Ф И З И К А

УДК 615.849.19

ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ И ИХ ГАЗОРАЗРЯДНО-ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ[1]

***Бойченко А. П.*[2], *Яковенко Н. А.*[3]**

PLASMA PROCESSES IN VEGETATIVE ECOLOGICAL SYSTEMS AND THEIR GAS-DISCHARGE PHOTOGRAPHIC MONITORING

Boichenko A. P., Yakovenko N. A.

The known methods of studying physics of plasma of condensed media are used to prove by experiments the existence of a plasma-similar state (PSS) of a biological matter by example of objects of vegetative origin and their systems. One of the basic properties of the local action of a low-frequency electromagnetic field (LF EMF) on "bioplasma" (BP) of plants is identified, namely the property to change its structural organization from a collection of free electrically charged particles, thus creating conditions for various vibrations and waves propagation in BP. The perspectiveness of using gas-discharge photography (GDP) for monitoring collective (plasma) processes of vegetative ecological systems functioning under the conditions of the LF EMF action is demonstrated. The GDP is used to establish that the processes of plants and their systems in BP are responsible for the quickly proceeding phase of their functioning.

Введение

Воздействие электромагнитных полей (ЭМП) и излучений техногенного происхождения на различные биологические объекты (БО) представляет в настоящее время серьезную экологическую проблему. Особенно актуальной она стала после обнаружения в 60-х годах XX в нетепловых эффектов этого воздействия на живой организм, приводящего в ряде случаев к летальному исходу [1]. В XXI в проблема приобрела еще бóльшую актуальность в связи с возрастающим с каждым годом уровнем мощности техногенного «радиофона», уже давно превысившего естественный [1, 2]. Кроме того, была установлена большая уязвимость для электромагнитного воздействия (ЭМВ) БО в зависимости от их положения и состояния в экологических системах. Наиболее уязвимыми оказываются растительные объекты, так как они жестко связаны со средой обитания и в отличие от БО животного происхождения не способны к свободному перемещению, т. е. лишены возможности покинуть зону неблагоприятного воздействия. Поэтому техногенную нагрузку первыми получают растительные экосистемы (РЭС). Максимум интенсивности такой нагрузки, особенно в последнее время, приходится на низкочастотную (НЧ) область ЭМВ в 50–60 Гц, т. е. на частоту промышленно вырабатываемой в мире электроэнергии. Перечисленные факторы делают изучение НЧ ЭМВ на РЭС важнейшей задачей экологии.

Несмотря на накопленный в настоящее время обширный экспериментальный и теоретический материал по ЭМВ на РЭС, объяснение его процессов и механизмов до сих пор не имеет единых основ. Так, например, открытым пока остается вопрос о реакции целого организма и их сообществ на локальное ЭМВ, особенно в НЧ области, или известная «проблема kT» [1, 2]. Перечисленные проблемы требуют для своего решения но-

[1]Работа выполнена при поддержке РФФИ и Администрации Краснодарского края р2006_юг (06-02-96640).

[2]Бойченко Александр Павлович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедрой оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: bojchenco@yandex.ru

[3]Яковенко Николай Андреевич, д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой оптоэлектроники Кубанского государственного университета.

вых подходов. К таковым можно отнести работы, в которых при условиях ЭМВ рассматриваются коллективные (плазменные) модели процессов взаимодействия электрически заряженных частиц растворов электролитов, являющихся основным веществом БО включая растения. Так в [3] для объяснения «эффекта Новикова – Жадина» предлагается модель диссипативной структуры, возникающей в ионном растворе аминокислот под действием слабых электрических и магнитных полей. Модель базируется на утверждении, что в результате комбинированного действия полей в растворе образуются диссипативные структуры, состоящие из кластера ионов, тороидального гидродинамического вихря и диффузионной «шубы» ионов противоположного знака электрического заряда, обеспечивающих электронейтральность диссипативной структуры в целом [3]. Такой подход вполне оправдан и справедлив для жидких гомогенных сред с ионной проводимостью, к которым относятся растворы электролитов. В случае БО ситуация принципиально иная. Живые организмы являются гетерогенными дисперсными системами, дисперсность которым придают клетки благодаря большим различиям геометрических и физико-химических свойств их мембран, внутри- и межклеточной сред с ионной проводимостью. В таких системах электролит подобен твердому ионному проводнику [4], по механизму электропроводности схожему с полимерными ионообменниками в набухшем состоянии [5]. Поэтому в [6] была теоретически рассмотрена возможность существования в БО как дисперсной системе четвертого, плазмоподобного состояния (ППС) вещества из коллекции электрически заряженных частиц, сокращенно названного биоплазмой (БП) [7], и позволяющего ответить на ряд проблемных вопросов, в частности, по реакции РЭС на локальное НЧ ЭМВ. Показано, что реализация ППС возможна только для внутри- и межклеточной сред растений, тогда как сами клетки образуют их очень прочную «кристаллическую решетку». Настоящая статья посвящена экспериментальной проверке существования БП в растительных объектах и их системах и возможности привлечения газоразрядной фотографии (ГРФ) [8] для мониторинга плазменных процессов функционирования РЭС в условиях НЧ ЭМВ.

