучистом потоке собственную темпера-

туру, значительно отличающуюся от температуры воздуха.

В данном случае наибольшее различие между температурой воздуха и листа томата достигало 20°C . Это различие может доходить и до больших величин. Чем ниже температура воздуха, тем более мощные лампы могут быть применены для освещения растений и тем значительнее будут различия между температурами воздуха и растения. Чем выше температура воздуха, тем скорее с увеличением мощности лучистого потока ламп

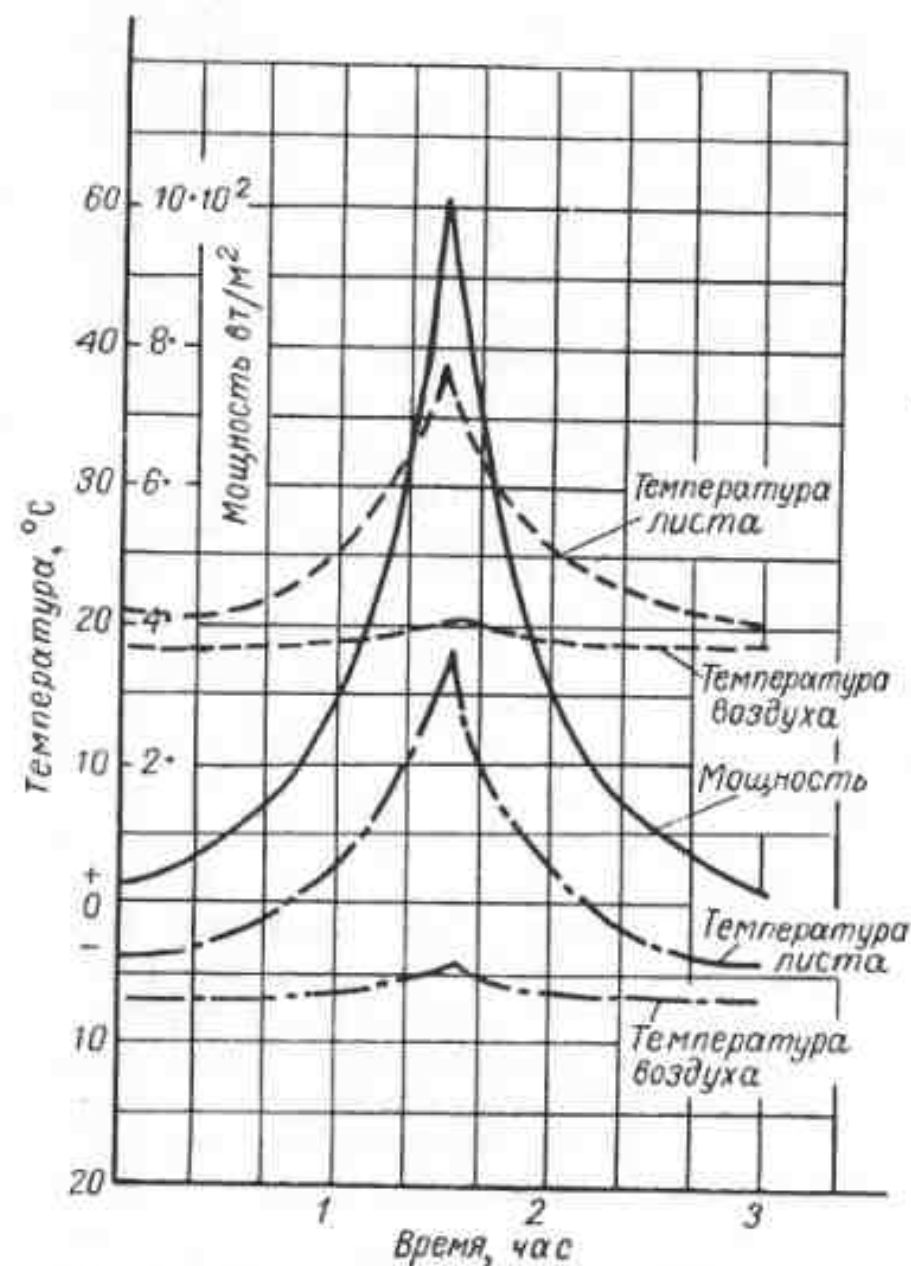


Рис. 58. Зависимость температуры листьев растений томата от мощности лучистого потока и температуры воздуха.

накаливания температура листьев достигнет вредных для жизни растения величин. Наоборот, чем меньше мощность лучистого потока ламп накаливания, тем более высокими (конечно, только до некоторого предела) могут быть температуры воздуха.

Так как только что описанный опыт проводился в интегральном лучистом потоке ламп накаливания, состоящем на 85% из инфракрасной радиации, возникает предположение, не является ли последняя причиной такого значительного нагрева растений по сравнению с воздухом. Чтобы выяснить этот вопрос, были поставлены другие опыты, в которых соотношение инфракрасной радиации и видимой было изменено в пользу последней в отношении 1:1. Для этого был использован водяной проточный фильтр со слоем воды в 5 см. Источником радиации была взята зеркальная сушильная лампа накаливания с параболической колбой. Мощность лучистого потока не варьировалась, а была постоянной и равнялась примерно 1500 Вт/м^2 , т. е. превышала максимальную солнечную радиацию в полтора раза. Понятно, что и освещение в этом опыте было больше солнечного.

Температура воздуха в камере, потолок и стены которой охлаждались проточной водопроводной водой, держалась на уровне 16°C . Температура воды в фильтре была 18°C .

Растения периллы, выращенные в условиях смешанного освещения люминесцентных трубок и мелких ламп накаливания, сразу же при помещении их в эту камеру достигали температуры 42°C . Следовательно, последняя отличалась от температуры воздуха и воды в фильтре, имевшем ту же температуру, что и воздух, на 26° .

Все только что изложенное показывает, что температура растений при одной и той же мощности лучистого потока, но при разных температурах воздуха будет иметь различное значение, точно так же как при переменной мощности и одной температуре воздуха будут наблюдаться разные температуры растения.

Таким образом, абсолютное значение температуры листа определяется как мощностью лучистого потока, так и температурой воздуха.

В природной обстановке на температуру листьев, кроме мощности лучистого потока и температуры воздуха, должны оказывать значительное влияние такие

факторы, как количество водяных паров в атмосфере и особенно скорость движения воздуха (ветры). Они воздействуют на теплообмен и транспирацию растений и тем понижают температуру листьев. Вследствие этого процесса листья растений на прямом солнечном освещении часто имеют даже несколько пониженную по сравнению с воздухом температуру.

Изложенные выше закономерности, касающиеся зависимости температуры листьев растений от мощности лучистого потока ламп накаливания и температуры воздуха, очень важны для практики выращивания растений в условиях электрического освещения. В этом легко убедиться, познакомившись с результатами специальных опытов, проведенных автором совместно с В. Г. Кармановым. Особенно наглядно характер взаимного влияния на растения мощности лучистого потока и температуры воздуха выявили опыты с томатами.

Семена томатов (сорт Пушкинский 1853), предварительно пророщенные на фильтровальной бумаге, были высеяны по одному в горшки с почвой и после развертывания семядолей поставлены в различные условия опыта. Всего было четыре варианта. В двух из них растения выращивали в лучистом потоке ламп накаливания мощностью 150 вт/м^2 , созданном за счет горения мелких ламп накаливания (5 вт, 21 в). Растения двух других вариантов находились в лучистом потоке 200-ваттных ламп накаливания мощностью 600 вт/м^2 . Следовательно, мощность лучистых потоков, получаемых растениями двух первых вариантов, была в четыре раза меньше по сравнению с мощностью облучения двух последних.

В обоих случаях лучистый поток представлял собой полное (интегральное) излучение ламп накаливания и, следовательно, спектральный состав его был одинаковым и характерным для данного источника излучения.

Кроме мощностей лучистых потоков, варьировалась и температура воздуха, окружающего растения. В одном случае (первый и четвертый варианты) растения выращивались в помещении с температурой воздуха 25°C , а в другом (второй и третий варианты) — при температуре воздуха $12\text{--}15^\circ \text{C}$.

Продолжительность ежесуточного освещения была 18 часов, одинаковая для всех вариантов опыта. При нахождении растений в темноте температура воздуха была



Рис. 59. Растения томатов в возрасте 25 дней, выращенные в искусственных условиях.

1 — мощность лучистого потока 150 вт/м^2 , температура воздуха 25°C ,
2 — мощность лучистого потока 150 вт/м^2 , температура воздуха $10\text{--}15^\circ \text{C}$;
3 — мощность лучистого потока 600 вт/м^2 , температура воздуха $10\text{--}15^\circ \text{C}$,
4 — мощность лучистого потока 600 вт/м^2 , температура воздуха 25°C .

несколько ниже и достигала для растений с теплым днем $18\text{--}20^\circ \text{C}$, а для растений с холодным днем до 10°C .

