
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

С.Н. Маслоброд

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ОРГАНИЗМА.

3. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕГУЛЯЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ОРГАНИЗМА

*Институт генетики АН РМ,
ул. Пэдурий, 20, г. Кишинев, MD-2002, Республика Молдова*

К системам электрофизиологической регуляции растительного организма, определяющим механизм пространственно-временной организации биопотенциалов объекта, относятся стационарные, медленно изменяющиеся биоэлектрические потенциалы (БЭП), а также местные и распространяющиеся потенциалы действия (ПД) и вариационные потенциалы (ВП) [1], условные обозначения см. в [2, 3].

1. Идентификация квазистационарного биоэлектрического поля объекта

Основные опыты проведены на группах семян и проростков кукурузы (гибриды ВИР42 и М291). В группе из 3-х набухающих семян коэффициент вариации (КВ) БЭП был существенно ниже контроля (КВ одиночных семян [4], рис. 1). С помощью экранирования семян фильтрами удалось показать, что система электромагнитного взаимодействия объектов является довольно стабильной. Система из неживых семян (поврежденных молью или убитых кипячением) имеет КВ на уровне контроля (одиночных семян). Таким образом, синхронизация БЭП компонентов фитоценоза – это свойство живой системы.

На уровне пары 4-5-дневных проростков, которые выросли из семян, разделенных электрическим изолятором (рис. 2, П), КВ длин колеоптиля и корешка были существенно ниже, чем у контрольных одиночных проростков (КВ длины а) колеоптиля и б) корешка в опыте и контроле составили соответственно, в %: а) $20,4 \pm 4,3$ и $62,9 \pm 6,5$ и б) $8,2 \pm 0,9$ и $15,8 \pm 3,3$). При использовании фильтров, отсекающих разные участки электромагнитного поля, было показано, что роль УФ, ИК и видимого диапазона во взаимодействии проростков не существенна, а функциональными являются, по-видимому, СВЧ и радиодиапазон [5, 6]. При увеличении расстояния между семенами эффект взаимодействия постепенно исчезает (в частности, КВ длины колеоптиля при расстоянии между двумя семенами 0, 5 и 25 мм составили соответственно, в %: $7,35 \pm 4,4$; $7,38 \pm 3,2$; $47,3 \pm 10,6$). В смешанных парах проростков (из семян разных генотипов) КВ их длин превышают КВ длин проростков чистых пар [5]. По-видимому, у последних создаются более благоприятные условия для резонансных эффектов вследствие большего подобия спектров электромагнитного излучения объектов.

2. Идентификация потенциала действия и вариационного потенциала, временная структура сигнала

В прежних опытах выделить электрический сигнал в чистом виде [6–9] не удавалось, так как полностью не отключался водно-ионный канал связи между объектами. В литературе до настоящего

времени продолжает дискутироваться вопрос о приоритетности электрофизиологической сигнализации у растений перед гидродинамической сигнализацией [10, 11]. Нами была использована оригинальная методика, позволяющая резко усилить электрический сигнал растения, передаваемый на другое растение ценоза, и полностью исключить химический и гидродинамический каналы связи между растениями [12].

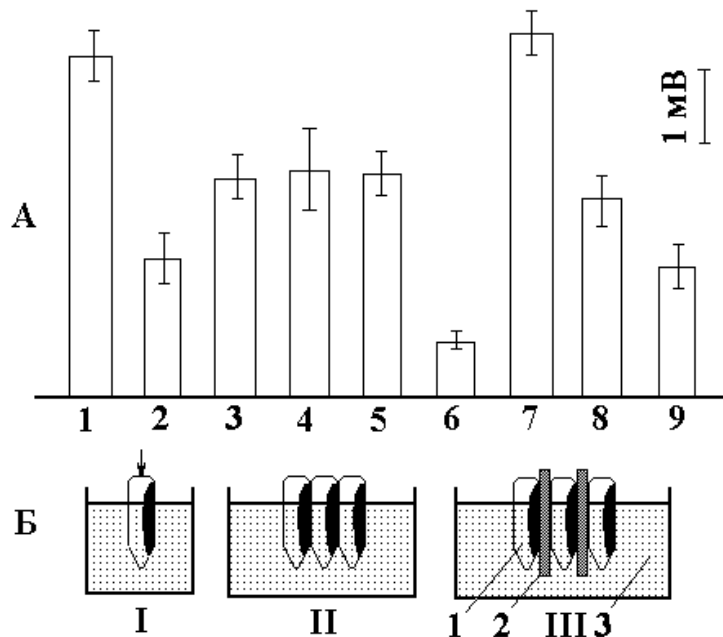


Рис. 1. Коэффициенты вариации (KV) стационарных потенциалов семян кукурузы (гибрид ВИР42), набухающих в группе и поодиночке.