1. Усиление НЧ колебаний в БП растений и их системах

Одно из основных свойств плазменной среды — возбуждение и распространение в ней различных колебаний и волн. Это свойство позволило в свое время экспериментально доказать существование ППС в конденсированных средах, таких как металлы и полупроводники [9–11]. По концентрации электрически заряженных частиц n, растительные БО близки к легированным полупроводникам ($n \sim 10^{24}$–10^{26} м$^{-3}$) [6], что дает основание экспериментально выявить ППС в растениях и их системах. В основу постановки эксперимента положены принципы, использованные в [9–11] при регистрации различных волновых явлений и процессов в плазме металлов и полупроводников (геликонные волны, осциллисторный эффект и пр.). От описанных в [9–11] проведенный эксперимент отличает тот факт, что в настоящих исследованиях использовали целое растение, а действие на него оказывали переменным ЭМП напряженностью $H_1 \sim 177$ Э и частотой $f = 50$ Гц только на ограниченную часть листа диаметром 5 мм. Выбор величины f моделировал условия техногенного ЭМВ на РЭС. Одновременно на это поле накладывали одиночный импульс ЭМП с $H_2 \sim 4,2$ кЭ и длительностью $\tau = 0,12$ с, а результат регистрировали в растении на расстоянии $l = 15$–20 см от места воздействия стандартным методом отведения биоэлектрических потенциалов (БЭП) [12]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Здесь 1 — лист верхнего яруса исследуемого растения, помещенного между наконечниками электромагнита 2, создающего в образованном ими зазоре 5 мм вышеуказанные для двух режимов напряженности ЭМП. Наконечники снабжены поролоновыми прокладками с целью предотвращения повреждения листьев. Корни растения (предварительно освобожденные и отмытые от почвы) находились в стакане с 0,1 % раствором KCl 3, где размещали референтный хлорсеребряный электрод (ЭВЛ-1М1) сравнения 4. Такой же отводящий (индифферентный) электрод 5 с ватным тампоном, смоченным раствором KCl той же концентрации [12], располагали на стебле от места воздействия на указанном расстоянии l. Использованный раствор KCl моделировал ионопроводящие свойства почвы [13]. Электроды подключали к многоканальному быстродействующему самописцу 6 (Н3031), позволяющему одновремен-

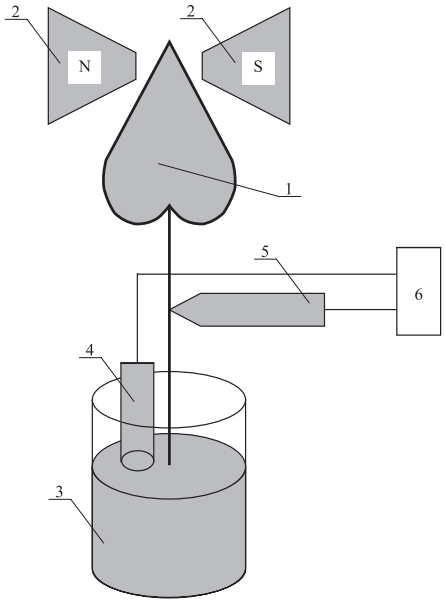


Рис. 1. Схема установки для регистрации электромагнитных колебаний в БП растений

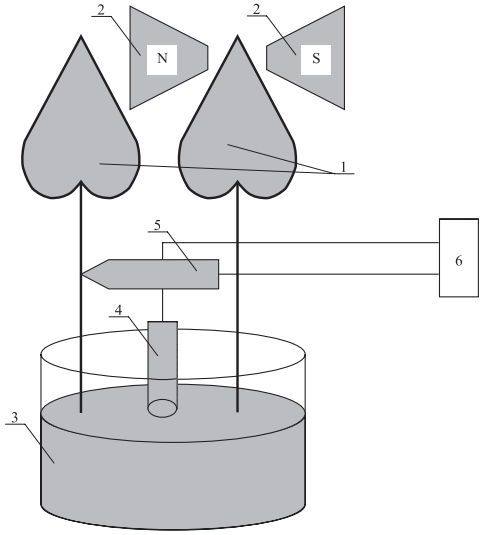


Рис. 2. Схема установки для регистрации электромагнитных колебаний в БП растительных систем

но записывать форму сигналов ЭМВ и БЭП амплитудой от 5 мкВ (с дополнительным усилителем) и частотой до 125 Гц. Объектами исследования служили 20-дневные проростки подсолнечника сорта «Мастер», сои «Валентина» и пшеницы сортов «Краснодарская-99» и «Батько». Описанные в настоящем параграфе эксперименты проводили в десяти повторностях на десяти растениях каждого вида.

У перечисленных видов растений была зафиксирована типичная для них квазистационарная разность БЭП в диапазоне от ∼10 до 45 мВ. На уровне этих значений БЭП переменное ЭМП частотой 50 Гц индуцировало в растениях переменную разность БЭП величиной амплитуды A от ∼0,2 до 0,5 мВ той же частоты. В момент наложения одиночного импульса ЭМП напряженностью ∼4,2 кЭ в исследуемых растениях, с задержкой t_z порядка $\sim 10^{-3}$ с от его переднего фронта, наблюдали усиление амплитуды $A_{\max}$ НЧ колебаний в 2 и более раз, а также — увеличение времени их затухания t по сравнению с τ на два порядка.

Для регистрации описанного явления в растительных системах эксперимент видоизменяли. В нем использовали по два растения одного вида. В составленной системе ЭМВ подвергали первое растение, а у второго — регистрировали отводимые БЭП. Схема экспериментальной установки показана на рис. 2 (обозначения на нем соответствуют обозначениям рис. 1). Явление усиления НЧ колебаний отражает график рис. 3 на примере системы из двух 20-дневных проростков пшеницы «Батько» (верхняя диаграмма — форма импульса ЭМП высокой напряженности, нижняя — БЭП). Из рисунка видно, что наблюдаемое явление имеет аналогию с геликонными волнами [10]. В сравнительной табл. 1 сведены результаты проведенных экспериментов для каждого вида растения и их систем. По измеренным значениям параметров были рассчитаны скорости затухания усиленных колебаний $\frac{A_{\max}}{t}$ и их распространения $\frac{l}{t_z}$ в растениях.

