



Фотолюминесцентный контроль спелости семян зерновых в процессе созревания

М. В. Беляков

Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”» в г. Смоленске (Смоленск, Россия)
bmw20100@mail.ru

Введение. Объективное определение спелости семян растений является одним из направлений развития сельскохозяйственных электротехнологий. Оптические методы и средства диагностики, исследованные в статье, являются высокоточными, селективными и экспрессными, а также могут легко интегрироваться в действующие современные сельскохозяйственные машины и аппараты.

Материалы и методы. Проведены поисковые исследования оптических спектральных люминесцентных свойств семян зерновых растений различной степени спелости. Отобраны партии семян овса и пшеницы в фазах молочной, молочно-восковой и восковой спелости, а также спелые семена. Исследование проведено на спектрофлуориметре «Флюорат-02-Панорама». Измерены спектры возбуждения при синхронном сканировании, и на их основе – спектры люминесценции. Вычислены интегральные параметры спектров.

Результаты исследования. Семена молочной спелости имеют наибольший пик возбуждения на длине волны около 362 нм и существенно меньший – на 424 нм. У спелых семян коротковолновый пик ($\lambda_{max} = 362$ нм) отсутствует; останутся пики 424 нм и 485 нм, причем длинноволновый пик повышается с увеличением срока спелости. Кроме того, с увеличением спелости семян возрастает отношение длинноволнового потока к коротковолновому. Зависимости могут быть статистически достоверно линейно аппроксимированы. Полученные зависимости можно использовать для определения степени физиологической зрелости семян. Предложена методика определения спелости семян зерновых растений при созревании, включающая пробоподготовку, возбуждение люминесценции в коротковолновом и длинноволновом диапазонах, ее регистрацию, усиление и обработку полученного фотоэлектрического сигнала. Для реализации методики разработана конструкция прибора объективного экспресс-анализа степени физиологической зрелости семян.

Обсуждение и заключение. В ходе созревания семян зерновых растений меняется соотношение их уровней возбуждения и потоков люминесценции: для незрелых семян характерна коротковолновая люминесценция, а в спелых семенах преобладает длинноволновая. Зависимости соотношения потоков фотолюминесценции от времени созревания являются возрастающими. Разработан прибор для определения уровня спелости семян, позволяющий определить, на какой стадии созревания находится семя.

Ключевые слова: семя, созревание, контроль спелости, спектр возбуждения, спектр люминесценции

Для цитирования: Беляков М. В. Фотолюминесцентный контроль спелости семян зерновых в процессе созревания // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 306–319. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.306-319>



Photoluminescence Monitoring the Ripeness of Cereal Seeds during Ripening

M. V. Belyakov

Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" in Smolensk (Smolensk, Russia)

bmw20100@mail.ru

Introduction. To assess objectively the ripeness plant seeds is one of the areas of developing agricultural electrotechnical technologies. Optical methods and diagnostic tools are highly accurate, selective, and express, and can be easy integrated into existing modern agricultural machines and devices.

Materials and Methods. The exploratory research of optical spectral luminescent properties of cereal seeds of different ripeness levels was carried out. The lots of oat and wheat seeds of the milky, milky-wax, and waxy ripeness, as well as ripe seeds were selected. The study was conducted on the spectrofluorometer "Fluorat-02-Panorama". The spectra of synchronous scan excitation were measured based on the seed luminescence spectra. The integral parameters of the spectra were calculated.

Results. The seeds of milky ripeness have the highest peak of excitation at a wavelength of about 362 nm and significantly less values at 424 nm. In ripe seeds there is no short-wave peak ($\lambda_{max} = 362$ nm). There are remain peaks of 424 nm and 485 nm, and the long-wave peak increases with increasing ripeness. With increasing seed ripeness, the ratio of longwave to the shortwave flux increases. The dependences can be statistically reliably approximated linearly. The obtained dependences can be used to determine the seed physiological ripeness degree. There have been proposed a technique for determining the ripeness of cereal seeds during their riping, including sample preparation, excitation of luminescence in the short-wave and long-wave ranges, its registration, amplification and processing the resulting photoelectric signal. To implement the method, the design of the device for objective rapid analysis of the stage of seed physiological ripeness was developed.

Discussion and Conclusion. During the ripening of cereal seeds, the ratio of their excitation levels and luminescence fluxes changes: for immature seeds, short-wave luminescence is characteristic, while in mature seeds, long-wave luminescence prevails. The dependence of the ratio of photoluminescence fluxes on the ripeness time is an increasing one. A device for determining the seed ripeness stage is developed.

Keywords: seed, ripening, ripeness control, excitation spectrum, luminescence spectrum

For citation: Belyakov M.V. Photoluminescence Monitoring the Ripeness of Cereal Seeds during Ripening. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):306-319. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.306-319>

Введение

В современных условиях развитие сельского хозяйства во многом зависит от результатов научно-технического прогресса, интенсивного внедрения достижений науки и техники, постоянного совершенствования методов и технологий производства продукции. Объективное определение спелости семян растений является одним из направлений развития сельскохозяйственных электротехнологий с целью внедрения современных

методов контроля в растениеводстве. Оптические методы и средства диагностики и контроля являются высокоточными, селективными, экспрессными, а также дистанционными и неразрушающими. Другими достоинствами оптических и оптико-электронных приборов являются простота и безопасность эксплуатации, минимум субъективных факторов и возможность интеграции в действующие современные сельскохозяйственные машины и аппараты.

Оптические спектральные и цветовые характеристики используют для сортировки семян, плодов, корнеплодов и другой продукции¹ [1]. Также оптическое излучение применяют в сельскохозяйственном производстве для уничтожения вредителей и обеззараживания зерна. Излучение в ближней инфракрасной области используют для контроля влажности, оценки содержания белков, жира, крахмала, клетчатки, сахаров в размолах, жидкостях или пастах².