А – KV у одиночных семян: нормальных (1) и вареных (9) и групп семян: соприкасающихся (2); разделенных пластинками – фторопластовой (3), парафиновой (4), графитовой (5), агаровой на 3М KCl (6); соприкасающихся, зародыши повреждены молью (7); соприкасающихся, вареных (8). Б – схема опыта: I – одиночные семена; II – группа соприкасающихся семян; III – группа семян, разделенных пластинками; 1 – семя; 2 – пластинка; 3 – ванна с водопроводной водой. Стрелка – точка измерения потенциала. Референтный электрод – в ванне с водой.

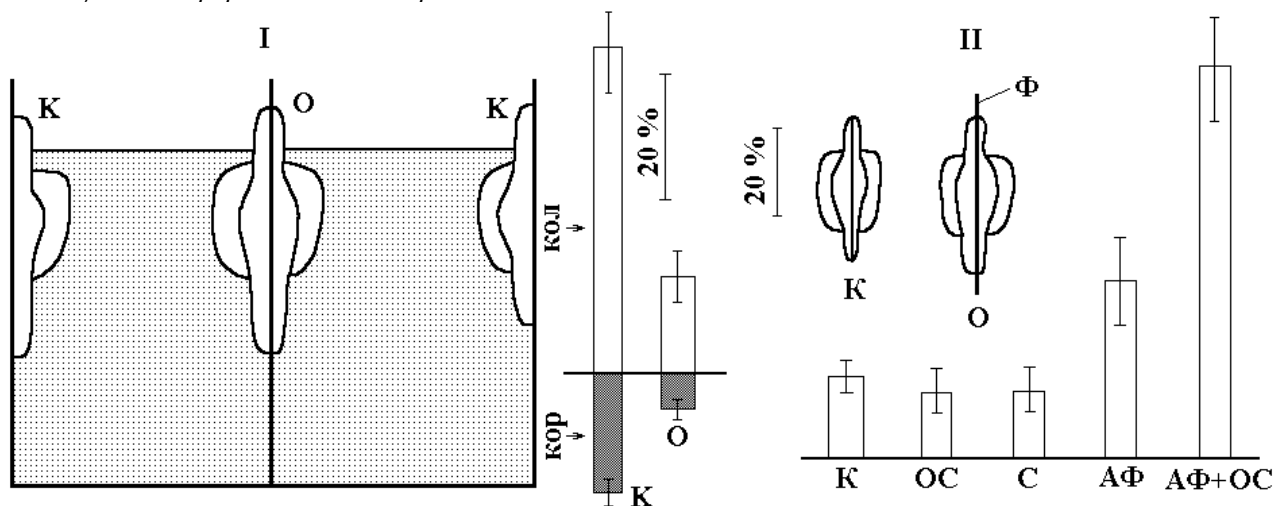


Рис. 2. Оценка электромагнитного взаимодействия пары прорастающих семян кукурузы (гибрид М291) по критерию синхронизации роста проростков.

I – схема опыта и коэффициенты вариации (KV) длины coleoptilia (кол) и корешка (кор) в опыте (O – два проростка разделены пластмассовой стенкой толщиной 1 мм) и контроле (K – одиночные проростки прислонены к стенке); II – схема опыта и KV длины coleoptilia: K – контроль (семена, соприкасающиеся зародышами); O – опыт (семена разделены фильтрами – Ф): OC – оргстекло; C – стекло; AF – алюминиевая фольга.

