

УДК 581.1

**ЛЮМИНЕСЦЕНТНО-ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
РЕАКЦИИ ПРОРОСТКОВ ПШЕНИЦЫ  
НА НИЗКОЧАСТОТНОЕ ЭЛЕКТРОПОЛЕВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ**

*Бойченко А. П.<sup>1</sup>*

LUMINESCENT-PHOTOGRAPHIC RESEARCHES REACTIONS SPROUT WHEAT ON  
LOW-FREQUENCY ELECTROFIELD INFLUENCE

Boychenko A. P.

With the help of the developed way of photographic registration spontaneous superweak luminescence the reaction 7 day's sprout wheat (*Triticum aestivum* L.) grade "Krasnodar-99" on a low-frequency electrical field by intensity 3 kV/m and frequency 50 Hz is revealed. On intensity, colour fields and character of a luminescence of roots a line of attributes reflecting this reaction is established than the close interrelation electrophysiological and quantum-optical processes in plants is determined. Is shown, that at local electrofield influence on a trailer part of sheet plates wheat, the extending wave of electrophysiological excitation reaches roots and increases brightness them luminescence, vary thus its spectral structure.

Keywords: spontaneous superweak luminescence, luminescent-photographic way, low-frequency electrofield influence.

Спонтанная сверхслабая люминесценция (ССЛ) растительных объектов является в настоящее время одним и важнейших диагностических показателей физиологии их развития и функционирования при различных условиях окружающей среды [1]. Поскольку интенсивность люминесценции низка (порядка  $10-10^3$  квант·с/см<sup>2</sup>), ее регистрация ведется с помощью очень чувствительных приборов — фотоэлектронных умножителей [1]. В 2001 году автором данной работы был предложен новый способ регистрации ССЛ — фотографический [2]. Он основан на накоплении квантов света фотоэмульсионными микрокристаллами галоидного серебра с последующей визуализацией изображений люминесценции путем химико-фотографической обработки регистрирующего материала. С помощью данного способа удалось не только показать широкодиапазонный спектр излучения, визуализировав его характерные цветовые поля на различных органах растений (от УФ до ИК излучения), но и выявить в последних высокоорганизованную лабильную субстанцию, образо-

ванную из разносортных электрически заряженных частиц, коллективно взаимодействующих друг с другом, и отражающую физиологическое состояние растений как целостно организованных систем. По своим физическим свойствам эта субстанция очень напоминала плазму газового разряда или полупроводников и оказалась крайне чувствительна к факторам внешней среды, особенно к действию электрического или магнитного полей, а ее изменения происходили задолго до того, как это действие проявлялось на анатомо-морфологическом уровне организации растений [2–5], причем, независимо от того, оказывалось ли такое действие на целый организм или его часть.

Вопрос о доморфологических изменениях в организме растений при различных условиях и факторах внешней среды является актуальным не только в изучении их физиологии, но и экологии, а также сельскохозяйственном производстве, когда агрофитоценозы подвергаются действию очень мощных электромагнитных полей, создаваемых, например, высоковольтными линиями электро-

<sup>1</sup>Бойченко Александр Павлович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры оптоэлектроники физико-технического факультета Кубанского государственного университета; e-mail: bojchenko@yandex.ru.

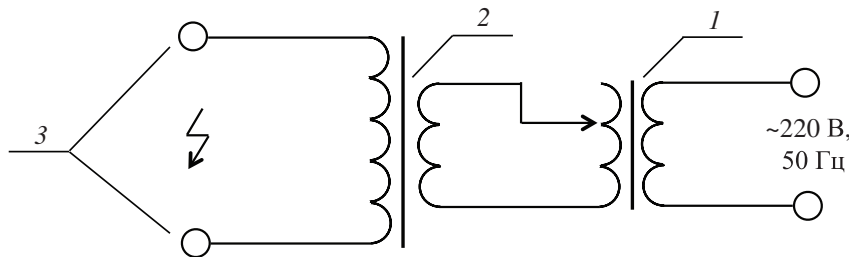


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема высоковольтного источника напряжения для моделирования НЧ ЭПВ на растения

передач (ВЛЭП), пролегающими через территории их посева. Такие линии генерируют в основном переменное электрическое поле низкой частоты (НЧ) порядка 50 Гц и напряженностью до 50 кВ/м. Поле с указанными характеристиками способно приводить к существенным морфологическим изменениям растений, вплоть до некроза тканей, что оказалось особенно сильно выражено на пшенице (*Triticum aestivum* L.) [6]. Поэтому в настоящей работе была поставлена цель: по характеру ССЛ корневой системы *Triticum aestivum* L. выявить у ее проростков реакцию на НЧ электрополевое воздействие (ЭПВ) аналогичное создаваемому ВЛЭП с помощью люминесцентно-фотографического способа (ЛФС).