Совокупность методов анализа, основанных на явлении люминесценции, называется люминесцентным анализом. Наибольшее распространение получил вид анализа, основанный на фотолюминесценции исследуемого вещества, возбуждаемой ультрафиолетовым излучением. Подобный анализ может быть как качественным, так и количественным. Первый проводится по спектрам люминесценции и используется для обнаружения следов люминесцирующих органических и неорганических веществ в различных объектах; второй основан на зависимости интенсивности люминесценции от количества люминесцирующего вещества. Исследование фотолюминесценции может дать информацию о состоянии живых и неживых систем без их повреждения и отбора большого объема пробы.

Обзор литературы

Оптические характеристики биотканей несут информацию о количественном содержании и пространственном распределении различных биологических компонентов в ней, что дает потенциальные возможности диагностики [2–6]. К настоящему времени созданы методики и установки оптической диагностики биологических объектов медицинского назначения [7–12].

Флуоресцентные спектрометры для диагностики *in vivo* [13] обычно используют волоконно-оптические системы [14–17].

Микроскопические наблюдения, произведенные над созревающими семенами, показали, что по мере их созревания происходит постепенное превращение крахмала в жир («ожирение» крахмальных зерен). Вопрос о накоплении веществ в созревающем зерне имеет важное практическое значение в связи с необходимостью определения оптимальных сроков уборки урожая и снижения потерь зерна при уборке³.

К данному времени известно несколько методов определения спелости семян.

1. Определение спелости семян по внешним признакам и консистенции. Метод является субъективным и наименее точным, хотя и широко распространен в сельскохозяйственной практике. Чаще всего применяется при плохой погоде в период созревания, но при его использовании требуются серьезный опыт и навык.

2. Определение спелости семян по массе сырых зерен. Метод предполагает мониторинг массы 1 000 сырых семян.

3. Определение спелости зерна по удельной массе. Метод предполагает расчет процентного содержания зерен молочной и восковой спелости при погружении средней пробы в солевой раствор⁴.

Также существуют методы с использованием различных технических устройств, например, инфракрасного термометра [18]. Недостатком данного метода является невозможность получить информацию о температуре с определенной поверхности, т. к. инфракрас-

¹ **Башилов А. М.** Электронно-оптическое зрение в аграрном производстве (системотехника построения и применения информационных оптических технологий). М. : Изд-во ГНУ ВИЭСХ, 2005. 312 с.

² **Лакович Дж.** Основы флуоресцентной спектроскопии / Пер. с англ. М. : Мир, 1986. 496 с.

³ **Казakov Е. Д., Кретович В. Л.** Биохимия зерна и продуктов его переработки. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Агропромиздат, 1989. 368 с.

⁴ Уборка урожая. URL: <http://rsechro.ru/biologizaciya-zemledeliya/4770-uborka-urozhaya.html>

ный термометр предназначен для измерения температуры в конкретной точке; кроме того, существенным оказывается влияние посторонних помех.

Предложен прибор тепловизионного контроля семян до и после обработки электромагнитным полем высокой частоты; вслед за обработкой проводят сравнение температуры каждого семени до и после воздействия [19]. Недостатками данного способа являются трудоемкость и продолжительность воздействия электромагнитного поля.

Таким образом, используемые в данное время методы определения спелости семян имеют недостатки, связанные с их субъективностью или длительностью, либо являются разрушающими. Альтернатива имеющимся методам – оптический люминесцентный метод, широко применяемый в настоящий момент в биомедицинских технологиях.

В сельскохозяйственных электро-технологиях созданы фотолюминесцентные методы и приборы контроля влажности [20; 21] и всхожести [22; 23].

Материалы и методы

Разработка методики предусматривает поисковые исследования оптических спектральных люминесцентных свойств семян зерновых растений различной степени спелости. Ранее автором было установлено сходство оптических люминесцентных свойств спелых семян большинства зерновых (пшеница, рожь, тритикале, гречиха, овес), зернобобовых (горох, фасоль) и овощных (перец, томат) растений [24]. Данные свойства можно считать типовыми и использовать при проектировании методики и приборов контроля спелости.

Для получения опытных образцов были посеяны и выращены семена овса «скаун» и пшеницы МИС. По мере их созревания отбирались партии семян различной степени спелости: для овса – молочной, молочно-восковой и восковой степени, а также спелые семена (4 срок); для пшеницы – мо-

лочной, молочно-восковой и восковой степени, а также 4-го и 5-го сроков спелости. Пробы отбиралась в следующие сроки: молочная (1-й срок) – 95 суток с момента посева, молочно-восковая (2-й срок) – 103 суток, восковая (3-й срок) – 109 суток, 4-й срок – 120 суток, 5-й срок – 126 суток.

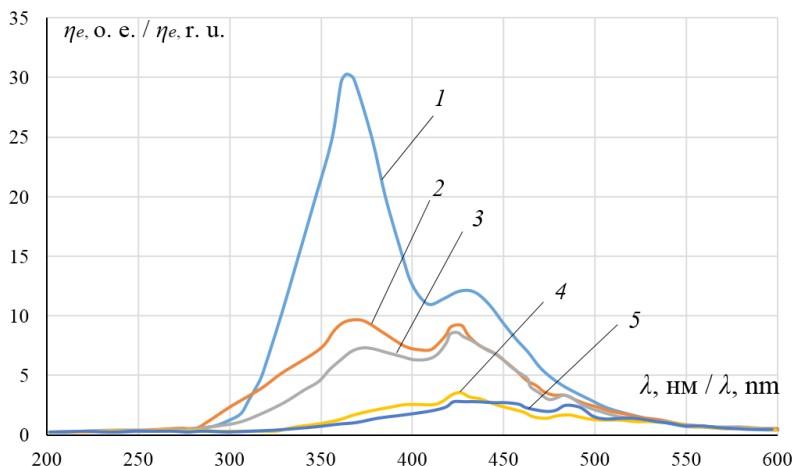
Исследование люминесценции проводилось на основе аппаратно-программного комплекса, состоящего из многофункционального спектрофлуориметра «Флюорат-02-Панорама», компьютера с установленным программным обеспечением «Panorama Pro» и внешней камеры для исследуемых образцов. Измерение спектров возбуждения и фотолюминесценции выполнялось аналогично ранее проведенным измерениям [25; 26].