Таким образом, растения первого варианта опыта выращивались при слабом освещении и высокой температуре воздуха, растения второго варианта — также при слабом освещении, но при низкой температуре воздуха. Растения третьего варианта получали мощный лучистый поток при пониженной температуре воздуха, а растения четвертого варианта, находясь в мощном лучистом потоке, выращивались в условиях высокой температуры воздуха.

Температура воздуха при помощи терморегуляторов поддерживалась за счет горения электропечей.

О состоянии томатной рассады, выращенной в различных условиях освещения и температуры воздуха, можно судить по данным табл. 39, сделанной за два дня до окончания опыта, и по рис. 59.

При слабом освещении растения совсем не росли, если температура воздуха была пониженной ($10\text{--}15^\circ \text{C}$);

наоборот, при освещении, в 4 раза большем, растения росли лучше в помещении с более холодным воздухом.

Высокая мощность освещения при высокой температуре воздуха отражалась на жизни растений томатов крайне неблагоприятно. В этих условиях у всходов, несмотря на то, что почва была закрыта белой бумагой, перегревались стебли около корневых шеек, а затем все время скручивались листья. Последнее делало их похожими на растения, поврежденные вирусными болезнями, хотя они и были здоровы. Забегая вперед, отметим, что такое состояние листьев было результатом их перегрева.

Таблица 39

Использование света рассадой томатов в зависимости от температуры воздуха

Варианты	Мощность (вт/м ²)		Температура (градусов)		Средний вес растений			Затраты электроэнергии на 1 мг сухого вещества (вт · ч)
	осветительной установки	лучистого потока	воздуха	листьев	сырой (г)	сухой (мг)	процент	
1	1200	150	25	28	33,07	3070	100	5,59
2	1200	150	12—15	15—18	2,27	260	8	77,88
3	4800	600	12—15	25—28	28,38	2970	96	27,07
4	4800	600	25	40	15,35	1800	58	44,72

Собственную температуру листьев томатных растений измеряли несколько раз в течение опыта при помощи описанного выше прибора, имеющего приемной частью микротермометр сопротивления. Ее средние значения для верхних листьев приведены в табл. 39.

Томатные растения наибольшую растительную массу образовали в условиях слабого освещения (150 вт/м²) и более высокой температуры воздуха. Почти такого же веса достигли и растения третьего варианта, росшие при пониженной температуре, но в условиях более мощного лучистого потока. Любопытно, что собственная температура их листьев была одинаковой и достигала 28° С. Сухая масса растений, выросших в помещении с температурой воздуха 25° С и под воздействием мощного лучистого потока, составляла только 40% от веса растений

двух предыдущих вариантов. Наконец, наименьший прирост растительного вещества дали растения второго варианта в условиях слабого освещения и невысокой температуры воздуха. Они же имели наименьшую температуру листьев, почти не отличающуюся от температуры воздуха. Практически эти растения почти не росли, дав за все время опыта по два не вполне развернувшихся листа. Ввиду того что растения четвертого варианта скручивали листья, можно заключить, что температура 40° С, которую они имели, является для томатов высокой. Обводненность тканей растений была меньшей у растений второго и четвертого вариантов опыта и несколько выше у растений первого и третьего вариантов. В данном случае она хорошо коррелировалась с длиной междоузлий и величиной листовых пластинок.

При сопоставлении количества электрической энергии, затраченной на образование 1 мг сухого вещества, резко выделяются растения первого варианта. В этом случае наблюдается несравнимая с другими вариантами экономия использования лучистого потока мощностью 150 вт/м² при температуре воздуха 25° С. Если количество электроэнергии в ватт-часах, приходящейся на 1 мг сухого вещества у растений этого варианта, принять за 100%, то в других вариантах оно выразится числами, во много раз большими. Это значит, что в данном опыте для накопления сухой растительной массы рассадой томатов лучистый поток лучше всего использовался при его сравнительно малой мощности, но при условиях относительно высокой температуры воздуха. Последнее несколько противоречит обычным представлениям. Исходя из них, надо было ожидать лучшего накопления растительной массы при невысокой интенсивности освещения у растений, росших при более пониженных температурах воздуха. На деле в подобных условиях (вариант второй) синтез сухого вещества оказался почти в 12 раз меньшим!

Снижение температуры воздуха привело к положительным результатам при сильном, а не слабом освещении. Это и понятно: менее нагретый воздух способствовал лучшей отдаче тепла, возникающего при поглощении растениями части мощного лучистого потока с большим содержанием инфракрасной радиации. Наоборот, при недостатке освещения несколько повышенные температуры

воздуха снижали расход тепла растениями и тем самым улучшали условия использования ими света.

Из всего сказанного очевидно, что значительная часть поглощаемой растениями лучистой энергии превращается в тепло, расходуемое ими в процессе теплообмена с внешней средой и на транспирацию.

Что касается цветения и плодоношения, то этот процесс у томатных растений шел нормально только в условиях мощного лучистого потока и пониженной температуры воздуха. Растения первого варианта начали образовывать бутоны одновременно с растениями третьего варианта, но последние не развивались и опадали.

Таким образом, создается впечатление, что для накопления сухой растительной массы у томатных растений ведущим фактором является температура их листьев. Если она благоприятна, то растения довольствуются очень небольшим количеством света. Ведь в лучистом потоке мелких ламп накаливания на видимую область спектра приходилось не более 30 вт/м^2 . Для образования же органов плодоношения томаты нуждались в повышенной мощности лучистого потока и зависели более от нее, чем от температуры воздуха.

Заслуживает внимания и факт различного характера роста растений томатов первого и третьего вариантов, имеющих очень близкий сухой вес и сходные температуры листьев. У растений первого варианта междоузлия растянуты и поэтому они высокие, а растения третьего варианта низкие и компактные, потому что их междоузлия значительно короче, при этом число узлов (листьев) в обоих случаях одинаково. Основные причины такого различия роста томатных растений, очевидно, прежде всего сводятся к неодинаковой мощности получаемых ими лучистых потоков, что приводит к различным особенностям роста осевых органов (стеблей).

Приведенный опыт с томатами интересен еще и тем, что он показал относительность оценки светолюбия растений. При сравнении рассады томатов первого и четвертого вариантов неизбежно отнесение данного сорта к теневыносливым видам. Наоборот, при сравнении состояния растений второго и третьего вариантов опыта выявляются признаки их светолюбия. Все дело в том, что томаты будут расти лучше в условиях высокой температуры воздуха при меньшем лучистом потоке ламп

накаливания (тенелюбие,) а в условиях более низкой температуры, наоборот, при большей мощности лучистого потока (светолюбие).

Что касается фотосинтеза, то, судя по образованию сухой растительной массы, его конечный эффект был одинаковым как при слабом, так и при значительно более интенсивном освещении, если листья растений имели одинаковую температуру. Значит, можно добиться высокого фотосинтеза и при малом освещении, повышая, а не понижая температуру воздуха, окружающего растение. Для повышения эффекта фотосинтеза в условиях интенсивного освещения следует, наоборот, не повышать температуру воздуха, а понижать так, чтобы собственная температура листьев держалась на уровне около 25°C .

Понятие «теплолюбие», так же как и понятие «светолюбие», относительно, но оба эти понятия, вероятно, всегда обратны друг другу. При интенсивном освещении растения оказываются менее «теплолюбивыми», чем при недостатке света, и наоборот.

Именно поэтому, кроме температуры воздуха, при выращивании растений в наших осветительных установках имеет большое значение и температура светящегося потолка установки, т. е. практически температура стекла и воды в фильтре. При сравнительно небольших мощностях излучения она должна быть относительно высокой.

Вот один из примеров. Огурцы сорта Клинский местный выращивались в лучистом потоке незеркальных ламп накаливания мощностью в 300 вт (по 5 ламп на $0,25 \text{ м}^2$). Колбы ламп погружались в проточную воду, находящуюся в кювете со стеклянным дном. В одной из таких установок температура воды поддерживалась на уровне 15°C . Во второй, точно такой же установке температура водяного потолка была выше в 3 раза и достигала 45°C . Все остальные условия выращивания огуречных растений были совершенно одинаковы.

Более теплая вода в фильтре способствовала лучшему росту и накоплению сухой растительной массы. Последняя была в 2,5 раза больше, чем у растений огурцов в установке с относительно холодным потолком (рис. 60).

Дело в том, что в этом случае мощность излучения на уровне вершин растений была незначительной, всего $150\text{—}200 \text{ вт/м}^2$, а температура воздуха $20\text{—}22^\circ$.