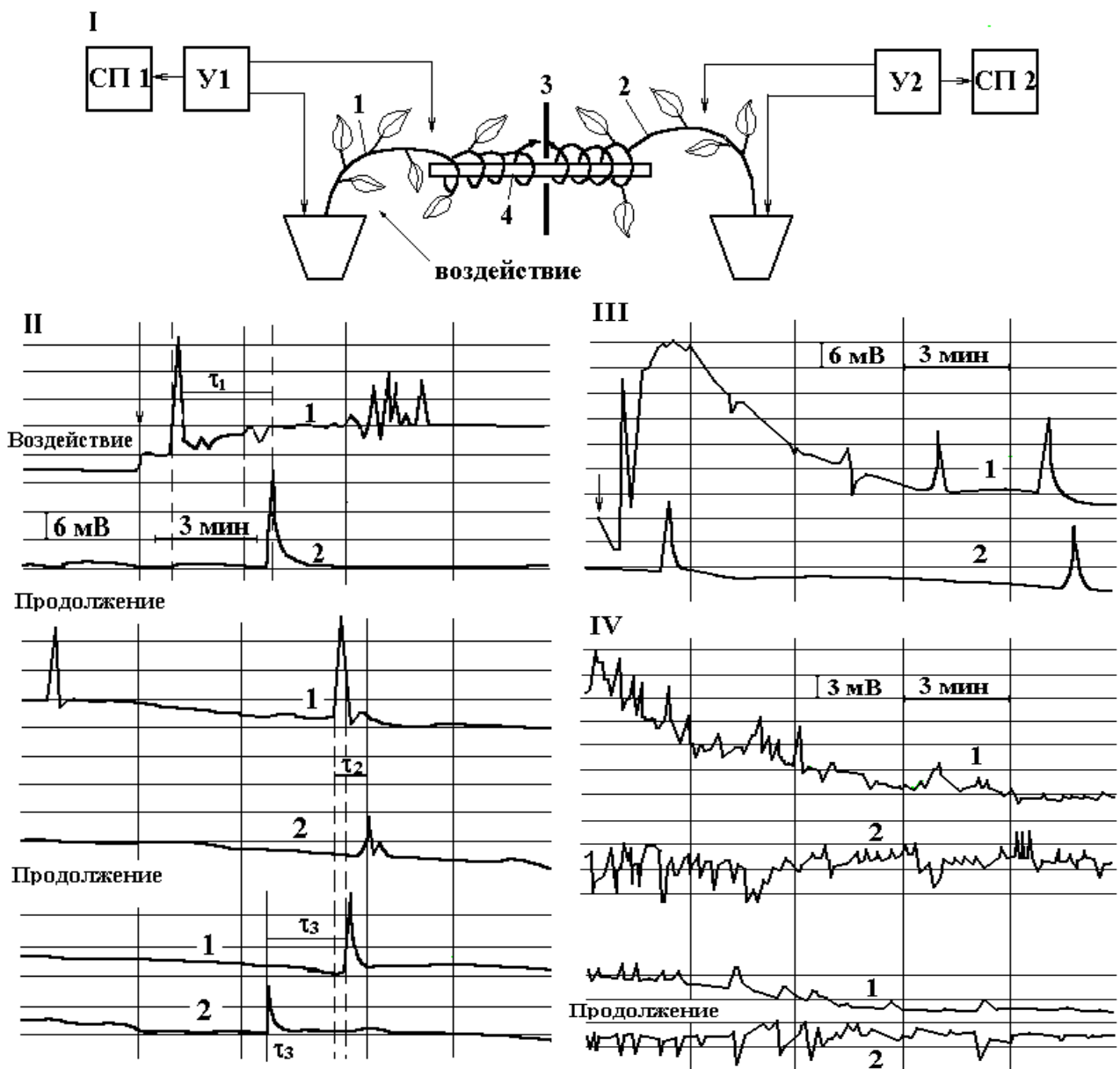


Рис. 3. Передача потенциалов действия (ПД) от одного растения вьюнка к другому через ферритовый сердечник ("биотрансформатор").

I – схема эксперимента: 1 – растение-индуктор ПД; 2 – растение-приемник ПД; 3 – электрический изолятор; 4 – ферритовый сердечник; У1, У2 – усилители потенциалов; СП1, СП2 – самопишущие потенциометры; II – ПД от термического раздражения (ожог листа); III – ПД от механического раздражения (частичная дефолиация); IV – эффект синхронизации ПД у двух растений сразу после их объединения через ферритовый сердечник.

Усики лазающих растений или верхушечные части стеблей вьющихся растений нависали на ферритовый сердечник с двух его концов (рис. 3, I). При локальном воздействии (температурном, химическом и механическом) на одно из растений в нем возникали ПД, которые передавались на соседнее растение по механизму электромагнитной индукции. Передача осуществлялась и в обратном направлении (рис. 3, II, III). В некоторых опытах удалось получить переброску ПД через воздушный зазор в 1,0–1,5 мм [13]. Скорость передачи сигнала – 12–35 см/мин, что соответствует данным литературы [14, 15]. В ходе опыта эта скорость имеет тенденцию к увеличению (эффект проторения).

Полученные результаты полностью укладываются в концепцию фиточеноза как ансамбля осцилляторов. Электромагнитный канал осуществляет взаимную подстройку и синхронизацию этих осцилляторов: у двух растений обнаружена синхронизация ритмик БЭП, вызванных механической деформацией тканей (рис. 3, IV).

Временная структура сигнала показана на примере светоиндуцированного сигнала. Результирующую кривую его амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) можно представить в виде совместно работающих трех электрогенных систем с модами 0,0035, 0,004 и 0,07 рад/с [16, 17].

3. Передача стереоструктуры сигнала (электромагнитного поля), сигнал как энергоинформационный “образ” объекта

3.1. Электрофизиологическая индукция эффекта зеркальной симметризации ценотической пары проростков, динамика эффекта у разновозрастных компонентов ценоза

Генезис зеркальной биосимметрии до настоящего времени на ценотическом уровне не изучался [18, 19]. При проращивании пары семян, соприкасающихся зародышами, обнаружен эффект зеркальной симметризации (ЭС) проростков (пара состоит из *l*- и *d*-проростков) [6, 20] (рис. 4, А, III).