Были измерены спектры возбуждения $\eta_e(\lambda)$ при синхронном сканировании, и на их основе – спектры люминесценции $\phi_l(\lambda)$. По результатам измерений осуществлялась статистическая обработка, где проводилось усреднение по 30 спектрам. В программе «Panorama Pro» были вычислены интегральные параметры спектров H и Φ . Последний является потоком фотолюминесценции, выраженным в относительных единицах.

Результаты исследования

Результаты измерения спектров возбуждения семян пшеницы различной спелости при синхронном сканировании представлены на рис. 1.

Видно, что семена молочной спелости имеют наибольший пик возбуждения на длине волны около 362 нм и существенно меньший – на 424 нм. Семена молочно-восковой спелости имеют пики на тех же длинах волн, но уже приблизительно равные по энергетической эффективности возбуждения. У семян восковой спелости наиболее выражен пик возбуждения на длине волны 424 нм, пик на 362 нм заметно ниже; кроме того, появляется небольшой пик на длине волны 485 нм. У спелых семян (4-й и 5-й срок) коротковол-



Р и с. 1. Спектральные характеристики возбуждения семян пшеницы при синхронном сканировании: 1 – молочная спелость, 2 – молочно-восковая спелость, 3 – восковая спелость, 4 – 4-й срок спелости, 5 – 5-й срок спелости

Fig. 1. The spectral characteristics of wheat seeds during excitations a synchronous scan: 1 – milk ripeness, 2 – milky-wax ripeness, 3 – waxy ripeness, 4 – 4 period of ripeness, 5 – 5 period of ripeness

новый пик ($\lambda_{max} = 362$ нм) отсутствует; остаются пики 424 нм и 485 нм, причем длинноволновый пик увеличивается с возрастанием срока спелости⁵ [27].

Для коротковолнового ($\lambda_{max} = 362$ нм), средневолнового ($\lambda_{max} = 424$ нм) и длинноволнового ($\lambda_{max} = 485$ нм) пиков рассчитаны интегральные значения H в рабочих диапазонах возбуждения: 250–410 нм, 410–470 нм и 470–550 нм соответственно. Результаты представлены в табл. 1, причем интегральные значения средневолнового возбуждения приняты за единицу, и относительно них пересчитаны значения параметров для коротковолновых и длинноволновых диапазонов (в знаменателе).

Из данных табл. 1 следует, что возможно определение физиологической зрелости по соотношению фотолуминесценции, возбуждаемой длинноволновым и коротковолновым излучением.

Далее были измерены спектры фотолуминесценции семян различной спелости при возбуждении на длинах волн $\lambda_s = 362$ нм и $\lambda_l = 485$ нм. Усредненные

по 30 измерениям результаты для семян молочной спелости и полностью спелых семян представлены на рис. 2; 3.

В программе «Panorama Pro» были рассчитаны потоки фотолуминесценции Φ_l и Φ_s . Результаты представлены в табл. 2; 3 и на рис. 4; 5.

Как следует из таблиц и графиков, с увеличением спелости семян отношение длинноволнового потока к коротковолновому увеличивается. Зависимости могут быть статистически достоверно линейно аппроксимированы при коэффициенте детерминации R^2 , равном 0,90 для пшеницы и 0,93 – для овса. Данные зависимости можно использовать для определения степени физиологической зрелости семян. Так, семена пшеницы можно считать спелыми при соотношении Φ_l / Φ_s , превышающем 1,0, а семена овса – 1,3.

На основе полученных результатов предложена методика определения спелости семян зерновых растений при созревании, структурная схема которой представлена на рис. 6.

⁵ Изменения спектральных свойств фотолуминесценции семян пшеницы в процессе созревания / М. В. Беляков [и др.] // Энергетика, информатика, инновации-2016 : сб. тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. : в 3 т. Т. 2. Тюмень : Универсум, 2016. С. 23–26.

Таблица 1

Table 1

Интегральные параметры спектров семян пшеницы для различных диапазонов**The integral parameters of the wheat seeds spectra for different ranges**

Срок / Duration	H , о. е. / H , г. у.		
	250–410	410–470	470–550
1	2 054,00	600	198,00
	3,49	1	0,34
2	896,00	413	165,00
	1,79	1	0,33
3	628,00	398	140,00
	1,57	1	0,35
4	135,00	151	83,65
	0,91	1	0,56
5	83,00	144	114,00
	0,57	1	0,79

Таблица 2

Table 2

Результаты расчета потоков фотолюминесценции семян пшеницы**The results of the fluxes calculation photoluminescence of wheat seeds**

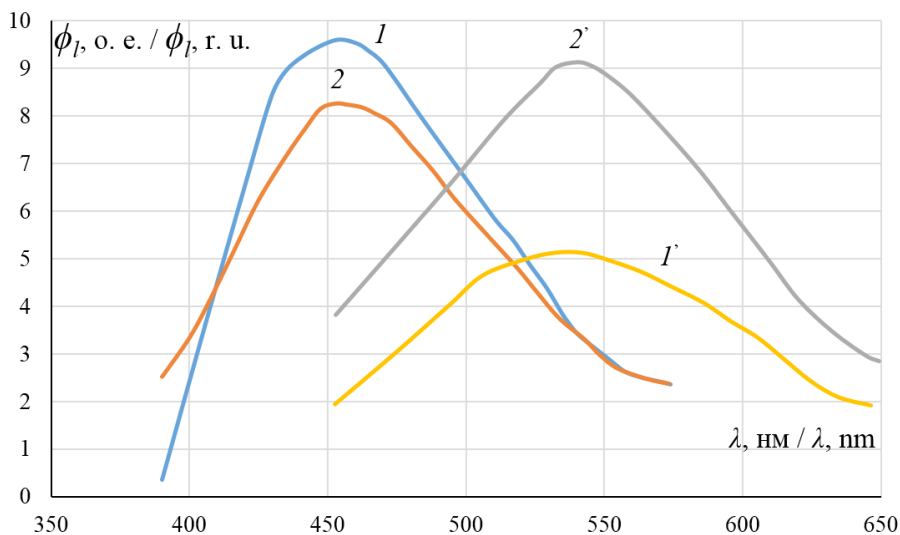
Срок / Duration	t , сут / t , day	Φ_{s2} , о. е. / Φ_{s2} , г. у.	Φ_{l2} , о. е. / Φ_{l2} , г. у.	Φ_s/Φ_l , о. е. / Φ_s/Φ_l , г. у.
1	95	1 116	658	0,59
2	103	1 278	921	0,72
3	109	1 491	1 297	0,87
4	120	1 125	996	0,89
5	126	1 023	1 114	1,09