Очень важным результатом является наблюдение описанного явления в растительных системах. Прежде всего, это указывает на их «электромагнитную целостность» и на коллективно-согласованный характер взаимодействия растений друг с другом. Подкрепляют эту мысль данные скоростей затухания и распространения колебаний, говоря о большой «добротности» резонансно-колебательных структур растений и растительных систем, их малом волновом сопротивлении. Следует отметить, что величины скоростей $\frac{l}{t_z}$ в отдельных растениях и их системах оказываются на порядок (и более) выше скорости распространения потенциалов действия в нервных клетках у млекопитающих и на четыре — у растений, включая и исследованные [12]. Данный факт указывает на недиффузионный механизм наблюдаемого явления

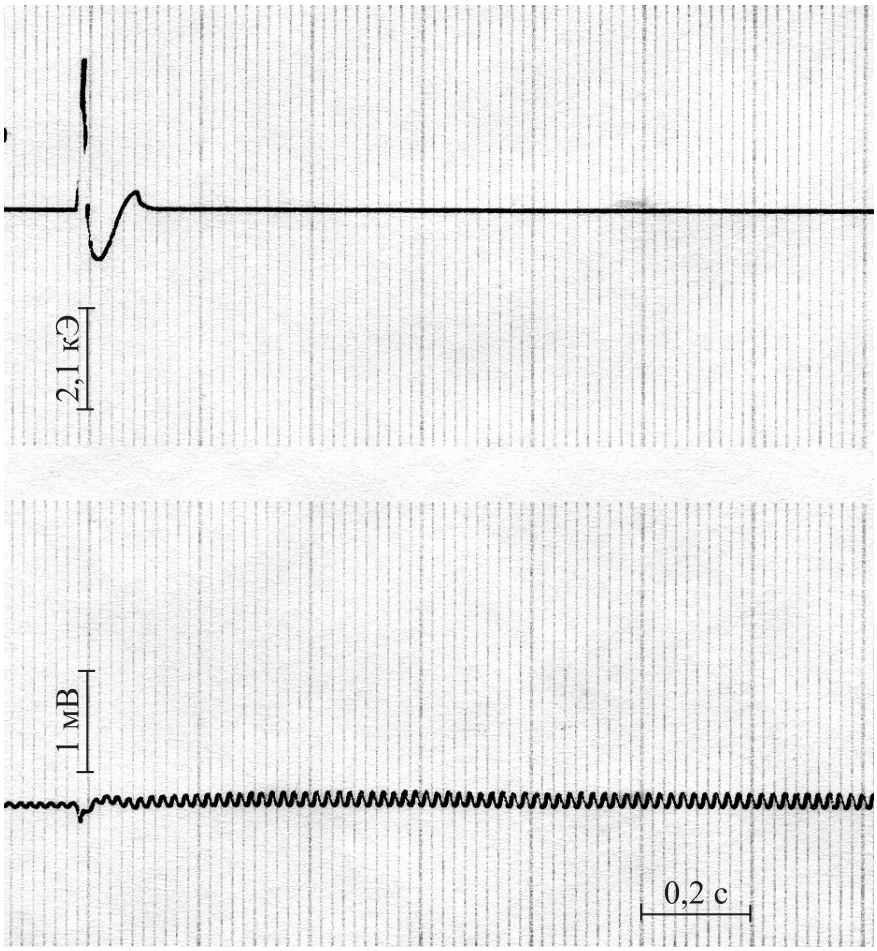


Рис. 3. График изменения во времени амплитуды НЧ колебаний БЭП в системе из двух 20-дневных проростков пшеницы «Батько» при ЭМВ на нее полями низкой и высокой напряженности

Таблица 1. Параметры НЧ колебаний БЭП у растений и их систем, усиленных действием одиночного импульса ЭМП напряженностью 4,2 кЭ и длительностью 0,12 с: 1 — одно растение, 2 — система из двух растений

Параметр	Соя «Валентина»		Подсолнечник «Мастер»		Пшеница			
					«Краснодарская-99»		«Батько»	
	1	2	1	2	1	2	1	2
A, мВ	0,48±0,03	0,39±0,01	0,42±0,02	0,35±0,02	0,30±0,02	0,24±0,01	0,21±0,01	0,10±0,01
$A_{\max}$, мВ	3,12±0,04	1,26±0,02	2,73±0,04	1,35±0,02	1,32±0,02	1,00±0,01	0,58±0,01	0,19±0,01
$t_z \cdot 10^{-3}$, с	6,34±0,09	9,83±0,14	4,75±0,07	7,95±0,12	20,02±0,30	24,02±0,36	9,82±0,14	12,02±0,18
t, с	5,00±0,10	1,80±0,02	11,90±0,24	5,10±0,04	5,00±0,10	1,27±0,01	4,75±0,02	1,35±0,01
l, м	0,20±0,02	0,20±0,02	0,20±0,02	0,20±0,02	0,15±0,01	0,15±0,01	0,15±0,01	0,15±0,01
$\frac{A_{\max}}{A}$	6,50	3,23	6,50	3,85	4,40	4,16	2,76	1,92
$\frac{t}{\tau}$	41,66	15,00	99,17	42,50	41,66	10,58	39,58	15,33
$\frac{A_{\max}}{t}$, мВ/с	0,62	0,70	0,23	0,26	0,26	0,78	0,12	0,14
$\frac{l}{t_z}$, м/с	31,54	20,34	42,10	25,15	7,49	6,24	15,27	12,47

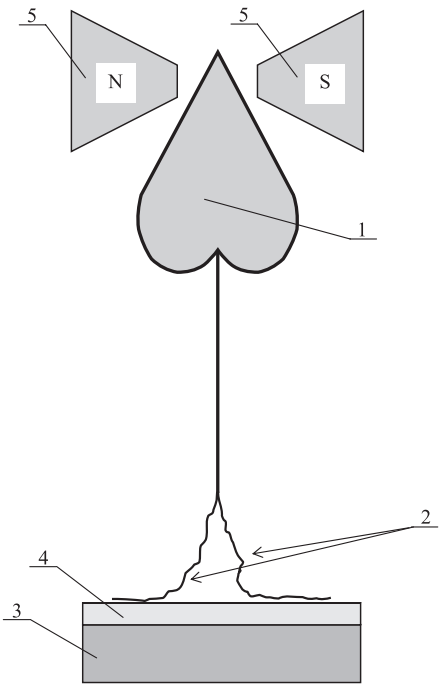


Рис. 4. Схема установки для фотографической регистрации изображений ССБЛ корневой системы растений

и отражает дальнодействующий характер кулоновского потенциала, создаваемого свободными электрически заряженными частицами растительной материи.