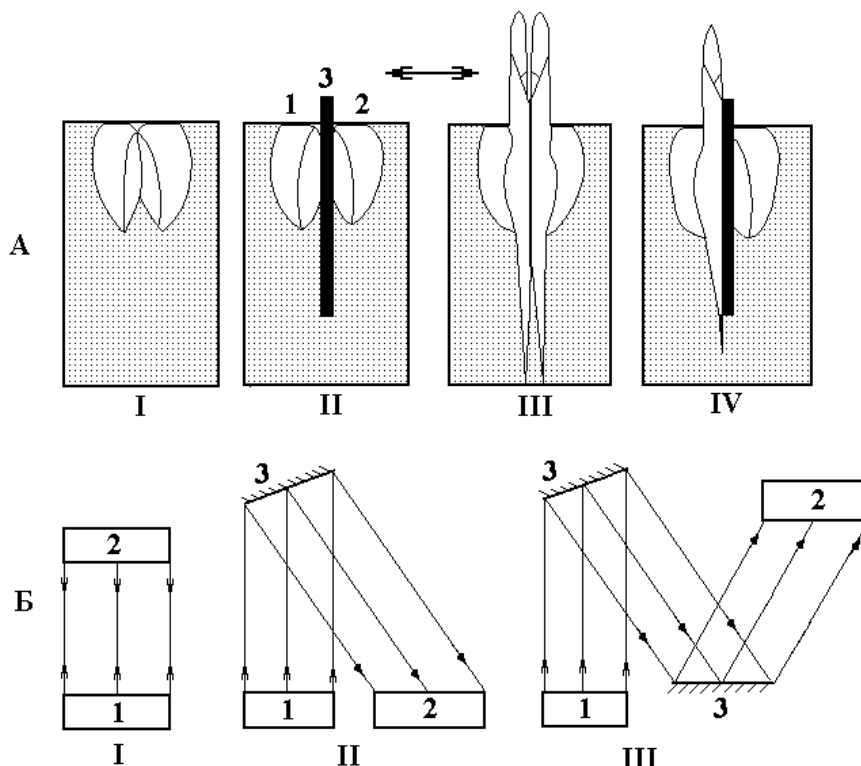


Рис. 4. Схема опытов по электромагнитному морфогенетически значимому взаимодействию растительных объектов в двух полярных направлениях.

А – по горизонтали (на примере семян и проростков кукурузы): I – пара соприкасающихся зародышами семян; II – то же с электромагнитным фильтром; III – пара, состоящая из левого (*l*) и правого (*d*) проростков (индукция зеркальной симметрии проростков); IV – пара разновозрастных объектов с фильтром, 1, 2 – семена; 3 – фильтр; Б – по вертикали (индукция биоизометрии в группе проростков): I – прямая индукция; II, III – отраженная индукция (однократно и дважды); 1 – индуктор; 2 – приемник; 3 – зеркало.

Число зеркально симметричных пар (ЗСП) составляет более 50%. В контроле (при касании семян эндоспермами или при случайном объединении семян) ЗСП меньше 50%. Эффект существенно значим для разных видов растений с разным филлотаксисом – супротивным (кукуруза, пшеница, тритикале, рожь) и винтовым (соя, подсолнечник). Так, число ЗСП в опыте и контроле для 1) подсолнечника (сорт МПС-15), 2) сои (сорт Букурия), 3) пшеницы (сорт Одесская 51), 4) тритикале (сорт КС-4), 5) ячменя (сорт Эльгина), 6) кукурузы (гибрид М291) составило соответственно, в % – 1) 66 ± 7 и 30 ± 3 ; 2) 72 ± 7 и 39 ± 4 ; 3) 71 ± 7 и 43 ± 4 ; 4) 52 ± 5 и 43 ± 4 ; 5) 69 ± 7 и 45 ± 5 . На эффект влияет абиотическая среда: при низкой температуре он отсутствует [20]. ЭС у гибридов выше, чем у линий. ЭС материнской формы выше, чем у отцовской. Механизм индукции ЭС – электромагнитный, как в [5, 6]. При удалении семян друг от друга ЭС исчезал. Опыт свидетельствует о стереоспецифичности биоэлектрических полей у прорастающих семян: у одного из семян и проростков пары поле левоспиральное, у другого – правоспиральное. По-видимому, с помощью этого поля или электрофизиологической стереополярности (ЭСП) растительный организм создает и переносит на расстояние (в том

числе на соседний организм) свой энергоинформационный “образ”. Следовательно, идею электромагнитного поля как матрицы формы организма [21, 22] можно конкретизировать, придав ей функцию переносчика не только вещества [23], энергии [24] и информации [23], энергии [24] и информации [23], но и стереоспецифической структуры.

При посадке к сухому семени второго семени, предварительно замачиваемого в течение суток, было обнаружено усиление ЭЗС [20]. Следовательно, ЭЗС был спровоцирован вторым семенем с более высокой физиологической активностью и, по-видимому, с уже сформировавшимся биоизомерией будущего проростка. Опыт был продолжен с индукцией ЭЗС не семенем, а проростком с четко видимой биоизомерией (l или d) [25] (рис. 4, А, IV). Посадка сухого семени к проростку приурочивалась к моменту появления у проростка очередного листа. Объект-индуктор оставался один и тот же, а объект-приемник каждый раз был новым. Спустя 1–2 суток последний отсаживался и проращивался до проростка. Между индуктором и приемником находилась пластинка из оргстекла (толщиной 1 мм). Этим обеспечивалось только электромагнитное взаимодействие между компонентами пары. Обнаружено усиление ЭЗС с возрастом проростка-индуктора. Лучшей способностью к формированию ЗСП обладали d -проростки индуктора. Коэффициент зеркальной симметризации (отношение числа ЗСП к не ЗСП) с d -индуктором составил 1,0–1,68; с l -индуктором – 0,54–1,0. Таким образом, у d -проростка более мощное биоэлектрическое поле, причем оно проявляется волнообразно (по-видимому, за счет наложения полей очередных вырастающих листьев).