Таблица 3

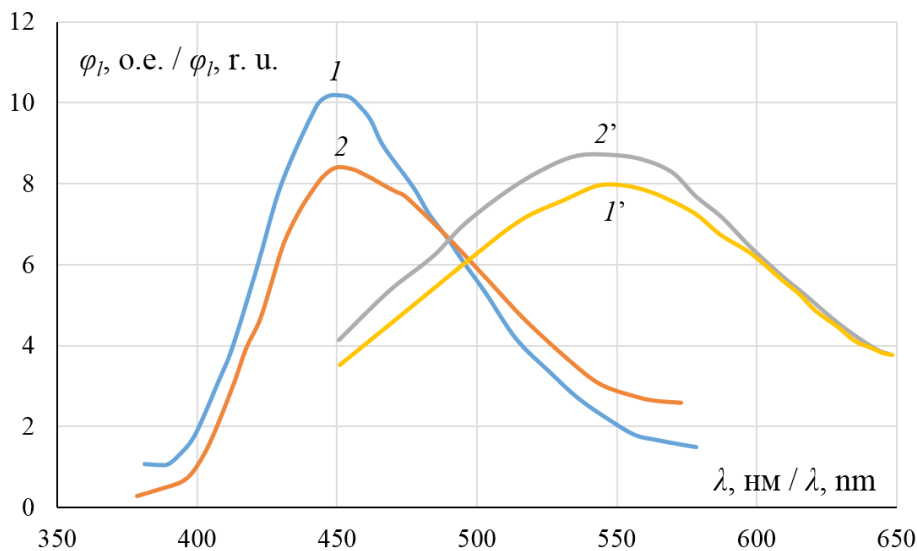
Table 3

Результаты расчета потоков фотолюминесценции семян овса**The results of the fluxes photoluminescence seed oats calculation**

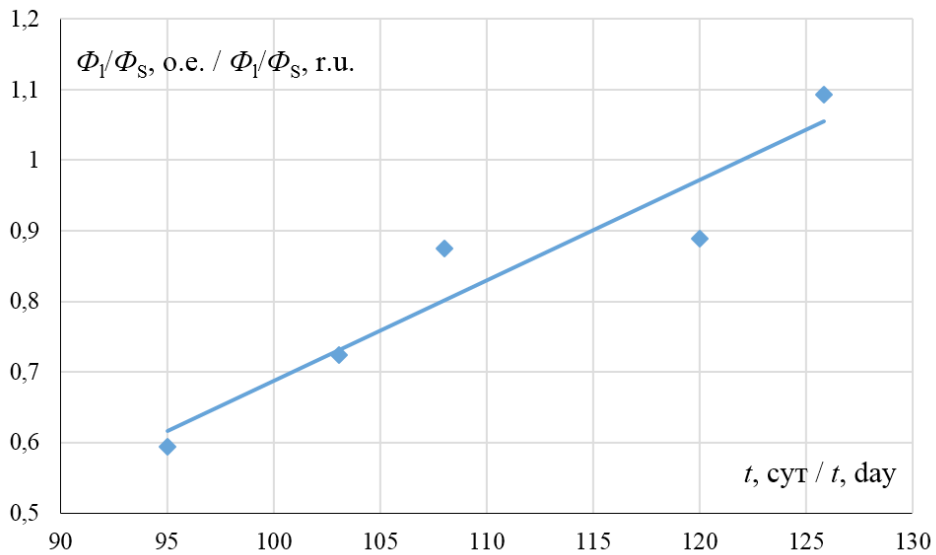
Срок / Duration	t , сут / t , day	Φ_{s3} , о. е. / Φ_{s3} , г. у.	Φ_{l3} , о. е. / Φ_{l3} , г. у.	Φ_s/Φ_l , о. е. / Φ_s/Φ_l , г. у.
1	95	993	991	1,00
2	103	983	1 101	1,12
3	109	913	1 132	1,24
4	120	913	1 184	1,30



Р и с. 2. Спектры люминесценции семян пшеницы молочной спелости (I ; I') и полностью спелых (2 ; $2'$) коротковолнового и длинноволнового диапазонов
 F i g. 2. The luminescence spectra of milky ripeness (I and I') and fully ripe (2 and $2'$) wheat seeds short-wave and long-wave ranges

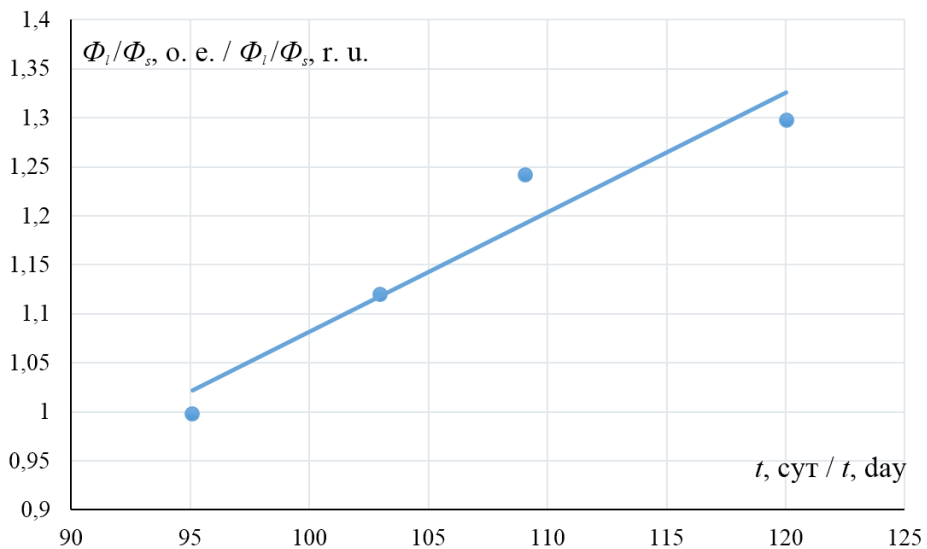


Р и с. 3. Спектры люминесценции семян овса молочной спелости (I ; I') и полностью спелых (2 ; $2'$) коротковолнового и длинноволнового диапазонов
 F i g. 3. The luminescence spectra of milky ripeness (I and I') and fully mature (2 and $2'$) oat seeds short-wave and long-wave ranges