2. Квантово-оптические явления БП растений

Кроме волновых свойств плазменная среда обладает ярко выраженными квантово-оптическими, что проявляется в различных видах ее люминесценции. Так, для газоразрядной плазмы, излучение света является основным признаком ее существования и средством получения информации о концентрации, свойствах и состоянии слагающих частиц. В случае ППС конденсированных сред к люминесценции приводит рекомбинация их неравновесных носителей электрического заряда, например, дырок и электронов в полупроводниках. В период с 1954 по 1961 гг. было обнаружено явление спонтанного эндогенного свечения у растений и млекопитающих, получившее название сверхслабой биолюминесценции (ССБЛ) [14]. Единственным средством ее регистрации до недавнего времени оставался фотоэлектронный умножитель, что не позволяло визуализировать структуру ССБЛ. В 2001 г. одним из авторов статьи был предложен новый метод ее регистрации — фотографический [15]. Метод основан на накоплении квантов света фотоэмульсионными микрокристаллами галоидного серебра. С его помощью на примере корешков лука была впервые доказана плазменная природа ССБЛ по выделяющимся из них и распадающимся в пространстве плазменным образованиям — плазмоидам [16]. Поэтому в рамках рассматриваемых вопросов представляется важным выявить реакцию БП растений на НЧ ЭМВ через их биолюминесценцию.

Схема экспериментальной установки для регистрации изображений ССБЛ растений в условиях НЧ ЭМВ представлена на рис. 4. Здесь 1 — лист верхнего яруса растения с корневой системой 2; 3 — подложка фотопленки с фоточувствительным эмульсионным слоем 4; 5 — наконечники электромагнита. В качестве регистрирующего материала использовали черно-белую галогенсеребряную фотопленку «Academy-200», а время ее экспозиции ССБЛ от корешков растений составляло 5 мин. Химико-фотографическую обработку фотопленки вели по стандартной технологии.

Выбор корневой системы в качестве излучателя определяли исходя из того факта, что в природных условиях эта часть высших растений лишена какого-либо светового воздействия, поэтому их излучение не может являться вынужденным от внешнего источника, на-

Таблица 2. Параметры изображений ССБЛ корешков растений в условиях НЧ ЭМВ

Параметр	D	N	D	N	D	N
	$H=0$		H_1		H_1+H_2	
Соя «Валентина»	0,322±0,004	7±1	0,287±0,003	13±2	0,304±0,004	17±1
Подсолнечник «Мастер»	0,352±0,005	11±2	0,321±0,003	17±2	0,336±0,003	23±3
Пшеница «Краснодарская-99»	0,214±0,003	4±1	0,195±0,002	6±1	0,226±0,002	10±2
Пшеница «Батько»	0,205±0,003	4±1	0,177±0,002	8±2	0,182±0,001	11±1

пример, от солнечного света. Данный факт позволяет непосредственно выявить локальное НЧ ЭМВ на растение и его передачу на весь организм посредством БП.

В эксперименте использовали те же виды растений, что и в предыдущем, а каждое растение — только один раз. Всего исследовали по 10 растений каждого вида для одного варианта эксперимента. Перед фотографической регистрацией ССБЛ корни растений освобождали и отмывали дистиллированной водой от грунта в темноте. После чего излишки воды с них удаляли фильтровальной бумагой, а растение сразу помещали в экспериментальную установку. Эксперимент проводили в трех вариантах. В первом фотопленку экспонировали ССБЛ корешков растений, не подвергавшихся ЭМВ (контроль), во втором варианте на растения непрерывно действовали (в течение времени экспозиции фотопленки) ЭМП с H_1 и частотой 50 Гц, а в третьем — действие оказывали комбинацией ЭМП с H_1 и H_2. В последнем случае за время экспозиции фотопленки на листья растений подавали по 10 импульсов ЭМП с H_2 и периодом повторения между ними в $\sim$30 с.

Изображения ССБЛ корешков были получены у всех исследованных растений и имели вид идентичный ранее опубликованным изображениям ССБЛ корешков лука [15, 16], отличаясь от них лишь контрастностью и фрагментами структуры. Количественную оценку изображений производили по их интегральной оптической плотности D (пропорциональную яркости свечения ССБЛ) и числу различающихся между собой структурных элементов N. Измерение первого параметра проводили на денситометре с погрешностью не более 0,5 %, а второго — с помощью оптического микроскопа при увеличении изображений в 50 раз. В табл. 2 представлены значения названных параметров. Из нее видно, что по отношению к контрольному варианту НЧ ЭМП с H_1 уменьшает интегральную яркость ССБЛ корневой системы у всех исследованных растений в 1,5 и более раз, заметно увеличивая при этом ее структурированность. Дальнейшая перестройка структуры свечения ССБЛ наблюдается при наложении импульсов ЭМП с H_2 при незначительном увеличении ее интегральной яркости. Как видно из табл. 2, наиболее структурированной оказывается ССБЛ корневой системы подсолнечника. Регистрируемые изменения яркостных и структурных параметров ССБЛ корней растений под НЧ ЭМВ на их листья доказывает существование процесса передачи электромагнитного сигнала через все тело растения и способности его частей согласованно функционировать при взаимодействии с окружающей электромагнитной средой посредством БП.

Результатом воздействия ЭМП на плазменную среду является образование в ней различных, чаще всего, винтовых структур [11]. Резкие изменения именно этого показателя в изображениях ССБЛ однозначно указывает на реакцию ППС вещества растительного организма на локальное НЧ ЭМВ. В этом же, вероятно, проявляется одно из основных свойств ЭМП — влиять на структурную организацию электрически заряженной компоненты БО.