3.2. Эффекты дистантной электрофизиологической индукции однотипной и зеркальной биоизомерии у проростков двух ценозов в вертикальном направлении

Объект-индуктор и объект-приемник – группа или фитоценоз (по 50–100 семян или проростков). Системы “индуктор-приемник” двух типов – “семена-семена” и “проростки-семена” – чистые (одного генотипа) и смешанные (двух разных генотипов). Генотипы: кукуруза (гибриды М424 и Дебют), ячмень (сорт Одесский 86) и тритикале (сорт КС-4). Индуктор располагался под приемником (“прямая индукция”) или на одной горизонтальной плоскости с приемником (электромагнитное взаимодействие посредством зеркала, расположенного над системой – “отраженная индукция”) (рис. 4, Б). В системе “проростки-семена” использовались только l - или только d -проростки-индукторы. Продолжительность индукции – 1–2 суток. После индукции семена отсаживались, проращивались и подсчитывалось отношение (K) числа l -проростков к числу d -проростков (при $K > 1$ преобладали l -проростки, при $K > 1-d$ -проростки).

В чистых и смешанных системах “семена-семена” при прямой индукции K между компонентами было однотипным по характеру (одновременно у обоих компонентов преобладали либо l -либо d -проростки). При отраженной индукции наблюдался эффект зеркальности K между компонентами, то есть если у одного из компонентов системы преобладали l -проростки, то у другого – d -проростки. Обобщенно эффекты можно продемонстрировать следующим образом: различия между K двух компонентов для всех вариантов при прямой индукции ($2,2 \pm 0,5$ ед.) существенно ниже, чем при отраженной индукции ($6,2 \pm 0,9$ ед. для объектов в чашках Петри и $4,4 \pm 0,7$ ед. для объектов в вегетационных сосудах). При использовании двух зеркал (взаимодействие по схеме “индуктор-зеркало I-зеркало II-приемник”) получен эффект индукции однотипной биоизомерии (в системах “ячмень-ячмень”, “ячмень-тритикале”, “тритикале-тритикале” K I и II компонентов соответственно равны $0,65-0,67$; $0,54-0,56$; $1,08-1,31$).

В системе “проростки-семена” при прямой индукции у приемника преобладают биоизомеры, совпадающие по типу с биоизомерией индуктора, а при отраженной индукции – преобладают зеркальные биоизомеры, то есть качественно картина – как в системе “семена-семена”. Общее среднее K приемника при прямой индукции l -индуктором составило $1,16 \pm 0,7$ ед, d -индуктором – $0,57 \pm 0,08$ ед; при отраженной индукции – $0,71 \pm 0,27$ и $1,25 \pm 0,01$ ед. Ошибка большая средней обусловлена разной степенью выраженности эффекта по вариантам. Обращает на себя внимание дальное действие эффекта индукции биоизомерии в вертикальном направлении (в нашем опыте оно было не менее 50 см) по сравнению с горизонтальным (ЭЗС пар проростков работал на расстоянии только до 20 мм) [6, 20]. Лучшее дальнее действие по вертикали может быть объяснено эффектом группы [26], геоэлектрическим эффектом (электрической поляризации между верхней и нижней поверхностями плоского объекта) [27] и направленным электромагнитным излучением с верхушек проростка [28].

Результаты этих экспериментов могут быть использованы для получения определенных биоизомеров, тем более у растений, у которых этот биоизомер в естественной среде обитания отсутствует [19, 29]. В опыте с отраженной индукцией в качестве объекта-индуктора выступает, по-видимому, не сам объект-оригинал, а его зеркальный энергоинформационный двойник или образ, сопоставимый с оригиналом по степени влияния на приемник.

4. Электрофизиологический механизм связи между надземной и подземной частями растений при световых воздействиях

До 70-х годов в физиологии растений общепринятой считалась точка зрения о безальтернативном фотосинтетическом механизме поступления в растения минеральных элементов [30], где индуктором восходящего потока элементов минерального питания в растении являются метаболиты – продукты фотосинтеза, возникающие в листьях на свету и доходящие до корней. Нами в серии работ, начиная с 1973 года [4, 31–36], было показано, что в растении существует не только фотосинтетический, но и электрофизиологический механизм, который функционирует при резких свето-темновых переходах.