Р и с. 4. График зависимости отношения длинноволнового потока фотолюминесценции семян пшеницы к коротковолновому от времени созревания

F i g. 4. The graph of ratio the long-wave flux wheat seeds photoluminescence to the short-wave ratio dependence of the ripening time



Р и с. 5. График зависимости отношения длинноволнового потока фотолюминесценции семян овса к коротковолновому от времени созревания

F i g. 5. The graph of ratio of the long-wave flux oat seeds photoluminescence to the short-wave dependence one on the ripening time

Предлагаемая методика включает в себя следующие этапы:

1. Для исследования с нескольких растений отбираются несколько семян. Возможен неразрушающий контроль семян полного колоса, в том числе без участия человека, с применением беспилотных летательных аппаратов. Исследуемая проба помещается в темную светонепроницаемую камеру.

2. Семена облучаются двумя источниками излучения (например, светодиодами), спектры излучения которых имеют максимумы на длинах волн $\lambda_s = 362$ нм и $\lambda_l = 485$ нм (или максимально близкие к ним) для возбуждения фотолюминесценции.

3. Люминесценция регистрируется двумя фотоприемниками (например, фотодиодами) с диапазонами чувствительности 380–580 и 450–650 нм.

4. Электрический фотосигнал с фотоприемников усиливается усилителем и поступает на микроконтроллер.

5. В микроконтроллере сигнал преобразуется в цифровую форму, после чего происходит расчет отношения потока длинноволновой фотолюминесценции Φ_l к потоку коротковолновой фотолюминесценции Φ_s .

6. Полученный результат поступает на выходное индикаторное устройство.

С учетом полученных данных определяется, на какой стадии созревания находятся семена, и принимается решение о возможных дальнейших действиях.

На рис. 7 представлена функциональная схема методики определения спелости семян.

Для реализации методики разработана конструкция и выбраны основные узлы прибора объективного экспресс-анализа степени физиологической зрелости семян (рис. 8).

В качестве источников излучения выбраны два светодиода: для коротковолнового излучения – VLMU3510⁶, для длинноволнового – XPEVBL-L1-R250-00 Z01⁷. В качестве приемников излучения наиболее подходящими по активности являются фотодиоды S9219-01⁸ и BPW21R⁹.

Произведен выбор компонентов электронного блока: операционный усилитель марки K140УД17, микросхема делителя напряжения K525ПС3, микроконтроллер ATMEGA8 на ЖКИ WH1602A [28]. Для разделения приема коротковолнового и длинноволнового фотосигналов используется временная задержка включения источников и приемников, осуществляемая через микроконтроллер.



Р и с. 6. Структурная схема методики определения спелости семян зерновых растений

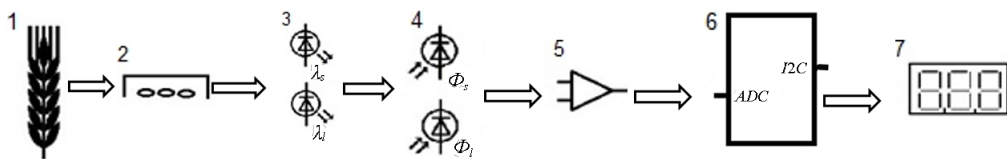
F i g. 6. The block diagram of the method for determining the ripeness grain plants seeds

⁶ Vishay – manufacturer of discrete semiconductors and passive components. URL: <https://www.vishay.com/docs/84363/vlm3510-365-130.pdf>

⁷ Farnell Россия. Электронные компоненты, электронные детали. URL: <http://ru.farnell.com/cree/x-pevbl-l1-r250-00z01/led-smd-xlamp-xpe-e-blue-485nm/dp/2335110>

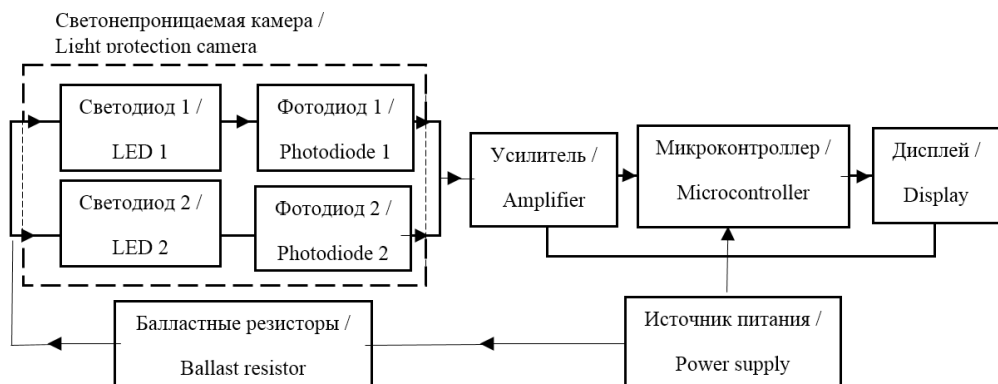
⁸ Home. Hamamatsu Photonics. URL: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/alpha/S/4103/S9219-01/index.html>

⁹ Vishay – manufacturer of discrete semiconductors and passive components. URL: <https://www.vishay.com/docs/81519/bpw21r.pdf>



Р и с. 7. Функциональная схема методики определения спелости семян: 1 – исследуемый материал (семена или колосья); 2 – светонепроницаемая камера с исследуемыми образцами; 3 – источники возбуждающего излучения; 4 – приемники фотолюминесцентного излучения; 5 – усилитель сигнала; 6 – микроконтроллер; 7 – выходной индикатор