## 1. Методика

Объектом исследования служили семидневные проростки пшеницы сорта «Краснодарская-99». Растения выращивались в чашках Петри на обеззоленной фильтровальной бумаге, смоченной дистиллированной водой при температуре 25°C. Моделирование на них НЧ ЭПВ от ВЛЭП осуществлялось с помощью специально сконструированного высоковольтного источника переменного напряжения, питаемого от сети ~220 В, 50 Гц. Электрическая схема устройства приведена на рис. 1, где 1 — регулируемый автотрансформатор, 2 — высоковольтный трансформатор, 3 — высоковольтные контакты. Прибор позволяет регулировать выходное напряжение частотой 50 Гц от 0,2 до 15 кВ.

Напряжение прикладывалось к концевой части листовых пластинок наибольшей длины, так как в естественных условиях произрастания пшеницы они имеют минимальное расстояние до высоковольтного провода и соответственно подвергаются большему ЭПВ.

Растения под НЧ ЭПВ являлись опытным вариантом, а без использования названного воздействия — контрольным. Каждый вариант эксперимента проводился десять раз. При каждом повторении эксперимента растение использовалось только один раз. Фотографическая регистрация ССЛ производилась от корней проростков в течение 300 с на цветную негативную фотопленку светочувствительностью 400 ед. ISO производства фирмы Kodak. За время ее экспонирования, в случае опытного варианта, на листовую пластинку непрерывно подавалось высоковольтное напряжение, создающее в системе образованного с листом конденсатора электрическое поле напряженностью порядка 3 кВ/м (поле с такой напряженностью создается у поверхности земли от ВЛЭП на 220 кВ [6]). Выбор корешков в качестве излучателя определялся двумя причинами. Во-первых, яркость их люминесценции в три и более раз превышает ССЛ других органов пшеницы. Во-вторых, при описанной организации эксперимента корневая система максимально удалена от источника ЭПВ и любые изменения в ССЛ позволят не только выявить реакцию растений на такое воздействие, но и судить о характере распространения индуцированного им в организме электромагнитного сигнала. Схема экспериментальной установки для реализации ЛФС корешков приведена на рис. 2, где 1 — лист исследуемого растения с корневой системой 2, прижатой поролоновым матрасиком 3 к фотоэмульсионному слою 4 фотопленки; 5 — подложка фотопленки; 6 — металлические высоковольтные электроды для создания переменного электрического поля; 7 — полимерная (полиэтиленовая) пленка, моделирующая диэлектрические свойства воздуха между ВЛЭП и телом растения; 8 — высоковольтный источник переменного напряжения, описанный выше.

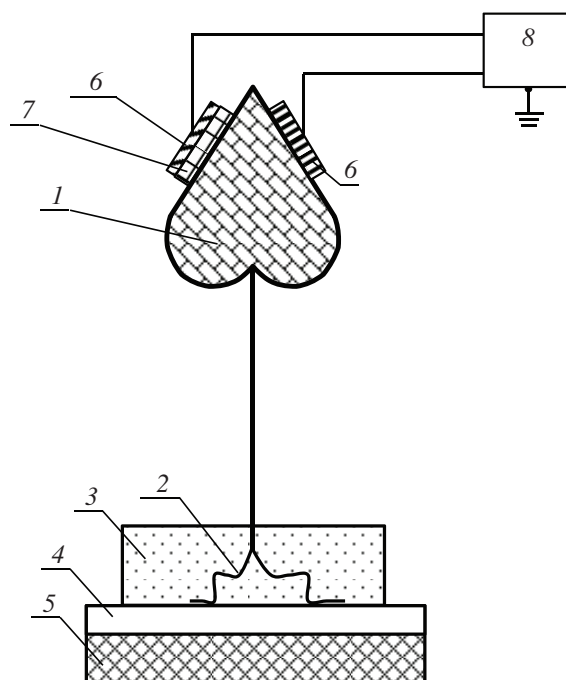


Рис. 2. Схема установки для фотографической регистрации ССЛ корней растений

На рис. 3 представлены фотографические изображения ССЛ, которые из-за технических возможностей типографии переводились из цветного варианта в черно-белый. По этой причине к результатам количественного анализа изображений добавлено описание цветовых полей ССЛ составляющих зон корешков. Кроме видимой составляющей ССЛ интерес представляет и ИК компонента. Поэтому для ее выделения экспонированная фотопленка до химико-фотографической обработки подсвечивалась со стороны корневого чехлика световой вспышкой от лампы накаливания мощностью 60 Вт в течение 0,005 с. Результат этих действий отражает рис. 3б.

