«Оптика атмосферы и океана», **27**, № 11 (2014)

РАДИАЦИЯ И БИОСФЕРА

УДК 535.37:678.06

Определение энергетической освещенности растений люминесцентным излучением флуоресцентных пленок при возбуждении солнечным излучением

А.Е. Иваницкий[1], А.С. Минич[1], М.Л. Колчев[1], Е.С. Буценко[1], Г.А. Ивлев[2], Б.Д. Белан[2]*

[1]Томский государственный педагогический университет
634041, г. Томск, ул. Киевская, 60
[2]Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 9.04.2014 г.

Предложена методика определения суммарной суточной энергетической освещенности растений люминесцентным излучением флуоресцентных пленок в условиях защищенного грунта. Показано, что суммарная энергетическая экспозиция в мае 2003–2005 гг. под флуоресцентными пленками с типичным содержанием люминофоров составляет от 0,05 (с неорганическим люминофором) до 0,134 Дж/см^2 (с органическим люминофором). Результаты исследования позволили впервые получить данные о величине энергетической освещенности растений люминесцентным излучением, необходимой для эффективного влияния на их рост и развитие.

Ключевые слова: пленки полимерные, флуоресцентные, сельскохозяйственные, оптические свойства; polymer films, fluorescent films, agricultural films, optical properties.

Введение

В настоящее время применение в защищенном грунте флуоресцентных пленок, содержащих в своем составе люминофоры узкополосного красного свечения на основе соединений европия, приводит к стимуляции роста, развития и к повышению урожайности большинства видов сельскохозяйственных культур (эффект активации продуктивности растений) [1–3]. Успешная реализация эффекта определяется в равной степени двумя факторами – фотофизическими свойствами самих пленок и метеоусловиями в период их эксплуатации, а прежде всего интенсивностью излучения Солнца и зависимой от него интенсивностью флуоресцентного излучения пленок.

Ранее нами была предпринята попытка определения энергетической освещенности растений под флуоресцентными пленками в околополуденное время в ясные солнечные дни в условиях успешной реализации эффекта активации продуктивности растений [4]. Оказалось, что прямое определение интенсивности флуоресцентного излучения пленок традиционными способами невозможно даже в условиях максимальной интенсивности возбуждающего излучения Солнца. Это связано с тем, что его интенсивность составляет десятки мВт/м^2, что значительно меньше «шумов» – непрерывных хаотических изменений в той же области солнечного спектра. Невозможность прямого экспериментального измерения интенсивности флуоресцентного излучения пленок в условиях защищенного грунта в период выращивания под ними растений определяет в настоящее время отсутствие в литературе таких данных.

Нами проведена оценка величины энергетической освещенности растений под флуоресцентными пленками и динамики ее изменений за май 2003–2005 гг. с использованием данных по мониторингу солнечной радиации, полученных на станции высотного зондирования (TOR-станции) ИОА СО РАН, и найденных ранее коэффициентов трансформации пленками излучения в красную область спектра [4].

Экспериментальная часть

В качестве опытных использованы флуоресцентные пленки полиэтилена высокого давления (ПЭВД) с добавками наиболее типичных для флуоресцентных пленок люминофоров: органического на основе комплекса нитрата европия с 1,10-фенантролином (ФЕ) с максимумом в спектре люминесценции 617 нм и оксисульфида иттрия, активированного европием (марки КТЦ-626) с максимумом 626 нм. Пленки изготавливали из ПЭВД марки 15303-003 стандартным методом экструзии с раздувом по методике [5].

* Алексей Евгеньевич Иваницкий (aleiv@tspu.edu.ru); Александр Сергеевич Минич (minich@tspu.edu.ru); Максим Леонидович Колчев (aleiv@tspu.edu.ru); Егор Сергеевич Буценко (gochan@sibmail.com); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru).