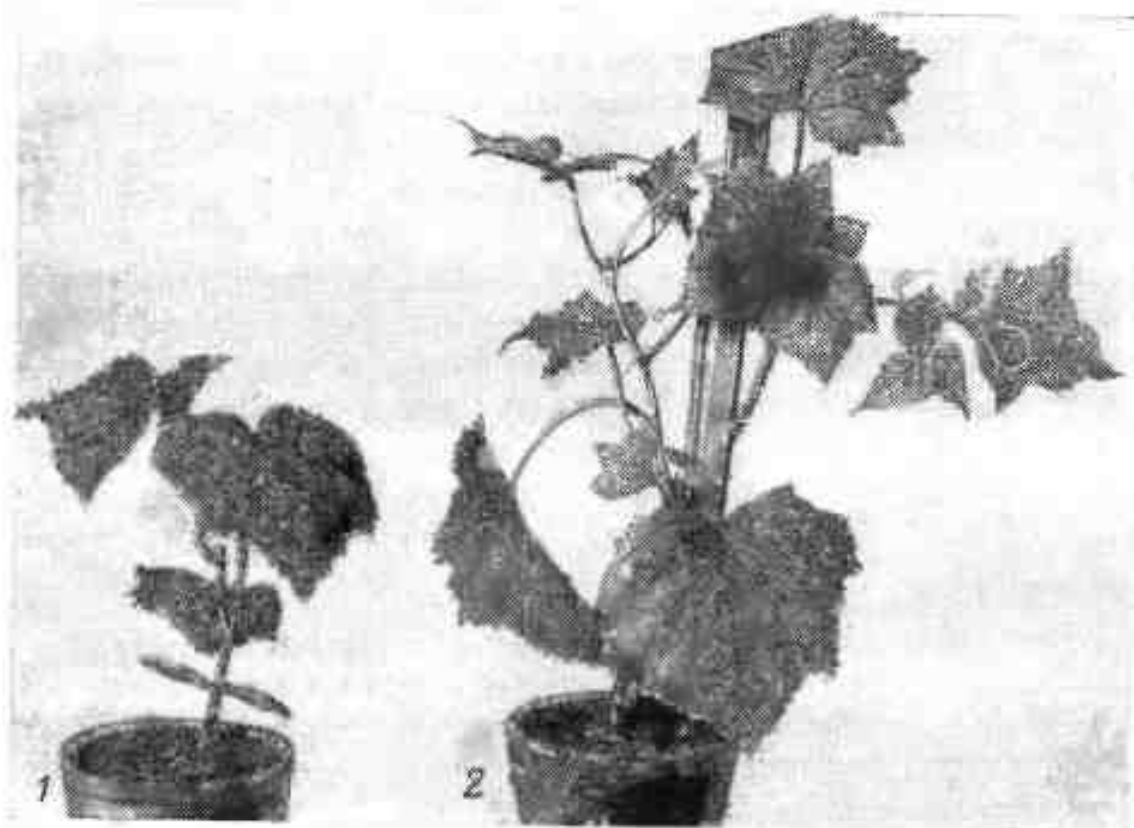


Рис. 60. Огурцы сорта Клинский местный, выращенные в одинаковых осветительных установках, состоящих из ламп накаливания.

1 — при температуре воды в фильтрах 15°, 2 — то же при 45°.

Понятно, что в этих условиях холодный потолок понижал температуру около вершин растений и тем самым ухудшал их рост. Возможно, что такое же явление наблюдается зимой в теплицах, так как пониженная по сравнению с воздухом температура стеклянной кровли ухудшает рост растений. Кровли теплиц, вероятно, следует делать теплыми. Для достижения этого есть простые способы. Один из них, как это делают в гидротеплицах, — подача на кровли теплой воды. Второй — обогрев стеклянной крыши лучистым потоком ламп накаливания, размещенных на специальном каркасе над стеклом. Третий способ, вероятно самый рациональный, состоит в соединении в одном двух первых. Конечно, могут быть предложены и другие способы, направленные к достижению той же цели.

Помимо большого значения температуры воздуха во время периодов облучения растений светом, столь же большое значение имеют и ночные температуры.

Как правило, в специальных монографиях и учебной литературе рекомендуется в ночные часы значительно понижать температуру воздуха в теплицах и других аналогичных помещениях. Теоретическое обоснование этого правила дано в исследованиях Вента, проведенных им, в основном, на томатных растениях в калифорнийском фитотроне. Основываясь на них, он выдвинул представление о термопериодизме растений. К нашему удивлению, в опытах, проведенных нами также в камере искусственного климата, мы получили иные результаты.

Для выяснения полезности понижения температуры воздуха в темный период суток по сравнению со светлым мы неоднократно проводили очень простые опыты.

Суть их сводится к тому, что растения томатов с появления всходов и до уборки урожая находились в двух одинаковых камерах искусственного климата при одинаковых световых режимах, получая ежедневно 14 часов света и 10 часов темноты. В одной камере температура воздуха и днем и ночью была одинаковой, равной 25°, а в другой камере дневная температура в 25° сменялась ночной в 18°С. Мощность лучистого потока около вершин растений колебалась от 400 до 200 вт/м², т. е. была сравнительно невысокой. Поэтому температура растений практически была такой же, как температура воздуха. Все условия выращивания, кроме различия в ночных температурах, были одинаковыми. Результаты таких опытов, проведенные с томатами сорта Пушкинский 1853, были всегда однозначными (табл. 40).

Таблица 40

Основные результаты фенологических наблюдений за растениями томатов в фитотроне
(продолжительность дня 14 часов)

Температура воздуха	Число дней от всходов до				
	появления бутонов	цветения	завязыва- ния плодов	созревания 1-го плода	уборки урожаи
Днем 25°, ночью 25°.	15	24	33	48	60
Днем 25°, ночью 18°.	17	35	41	67	80

Любопытно, что при почти одновременном появлении бутонов цветение растений, получавших теплую ночь (25°), началось на 10 дней раньше, чем у растений в камере с температурой воздуха ночью 18° . Еще больший разрыв наблюдался в созревании плодов. При постоянной температуре первые плоды созревали за 48 суток, а весь урожай был снят, как обычно, за 60 дней. В камере же с переменной температурой первые красные плоды появились только через 67 дней. Разрыв в сроке созревания первых плодов достигал 20 дней.

Еще важнее для практики данные, касающиеся формирования урожая (табл. 41).

Таблица 41

Формирование урожая томатами, выращиваемыми при различной ночной температуре
(продолжительность дня 14 часов)

Температура воздуха	Количество плодов (процент)		Средний урожай плодов на 1 растение (г)	Затраты электроэнергии на 1 кг плодов	
	завязавшихся	вызревших		квт · ч	процент
Днем 25° , ночью 25° .	66	86	520	220	100
Днем 25° , ночью 18° .	42	48	410	337	153

Часто приходится слышать, что для завязывания плодов томатов полезны ночные пониженные температуры, но мы наблюдали обратное явление. Незначительное понижение ночной температуры приводило к понижению процента завязывания плодов. Созревание плодов шло значительно интенсивнее при постоянной температуре, и в момент уборки, когда возраст растений был равен 60 дням, они имели 86% вполне созревших плодов. Растения, росшие в условиях термопериодизма, даже в 80-дневном возрасте имели только 48% зрелых плодов. Несмотря на 20-дневное различие в сроке уборки урожая, растения, получавшие постоянную температуру, в меньшем возрасте имели больший урожай плодов. В результате затраты только одной электроэнергии при постоянной суточной температуре были на 50% ниже, чем в случае рекомендуемого понижения ночной температуры.

Помимо ускорения роста, развития и повышения урожая томатов, постоянная суточная температура порядка 25° способствует и заметному улучшению пищевых достоинств плодов. Они обладают большей сахаристостью и большим содержанием витамина С, а также повышенным содержанием сухого вещества по сравнению с плодами, созревшими в установке, где ночная температура была ниже дневной на 7° .

Следовательно, понижение ночной температуры против дневной всего на 7° приводит не к улучшению результатов выращивания томатов, а наоборот, ухудшает эти результаты.

Чтобы познакомиться более подробно с этим интересным и важным для практики явлением — отсутствием термопериодизма, по крайней мере у сортов томатов, с которыми велись наши исследования, — остановимся на результатах еще одного опыта.

В этом опыте томатные растения сорта Пушкинский 1853 выращивали параллельно в четырех камерах искусственного климата при одинаковом световом режиме: мощность лучистого потока ламп накаливания после водяного фильтра 200—400 вт/м², продолжительность дня — 14 часов. Все другие условия выращивания были также одинаковыми.

Изменялась только температура воздуха.

В первой камере температура воздуха днем и ночью была одинаковой, равной 25° . Во второй камере дневная температура его равнялась 25° , а ночная $12-15^{\circ}$. В третьей камере, наоборот, температура днем была $12-15^{\circ}$, а ночью 25° . В четвертой камере и днем и ночью температура была одинаковой, равной $12-15^{\circ}$. Выращивание растений в указанных условиях продолжалось 23 дня.