Анализ полученных изображений ССЛ осуществлялся по их интегральной оптической плотности  $D = D_{VI} - D_V$  (эквивалентной яркости люминесценции) и количеству структурных элементов  $N$  — отдельных пятен засветки, формирующих изображение. Первый параметр оценивался по негативам с помощью денситометра СР-25М как разница между интегральной оптической плотностью изображений с вуалью фотопленки  $D_{VI}$  и плотностью только вуали  $D_V$ , а второй параметр — по полученным с негативов фотографиям путем подсчета элементов свечения

на экспонируемой площади проекции корня как отношение этих параметров (штук/см<sup>2</sup>).

## 2. Результаты и обсуждение

Даже при визуальном рассмотрении полученных изображений ССЛ корней видны кардинальные отличия между контрольным и опытным вариантами. В отсутствие НЧ ЭПВ свечением охвачена в основном зона растяжения корешков (рис. 3а). При этом на каждой из зон структурно различается и сама ССЛ. Со стороны зоны деления она представлена крупными овальными пятнами желтого цвета, а само свечение имеет резкий градиент убывания яркости. Со стороны зоны всасывания ССЛ представлена мелкими, сливающимися между собой пятнышками оранжево-красного цвета, градиент яркости которых носит плавно убывающий характер.

В случае ЭПВ вся описанная выше закономерность свечения нарушается, что, прежде всего, выражено структурными изменениями ССЛ (рис. 3б). Ей охвачена вся экспонированная область корешков, без каких-либо резких градиентов яркости. При детальном оптико-микроскопическом рассмотрении негативов ССЛ представляет совокуп-

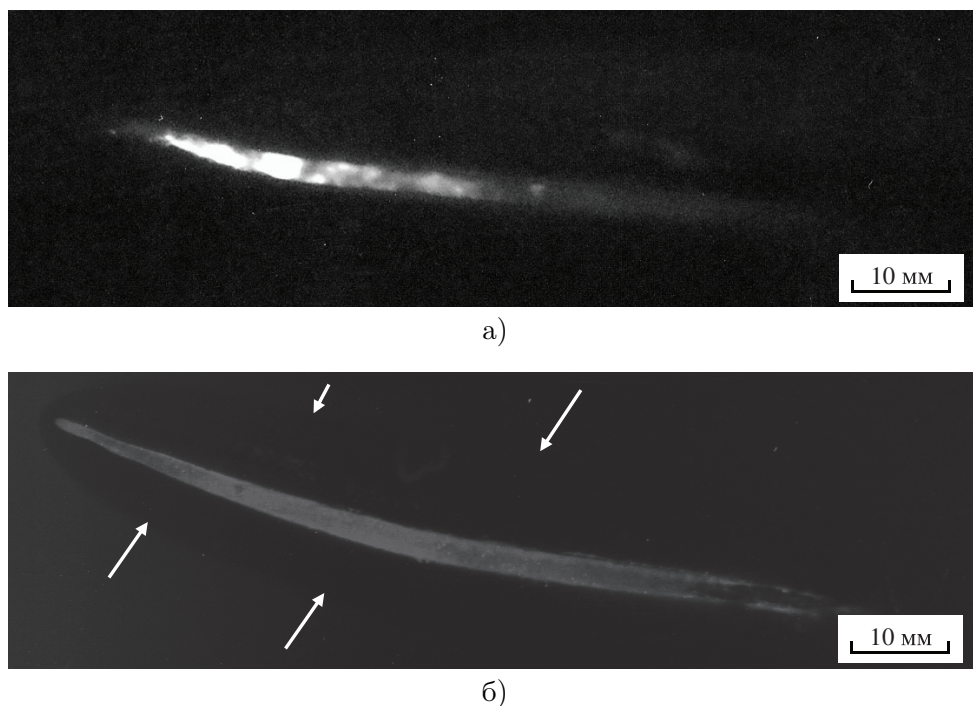


Рис. 3. Фотографические изображения ССЛ корней пшеницы: *а* — контроль; *б* — НЧ ЭПВ. Стрелками показаны границы ИК составляющей ССЛ

ность большого количество очень мелких (порядка 0,1 мм) пятнышек бирюзового цвета, наибольшее количество которых сосредоточено на зоне всасывания. Тем же цветом представлена и зона растяжения корешков. Лишь в зоне деления присутствует незначительный синеватый оттенок, по-видимому, относящийся к УФ компоненте ССЛ при интенсивном митозе в названной зоне корня. Результаты количественных оценок яркостных и структурных параметров изображений ССЛ представлены в таблице, подтверждающей визуальный анализ изображений.