F i g. 7. The functional diagram of the method for determining the seed ripeness: 1 – the test material (seeds or ears); 2 – opaque chamber with the samples; 3 – exciting radiation sources; 4 – photoluminescent radiation receivers; 5 – amplifier; 6 – microcontroller; 7 – output indicator



Р и с. 8. Структурная схема прибора для определения спелости семян
F i g. 8. The block diagram of the device for determining the seed ripeness

Обсуждение и заключение

Оптические фотолюминесцентные методы оценки качества семян растений являются бесконтактными, быстродействующими, селективными и зачастую неразрушающими. Для семян исследованных зерновых растений характерно возбуждение фотолюминесценции в диапазонах с максимумами на длинах волн 362 нм, 424 нм и 485 нм. В ходе созревания семян зерновых растений (на примере пшеницы и овса) меняется соотношение их уровней возбуждения и потоков люминесценции: для незрелых семян характерна коротковолновая люминесценция, а в спелых семенах преобладает

длинноволновая. Зависимости соотношения потоков фотолюминесценции длинноволнового и коротковолнового диапазонов от времени созревания являются возрастающими и могут быть статистически достоверно аппроксимированы линейными функциями. На основе полученных результатов разработан прибор для определения уровня физиологической зрелости семян, позволяющий за счет облучения семян двумя источниками с определенными длинами волн и регистрации потока фотолюминесценции соответствующими приемниками определить, на какой стадии созревания находится семя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Методы измерений спектральных характеристик и распознавания элементов зерновых смесей в системах сепарации реального времени / Э. К. Алгазинов [и др.] // Измерительная техника. 2014. № 1. С. 36–41.
2. **Jacques S. L.** The role of skin optics in diagnostic and therapeutic uses of lasers // Lasers in Dermatology / Eds. R. Steiner [et al.]. Berlin : Springer–Verlag, 1991. P. 1–21. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-75201-8_1
3. Review of optical breast imaging and spectroscopy / D. Grosenick [et al.] // Journal of Biomedical Optics. 2016. Vol. 21, no 9. P. 091311. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.9.091311>
4. Colorectal tumors and hepatic metastases differ in their optical properties—relevance for dosimetry in laser-induced interstitial thermotherapy / C. Holmer [et al.] // Lasers in Surgery and Medicine. 2006. Vol. 38, issue 4. P. 296–304. DOI: <https://doi.org/10.1002/lsm.20300>
5. Brown adipose tissue density measured by near-infrared time-resolved spectroscopy in Japanese, across a wide age range / S. Fuse [et al.] // Journal of Biomedical Optics. 2018. Vol. 23, no. 6. P. 065002. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.23.6.065002>
6. Spatially resolved, diffuse reflectance imaging for subsurface pattern visualization toward development of a lensless imaging platform: phantom experiments / I. Schelkanova [et al.] // Journal of Biomedical Optics. 2016. Vol. 21, no 1. P. 015004. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.1.015004>
7. Method and apparatus for measuring non-nutritive suck pattern stability : pat. 2009/0222214 A1 US : G 06 F 19/00, G 01 N 33/00 / Barlow S., Wang J., inventors ; University of Kansas, assignee. № 12/390,142 ; filed 21.02.09 ; publ. 03.09.09. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/ed/bc/1a/6fe5d2f6335935/US20090222214A1.pdf>
8. Diagnostic method for disorders using copeptin : pat. 2009/0221009 A1 US : G 01 N 33/53, G 01 N 33/00 / Bergmann M., Struck J., inventors ; Brahms AG, assignee. № 11/573,595 ; filed 19.08.05 ; publ. 03.09.09. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/af/10/2a/9b8322c927b4ec/US20090221009A1.pdf>
9. Identification of cancer biomarkers and phosphorylated proteins : pat. 2009/0226913 A1 US : C 12 Q 1/68, C 12 Q 1/00, G 01 N 33/574, G 01 N 33/00 / Pope R. M. [et al.], inventors ; Life Technologies Corporation, assignee. № 12/340,341 ; filed 19.12.08 ; publ. 10.09.09. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/c0/c9/ba/2a844549c238c8/US20090226913A1.pdf>
10. Method for improving optical response marking of analytical chemistry sensor arrangement : pat. 2009-180735 AJP : G 01 N 21/64, G 01 N 21/78, G 01 N 33/58, G 01 N 33/50. № 2009-62380 ; filed 16.03.2009 ; publ. 13.08.09. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/68/92/91/887124384d618a/JP2009180735A.pdf>
11. Nanowire-based system for analysis of nucleic acids : pat. 2009/226927 A1 US : C 12 Q 1/68, G 01 N 33/00, C 40 B 30/10, C 12 M 1/00 / Sun H., Fung S., Woo S. L., inventors. № 12/468,831 ; filed 19.05.09 ; publ. 10.09.09. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/cb/11/22/d9ed4b34c0d1d1/US20090226927A1.pdf>
12. Universal sample preparation system and use in an integrated analysis system : pat. 2009/108260 A2 WO : C 12 P 19/34, B 01 D 17/06, B 01 D 57/02, B 01 L 3/00, G 01 N 33/00, C 12 M 1/00, G 01 N 1/18 / Vangbo M. [et al.], inventors ; Microchip Technologies, Inc., applicant. № PCT/US2009/000419 ; filed 21.01.09 ; publ. 03.09.09. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/9b/67/df/51cbcd000addf3/WO2009108260A2.pdf>
13. **Mouroulis P., Green R. O.** Review of high fidelity imaging spectrometer design for remote sensing // Optical Engineering. 2018. Vol. 57, no. 4. P. 040901. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.4.040901>
14. Development and in vivo test of a miniature Raman probe for early cancer detection in the peripheral lung / H. C. McGregor [et al.] // Journal of Biophotonics. 2018. Vol. 11, issue 11. P. 201800055. DOI: <https://doi.org/10.1002/jbio.201800055>
15. **Liu Q., Vo-Dinh T.** Spectral filtering modulation method for estimation of hemoglobin concentration and oxygenation based on a single fluorescence emission spectrum in tissue phantoms // Medical Physics. 2009. Vol. 36, issue 10. P. 4819–4829. DOI: <https://doi.org/10.1118/1.3218763>