Растения первой группы были хорошо развиты (рис. 61). Они имели наибольшую вегетативную массу и распускающиеся бутоны на двух кистях. Растения второй группы (прохладная ночь) сильно отставали от них в росте и, главное, не образовали бутонов. Они значительно отставали от растений, получавших теплую ночь, и в росте и в развитии. Растения третьей группы по обычным представлениям должны были бы очень быстро погибнуть, так как получали холодный день и теплую ночь. Но они, как можно видеть, хотя и очень плохо, но все же жили и даже немного росли. Зато



Рис. 61. Томаты в возрасте 20 дней, выращенные в камере искусственного климата на 14-часовом дне.

1 — при температуре воздуха 25° днем и ночью, 2 — то же при 25° днем, $10-12^{\circ}$ ночью, 3 — то же при $10-12^{\circ}$ днем, 25° ночью, 4 — то же при $10-12^{\circ}$ днем и ночью.

растения четвертой группы, против правил, просто гибли в состоянии семядолей.

Результаты этого опыта с полной очевидностью свидетельствуют в пользу постоянства оптимальной температуры томатных растений для их быстрого развития и высокой продуктивности. Любые чередования оптимальной температуры (25°) с более низкой ($12-15^{\circ}$), т. е. термопериодические условия, приводят к резкому снижению продуктивности растений и даже практически, в нашем опыте, к их гибели. Оптимальная для томатных растений собственная температура около 25°C вряд ли может варьировать в течение суток, а может быть, и всего вегетационного периода без вреда для них.

Вероятно, это положение является в какой-то мере правильным и для других видов растений.

Что касается томатов, то несоблюдение постоянства освещения и температуры воздуха, определяющих опти-

мальную температуру самого растения, будет всегда сказываться на конечном хозяйственном эффекте. Недобор урожая плодов томатов, их низкие пищевые качества и позднее созревание являются результатом неправильного выращивания, приводящего к варьированию их собственной температуры в недопустимых пределах.

Таким образом, экспериментально установлено, что в одном и том же лучистом потоке можно вырастить и плохие и хорошие растения в зависимости от температуры окружающего воздуха.

Надо полагать, что изложенные выше факты имеют общепарабиологическое значение и закономерны для условий не только искусственного, но и естественного освещения. В частности, они показывают полную несостоятельность так называемого закона физиологического минимума Блэкмана, искажающего сущность подлинных взаимосвязей растений с окружающей средой.

По этому «закону» лимитирующим процесс фотосинтеза будет тот фактор, который находится в минимуме с точки зрения исследователя, а не растения. Так, например, если растение находится в условиях недостаточного освещения, то, по Блэкману, единственным способом получить достаточный урожай является повышение интенсивности освещения. На самом же деле при недостатке света можно повысить температуру воздуха и тем самым улучшить синтетическую деятельность растений и добиться тех же результатов, что и при улучшении световых условий.

В природе все факторы среды, необходимые для жизни растений, всегда в любых условиях действуют сопряженно. Стоит измениться одному фактору в сторону уменьшения или увеличения, как очень скоро изменится количественная потребность растения и в других факторах.

Что касается мощности лучистого потока и температуры воздуха, то их влияние на растение неотделимо одно от другого, ибо оба эти фактора определяют температуру листьев растений, от которой зависят многие процессы растительной жизни.

БЛИЖАЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫРАЩИВАНИЯ РАСТЕНИЙ В ИСКУССТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Повышение продуктивности растений, так же как и ускорение их развития, были и остаются важными проблемами как практического, так и теоретического растениеводства.

Надежда на получение двух колосьев там, где рос один, издавна была мечтой земледельца и способствовала развитию физиологии растений.

Позже, с развитием принципов научной селекции, возникла проблема ускорения развития растений. Ее значение определяется необходимостью получения новых разновидностей, успевающих закончить свою вегетацию в течение благоприятных, часто очень коротких, летних периодов северных стран.

Помимо этого, сам процесс селекционной работы тормозился длительными сроками, проходящими от посева до первого плодоношения гибридных растений, особенно если эти растения были многолетними. Плодоношение многих растений начинается на второй-третий год их жизни, а большинство древесных видов начинает плодоносить еще позже, часто в возрасте 10—15, а то и 50 лет. Естественно, что столь поздние сроки первого плодоношения многолетних растений сильно затрудняют успешную селекционную работу с подобными видами.

В различное время было предложено немало методов, как повышающих продуктивность растений, так и ускоряющих их развитие.

Вся современная система земледелия, вся агротехника возделывания сельскохозяйственных растений направлены на получение наиболее высоких урожаев.

Многочисленные наблюдения показывают, что повышение продуктивности растений очень часто приводит к одновременному удлинению периода их развития. Наоборот, большинство методов, ускоряющих развитие растений, в то же время понижает их продуктивность. Отсюда возникла неверная и вредная для практики теория об антагонизме между продуктивностью и скороспелостью растений. Например, озимые сорта хлебных злаков всегда продуктивнее яровых, однако это не означает, что нельзя создать яровой сорт пшеницы, столь же или даже более урожайный, чем лучший озимый сорт.

Более того, наши исследования показывают, что у любых растительных видов, в том числе и у сравнительно скороспелых однолетников, и продуктивность, и скорость их развития могут сопутствовать друг другу в очень широких пределах. При этом заслуживает исключительного внимания то обстоятельство, что среди факторов внешней среды, обязательных для нормальной жизнедеятельности растений, наиболее активным ускорителем развития растений оказывается лучистая энергия.

Именно поэтому нам удалось получить ряд очень высоких показателей как по скорости развития, так и по продуктивности для самых разнообразных растений.

Томаты сорта Пушкинский 1853 в хороших естественных условиях за 6 месяцев выращивания дают урожай плодов не более 7—10 кг с 1 м². В наших опытах, полностью в искусственных условиях, весь урожай плодов снимался через два месяца после появления всходов, причем за 6 месяцев собирается три урожая с общим количеством плодов в 60 кг.

Это означает, что нам удалось одновременно и ускорить развитие томатных растений в 2—3 раза и увеличить их продуктивность не менее чем в 5—6 раз. Общее количество сухого вещества у томатных растений за сутки с 1 м² в наших опытах достигает 70—80 г, т. е. находится на уровне высоких урожаев хлореллы и, конечно, это еще далеко не предел.

В настоящее время средний вес готовых к уборке томатов (рис. 62) составляет примерно 874 г при высоте, не превышающей 50—55 см. Такие размеры томатных растений позволяют выращивать 36 растений на 1 м², равномерно размещенных на площади осветительной установки.



Рис. 62. Состояние томатов в 50-дневном возрасте в осветительной установке из ламп накаливания и водяного фильтра.

Такое сильное загущение, как 36 растений на 1 м², никогда ранее не применявшееся, благодаря хорошему освещению и снабжению растений водой и минеральными питательными веществами создает хорошие условия для отбора наиболее продуктивных и скороспелых растений.

Интенсивное освещение для томатных растений обеспечивается в наших опытах осветительными установками, состоящими из 16 зеркальных ламп накаливания по 300 вт каждая и водяного фильтра. Мощность лучистого потока у вершин растений в первые дни после посева поддерживается на уровне 250—300 вт/м², а затем повышается за счет приближения растений к потолку установки до 600 вт/м². Такие мощности лучистых потоков при 14-часовом ежесуточном освещении создают световой режим, способствующий активной жизнедеятельности томатных растений.

Для создания хороших условий корнеобитания растений на подъемный пол осветительной установки помещается квадратный бак из листового железа или, еще лучше, из пластмассы. В первом случае внутренние стенки и пол (железного) бака покрыты битумом, а снаружи масляной краской. Длина сторон бака 1000 мм, а глубина его 200 мм. В середине дна сделано отверстие с припаянной к нему трубкой, на которую надевается резиновый шланг.

Для того чтобы растения никогда не нуждались в минеральных питательных веществах, воде и воздухе, находящихся в корнеобитаемой среде, они выращивались в размельченном керамзите. Керамзит два раза в сутки насыщался питательным раствором. Кнопа нормальной или двойной концентрации, который стекал в центральное отверстие, находящееся на дне бака. Наполнение раствором керамзита осуществлялось или автоматически, или вручную. Раствор менялся через день или через 2—3 дня.

Через 15 дней после всходов наши томатные растения уже имеют хорошо заметные бутоны. Цветение начинается в возрасте 22—25 дней. Завязи образуются в возрасте 30 дней. Первые красные плоды появляются на 48—50-й день, и урожай собирается через 60 дней после появления всходов. Урожайность каждого из 36 растений

в последних опытах нашей сотрудницы Л. С. Александровой при общем количестве плодов около 22 кг, собираемых с 1 м² за 60 дней жизни растений, дана в табл. 42.

Из 36 растений у 29 урожай плодов превышал 500 г, причем у двух растений он был больше 1 кг.