Из таблицы видно, что при НЧ ЭПВ на проростки пшеницы наибольшие изменения претерпевает структурная составляющая ССЛ. Она более чем в 3 раза превышает  $N$  для контрольного варианта. Изменяется и спектральный состав люминесценции. Если для контрольного варианта в ней преобладала длинноволновая компонента, ограниченная желтым свечением, то при НЧ ЭПВ его спектр сдвигается в коротковолновую область длин волн. Судя по цветовым полям, в основном здесь преобладают зеленые и голубые лучи, а также когерентная ИК составляющая. По-видимому, длины волн ее излучения принадлежат к ближней зоне электромагнитного спектра. Выявить ИК излу-

чение для ССЛ корней контрольного варианта не удалось. Вероятно, они не носят когерентный характер, четко выявляемый по эффекту Гершеля или путем слабой подсветки длинноволновым излучением экспонированного ССЛ негатива (см. рис. 3б). Полученные данные позволяют не только судить о реакции проростков пшеницы на НЧ ЭПВ, но и дают основание для предположений возможного пути реализации этого процесса.

Согласно [1], наибольшая интенсивность ССЛ приходится на зону растяжения корня, где прекращается деление клеток и наблюдается их дифференциация. При этом образование крупных вакуолей делает клетки этой зоны наиболее прозрачными для оптического излучения. Кроме того, цитологическими исследованиями установлено, что основным поставщиком фотонов ССЛ являются клеточные стенки [7]. Обладая ярко выраженными катионообменными свойствами, они являются очень активными участниками электрофизиологических процессов, включая генерацию биоэлектрических потенциалов [8]. А последние исследования в изучении клеточной стенки как динамической системы [9] дополняют этот вывод. Поэтому электрогенез у растений и квантово-оптические процессы в их различных структурах имеют очень тес-

Оптические и структурные характеристики фотографических изображений ССЛ корней и цветowych полей их зон у пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта «Краснодарская-99»

Вариант опыта	$D$	$N$ , штук/см <sup>2</sup>	Цветовые поля ССЛ зон корней		
			деления	растяжения	всасывания
Контроль	$0,216 \pm 0,022$	$2,46 \pm 0,30$	отсутствует	желтый	Оранжево-красный
НЧ ЭПВ	$0,375 \pm 0,040$	$7,69 \pm 1,15$	Бирюзовый с синеватым оттенком	Бирюзовый	Бирюзовый

ную взаимосвязь. Из чего следует, что любые внешние или внутренние факторы, приводящие к изменению биоэлектрических потенциалов, должны неизбежно отражаться на ССЛ растений. Особенно для такого специфически действующего фактора как переменное электрическое поле.

Основными мишенями в организме растений для внешнего электрического поля, прежде всего, являются подвижные электрически заряженные частицы, например, ионы  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^-$  и пр. В отсутствие поля их транспорт через клеточные биомембраны носит электродиффузионный характер, создаваемый градиентом концентраций, как и протекающие при этом хемилюминесцентные реакции [1]. При ЭПВ не только меняется концентрационный градиент по обе стороны мембран, но и интенсифицируются различные биохимические реакции за счет дополнительной ускоряющей силы со стороны внешнего электрического поля, действующей на ионы. Это действие способно изменить энергетическое состояние как самих ионов, так и электрически заряженных реакционных центров. Тогда при их взаимодействии возможно не только усиление квантового выхода ССЛ (т.е. ее яркости), но и излучение фотонов с большими энергиями (меньшими длинами волн) по сравнению с отсутствием ЭПВ. Описанная картина в целом подтверждается проведенными исследованиями. Из таблицы и рисунков видно как увеличение интегральной оптической плотности фотографических изображений ССЛ (усиление ее яркости), так и смещение их цветовых полей от длинноволнового диапазона к волнам меньшей длины (зеленые и голубые лучи).