3. Газоразрядно-фотографический мониторинг РЭС

Использование качественно различных по физической сущности методов в изучении растений и их сообществ, электрофизиологического и люминесцентного, приводит к одному выводу: в организме растений и связывающей их среды с ионной проводимостью (раствор электролита, почва, питательные среды и пр.) существует система из согласованно взаимодействующей коллекции электрически заряженных частиц, что и присуще плазме. По нашим оценкам, в организме высших растений как целостных системах коллективная реакция этих частиц (ионов Na^+, K^+, Ca^{2+} и Cl^-)

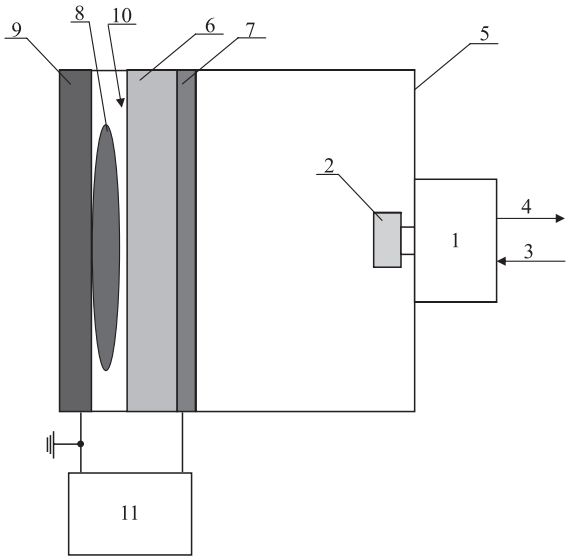


Рис. 5. Схема устройства ЦГРФ для получения лавинных ГРИ листьев различных растений

на внешнее ЭМВ может проявляться во внеклеточной среде до частоты ∼850 МГц, а во внутриклеточной — до ∼4 ГГц. При этом создаваемая частицами (ионами) плазма является неидеальной и невырожденной [17], чем схожа с холодной неравновесной плазмой барьерного газового разряда (БГР), на котором основана ГРФ [8]. Перспективность использования этого вида фотографии для диагностики БП была математически обоснована в наших работах [6, 8]. Поэтому представляется важным экспериментально проверить теоретические выводы.

Исследования проводили на 20-дневных проростках сои «Валентина», выращенных в искусственно созданных условиях НЧ ЭМВ от высоковольтных линий электропередач (ВЛЭП), и на деревьях березы повислой (Betula pendula Roth.), естественно произрастающих вблизи этих линий. По данным [18] ВЛЭП создают переменное ЭМП частотой 50 Гц и напряженностью от ∼0,20 до 1,73 Э. Результат ЭМВ на РЭС оценивали по лавинным газоразрядным изображениям (ГРИ) листьев названных БО. Для получения ГРИ было разработано специальное оптоэлектронное устройство, позволяющее без отрыва листьев от материнского растения вводить изображения непосредственно в компьютер, а затем с помощью специально разработанной программы «GDF-Ecology» математически обрабатывать и анализировать их. Устройство получило название «цифровой газоразрядный фотоаппарат» (ЦГРФ). Его схема представлена на рис. 5. Здесь 1 — черно-белая видеокамера чувствительностью до $\sim 10^{-4}$ лк с объективом 2 из «просветленной оптики», каналом электрического питания 3 и выходным видеоканалом 4; 5 — газоразрядная камера, состоящая из оптического стекла 6 с токопроводящим покрытием (из SnO_2) 7; 8 — лист исследуемого растения, прижимаемый заземленным металлическим (или таким же вторым стеклянным) электродом 9, который с листом образует газоразрядный промежуток 10 между его поверхностью и стеклом; 11 — высоковольтный импульсный генератор.

В основу алгоритма работы программы «GDF-Ecology» положена методика оценки флуктуирующей асимметрии листьев, заключающаяся в измерении различия между их левой и правой половинками [19]. Благодаря большой корреляции асимметрии листьев со степенью нарушения экологической обстановки, методика хорошо зарекомендовала себя при определении общего уровня антропогенного воздействия. В данной методике выбрано пять геометрических параметров (признаков): ширина половинки листа; длина второй жилки; расстояние между основаниями первой и второй жилками; расстояние между концами этих жилок; угол между главной жилкой и второй от основания жилкой [19]. Опираясь на физические закономерности формирования лавинных ГРИ различных БО [8], перечисленные геометрические параметры были дополнены еще тремя газоразрядными: интегральными яркостями свечения БГР на второй жилке и между концами первой и второй жилками, а также интегральной яркостью свечения

разряда на верхних и нижних сторонах листовых пластинок. По полученным значениям промеров X для правой и левой (верхней и нижней) половинок листьев, программа оценивает коэффициент асимметричности Y по каждому параметру как отношение разности к сумме промеров листа слева и справа (для интегральной яркости всего листа — сверху и снизу). Таким образом, каждый лист растения обрабатывается по восьми газоразрядно-геометрическим параметрам с шестнадцатью значениями X по формуле:

$$Y = \frac{X_{\text{л(в)}} - X_{\text{п(н)}}}{X_{\text{л(в)}} + X_{\text{п(н)}}},$$

где $X_{\text{л}}$, $X_{\text{п}}$, $X_{\text{в}}$ и $X_{\text{н}}$ — значения промеров с левой, правой, верхней и нижней сторон листа, соответственно. По полученным значениям Y программа находит отдельно для геометрических и газоразрядных параметров значения среднего относительного различия между сторонами на признак для каждого листа. Далее вычисляется среднее относительное различие на признак для всей выборки X. Полученные показатели характеризуют степень асимметричности организма по геометрическим $\bar{Y}_G$ и газоразрядным $\bar{Y}_{GDF}$ параметрам. Для показателя $\bar{Y}_G$ листьев березы разработана пятибалльная шкала отклонения от нормы [19], в которой 1 балл соответствует условной норме со значениями $\bar{Y}_G$ до 0,055, а 5 баллов — критическому состоянию при $\bar{Y}_G$ более 0,07. Отметим, что полученные с помощью ЦГРФ ГРИ верхних и нижних сторон листьев сои и березы показали их существенные различия, которые не наблюдаются визуально или с помощью известных оптических методов. ГРИ сторон листьев названных БО представлены на рис. 6а–6г. По рисунку видно, что изображения верхних частей листовых пластинок формируются преимущественно из отдельных шаровидных элементов различных размеров и яркости (особенно хорошо это проявилось на листьях сои), а на нижних — четко выявляется жилкование листьев благодаря слиянию электронных лавин БГР. Описанная картина говорит о различных режимах горения разряда по всей поверхности листьев. Поэтому оценка параметра $\bar{Y}_G$ проводилась программой по ГРИ их нижней части.