Заслуживает особого внимания факт высокой фотосинтетической продуктивности листьев наших томатных растений. О нем лучше всего судить по соотношению веса плодов к весу всей вегетативной массы. При общем сыром весе одного среднего растения в 874 г на долю плодов приходится 627 г, или более 71%, и на долю листьев, стеблей и корней всего 247 г, или менее 30%. Такое соотношение между плодами и вегетативной массой чрезвычайно выгодно.

Повышение урожая нашего лабораторного образца можно объяснить только тем, что мы в течение многих поколений (не менее 30) ведем отбор наиболее продуктивных особей, семенами которых и пользуемся для следующих генераций. Кроме того, ежегодно потомство отобранных растений выращивается в теплице для получения наибольшего количества семян.

Таблица 42

Урожай плодов томатов по каждому растению в осветительной установке, состоящей из зеркальных ламп накаливания и водяного экрана

Вес плодов (г) с одного растения в пределах весовой группы				
401—500	501—600	601—700	701—800	> 801
410	520	610	730	840
410	540	610	770	860
450	550	620	800	920
460	560	620		1030
460	560	620		1090
470	560	620		
470	560	620		
	570	620		
	575	640		
	590	650		
	600			
3130	6185	6230	2300	4740

При получении урожая томатов за 60 суток в количестве 22 кг с 1 м² на 1 кг плодов расходуется 183 кВт·ч электроэнергии. Это видно из следующих кратких расчетов: за 14 часов ежедневного горения 16 лампами мощностью 300 вт каждая затрачивается 67 (300×16×14) кВт·ч, а за 60 суток в 60 раз больше, т. е. 4020 кВт·ч. А так как при этом собирается урожай в 22 кг, то затраты на 1 кг составляют 183 (4020:22) кВт·ч. При стоимости 1 кВт электроэнергии 0,1 копейки расходы на ее оплату выразятся в 18 копеек на 1 кг. В данное время самым высоким является расход на оплату электрических ламп.

Помимо получения высоких урожаев плодов томатов, наши осветительные установки с лампами накаливания позволяют выращивать хорошо развитую рассаду томатов всего за 14—15 дней. Субстратом для выращивания рассады является дробленый керамзит. На рис. 63 показано 15-дневное растение, вытасченное из керамзита просто рукой, которая продолжает его держать. Все корни покрыты керамзитом, что обеспечивает совершенно безболезненную пересадку в любые условия даже без подвядания растений.

В тепличных условиях такое высокое качество рассады обеспечивает быстрое получение зрелых плодов томатов. При высаживании нашей рассады в начале марта в теплицу первые красные плоды появляются к 1 мая. Затраты электроэнергии на одно растение рассады равны 8,5 кВт·ч.

Результаты наших многократных отборов наиболее продуктивных томатных растений позволяют надеяться на повышение урожая с 1 м² до 36 кг плодов за 60 дней. Тогда в год с 1 м² можно будет собирать урожай, равный 216 кг, или в переводе на площадь, равную 1 га, — 21 600 ц превосходных по пищевым качествам плодов. Вероятно, и этот урожай не является предельным. Опыт показывает, что имеются крупные резервы дальнейшего повышения продуктивности томатных растений. Они скрыты в действии всех факторов, необходимых для жизнедеятельности растений, и, конечно, в первую очередь в действии света. Причем здесь возможны и улучшения спектрального состава и выбор наиболее рациональных доз света, получаемых растениями за сутки, и т. п.



Рис. 63. Рассада томатов в возрасте 15 дней, выращенная на керамзите в осветительной установке, состоящей из зеркальных ламп и водяного экрана.

Например, в наших установках томаты плохо растут на непрерывном освещении из-за быстрого старения листьев, выражающегося в потере ими нормальной пигментации, в скручивании и, наконец, в постепенном отмирании. В том случае, когда томаты выращиваются на непрерывном освещении за счет лучистых потоков газосветных ламп, такого явления не наблюдается. Отсюда возникло требующее проверки предположение о неблагоприятном влиянии на томаты спектрального состава излучения ламп накаливания при не-

прерывном облучении растений. Результаты проведенных с этой целью опытов превзошли все наши ожидания. Оказалось, что непрерывное освещение лучистым потоком ламп накаливания, лишенным ближней инфракрасной радиации, с максимумом излучения в желто-зеленой области не приводит к какому-либо видимому угнетению томатных растений. Напротив, растения эти имеют интенсивно окрашенные листья, почти темно-синего цвета, еще никогда не наблюдавшиеся в наших опытах, без всяких признаков скручивания. Бутоны и цветы у растений появились в нормальные для данной мощности лучистого потока сроки (табл. 43).

Таблица 43

Влияние спектрального состава света на растения томатов

Варианты освещения лучистым потоком ламп накаливания	Состояние растений	Окраска	Число листьев	Вес наземной массы		Дней от всходов до	
				сырой (г)	сухой (г)	бутизации	цветения
Максимум излучения в желто-зеленой области	Цветение	Темно-зеленая, почти синяя	12	50	4,45	16	30
Обычное спектральное распределение энергии	Вегетативное	Светло-зеленая, пятнистая	8	10	0,70	Нет	Нет

Растения томатов из установки с обычным спектральным распределением энергии лучистого потока ламп накаливания, прошедшего через воду, как всегда, имели бледно окрашенные листья с большим числом на них белых пятен с признаками начавшегося отмирания.

Растения, выросшие в лучистом потоке, где вся энергия находится в видимой области, выглядят значительно лучше растений, росших при той же мощности лучистого потока, но с иным распределением (обычным для наших осветительных установок) энергии по спектру (рис. 64).

В 30-дневном возрасте средний сырой и сухой вес растений в опытной группе составлял соответственно 50 и 4,45 г, а в контрольной группе 10 и 0,7 г, т. е. растительная масса опытных растений была более чем в пять раз больше контрольных. Так же сильно растения отличались и по развитию. Опытные растения цвели, а у контрольных растений еще не было бутонов.

Из результатов этого опыта вытекают существенные для практики выводы. Для томатных растений непрерывное освещение неблагоприятно не само по себе, а только при определенном спектральном составе, когда большая часть энергии приходится на ближнюю инфракрасную радиацию. Если же основное количество энергии



Рис. 64. Томаты в возрасте 25 дней, выращенные при непрерывном освещении в лучистом потоке зеркальной лампы накаливания, пропущенном через водяной фильтр и раствор хлорной меди (левый сосуд) и только через водяной фильтр (правый сосуд).

находится в области видимой радиации с длиной волн от 400 до 700 мкм, непрерывное освещение при мощности лучистого потока 200 Вт/м^2 не вызывает отрицательного эффекта. Похожий эффект вызывает и изменение спектрального состава излучения и укорочение периода ежесуточного освещения. Возможно, что существует определенная зависимость между степенью «светового хлороза» и количеством ближней инфракрасной радиации, полученной томатами за известный период времени.

Отрицательный эффект длинноволновой радиации в значительной степени сглаживается коротким днем. На 14-часовом дне, например, при неблагоприятном спектральном составе листья томатов имеют хорошо развитые листовые пластинки, нормальную зеленую окраску и почти не скручиваются. Отсюда возникает предположе-

ние, что большое количество ближней инфракрасной радиации, получаемой растениями за сутки, изменяет физиологическое состояние листьев в неблагоприятную для полноценного синтеза сторону. Выращивание томатов на 14-часовом дне в значительной степени снижает отрицательный эффект действия спектра лампы накаливания.

Листья томатов, выросших в нашей установке, в условиях 14-часового дня к моменту цветения обладают хорошей оптической плотностью, выражающейся в высоком коэффициенте поглощения падающей на них лучистой энергии. В сине-фиолетовой и красной областях спектра поглощение доходит до 90%, а минимальное поглощение в зеленой области до 70%. Такие несомненно высокие показатели поглощения света листьями томатов говорят в пользу светового режима, в котором они формируются.

Возможно, что неблагоприятное действие ближней инфракрасной радиации зависит от количества энергии, лежащей в пределах видимой радиации. Очень может быть, что достаточное количество энергии в видимой области нейтрализует или даже изменяет влияние ближней инфракрасной радиации на морфогенез томатных растений.

Помимо нормального формирования листьев, растения томатов, росшие при освещении видимой радиацией без участия красной и ближней инфракрасной, характеризуются большим накоплением растительной массы и нормальным ходом онтогенеза. Очевидно, для этих важнейших в хозяйственном отношении физиологических процессов имеют большое значение зеленая, желтая и оранжевая радиации с длиной волн от 500 до 600 мкм. На данную область радиации в нашем опыте в общей сложности приходилось около 60% от всего лучистого потока, а в контроле всего около 9—10%. Причем очень возможно, что особенно важной оказывается именно желтая радиация.

Подобрав оптимальный спектральный состав лучистого потока, несомненно снова удастся значительно повысить и без того высокий урожай томатов.