© Иваницкий А.Е., Минич А.С., Колчев М.Л. и др., 2014

Биологические испытания проводили с применением специально разработанных методик биологического тестирования флуоресцентных пленок, заключающихся в выращивании в условиях защищенного грунта в весенний период рассады белокочанной капусты на агробиостанции Томского государственного педагогического университета [6]. У 30-суточных растений проводили сравнение морфометрических показателей растений, выращенных под флуоресцентными пленками, с аналогичными показателями контрольных растений, выращенных под немодифицированными полиэтиленовыми пленками тех же технологических параметров по методикам [6].

Суточные изменения энергетической освещенности солнечного излучения УФ-области определены с использованием двух приборов, установленных в Академгородке г. Томска на TOR-станции. Это ультрафиолетовый пиранометр UVB-1 (YES – Yankee Environmental System inc., USA) с диапазоном от 280 до 320 нм, выдающий интегральное значение в диапазоне УФ–*B*-радиации, и спектрофотометр Brewer (MKIV, Canada), осуществляющий сканирование суммарной радиации с шагом 0,5 нм в диапазоне от 290 до 325 нм. Восстановление спектра излучения в диапазоне от 325 до 400 нм осуществляли по методике, используемой для УФ и озонометрических станций на основе приборов Brewer с учетом окна прозрачности на длине волны 324 нм и заданием модельного спектра до 400 нм.

Результаты и их обсуждение

Для проведения исследований использованы пленки из опытных партий с наиболее типичными для практического использования люминофорами (0,1% мас.). Пленки изготовлены по стандартной для этого класса материалов технологии [7], имеют характерные для флуоресцентных пленок фотофизические свойства (табл. 1).

Таблица 1

Некоторые свойства флуоресцентных пленок ПЭВД марки 15803-020 толщиной 120 мкм с добавкой 0,1% мас. люминофоров

Тип люминофора	Спектральный состав люминесцентного излучения, нм	Ширина на полувысоте основного пика люминесценции, нм	Коэффициент удельной трансформации
ФЕ	597; **617**; 685	$3{,}05 \pm 0{,}05$	$5{,}2 \cdot 10^{-5}$
КТЦ-626	585; 594; **626**; 705	$2{,}0 \pm 0{,}0$	$4{,}7 \cdot 10^{-5}$

Для биологического тестирования опытных флуоресцентных пленок в весенний период в течение мая 2003–2005 гг. в условиях защищенного грунта выращивали рассаду белокочанной капусты Надежда. Для сравнения использовали показатели контрольных растений, выращенных под немодифицированной полиэтиленовой пленкой толщиной 120 мкм, изготовленной из той же марки ПЭВД.

Одним из главных морфометрических показателей, определяющих особенности роста и развития контрольных растений капусты, является площадь поверхности листьев [6]. Значительное увеличение этого показателя на 90% для пленки с добавкой люминофора ФЕ по сравнению с показателями контрольных растений за все годы испытаний отметили только в 2003 г. Некоторое увеличение этого показателя (около 5% по сравнению с контрольным значением) наблюдали в 2004 г. Наиболее неблагоприятным для выращивания рассады капусты по этому показателю явился 2005 г. В этот год площадь ассимилирующей поверхности рассады капусты под пленкой с добавкой люминофора ФЕ была меньше на 11%, чем у контрольных растений, – отрицательный эффект. Для пленок с добавкой люминофора КТЦ-626 только в 2003 г. установили увеличение показателя на 22% по отношению к контрольным растениям, а в 2004–2005 гг. наблюдали отрицательный эффект.

Таким образом, трехлетние наблюдения за ростом и развитием растений рассады белокочанной капусты одного сорта, в одни и те же сроки с использованием ежегодно одинаковых по составу и свойствам флуоресцентных пленок показали многообразие их влияния на растения и проявления эффекта активации продуктивности растений в разные годы. Это обстоятельство является совершенно естественным с учетом большого количества факторов, определяющих интегральные показатели роста и развития растений. Тем не менее сравнение полученных результатов биологического тестирования флуоресцентных пленок с конкретными метеорологическими условиями в период проведения экспериментов позволяет выявить вполне заметные закономерности. Авторами [8] показана зависимость эффекта активации продуктивности растений от окружающей температуры и состояния облачности в период проведения экспериментов.