Семена сои проращивали по методике [20] в ящиках размером 0,5×1,5 м в грунте «Универсальный», производимого ЗАО «МНПП “ФАРТ”» на основе смеси торфов различной степени разложения с добавлением органических субстратов, неорганических макро- и микроэлементов. Всего в ящике было высажено 100 семян (20 рядов по 5 семян в каждом ряду). Опыты проводили в марте 2006 г. Переменное ЭМП создавали кольцами Гельмгольца (КГ), в центре которых напряженность поля составляла ∼1,5 Э. КГ с ЭМП охватывали как побеги растений, так и их корневую систему, что дополнительно моделировало условия ЭМВ от подземных ВЛЭП. В опытах поле включали в день посева и выключали по достижении ростками 20-дневного возраста. Аналогично выращивали семена контрольного варианта, но без КГ. В этом случае растения росли и развивались в естественном магнитном поле Земли (∼0,4 Э). Из 100 высаженных семян в каждом варианте, контрольных взошло 85, а подвергшихся НЧ ЭМВ — 92. Для контрольного и опытного вариантов было сфотографировано по 255 листьев 85 растений (по три листа у каждого растения). Схема организации описанного эксперимента представлена на рис. 7.

Контрольным вариантом для березы служили листья деревьев, произрастающих в лесной зоне Краснодарского края без каких-либо элементов антропогенного воздействия (дороги, строения, ВЛЭП и пр.). Деревья опытного варианта выбирали в аналогичных условиях, но в зонах пролегания только ВЛЭП, что позволяло исключить влияние на результаты оценок газоразрядно–геометрических параметров других антропогенных факторов. ГРФ листьев проводили в конце августа 2006 г., что соответствует завершению их интенсивного роста и формирования [19]. В целом было исследовано по 40 деревьев для каждого варианта, а для каждого дерева получено по 100 ГРИ листьев (всего 8000 снимков). Математическую обработку данных измерений для всех исследованных видов БО проводили с помощью той же программы по принятым в биометрии методам [21]. Результаты оценок $\bar{Y}_G$ и $\bar{Y}_{GDF}$ представлены в табл. 3 (в скобках для них приведены значения коэффициента вариации, выраженного в %) со шкалой коэффициента асимметричности для листьев березы повислой. По данным видны достоверные различия между контрольным и опытным вариантами для $\bar{Y}_G$ и $\bar{Y}_{GDF}$ исследованных видов растительных БО.

Сравнение значений $\bar{Y}_G$ для березы со шкалой показывает, что ее произрастание вблизи ВЛЭП увеличивает асимметрию листьев до

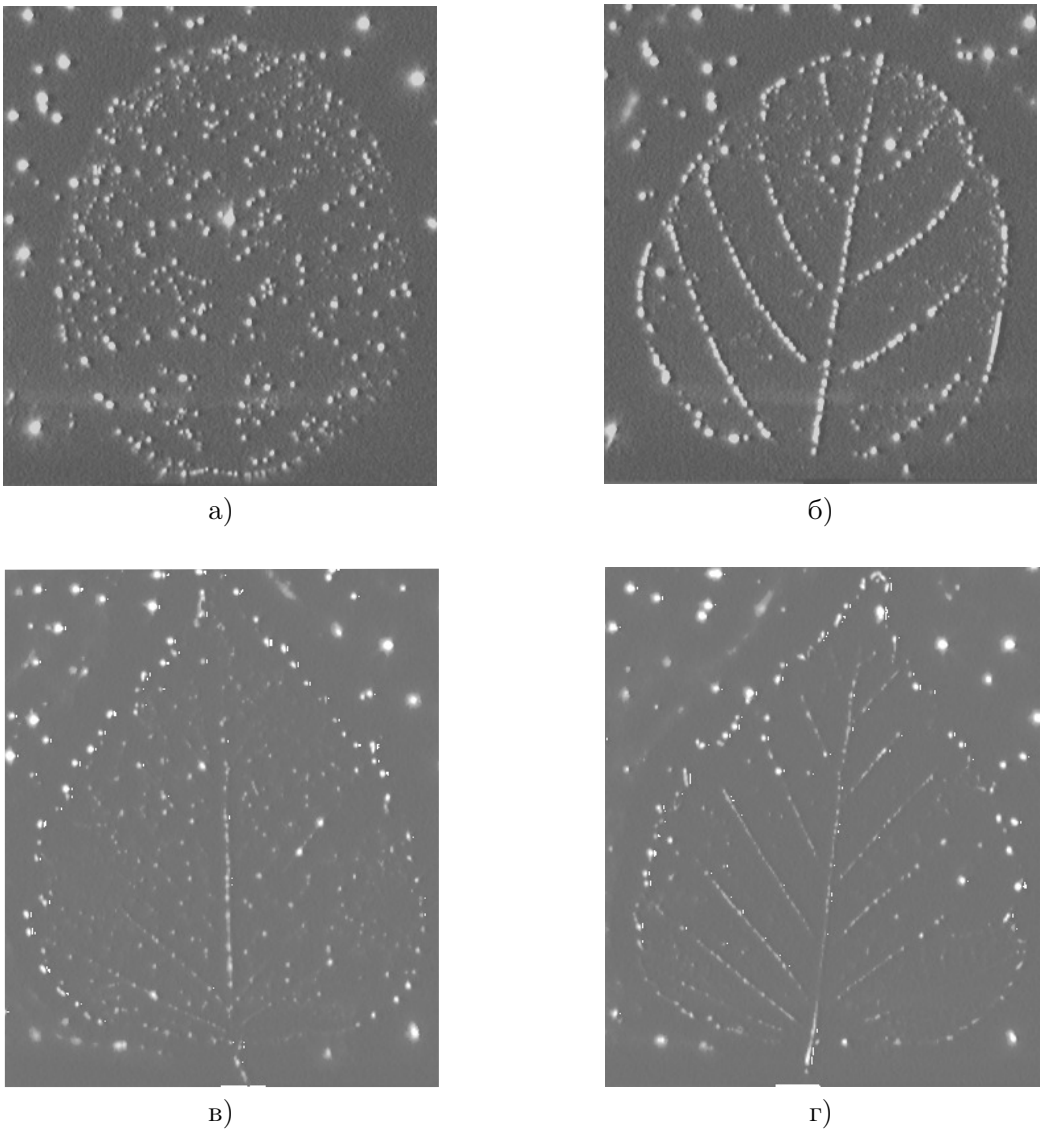


Рис. 6. Газоразрядные изображения листьев сои «Валентина» (*а*, *б*) и березы повислой (*в*, *г*): *а*, *в* — верхняя сторона листовых пластинок; *б*, *г* — нижняя сторона листовых пластинок