Существенные перспективы в значительном улучшении результатов кроются и в более подробном изучении всех внешних факторов, начиная с температуры среды

и кончая условиями минерального питания, которые способствуют максимальному использованию растениями света. В повышении продуктивности растений значительную роль должны сыграть работы по выявлению оптимальных сочетаний всех внешних факторов. В этом и заключается исключительно важное значение лабораторий искусственного климата (фитотронов).

Томаты не являются исключением, такие же, а возможно даже и лучшие результаты могут быть получены и по другим культурам.

Ускорение развития имеет исключительно большое значение для культуры декоративных растений. В цветоводстве скорость и сроки выгонки определяют стоимость выпускаемой продукции. Мало этого, в северной части СССР многие поздно зацветающие виды, например крупноцветную хризантему, приходится долгое время выдерживать в дорогостоящих сооружениях утепленного грунта, теплицах и парниках, так как их вегетационный период не укладывается в теплые месяцы. В частности, крупноцветная хризантема выгоняется в течение 8—9 месяцев. Естественно, что ее себестоимость весьма значительна.

Однако, как показали результаты выращивания нескольких сортов крупноцветных хризантем при искусственном освещении в осветительной установке лаборатории светофизиологии, время ее выгонки может быть сокращено до 2 месяцев, т. е. в 3—4 раза. За этот сравнительно короткий срок, начинающийся с посадки черенков и кончающийся ее цветением, получают хорошие растения хризантемы, причем на каждое из них затрачивается всего около 90 кВт·ч электроэнергии.

В период черенкования хризантема находится на длинном дне или на непрерывном освещении, что способствует быстрому укоренению, а затем переводится на 12-часовой день, значительно ускоряющий ее цветение.

При правильном использовании искусственного света проще всего с наименьшими затратами электроэнергии на единицу продукции вырастить лук на перо. Для этих целей хорошим источником освещения являются люминесцентные трубки. При этом могут быть рекомендованы два способа получения зимой ценного по своим пищевым качествам зеленого лука.

Первый способ выгонки лука на перо заключается в выращивании его между двумя рядами люминесцентных трубок, расположенных среди растений параллельно поверхности стеллажа. В этом случае создается хорошо используемое луком двухстороннее освещение, чего нельзя достигнуть, освещая лук только сверху.

Второй способ состоит в следующем: луковицы помещают в выгоночное помещение, лишенное всякого света, и оставляют там до тех пор, пока листья («перо») достигнут товарных размеров, т. е. длины 30—35 см. При температуре воздуха 20°С на этот процесс уходит не больше 10 суток, считая с начала прорастания луковиц. Затем растения с двух сторон облучают светом люминесцентных ламп непрерывно в течение 24 или 48 часов. За это время листья лука полностью зеленеют и, таким образом, вся выгонка на перо заканчивается за 11—12 дней с минимальными затратами как на топливо, так и на электроэнергию.

Напомним, что в производственных условиях на выгонку лука затрачивается не менее 30—50, а то и 60 дней, причем все это время лук находится в теплицах, расходующих большое количество тепла.

Содержание витамина С в листьях лука, выращенных по описанному выше способу, разработанному в лаборатории светофизиологии, составляет в среднем 31 мг на 100 г сырого вещества, что превышает на 8% содержание его в листьях, выгоняемых в зимнее время в теплицах.

Этот новый способ выгонки лука вполне пригоден для широкой практики северного зимнего овощеводства. Очень возможно, что таким же способом можно выращивать и ряд других зеленных культур.

Пожалуй, еще большего ускорения репродуктивного развития удалось достичь у растений арахиса.

В осветительной установке, состоящей из ламп накаливания и водяного фильтра, сортообразцы арахиса, полученные из ВИР и обычно зацветающие на юге СССР на 45—50-й день от посадки, начали цвести в 16-дневном возрасте, а к 50-му дню уже дали вполне зрелые семена (рис. 65).

Естественно, что искусственное освещение ускоряет развитие и многолетних древесных растений. Так, например, корнесобственные сортовые лимоны зацветают в течение первого года жизни, считая с момента посадки

черенков, а сеянцы лимонов цветут через 3—5 лет после высева семян. Шиповники и некоторые другие кустарники при семенном размножении переходят к плодоношению в первый год жизни.

Очень интересные данные были получены в наших скромных опытах с виноградом. Недавно Г. Х. Арзамасцевой удалось получить плодоношение 4-месячных растений винограда в условиях лабораторной установки с лампами накаливания и водяным фильтром. При посадке черенков с двумя сближенными почками в небольшие сосуды с почвой или керамзитом за 4 месяца образовались растения, давшие по 2—3 крупных кисти ягод. Виноград в искусственных условиях становится вечнозеленым и вечно вегетирующим растением, что позволяет без особенных затруднений всегда иметь плодоносящие растения. По нашему предварительному подсчету с 1 м² нашей осветительной установки за год можно снимать не менее 40 кг винограда. При серьезной работе с этой культурой возможно и сокращение срока от

посадки черенков до урожая и повышение последнего.

Искусственные условия могут быть с успехом использованы для выращивания тропических растений, дающих ценные растительные продукты и не могущих жить в естественных условиях нашей страны. Примером



Рис. 65. Растение арахиса в 45-дневном возрасте, выращенное в осветительной установке из ламп накаливания и водяного фильтра.

Рис. 66. Растения раувольфии в 7-месячном возрасте, выращенные в установке из люминесцентных трубок (1) и ламп накаливания с водяным фильтром (2) при 20-часовом дне.



такого растения может служить раувольфия змеинная. Она растет в лесах тропической Индии и является ценным лекарственным растением. Из корней этого растения добываются алкалоиды, эффективные в лечении гипертонии и ряда психических заболеваний.

Получив небольшое количество черенков этого растения, взятых с однолетних сеянцев, растущих в оранжерее Всесоюзного института лекарственных растений, мы, размножив их, провели почти годичное выращивание раувольфии в осветительной установке, состоящей из 200-ваттных ламп накаливания и водяного экрана, а также под люминесцентными лампами.

В осветительной установке из ламп накаливания за 8 месяцев выращивания каждое растение раувольфии дало такое количество алкалоидов, какое в Индии в естественных условиях накапливается за три года. При этом растения раувольфии лучше всего росли и скорее всего зацвели на длинном 18—20-часовом дне в лучистом потоке ламп накаливания.

Несмотря на то, что раувольфия является лесным растением, растущим под пологом леса, а на культурных плантациях обязательно притеняется, она плохо росла в условиях люминесцентного освещения (рис. 66).

Пример с раувольфией показывает, что при электрическом освещении и, следовательно, вообще в условиях искусственных режимов можно выращивать любые растения, в том числе и тропические, и тем самым быть независимым от условий климата, не свойственного данной стране. Вообще в научном отношении вопрос о зависимости успеха той или иной важной культуры от географического пункта на земле может считаться снятым.

При необходимости любое растение в любом пункте может быть выращено в соответствующей среде, созданной не природой, а человеком. Изучая и регулируя световой и температурный режимы выращивания, а также условия питания и водоснабжения, за короткие сроки можно получать не только то, что дает до сих пор природа, но, по-видимому, и заставить растения синтезировать несколько иные органические вещества, более отвечающие желаниям и нуждам человека. В частности, регулируя режим выращивания, нетрудно добиться подавления синтеза одних веществ, малоценных или даже вредных, за счет возрастания синтеза других, ценных в пищевом или лечебном отношении.

Итак, результаты всех наших опытов свидетельствуют, что при необходимости в искусственных условиях можно вырастить любые виды растений с очень хорошими результатами, далеко превышающими нормальные урожаи в оптимальных естественных условиях.

Выращивая растения полностью в контролируемых условиях, мы столкнулись с важным в практическом отношении явлением, впервые описанным в работах И. А. Костюченко и Т. Я. Зарубайло, заключающимся в различном поведении одного и того же сорта пшеницы в зависимости от условий, в которых созревали ее семена.

В Ленинграде, например, ветвистая пшеница даст лучшие результаты, если для посева берутся семена, полученные с Кавказа или из Средней Азии, а не местной репродукции.

Весьма вероятно, что озимые пшеницы потому и нуждаются в действии пониженных температур, что их семена формируются и созревают в условиях высоких температур, характерных для южных районов, где они обычно возделываются. Наоборот, яровые пшеницы, высеваемые на севере, созревают, как правило, при более

низких температурах и потому хорошо растут в условиях повышенных температур.

При выращивании ветвистой пшеницы в условиях искусственного освещения оказалось, что генерации, семена которых созревали при высоких температурах воздуха, удлиняли период своего развития при выращивании в тех же условиях и сокращали его после небольшого периода охлаждения прорастающих семян. Наоборот, растения из семян, созревших в тех же осветительных установках, но при меньших температурах воздуха, скорее развивались и давали высокий урожай при высоких температурах.