16. Decomposition of complex fluorescence spectra containing components with close emission maxima positions and similar quantum yields. Application to fluorescence spectra of proteins / A. Savić [et al.] // Journal of Fluorescence. 2013. Vol. 23, issue 3. P. 605–610. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10895-013-1183-0>
17. Early detection and differentiation of venous and arterial occlusion in skin flaps using visible diffuse reflectance spectroscopy and autofluorescence spectroscopy / C. Zhu [et al.] // Biomedical Optics Express. 2016. Vol. 7, issue 2. P. 570–580. URL: <https://doi.org/10.1364/BOE.7.000570>
18. Инфракрасный термометр : пат. 74282 Рос. Федерация : МПК А 61 В 5/00 (2006.01) / Ткаченко Ю. А. ; патентообладатель Закрытое акционерное общество «СЕМ Технолоджи». № 2008104491/22 ; заявл. 05.02.2008 ; опубл. 27.06.2008, Бюл. № 18. URL: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=74282&TypeFile=html
19. Способ определения биологически ценных семян кукурузы : пат. 2506734 Рос. Федерация : МПК А01 С 1/00 (2006.01) / Кузьминов В. И., Гребенник В. И. ; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ставропольский государственный аграрный университет». № 2012141184/13 ; заявл. 26.09.2012 ; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/250/2506734.html>
20. **Беляков М. В.** Оптические спектральные свойства семян растений различной влажности // Вестник НГИЭИ. 2016. № 4 (59). С. 38–50. URL: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1397
21. **Беляков М. В., Куликова М. Г.** Зависимости влажности семян растений от потока люминесценции // Естественные и технические науки. 2016. № 11. С. 162–163.
22. **Беляков М. В., Выборнова Е. И.** Разработка люминесцентного анализатора всхожести семян агрокультур // Вестник НГИЭИ. 2017. № 1 (68). С. 39–52. URL: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1468
23. **Беляков М. В., Булатикова В. О., Тарасенков К. А.** Методика объективного контроля спелости семян растений при созревании // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 3 (28). С. 14–19. URL: <http://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2019/02/%D0%98%D0%9D%D0%9E%D0%92%D0%A1%D0%A5-28.pdf>
24. **Беляков М. В.** Типовые спектральные характеристики люминесценции семян растений // Естественные и технические науки. 2015. № 11 (89). С. 521–525.
25. **Беляков М. В.** Исследование люминесцентных свойств семян пшеницы и овса различной всхожести // Вестник ВИЭСХ. 2016. № 1 (22). С. 30–33. URL: <http://vestnik.viesh.ru/wp-content/uploads/2016/08/2016-01-22.pdf>
26. **Беляков М. В.** Определение всхожести семян растений люминесцентным методом // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 3 (52). С. 35–40. URL: https://izhgsha.ru/images/rio/Raznoe/Vestniki/2017_3.pdf
27. **Беляков М. В.** Изменение люминесцентных характеристик семян пшеницы в процессе созревания // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 6. С. 38–41. URL: <http://www.journal-kgsha.ru/data/documents/2017-06.pdf>
28. **Беляков М. В.** Оптический люминесцентный анализатор всхожести семян растений // Инновации в сельском хозяйстве. 2017. № 2 (23). С. 73–82. URL: <http://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2018/04/Insel23.pdf>

Поступила 29.11.2018; принята к публикации 13.02.2019; опубликована онлайн 28.06.2019

Об авторе:

Беляков Михаил Владимирович, заведующий, кафедра оптико-электронных систем, филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”» в г. Смоленске (214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический пр., д. 1), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: W-2746-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, bmw20100@mail.ru