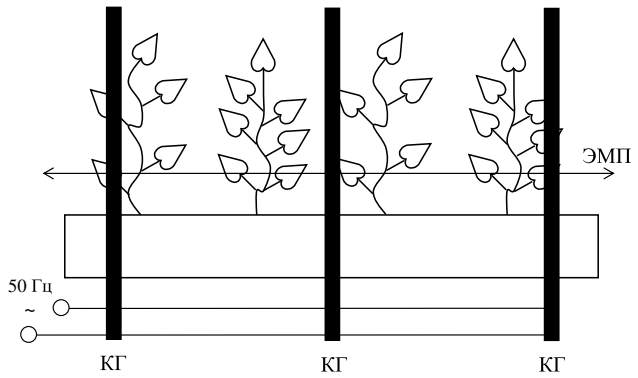


Рис. 7. Схема установки (вид сбоку) с применением КГ для выращивания растений в переменном ЭМП частотой 50 Гц и напряженностью ∼1,5 Э (стрелкой показано направление поля)

Таблица 3. Результаты ГРФ мониторинга РЭС в условиях НЧ ЭМВ

Вариант опыта	$\bar{Y}_G$	$\bar{Y}_{GDF}$
Соя «Валентина»		
Контроль	0,063±0,001 (0,81%)	0,134±0,001 (0,38%)
НЧ ЭМВ	0,109±0,002 (0,93%)	0,108±0,001 (0,47%)
Береза повислая		
Контроль	0,025±0,002 (4,00%)	0,022±0,002 (4,63%)
НЧ ЭМВ	0,060±0,005 (4,25%)	0,042±0,004 (4,86%)
Шкала отклонения от нормы коэффициента асимметричности $\bar{Y}_G$ для листьев березы повислой [19]		
Балл	Значение коэффициента асимметричности $\bar{Y}_G$	
1	до 0,055	
2	0,055–0,060	
3	0,060–0,065	
4	0,065–0,070	
5	более 0,070	

3 баллов, говоря об экологически нарушенной обстановке. Та же тенденция наблюдается и для газоразрядного параметра ее листьев $\bar{Y}_{GDF}$. Несколько иная закономерность прослеживается для листьев сои. В условиях НЧ ЭМВ их геометрическая асимметрия увеличивается, а газоразрядная — уменьшается. Различие в закономерностях изменения $\bar{Y}_G$ и $\bar{Y}_{GDF}$ для различных растительных БО указывает на отсутствие между параметрами прямой взаимосвязи. Об этом также говорят равные значения $\bar{Y}_G$ и $\bar{Y}_{GDF}$ для сои в опытном варианте и контрольном для березы, из чего следует, что каждый из параметров несет различную информацию о БО и, вероятно, имеет прямую зависимость от условий окружающей среды, в частности, от ее электромагнитной обстановки. Действительно, геометрический параметр $\bar{Y}_G$ отражает конечный результат длительного процесса роста и развития листьев БО при различных факторах окружающей среды. Поэтому его оценка для одних и тех же физиологически сформировавшихся листьев при одинаковых условиях ГРФ с малым временем экспозиции должна давать неизменный результат. Газоразрядный же параметр $\bar{Y}_{GDF}$ непосредственно связан с электромагнитной компонентой БО, т. е., с их свободными электрически заряженными частицами, образующими БП [6]. Поэтому он должен быть в большей степени подвержен изменениям внешней среды, включая ЭМВ.

С целью проверки высказанных предположений проводили эксперимент на 20-дневных проростках сои того же сорта не подвергавшихся НЧ ЭМВ. Растения выращивали в отдельных пластиковых стаканах. Из 100 высаженных семян взошло 89 растений, у которых до ЭМВ было сфотографировано по одному листу (всего получено 89 ГРИ листьев). Эти ГРИ листьев являлись контролем. Как и ранее, их фотографировали без отрыва от стеблей. Для оценки влияния времени НЧ ЭМВ на параметры $\bar{Y}_G$ и $\bar{Y}_{GDF}$, стаканы с растениями последовательно помещали в центр КГ и включали ЭМП ($f = 50$ Гц и $H \sim 1{,}5$ Э) на 30 с. В течение этого времени проводили ГРФ тех же листьев 89 растений с газоразрядной экспозицией в 0,1 с и интервалом от момента включения поля в 1, 3, 5, 10, 20 и 30 с. Полученные ГРИ обрабатывали описанным выше способом с помощью программы «GDF-Ecology». Результат оценки изменения параметров $\bar{Y}_G$ и $\bar{Y}_{GDF}$ листьев от времени НЧ ЭМВ представлен в табл. 4. Приведенные данные демонстрируют неизменность геометрического параметра $\bar{Y}_G$ за 30 с времени НЧ ЭМВ и сильную зависимость от него газоразрядного параметра $\bar{Y}_{GDF}$. Последний существенно меняется уже на третей секунде ЭМВ и стабилизируется к десятой, принимая меньшее значение асимметричности по сравнению с контролем. Полученные результаты указывают на отсутствие прямой связи между параметрами $\bar{Y}_G$ и $\bar{Y}_{GDF}$, подтверждая высказанные предположения.