Вегетационный период ветвистой пшеницы в условиях искусственного освещения был сокращен до 70 дней. Что касается ее продуктивности на электрическом освещении, то она была выше нормы, несмотря на значительное ускорение развития.

Число зерен в колосе у растений, выросших на электрическом освещении, колебалось в пределах от 56 до 75. Вес их составлял от 3 до 4,5 г на один колос. Зерно было выполненным и более стекловидным, чем у растений, росших на естественном освещении. Наибольшее количество продуктивных стеблей (4—8) также наблюдалось у растений, росших на искусственном освещении.

Быстрое созревание ветвистой пшеницы в условиях электрического освещения привело к получению за один год пяти поколений, причем растения, выросшие из семян первого лабораторного поколения на участке лаборатории, обнаружили очень высокую продуктивность. Так, были растения, которые дали по 4700 зерен, собранных в 25—30 колосьях. Общий вес зерна на одно растение доходил до 200 г и выше. Таких высоких показателей продуктивности растений исходного образца при том же способе культуры не было обнаружено.

Этот факт, так же как и постоянное возрастание продуктивности томатных растений в условиях искусственного освещения, свидетельствует о недостаточности наших представлений о потенциальных возможностях растений и в то же время указывает на еще один крупный резерв поднятия производительности растениеводства.

Все испытанные нами сорта томатов в условиях искусственного освещения обнаруживают тенденцию к значительному варьированию особей, составляющих сорт,

причем по самым важным биологическим и хозяйственным признакам. Поэтому для выращивания растений в условиях искусственного освещения следует создавать специальные сорта, ведя селекционную работу в камерах искусственного климата и обязательно при искусственном освещении.

Мало этого, наш опыт показывает, что, помимо селекционной работы с существующими видами и сортами овощных и других растений, для получения наиболее продуктивных и полностью используемых в пищу растений следует вести в условиях искусственного освещения и генетическую работу. Последняя должна направляться на создание новых форм растений, дающих наименьшие отходы растительной массы и обладающих высоким коэффициентом использования лучистой энергии.

Примером таких растений может быть межродовой гибрид между капустой белокочанной (Номер первый) и редисом (Розовый с белым кончиком), полученный автором сперва совместно с Р. И. Осминкиной, а затем с Г. А. Макаровой.

Летом 1945 г. в лаборатории физиологии ВИР кастрированные цветы редиса были опылены пылью белокочанной капусты (сорт Номер первый), взятой с цветков молодых (50-дневных) растений, привитых на готовые к цветению растения редиса.

Предварительная прививка капусты на редис произведена для того, чтобы получить цветение капусты в первое лето жизни, без образования кочна. При этом автор исходил из результатов своих актинопериодических исследований, показавших, что переход к цветению обуславливается теми веществами, которые поступают из листьев к точкам роста. Работа проводилась следующим образом: семена редиса сорта Розовый с белым кончиком высевались в большие сосуды, заполненные двумя килограммами почвы. С появлением всходов в каждом сосуде оставлялось по одному растению. Они выращивались в теплице на непрерывном освещении до образования цветоноса. После этого на растениях редиса, служивших подвоями-донорами, удалялись все точки роста, начиная с вершинной и кончая семядольными. Затем на вершину стебля прививались молодые растения капусты (15-дневная рассада). После начала срастания тканей привоя и подвоя привитое растение капусты — реципи-

ент — заключалось в светонепроницаемую цилиндрическую камеру из тонкого картона и плотной материи.

Капуста (реципиент), находясь в темноте, жила за счет фотосинтеза листьев редиса (донора), лишённого своих точек роста и поэтому не расходующего веществ, вызывающих цветение, которые благодаря этому направлялись в точки роста капусты. Последняя начала образовывать вершинные бутоны примерно через 30 дней после прививки.

Таким образом, было получено цветение капусты на 45—50-й день после появления всходов, что само по себе было весьма важным фактором, доказавшим, что в онтогенезе как однолетних, так и двулетних растений основная роль принадлежит листьям, а не точкам роста.

Прививочные воздействия, помимо необычного ускоренного цветения капусты, обеспечили значительное увеличение завязывания гибридных семян, повысив тем самым процент удачного скрещивания при отдаленной межродовой гибридизации.

Позже, уже в лаборатории светофизиологии АФИ, данные опыты по получению межродовых гибридов между капустой и редисом были повторены вновь. В этом случае, помимо белокочанной капусты, была взята кольраби, которая в виде рассады прививалась на редис так же, как белокочанная сорта Номер первый. Кроме того, в отличие от первого опыта в данной работе были в большом количестве проделаны контрольные скрещивания между редисом и семенниками капусты.

Все контрольные опыления окончились неудачей — не завязалось ни одного гибридного семени. Опыление цветов редиса пылью капусты, перешедшей к цветению под воздействием листьев редиса, снова привело к получению гибридных семян. Мало этого, на этот раз удалось получить гибридные семена и при обратном скрещивании, т. е. в том случае, когда цветы капусты были опылены пылью редиса. Подобный случай, когда матерью была капуста, явился первым в истории скрещивания капусты с редькой и редисом. Отсюда следует, что предварительное выращивание рассады капусты в темноте под воздействием листьев редиса не только ускоряет развитие капусты, превращая ее из двулетнего растения в однолетнее, но одновременно приводит и к преодолению нескрещиваемости.

В первом гибридном поколении в обеих реципрокных комбинациях растения имели явно промежуточный характер как по морфологическим, так и по физиологическим признакам. Это были высокие поздноцветущие растения, не образующие ни кочна, ни настоящего корнеплода, с длинными листьями, напоминающими редисные. В результате свободного опыления они дали небольшое количество семян, позволившее получить второе гибридное поколение. В нем, и особенно в третьем поколении, наблюдалось весьма разнообразное и сложное расщепление гибридных семей, приведшее к выделению по крайней мере 15 различных типов растений. Наиболее интересными из них были амфидиплоиды, очень похожие на амфидиплоиды, полученные в свое время в ВИР Г. Д. Карпеченко при скрещивании редьки с капустой. Эти растения имеют все признаки вида и были описаны Г. Д. Карпеченко под названием Рафана-броссика. Наши амфидиплоиды за лето образуют большую растительную массу, достигающую до 18 кг, содержащую до 200 мг витамина С. Они отличаются довольно хорошей устойчивостью к морозам и способностью давать корневые побеги, что позволяет надеяться на получение новой кормовой культуры, которая к тому же может оказаться выгодным сырьевым источником для получения витамина С.

Среди большого числа разнообразных гибридных семей были найдены растения с диплоидным набором хромосом, которые представляли собой редис, обладающий хорошим корнеплодом, но в отличие от обычного редиса с более мясистыми и совсем не опушенными листьями, несколько напоминающими листья капустной рассады и богатыми витамином С (от 80 до 120 мг на 100 г). Благодаря этим особенностям листья гибридного редиса обладают превосходными салатными качествами и являются хорошим пищевым продуктом. Наш гибридный редис является растением, у которого нет несъедобных частей. Весь урожай без всяких отходов идет в пищу (и «вершки» и «корешки», как говорится в народной сказке).

В настоящее время урожай гибридного редиса в установке из зеркальных ламп накаливания и водяного фильтра при непрерывном освещении за 18 дней достигают 4,0 кг с 1 м². В год можно получить минимум 18 урожаев, что составит 72 кг с 1 м². Мы считаем, что

эти урожаи в ближайшее время должны быть значительно повышены, а срок выращивания сокращен. Наша задача — вырастить за 15 суток 10 кг растительной массы гибрида, что означает получение в год 24 урожаев с общей, полностью идущей в пищу растительной массой 240 кг (т. е. около 100 г сухого вещества с 1 м² в сутки) при затрате электроэнергии около 170 квт·ч на 1 кг продукции. Данный пример с результатами межродовой гибридизации показывает путь, по которому надо направлять генетические исследования для получения новых синтетических видов растений.

Сочетание генетико-селекционной работы с исследованиями потенциальных возможностей растений и с последующим выращиванием новых видов в контролируемых условиях является основой нового чрезвычайно прогрессивного вида растениеводства.

Все сообщенные выше факты, говорящие о несовершенстве современных биологических представлений, должны побудить исследователей с большим упорством и энтузиазмом заняться их уточнением. Каждое новое открытие в этой области будет способствовать прогрессу человечества не меньше, чем физические открытия, приведшие к созданию атомной бомбы.

Нельзя не завидовать будущим молодым исследователям, которые станут решать эти интереснейшие задачи естествознания и вместе с тем хочется пожелать им быстрых и больших успехов.

Конечно, изложенные здесь способы получения высоких урожаев растений пока не могут (по экономическим соображениям) внедряться в широкую практику*, но они указывают на новое надежное направление в развитии растениеводства, которое было невозможно без предварительного выяснения многих сторон жизнедеятельности растений.