Было обнаружено, что возникающая в листьях зеленого растения фотоиндуцированная электрическая реакция (ФЭР) распространяется по растению вплоть до корней [32] и вызывает приток в растение элементов минерального питания из почвы или питательного раствора задолго до возможного прихода к корням ассимилятов – продуктов фотосинтеза. В специальных опытах показано, что включение света у разных видов растений вызывает эффект стимуляции поступления элементов минерального питания – фосфора, кальция [33], калия, нитратов и выделения протонов [35]. Выключение света снимает эффект (рис. 5). Время наступления эффекта совпадало со временем прихода от листьев к корням электрического сигнала (со скоростью порядка 1 см/с). Скорость передачи ассимилятов и элементов минерального питания была на порядок ниже, что было зафиксировано приборами с прямым контролем ФЭР и встречных потоков ассимилятов и фосфора с помощью радиометки ^{14}C и ^{32}P [34]. Спустя 5 минут после светового воздействия радиометка изотопа ^{14}C была зафиксирована только в листьях проростка, а радиометка ^{32}P – не только в корнях, но и в стебле. С помощью радиоавтоматической графики эта картина была визуализирована. После светового стресса из-за перекрытия встречных потоков ^{14}C и ^{32}P была получена засветка всего растения (рис. 5, VII, 1). Через 60 дней, когда в этом растении ^{32}P полностью распался, засветка была обнаружена только в листьях за счет ^{14}C (рис. 5, VII, 2). Следовательно, радиофосфор успел дойти до листьев раньше, чем радиоуглерод (химический сигнал) дошел до корней.

Устранение канала электрической сигнализации приводило к исчезновению эффекта подкачки а) у альбиносных растений (у них отсутствует рецептор электрического возбуждения), б) при блокировании сигнала хлороформом (рис. 5, IV), в) при медленном нарастании освещенности (сигнал возникает только при резких свето-темновых переходах (рис. 5, V, VI). В последнем случае с помощью радиометрической аппаратуры удалось показать работу второго, постулируемого в литературе, инерционного фотосинтетического механизма (эффект подкачки наступал только через 1,5–2,0 ч), чем еще раз была показана независимость быстрого механизма непосредственно от процесса фотосинтеза (но не фотосинтетических пигментов). Данный механизм работал и при отключении гидродинамического канала у объектов 1) со 100% влажностью воздуха (движение водного потока в растении отсутствует); 2) с листьями, замазанными вазелином (дополнительно отключался фотосинтез); 3) связанных через корневые системы (в районе корневых контактов разрывалась водно-ионная нить [4, 34].

В отношении конкретного (мембранного) механизма наблюдаемого эффекта можно сказать, что этот механизм, по-видимому, связан с активацией АТФаз клеток поверхности корня, главным образом H^+ – АТФаза под влиянием прихода к корням волны электрического возбуждения [37]. В результате происходит выброс протона и поглощение в антипорте с ним калия и других элементов [35, 37]. Для индукции эффекта поглощения ^{32}P корнями растения Оприлов [37] использовал несветовые (химические и температурные) раздражители. Нами показано, что и при световом воздействии происходит выброс протона из корней растений (рис. 3, II) и поглощение калия и нитратов [35]. Мы полагаем, что электрофизиологический механизм регуляции минерального питания у растений с помощью фотоиндуцированных ПД играет важную роль в жизнедеятельности растений. Этот механизм функционирует и в нормальных условиях, когда происходят резкие световые перепады – из-за фотопериода, переменной облачности, движения листьев на ветру и т.д. [34].