Большая разница в изменении во времени геометрического и газоразрядного параметров позволяет заключить, что первый отражает информацию о медленно протекающих процессах функционирования РЭС, выражающихся в длительном физиологическом раз-

Таблица 4. Результаты оценки изменения параметров $\bar{Y}_G$ и $\bar{Y}_{GDF}$ листьев сои «Валентина» от времени НЧ ЭМВ

Вариант опыта	Время НЧ ЭМВ, с	$\bar{Y}_G$	$\bar{Y}_{GDF}$
Контроль	0	0,064±0,002	0,137±0,002
НЧ ЭМВ	1	0,064±0,002	0,132±0,001
НЧ ЭМВ	3	0,063±0,001	0,124±0,002
НЧ ЭМВ	5	0,063±0,002	0,114±0,001
НЧ ЭМВ	10	0,064±0,002	0,110±0,002
НЧ ЭМВ	20	0,064±0,002	0,109±0,002
НЧ ЭМВ	30	0,063±0,001	0,109±0,002

витии и формировании листьев и всего растения в целом. Поэтому наблюдать его заметные изменения у РЭС возможно только на большом в физиологическом смысле промежутке времени. Второй параметр несет информацию о быстропротекающих процессах и отражает коллективную реакцию лабильной, электрически заряженной компоненты растений или их систем на момент регистрации. Таким образом, с помощью ГРФ возможно вести мониторинг как медленно, так и быстропротекающих процессов функционирования РЭС, в том числе и при НЧ ЭМВ.

Выводы

Обобщая результаты работы, можно сделать следующие выводы:

1. С помощью известных методов изучения физики плазмы конденсированных сред экспериментально доказано существование ППС биологической материи на примере объектов растительного происхождения и их систем, заключающееся в коллективно-согласованном характере взаимодействия электрически заряженных частиц БП друг с другом.

2. Установлено одно из основных свойств воздействия НЧ электромагнитного поля на БП растений — изменять ее структурную организацию из коллекции свободных электрически заряженных частиц, создавая условия для распространения в БП различных колебаний и волн. Особенность этого процесса — проявляться и при локальном НЧ ЭМВ.

3. Продемонстрирована перспективность использования ГРФ для мониторинга коллективных (плазменных) процессов функционирования РЭС в условиях НЧ ЭМВ. С ее помощью установлено, что процессы в БП растений и их системах ответственны за быстропротекающую фазу их функционирования.

Литература

1. *Пресман А. С.* Электромагнитные поля и живая природа. М.: Наука, 1968. 288 с.
2. *Пресман А. С.* Электромагнитные поля в живой природе. М.: Знание, 1971. 58 с.
3. *Карнаухов А. В.* Диссипативные структуры в слабых магнитных полях // Биофизика. 1994. Т. 39. Вып. 6. С. 1009–1014.
4. *Гусев Н. А.* Состояние воды в растении. М.: Наука, 1974. 130 с.
5. *Хладик Дж.* Физика электролитов. М.: Мир, 1978. 555 с.
6. *Бойченко А. П.* О плазмоподобном состоянии биологической материи / Кубанский гос. университет. Краснодар, 2006. 13 с. Деп. в ВИНИТИ 11.12.2006. № 1537–В2006.
7. *Инюшин В. М., Грищенко В. С., Воробьев Н. А. и др.* О биологической сущности эффекта Кирлиан. Концепция биологической плазмы. Алма-Ата: изд-во КазГУ, 1968. 38 с.
8. *Бойченко А. П., Шустов М. А.* Основы газоразрядной фотографии. Томск: Изд-во «STT», 2004. 316 с.
9. *Иванов Ю. Л., Рывкин С. М.* Возникновение колебаний тока в образцах германия, помещенных в электрическое и продольное магнитное поле // ЖТФ. 1958. Т. 28. № 4. С. 774–775.
10. *Bowers R., Legendy C., Rose F.* Oscillatory galvanomagnetic effect in metallic sodium // Phys. Rev. Lett. 1961. Vol. 7. № 9. P. 339–341.
11. *Владимиров В. В.* Винтовая неустойчивость в электронно-дырочной плазме полупроводников // УФН. 1975. Т. 115. Вып. 1. С. 73–99.
12. *Опритов В. А., Пятыгин С. С., Ретивин В. Г.* Биоэлектрогенез у высших растений. М.: Наука, 1991. 216 с.
13. *Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А.* Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Высш. шк., 1973. 400 с.
14. *Журавлев А. И.* Спонтанная биохемилюминесценция // Тр. моск. общ. испытат. природы. 1972. Т. 39. С. 5–8.
15. *Бойченко А. П.* Об использовании цветных обращаемых фотопленок для регистрации сверх-

слабой биолюминесценции // Журн. научн. и прикл. фотогр. 2001. Т. 46. № 6. С. 48–50.

16. *Бойченко А. П., Козлов А. С.* О биоплазменной природе сверхслабой люминесценции корешков лука // Экология и здоровье человека. Экологическое образование. Математические модели и информационные технологии: Тез. докл. VI Междунар. конф. Краснодар, 2001. С. 247.
17. *Бойченко А. П.* О невырожденности и неидеальности физической плазмы растительных биообъектов // 13 Всеросс. научной конф. студентов-физиков и молодых ученых: Матер. и тез. докл. Ростов-на-Дону – Таганрог, 2007. С. 460.
18. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / Под ред. И. А. Баумштейна, С. А. Бажанова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 768 с.
19. *Шестакова Г. А., Стрельцова А. Б., Константинова Е. Л.* Методика сбора и обработки материала для оценки стабильности развития березы повислой. Калуга: Изд-во КалужГУ, 1997. 25 с.
20. *Новицкий Ю. И., Новицкая Г. В., Кочешкова Т. К. и др.* Рост пера лука в слабом постоянном магнитном поле // Физиология растений. 2001. Т. 48. № 6. С. 821–828.
21. *Урбах В. Ю.* Биометрические методы. М.: Наука, 1964. 416 с.

Ключевые слова: биоматериалы, низкочастотное электромагнитное поле, газоразрядно-фотографический мониторинг, плазменные процессы, люминесценция

Статья поступила 25 мая 2007 г.
Кубанский государственный университет, г. Краснодар
© Бойченко А. П., Яковенко Н. А., 2008