В настоящее время также не вызывает сомнения то, что определяющая роль в успешной реализации наблюдаемого эффекта принадлежит люминесцентному излучению флуоресцентных пленок [9]. Значение оптимальной интенсивности люминесцентного излучения, необходимого для успешной реализации эффекта, может быть определено путем параллельного с биологическими испытаниями измерения интенсивности возбуждающего люминесценцию УФ-излучения Солнца.

В качестве примера на рис. 1 представлены типичные дневные зависимости интенсивности УФ-излучения Солнца.

Дневные изменения интенсивности УФ-излучения определены для всего периода испытаний с 1 по 31 мая 2003–2005 гг. Изменения интенсивности типичны [10] и определяются временем суток и конкретными метеоусловиями. На рис. 2 представлены суточные значения энергетической экспозиции растений УФ-изучением Солнца в мае 2003 г. и общая облачность в тот же период (по данным Томского гидрометцентра).

Данные по интенсивности УФ-изучения Солнца, полученные путем ежедневного наблюдения на TOR, позволили рассчитать величины суточной энергетической экспозиции флуоресцентных пленок УФ-излучением Солнца за весь период испытаний с 1 по 31 мая 2003–2005 гг. (рис. 3).

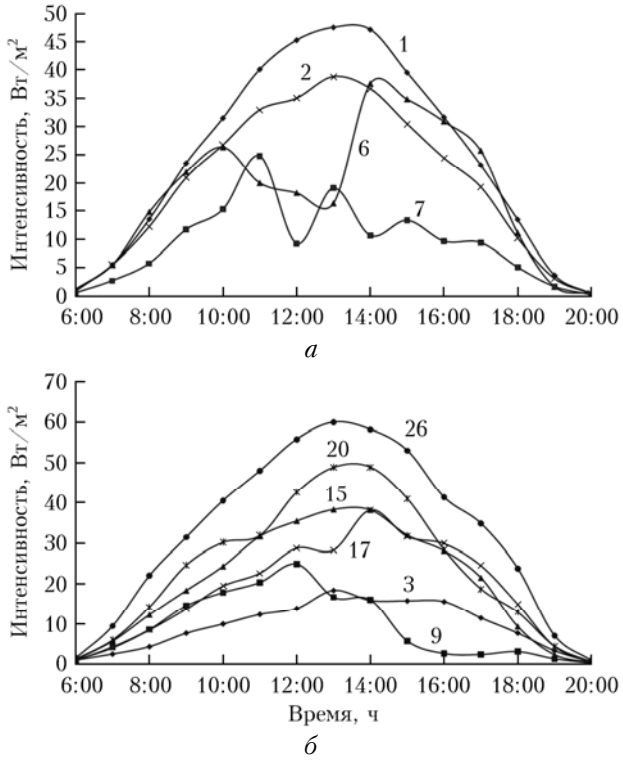

Рис. 1. Дневное изменение интенсивности УФ-излучения (290–400 нм): *а* – май 2003 г.; *б* – май 2004 г. (цифры у кривых соответствуют числу месяца)

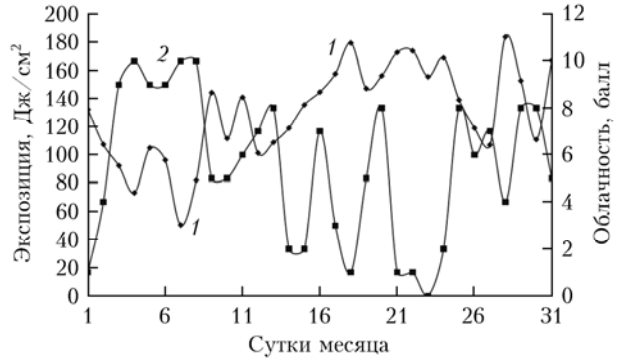

Рис. 2. Величины суточной энергетической экспозиции УФ-излучением Солнца (*1*) и облачности (*2*) в мае 2003 г.