Как известно, при локальном раздражении листовой пластинки растения возникают потенциалы действия, которые, распространяясь по проводящим пучкам со скоростью порядка 30–40 см/мин, достигают корней и вызывают временное изменение погло-

щения веществ [8, 10], что отражается на общем физиологическом состоянии целого растения. Очевидно, аналогичная картина процесса имеет место и в настоящих исследованиях с пшеницей. При пятиминутном локальном НЧ ЭПВ на ее листья с любого участка проростков было возможно регистрировать биоэлектрические потенциалы, соответствующие форме прикладываемого высоковольтного напряжения частотой 50 Гц. (Результатам этих исследований планируется посвятить отдельную публикацию.) Таким образом, весь организм растений, включая их корневую систему, был охвачен процессом электрофизиологического возбуждения от НЧ ЭПВ. Из этого следует, что те зоны корней, которые до ЭПВ обладали очень низкой излучательной способностью или вообще ее не имели, в условиях воздействия оказались источниками ССЛ. Этим также объясняется резкое увеличение ее структурных элементов свечения  $N$ , наглядно демонстрируемое рис. 3б. Выявленная закономерность подтверждает ранее полученные результаты по ССЛ пленки лука, к которой прикладывалось электрическое поле, приводившего к пятикратному (и более) увеличению интенсивности люминесценции [11]. Однако новым отличительным элементом настоящих исследований от ранее проведенных является возможность визуализировать конкретные участки тел растений и определять спектральный состав их ССЛ без привлечения каких-либо сложных и дорогостоящих технических средств.

По совокупности представленных результатов можно сказать, что ЛФС, так же, как и электрофизиологический способ, позволяет выявлять реакцию растительного организма на НЧ ЭПВ, в том числе, создаваемое ВЛЭП. При этом одновременно фиксируется как физиологическая, так и морфологическая особенность свечения ССЛ (в первом случае это ее яркость и спектральный состав, а во вто-

ром — структурные характеристики), отражающая происходящие в растениях изменения.

В заключение отметим, что многолетние и систематические исследования ССЛ различных видов и сортов растений ЛФС выявили существенные изменения яркости и характера свечения растительных биоструктур в зависимости от времени года. Установлено, что максимум интенсивности ССЛ различных растений приходится на весенне-летний период, а минимум — на осенне-зимний. Кроме того, обнаружено заметное изменение ССЛ в течение суток. Для одного и того же вида растения значительная интенсивность люминесценции приходится на временной промежуток с 0 до 6 часов утра, а ее спад — от 16 до 18 часов, что согласуется с данными авторов [12]. Поэтому описанные в настоящей работе эксперименты проводились в марте–апреле 2010 г. в период с 1 до 6 часов. Из сказанного также следует, что полученные в указанный период результаты настоящей работы могут кардинально отличаться от получаемых для тех же видов и сортов растений в другое время года и даже суток. Поэтому названная закономерность должна учитываться при проведении исследований по фотографической регистрации ССЛ.

### Литература

1. *Веселовский В. А., Веселова Т. В.* Люминесценция растений: Теоретические и практические аспекты. М.: Наука, 1990. 200 с.
2. *Бойченко А. П.* Об использовании цветных обращаемых фотоэнонок для регистрации сверхслабой биолюминесценции // Журн. научной и прикладной фотографии. 2001. Т. 46. № 6. С. 48–50.
3. *Бойченко А. П., Козлов А. С.* О биоплазменной природе сверхслабой люминесценции корешков лука // Экология и здоровье человека. Экологическое образование. Математические модели и информационные технологии: Докл. VI Междунар. конфер. Краснодар: КубГАУ, 2001. С. 247.
4. *Бойченко А. П.* О динамике спектра сверхслабой биолюминесценции // Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине: Сб. тез. IV Международного Конгресса. СПб.: Нива, 2006. С. 84.
5. *Бойченко А. П.* Фотографическая регистрация плазменных явлений в биообъектах // Технологии живых систем. 2008. Т. 5. № 1. С. 72–75.
6. *Чехов В. И.* Экологические аспекты передачи электроэнергии. М.: МЭИ, 1991. 44 с.
7. *Погосян С. И., Аверьянов А. А., Мерзляк М. Н., Веселовский В. А.* Внеклеточная хемилюминесценция корней растений // ДАН СССР. 1978. Т. 239. С. 974–976.
8. *Опритов В. А., Пятыгин С. С., Ретивин В. Г.* Биоэлектрогенез у высших растений. М.: Наука, 1990. 216 с.
9. *Горшкова Т. А.* Растительная клеточная стенка как динамическая система. М.: Наука, 2007. 429 с.
10. *Гунар И. И., Синюхин А. М.* Распространяющаяся волна возбуждения у высших растений // ДАН СССР. 1962. Т. 142. С. 954–956.
11. *Еремеев В. Ф.* Анализ механизма деградационного митогенетического излучения // Бюлл. эксперимент. биологии и медицины. 1958. № 6. С. 95–100.
12. *Инюшин В. М., Ильясов Г. У., Непомнящих И. А.* Биоэнергетические структуры — теория и практика. Алма-Ата: Казахстан, 1992. 208 с.

Ключевые слова: спонтанная сверхслабая люминесценция, люминесцентно-фотографический способ, низкочастотное электрополевое воздействие.