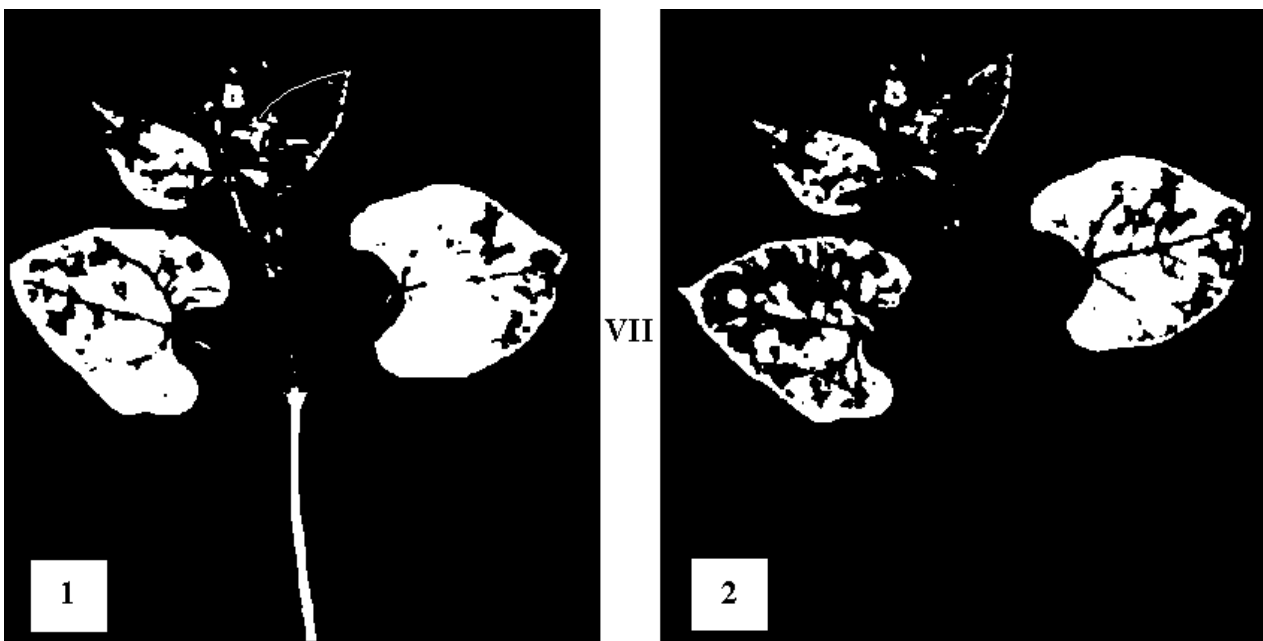
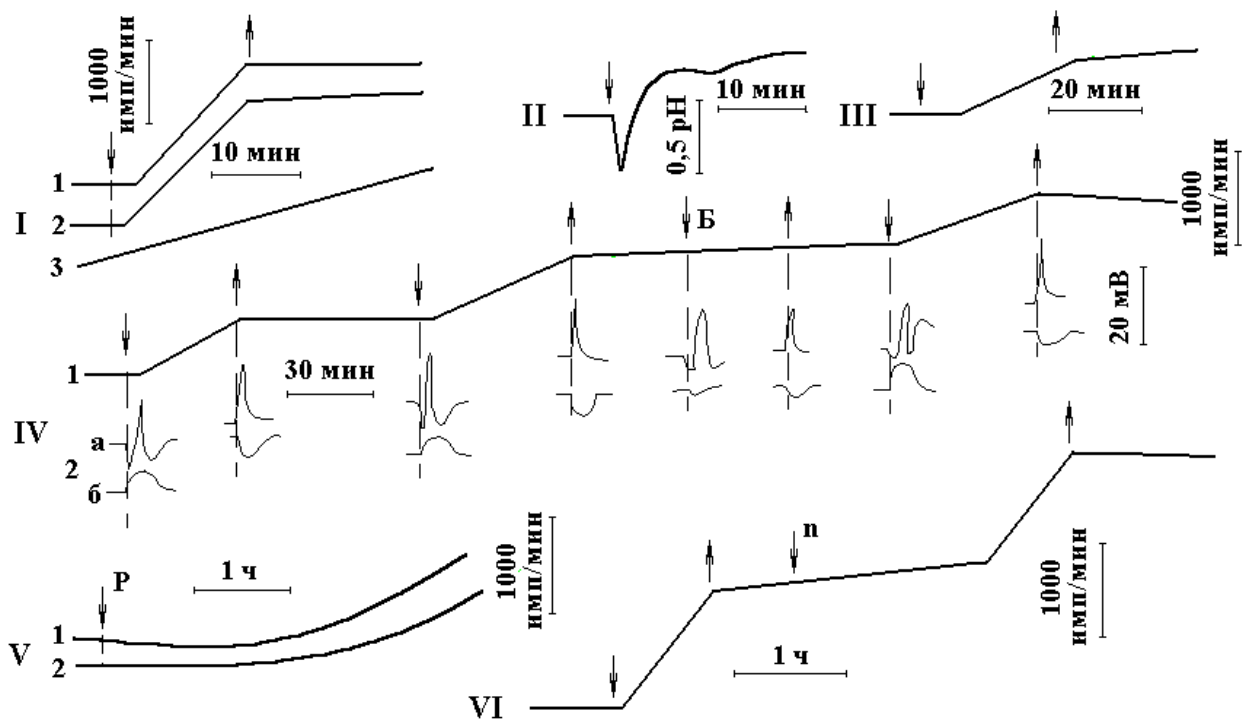


Рис. 5. Стимуляция поглощения элементов минерального питания и выделения протонов растениями под влиянием светового воздействия.

I – проросток кукурузы в почве ^{32}P в листе – 1 и в стебле – 2; 3 – без освещения). II – проросток кукурузы в растворе (H^+ в корнях при локальном лазерном воздействии ($\lambda = 633,8 \text{ нм}$; $W = 3 \text{ мВт/см}^2$ на лист)). III – саженец винограда в почве ^{45}Ca в листе). IV – проросток кукурузы в почве ^{32}P в листе – 1; электрическая реакция в листе на свет – 2а и стебле – 2б, физиологический блок – Б). V – саженец винограда на полевом участке (^{32}P в штамбе – 1 и листе – 2 во время рассвета – P). VI – проросток кукурузы в почве (^{32}P при резком – \downarrow и постепенном \downarrow II увеличении интенсивности света). Стрелки – начало и конец воздействия светом от лампы накаливания (5 Клк), кроме II и V. VII – растение фасоли (радиоавтографический анализ ^{32}P , поступившего из раствора $\text{KH}_2^{32}\text{PO}_4$ и ^{14}C из $^{14}\text{CO}_2$ воздуха при 5-минутном световом воздействии сразу после окончания опыта – 1 и спустя 60 дней – 2).