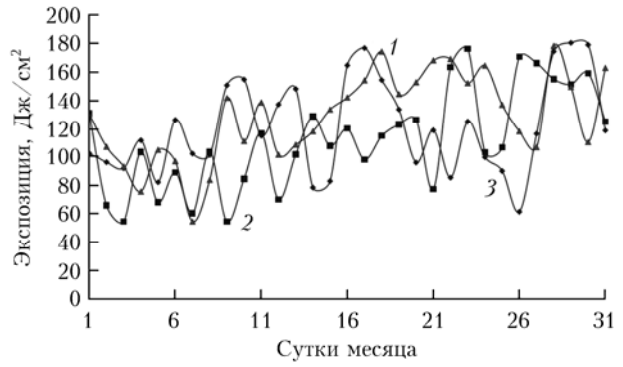

Рис. 3. Суточная энергетическая экспозиция УФ-излучением Солнца в мае: *1* – 2003 г.; *2* – 2004 г.; *3* – 2005 г.

Полученные данные показывают, что наибольшая интенсивность УФ-излучения (и определяемая ею величина энергетической экспозиции) за все годы испытаний наблюдалась в мае 2003 г. (кривая *1* на рис. 3), что хорошо согласуется с результатами биологических испытаний. В 2005 г. (кривая *3*) величины суммарной энергетической экспозиции близки к данным 2003 г., но в 2005 г. наблюдаются значительно более резкие изменения экспозиции в течение месяца, особенно во второй и третьей декадах. В 2004 г. (кривая *2*) суммарная энергетическая экспозиция в первой и второй декадах месяца значительно ниже, чем в 2003 и 2005 гг.

Суточные изменения интенсивности УФ-излучения Солнца при проведении испытаний в 2003–2005 гг. позволяют оценить интенсивность люминесцентного излучения под свежеприготовленными флуоресцентными пленками с учетом определенных ранее [4] удельных коэффициентов трансформации для использованных люминофоров. Так, для пленки с люминофором ФЕ интенсивность люминесцентного излучения в зависимости от возбуждающего УФ-излучения Солнца составила в среднем от 4 до 12 мВт/м^2, для пленок с люминофором КТЦ-626 – от 0,4 до 2 мВт/м^2.

Полученные данные значительно расширяют имеющиеся в литературе сведения по интенсивности люминесцентного излучения под флуоресцентными пленками, которые определены в настоящее время только для максимальных полуденных значений интенсивности возбуждающего излучения в ясные солнечные дни [4]. Однако энергетическая освещенность, рассчитанная из исходного значения интенсивности люминесцентного излучения, определена для свежеприготовленных флуоресцентных пленок [4, 11]. В то же время имеются данные, показывающие, что при эксплуатации в естественных условиях наблюдается значительное уменьшение интенсивности люминесценции люминофоров в пленках, которое связывают с фотохимическим разложением люминофора [12]. Такое фотохимическое разложение люминофора, определяемое сроком службы пленок, приведет к закономерному уменьшению энергетической освещенности пленок пропорционально уменьшению интенсивности их флуоресценции.

В качестве примера на рис. 4 представлены данные по изменению дневной энергетической освещенности под флуоресцентными пленками с люминофорами ФЕ и КТЦ-626, полученные с учетом коэффициента уменьшения интенсивности флуоресценции.