Однако и полученные нами результаты могут быть с успехом применены в настоящее время там, где это надо. Почему не представить себе, что скоро появятся искусственные сады и огороды в Антарктике, Арктике и вообще в любых суровых условиях, где будет жить человек.

* При организации массового промышленного производства оборудования (в первую очередь специальных электроламп), необходимого для культуры растений в искусственных условиях, эти ограничения отпадут.

В начале нашего века русский писатель А. И. Куприн в рассказе «Тост» мечтал, что такие сады украсят землю именно в ее полярных областях через 1000 лет, но его мечта уже осуществляется.

Вступление в строй новых мощных гидроэлектростанций с дешевой электроэнергией, не всегда находящей полный сбыт, даст возможность, хотя бы в определенные часы суток, с успехом использовать ее для выращивания различных растений. Для этих целей около крупных ГЭС могут быть созданы специальные установки — прообраз фабрик индустриального растениеводства. Это будет еще один пример торжества идей В. И. Ленина, предвидевшего величайшее значение для построения коммунизма электрификации всего народного хозяйства.

Заглядывая вперед, можно ожидать, что для выращивания неслыханных для нашего времени урожаев различных сельскохозяйственных культур направится электрический ток атомных станций и тем самым будет осуществлено самое гуманное и прогрессивное использование атомной энергии в мирных целях.

Источники энергии и минеральных элементов, необходимых для жизни растений, беспредельны. Беспредельны и возможности высоких и все возрастающих урожаев растений, сперва за счет существующих видов, а потом при помощи новых, созданных человеком методом гибридизации.

Если уже существующие томаты обнаруживают в фитотроне способность давать на отдельных растениях за 60 суток урожай плодов до 2700 г, то чего же можно ожидать в будущем от новых сортов, полученных синтетическим методом?

Урожай одного томатного растения в лабораторной осветительной установке в 2700 г за 60 суток при 25 растениях на 1 м², полученный Г. Х. Арзамасцевой в период подготовки к изданию этой книги, позволяет надеяться на выращивание в год с 1 м² урожая плодов томатов в количестве не ниже 400 кг. И нет никаких оснований полагать, что и этот урожай не будет еще повышаться. За такие пусть пока полуфантастические урожаи стоит и нужно бороться, ибо их получение не только решит проблему питания, но и будет способствовать еще большему прогрессу биологической науки.

ОСНОВНАЯ ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Брежнев Д. Д. Томаты. Сельхозгиз, 1955.
Ван дер Вин Р., Мейер Г. Свет и рост растений. Москва, 1962.
Данилов А. Н. Задачи изучения фотосинтеза в отношении прямого усвоения и косвенного значения света. Советская ботаника, 1940.
Доброхотова С. И. Культура томатов на искусственном свете. Труды лаб. светофизиологии АФИ, № 1, 1938.
Ермаков Е. И. Пористая керамика для защищенного грунта. «Вестник с.-х. науки», № 2, 1961.
Иванов А. П. Электрические источники света, 1948.
Калитин Н. Н. Лучи солнца. АН СССР, 1947.
Карманов В. Г. и Пумпянская С. Л. Отражение фотопериодического ритма выращивания на процессе транспирации фасоли. «Агробиология», № 6 (102), 1956.
Катунский В. М. Зависимость фотопериодической реакции растений от спектрального состава света. ДАН СССР, т. 15, № 8, 1937.
Клешнин А. Ф. Растение и свет. АН СССР, 1954.
Кондратьев К. Я. Лучистая энергия солнца. Лениздат, 1954.
Костюченко И. А. и Зарубайло Т. Я. Естественная яровизация зерна на растении в период созревания. «Соц. растениеводство», № 17, 1936.
Леман В. М., Фанталов О. С. Ксеноновая лампа — новый источник света в растениеводстве. «Вестник с.-х. науки», № 7, 1963.
Любименко В. Н. Фотосинтез и хемосинтез в растительном мире. Сельхозгиз, 1938.
Макаревский Н. И. Об отражении, пропускании и поглощении солнечной радиации листьями растений. Труды лаб. светофизиологии АФИ, № 1, 1938.
Мальчевский В. П. Действие некоторых лучей спектра на развитие растений. Тр. лаб. светоф. АФИ, в. 1, 1938.
Мальчевский В. П. Труды Ин-та физиологии растений АН СССР, т. 3, 1946.
Максимов Н. А. Культура растений на электрическом свете и ее применение для семенного контроля и селекции. Научно-агроном. журнал, 7—8, 1925.
Мошков Б. С. Фотопериодизм растений. Сельхозгиз, 1961.

Ничипорович А. А. Световое и углеродное питание растений (фотосинтез). АН СССР, 1955.

Разумов В. И. Значение качественного состава света в фото-периодической реакции. Тр. по прикл. ботанике, генетике и селекции, с. III, № 8, 1933.

Чесноков В. А. и Степанова А. М. О фотосинтезе огурцов и томатов, выращенных при искусственном освещении. Тр. Ин-та физиологии растений АН СССР, т. 10, 1955.

Borthwick H. A., Hendricks S. B. and Parker M. W. Action spectrum for photoperiodic control of floral initiation of a long day plant, winter barley. Bot. gaz. 119, 1948.

Borthwick H. A. and Cathey H. U. «Role of phytochrome in control of flowering of chrysanthemum». Bot. gaz., v. 123, No 3, 1962.

Bünning Erwin. Die Physiologische Uhr. 1958.

Garner W. W. and Allard H. A. «Effect of short alternating periods of light and darkness on plant growth». Science (N. S.) VLXVI, No 1697, 1927.

Harvey R. B. Growth of plants in artificial light. Bot. gaz. 74, No 4, 1922.

Klebs G. Über die Blütenbildung von Sempervivum. Flora. Bd. 11—12, 1918.

Mangon H. Production de la matière verte des feuilles sous l'influence de la lumière électrique. Comt. Read. L'Acad. Sc. Paris, 1861.

Nuernbergk E. L. Kunstlicht und Pflanzenkultur München, Bonn, Wien, 1961.

Rane F. W. M. Electrohorticulture with the incandescent lamp. West Virginia Agr. Exp. Sta. Bull. 37, 1894.

Roberts R. H. and Struckmeyer B. E. «The effects of temperature and other environmental factors upon the photoperiodic responses of some of the higher plants». J. Agr. Res. 56, No 9, 1938.

Roodenburg G. M. Kunstlichtcultuur (Cultivation of plants in artificial light). Mededeel Lantbouwhoogeschool, Wageningen, 34, N 14, 1930.

Schappell N. A. Effect of narrow ranges of wave length of radiant energy and other factors on the reproductive growth of long-day and short-day plants. Cornell. Agr. Exp. Sta. Mem., 185, 1936.

Thelen O. Natürliches, künstliches und monochromatisches Licht in seiner Bedeutung für die Entwicklung und die Stoffproduktion einiger Kulturpflanzen. Rostock, 1910.

Truffaut G. et Thurnessen G. Influence de la lumière artificielle sur la croissance des plantes supérieures. C. R. Ac. Sc. Paris, 188, N 5, 1929.

Wassink E. C., Dehint P. Y. A. L. and Bensink J. Some effects of high-intensity irradiation of narrow spectral regions. Photoperiodism and Related Phenomena in Plants and Animals, Washington, B. C., 1959.

Went F. W. «The experimental control of plant grow». Waltham, Mass., 1957.

Withrow R. B. and Benedict H. M. Photoperiodic responses of certain greenhouse annuals as influenced by intensity and wavelength of artificial light used to lengthen the day light period. Plant physiol., 11, 1936.

СОДЕРЖАНИЕ

Потенциальные возможности растений и их выявление	3
Значение исследований, проводимых в условиях искусственного климата	3
Развитие представлений о выращивании растений в искусственных условиях	14
Естественное и искусственное освещение	39
Солнечный свет	39
Электрические источники излучения	59
Измерение излучений	71
Отражение, пропускание, поглощение и усвоение света растениями	77
Основные звенья искусственных комплексов внешней среды при выращивании растений	87
Осветительные установки для выращивания растений	87
Лабораторные камеры искусственного климата	100
Заменители почвы в условиях искусственного освещения	110
Факторы, влияющие на усвоение света растениями	120
Зависимость использования растениями света от направленности лучистых потоков и расположения листьев в пространстве	120
Актиноритмическая реакция растений	131
Значение актиноритмических закономерностей в развитии растений при выращивании их в искусственных условиях	152
Значение мощности светового потока для культуры растений	162
Значение световых суточных доз для выращивания растений	176
Влияние на растения спектрального состава света	192
Влияние на растения инфракрасной радиации	227
Влияние на растения ультрафиолетовой радиации	241
Влияние температуры на использование растениями света	247
Ближайшие перспективы выращивания растений в искусственных условиях	264
Основная цитированная литература	285