Благодарности: автор выражает признательность рецензентам за внимательное прочтение рукописи.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Algazinov E.K., Dryuchenko M.A., Minakov D.A., Sirota A.A., Shul'gin V.A. Methods of measuring the spectral characteristics and identifying the components of grain mixtures in real-time separation systems. *Izmeritel'naya tekhnika* = Measurement Techniques. 2014; 1:36-41. (In Russ.)
2. Jacques S.L. The role of skin optics in diagnostic and therapeutic uses of lasers. In: Steiner R., Kaufmann R., Landthaler M., Braun-Falco O. (eds) *Lasers in Dermatology*. Berlin: Springer-Verlag; 1991. p. 1-21. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-75201-8_1
3. Grosenick D., Rinneberg H., Cubeddu R., Taroni P. Review of optical breast imaging and spectroscopy. *Journal of Biomedical Optics*. 2016; 21(9): 091311. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.9.091311>
4. Holmer C., Lehmann K.S., Risk J., Roggan A., Germer C.-T., Reissfelder C., et al. Colorectal tumors and hepatic metastases differ in their optical properties – relevance for dosimetry in laser-induced interstitial thermotherapy. *Lasers in Surgery and Medicine*. 2006; 38(4):296-304. DOI: <https://doi.org/10.1002/lsm.20300>
5. Fuse S., Nirengi S., Amagasa S., Homma T., Kime R., Endo T., et al. Brown adipose tissue density measured by near-infrared time-resolved spectroscopy in Japanese, across a wide age range. *Journal of Biomedical Optics*. 2018; 23(6):065002. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.23.6.065002>
6. Schelkanova I., Pandya A., Saiko G., Nacy L., Babar H., Shah D.F., et al. Spatially resolved, diffuse reflectance imaging for subsurface pattern visualization toward development of a lensless imaging platform: Phantom experiments. *Journal of Biomedical Optics*. 2016; 21(1):015004. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.1.015004>
7. Barlow S., Wang J., inventors. University of Kansas, assignee. Method and apparatus for measuring non-nutritive suck pattern stability. US Patent 2009/0222214 A1. 2009 Sep 03. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/ed/bc/1a/6fe5d2f6335935/US20090222214A1.pdf>
8. Bergmann A., Struck J., inventors. Brahm's AG, assignee. Diagnostic method for disorders using copeptin. US Patent 2009/0221009 A1. 2009 Sep 03. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/af/10/2a/9b8322c927b4ec/US20090221009A1.pdf>
9. Pope R., Liang X., inventors. Life Technologies Corporation, assignee. Identification of cancer biomarkers and phosphorylated proteins. US Patent 2009/0226913 A1. 2009 Sep 10. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/c0/c9/ba/2a844549c238c8/US20090226913A1.pdf>
10. Method for improving optical response marking of analytical chemistry sensor arrangement. JP Patent 2009-180735 A. 2009 Aug 13. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/68/92/91/887124384d618a/JP2009180735A.pdf>
11. Sun H., Fung S., Woo S.L., inventors. Nanowire-based system for analysis of nucleic acids. US Patent 2009/0226927 A1. 2009 Sep 10. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/cb/11/22/d9ed4b34c0d1d1/US20090226927A1.pdf>
12. Vangbo M., Nielsen W.D., Blaga L.I., Stern S., Horn J., Van Nguyen M., et al., inventors. Microchip Technologies, Inc., applicant. Universal sample preparation system and use in an integrated analysis system. WO Patent 2009/108260 A2. 2009 Sep 3. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/9b/67/df/51cbcd00addf3/WO2009108260A2.pdf>
13. Mouroulis P., Green R.O. Review of high fidelity imaging spectrometer design for remote sensing. *Optical Engineering*. 2018; 57(4):040901. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.4.040901>
14. McGregor H.C., Short M.A., Lam S., Shaipanich T., Beaudoin E.-L., Zeng H. Development and in vivo test of a miniature Raman probe for early cancer detection in the peripheral lung. *Journal of Biophotonics*. 2018; 11(11):201800055. DOI: <https://doi.org/10.1002/jbio.201800055>
15. Liu Q., Vo-Dinh T. Spectral filtering modulation method for estimation of hemoglobin concentration and oxygenation based on a single fluorescence emission spectrum in tissue phantoms. *Medical Physics*. 2009; 36(10):4819-4829. DOI: <https://doi.org/10.1118/1.3218763>
16. Savić A., Kardos R., Nyitrai M., Radotić K. Decomposition of complex fluorescence spectra containing components with close emission maxima positions and similar quantum yields. Application to fluo-

rescence spectra of proteins. *Journal of Fluorescence*. 2013; 23(3):605-610. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10895-013-1183-0>

17. Zhu C., Chen S., Hoe-Kong Chui C., Tan B.-K., Liu Early Q. Early detection and differentiation of venous and arterial occlusion in skin flaps using visible diffuse reflectance spectroscopy and autofluorescence spectroscopy. *Biomedical Optics Express*. 2016; 7(2):570-580. DOI: <https://doi.org/10.1364/BOE.7.000570>

18. Tkachenko Yu.A., inventor. Closed Joint Stock Company CEM Technology, assignee. Infrared Thermometer. RU Patent 74282. 2008 Feb 05. Available at: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=74282&TypeFile=html (In Russ.)

19. Kuzminov V.I., Grebennik V.I., inventors. FSBEI HPE Stavropol State Agrarian University, assignee. Method for determination of biologically valuable corn seeds. RU Patent 2506734. 2012 Sep 26. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/250/2506734.html> (In Russ.)

20. Belyakov M.V. Optical spectral qualities of plant seeds with different moisture. *Vestnik NGIEI = Bulletin NGII*. 2016; 4:38-50. Available at: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1397 (In Russ.)

21. Belyakov M.V., Kulikova M.G. Dependence of humidity of seeds of plants on a stream of luminescence. *Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki = Natural and Technical Sciences*. 2016; 11:162-163 (In Russ.)

22. Belyakov M.V., Vybornova E.I. Fluorescent analyser development of crop species seed germination. *Vestnik NGIEI = Bulletin NGII*. 2017; 1:39-52. Available at: http://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1468 (In Russ.)

23. Belyakov M.V., Bulatikova O.V., Tarasenkov K.A. Methodology of objective control of membership of seasons of ras-changes at ripe. *Innovatsii v selskom khozyaystve = Innovations in Agriculture*. 2018; 3:14-19. Available at: <http://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2019/02/%D0%98%D0%9D%D0%9D%D0%9E%D0%92%D0%A1%D0%A5-28.pdf> (In Russ.)

24. Belyakov M.V. Typical plant seeds spectral characteristics. *Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki = Natural and Technical Sciences*. 2015; 11:521-525 (In Russ.)

25. Belyakov M.V. The study of fluorescent properties of seeds of wheat and oat of different germination. *Vestnik VIESKH = VIESH Institute' Herald*. 2016; 1:30-33. Available at: <http://vestnik.viesh.ru/wp-content/uploads/2016/08/2016-01-22.pdf> (In Russ.)

26. Belyakov M.V. Determination of germination of plant seeds by luminescent method. *Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii = The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2017; 3:35-40. Available at: https://izhgsha.ru/images/rio/Raznoe/Vestniki/2017_3.pdf (In Russ.)

27. Belyakov M.V. Change in luminescent characteristics of wheat seeds during maturation. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii = Vestnik of Kursk State Agricultural Academy*. 2017; 6:38-41. Available at: <http://www.journal-kgsha.ru/data/documents/2017-06.pdf> (In Russ.)

28. Belyakov M.V. Optical luminescent analyzer of germination of plant seeds. *Innovatsii v selskom khozyaystve = Innovations in Agriculture*. 2017; 2:73-82. Available at: <http://journal.viesh.ru/wp-content/uploads/2018/04/Insel23.pdf> (In Russ.)

Received 29.11.2018; revised 13.02.2019; published online 28.06.2019

About author:

Mikhail V. Belyakov, Head, Chair of Optoelectronic Systems, Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" in Smolensk (1 Energeticheskiy Proyezd, Smolensk 214013, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, ResearcherID: W-2746-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, bmw20100@mail.ru

Acknowledgements: The author expresses gratitude to the reviewers for the careful reading of the manuscript.

The author has read and approved the final version of the paper.