Эти данные позволяют оценить значения суммарной суточной энергетической экспозиции растений люминесцентным излучением под флуоресцентными пленками, которое согласно современным представлениям является движущей силой наблюдаемого эффекта (рис. 4).

Несмотря на значительную разницу в проявлении эффекта ускоренного роста и развития растений за годы испытаний, закономерных изменений суточной энергетической экспозиции растений под пленками не найдено. Значения суммарной энергетической экспозиции растений за весь вегетационный

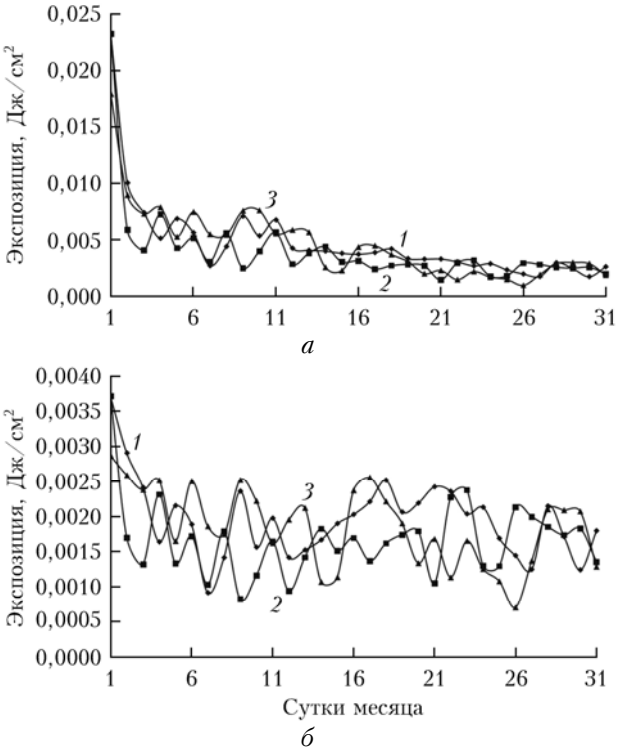

Рис. 4. Энергетическая экспозиция растений под флуоресцентной пленкой с люминофором: *а* — ФЕ в мае: 2003 г. — *1*; 2004 г. — *2*; 2005 г. — *3*; *б* — КТЦ-626 в мае: 2003 г. — *1*; 2004 г. — *2*; 2005 г. — *3*

период близки и составляют десятые—сотые доли Дж/см^2 (табл. 2). Отсутствие зависимости может быть связано с многофакторным влиянием условий внешней окружающей среды на рост и развитие растений.

Таблица 2

Изменение суммарной энергетической экспозиции растений под флуоресцентными пленками в мае 2003—2005 гг.

Год испытания	Энергетическая экспозиция, Дж/см^2	
	Пленка с ФЕ	Пленка с КТЦ-626
2003	0,134	0,058
2004	0,112	0,049
2005	0,133	0,056

Заключение

Предложена методика определения суммарной суточной энергетической освещенности растений люминесцентным излучением флуоресцентных пленок в условиях защищенного грунта.

На примере выращивания растений рассады капусты в весенние периоды 2003—2005 гг. проведено сопоставление данных по интегральной освещенности растений люминесцентным излучением флуоресцентных пленок в конкретных метеоусловиях и эффективности влияния пленок на рост и развитие растений под ними.

Полученные результаты позволили впервые получить данные о величине энергетической освещенности растений люминесцентным излучением, необходимой для эффективного влияния на их рост и развитие.

1. *Kusnetsov S.I., Leplianin G.V., Mironov U.I., Murinov Yu.I., Schelakov R.N., Karasev V.E., Tolstikov G.A.* «Polisvetan», a high performance material for cladding greenhouses // Plasticulture. 1989. V. 83, N 3. P. 13—20.
2. *Минич А.С., Минич И.Б., Зеленьчукова Н.С., Райда В.С.* Особенности роста растений и продуктивность у гибридов огурца при выращивании под фотолюминесцентной и гидрофильной пленками // Сельскохозяйственная биология. 2010. № 1. С. 81—85.
3. *Минич А.С., Минич И.Б., Пермякова Н.Л.* Продуктивность различных видов и сортов растений семейства *Solanaceae* под флуоресцентными пленками // Вестн. Том. гос. пед. ун-та. 2012. № 7. С. 100—105.
4. *Райда В.С., Иваницкий А.Е., Бушков А.В., Федоров А.И., Толстиков Г.А.* Определение вклада возбуждаемой люминесцентной составляющей флуоресцентных полимерных пленок в проходящее через них солнечное излучение // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 2—3. С. 245—251.
5. *Райда В.С., Минич А.С., Терентьев В.А., Майэр Э.А., Коваль Е.О.* Технология производства флуоресцентных полиэтиленовых пленок для сельского хозяйства // Хим. промышленность. 1999. № 10. С. 56—58.
6. *Минич А.С., Минич И.Б., Райда В.С., Карначук Р.А., Толстиков Г.А.* Биологическое тестирование светокорректирующих пленок в условиях закрытого грунта при выращивании белокочанной капусты // Сельскохозяйственная биология. 2003. № 3. С. 43—56.
7. *Бушков А.В., Днепровский С.Н., Крупенко З.Ф., Буллер Т.А., Иваницкий А.Е., Райда В.С.* Особенности получения и переработки композиций ПЭВД с люминофорами на основе соединений европия // Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий: Мат-лы III Всерос. научн. конф. Томск, 2—4 сентября 2004 г. Новосибирск: Изд-во института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, 2004. С. 314—316.
8. *Минич А.С., Минич И.Б., Зеленьчукова Н.С., Райда В.С., Толстиков Г.А.* Влияние метеорологических условий на эффективность использования флуоресцентных пленок для ограждения закрытого грунта при выращивании растений в условиях региона г. Томска // Вестн. Том. гос. пед. ун-та. Сер. Естественные и точные науки. 2003. Вып. 4. С. 39—44.
9. *Минич А.С., Минич И.Б., Зеленьчукова Н.С., Иваницкий А.Е., Райда В.С.* Определение вклада люминесцентного излучения полиэтиленовых пленок с фотолюминофорами на основе соединений европия в увеличение продуктивности растений в защищенном грунте // Вестн. Том. гос. пед. ун-та. 2010. Вып. 3(93). С. 22—26.
10. *Васильев А.В., Мельникова И.Н.* Коротковолновое солнечное излучение в атмосфере Земли. Расчеты. Измерения. Интерпретация. 2002. СПб.: НИИХ СПбГУ, 2002. 386 с.
11. *Райда В.С., Иваницкий А.Е., Коваль Е.О., Калайда Т.В., Петренко Т.В., Толстиков Г.А.* Особенности фотофизических свойств флуоресцентных пленок ПЭВД с неорганическими люминофорами // Пластические массы. 2002. № 12. С. 39—43.
12. *Долматова С.Г., Райда В.С., Коваль Е.О.* Определение срока службы люминофоров на основе соединений европия в флуоресцентных полиэтиленовых пленках // Пластические массы. 2003. № 10. С. 42—45.

A.E. Ivanitskii, A.S. Minich, M.L. Kolchev, E.S. Butsenko, G.A. Ivlev, B.D. Belan. **Determination of plants irradiance by luminescent radiation of fluorescent films at excitation by solar radiation.**

A method of determination of total daily irradiance of plants by luminescent radiation of fluorescent films in conditions of protected soil was offered. It was shown that the total energy exposure for films with a typical content of luminophor was from 0.05 J/cm^2 for films with inorganic luminophor to 0.134 J/cm^2 for films with organic luminophor in May 2003–2005. The results of investigation allowed us to obtain data on the value of plants irradiance by luminescent radiation required for effective influence on the plants growth and development.