Наша концепция получила принципиальное подтверждение в работах других исследователей [23, 38, 39].

5. Электрофизиологическое воздействие лазерного излучения на растения

Нами впервые было использовано лазерное излучение в качестве электрофизиологического раздражителя [4, 40, 41]. Благодаря уникальным характеристикам этого излучения удалось получить новые факты, которые расширяют наши представления о природе и функции фотоиндуцированных электрических сигналов (рис. 6). Сверхкороткая длительность импульса (единицы пикосекунд) и высокая плотность лазерного излучения позволили обнаружить на листьях растений типичный ПД, которому присущ закон "все или ничего" (рис. 6, Б, Е), ПД способен распространяться по листу. Получены также эффекты суммации подпороговых раздражений (рис. 6, Е, П) и градуальный ответ на повышение интенсивности воздействия (рис. 6, Г, Е). Форма реакции на низкоинтенсивное излучение такая же, как на обычный свет (рис. 6, А). Высокая монохроматичность лазерного излучения, по-видимому, обеспечивает более точное попадание фактора на определенный фоторецептор (так, приемником лазерного излучения $\lambda = 633,8$ нм может быть хлорофилл и фитохром) по сравнению с монохроматическим светом, получаемым с помощью обычных и интерференционных фильтров. Об этом свидетельствуют различия в АЭР при действии на объект указанных факторов [4, 40, 41]. Поляризация и когерентность излучения вносит вклад в общую АЭР [4, 40, 41 (рис. 6, В)], что обуславливается пространственно-временной упорядоченностью объекта (АЭР в вариантах использования лазерного излучения $\lambda = 633,8$ нм), а) без изменения его характеристик, б) со снятой когерентностью, в) со снятой когерентностью и поляризацией) составили для листа кукурузы, в мВ – $4,1 \pm 0,4$; $2,7 \pm 0,2$; $2,4 \pm 0,2$.

Известно, что поляризованный свет позволяет выявить полярность расположения клеток в листе и хлоропластов в клетке [42], а также фитохромов по отношению к поверхности цитоплазматической мембраны клетки [43]. Роль когерентности в структуре и функции объекта еще предстоит выяснить. Во всяком случае считается, что живые организмы способны генерировать, подобно лазерам, собственное когерентное электромагнитное излучение [44]. Продолжительное навязывание растениям ориентационных эффектов путем выращивания растений на поляризованном свете привело к существенным изменениям в величинах стационарных БЭП и АЭР при действии плоскополяризованного света, ориентированного вдоль или поперек оси листа [41]. С помощью лазерного излучения, которое обладает поляризацией, нам впервые удалось обнаружить: а) оптическую активность (ОА) семян и листьев растений кукурузы в норме (знак вращения плоскости поляризации объектов совпадал со знаком их биоизомерии то есть левизной или правизной) [4]; б) волну структурных перестроек в листе (с преобладанием *l*-типа или *d*-компонентов ОА), которая сопровождает волну электрического возбуждения от внешних раздражителей [41]. Зависимость ОА от длины волны светового раздражителя имела максимум в желто-оранжевой области [41].

6. Электрофизиологическое действие γ -излучения на растения

Нами впервые показано, что γ -излучение, обычно не воспринимаемое органами чувств человека и животных, является эффективным электрофизиологическим раздражителем для растений [40, 45]. Тем самым наглядно демонстрируется высокая чувствительность системы электрофизиологической сигнализации у растений, что может быть использовано при разработке экспресс-методик оценки радиобиологических эффектов и радиозэкологического мониторинга.

В полевых условиях на установке γ -поле была исследована электрическая реакция растений на острое γ -излучение с мощностью дозы 10 Гр/ч [43] (рис. 7). Обнаружена позитивация БЭП с А до 6 мВ и негативация до 30 мВ с четко выраженным латентным периодом до 30 мин. Выключение источника γ -излучения приводило к резкому (без латентного периода) изменению БЭП, по полярности совпадающему с действием фактора (рис. 7). Пороги реакции находятся в пределах поглощенной дозы 2-6 Гр, которая для кукурузы считается стимуляционной [46]. Характер электрофизиологической стереополярности листьев – как при действии светового фактора [1, 40, 45], то есть γ -излучение является раздражителем I группы [1, 40, 45]. На пестром листе колеуса обнаружено участие всех пигментов листа в генерации электрической реакции [1, 40, 45]. Следовательно, на этом листе наблюдается мозаичность электрофизиологического и радиобиологического эффекта. В целом, γ -излучение выступает как неспецифический электрофизиологический раздражитель, индуцирующий градуальный ответ живой системы на экстремальные воздействия.

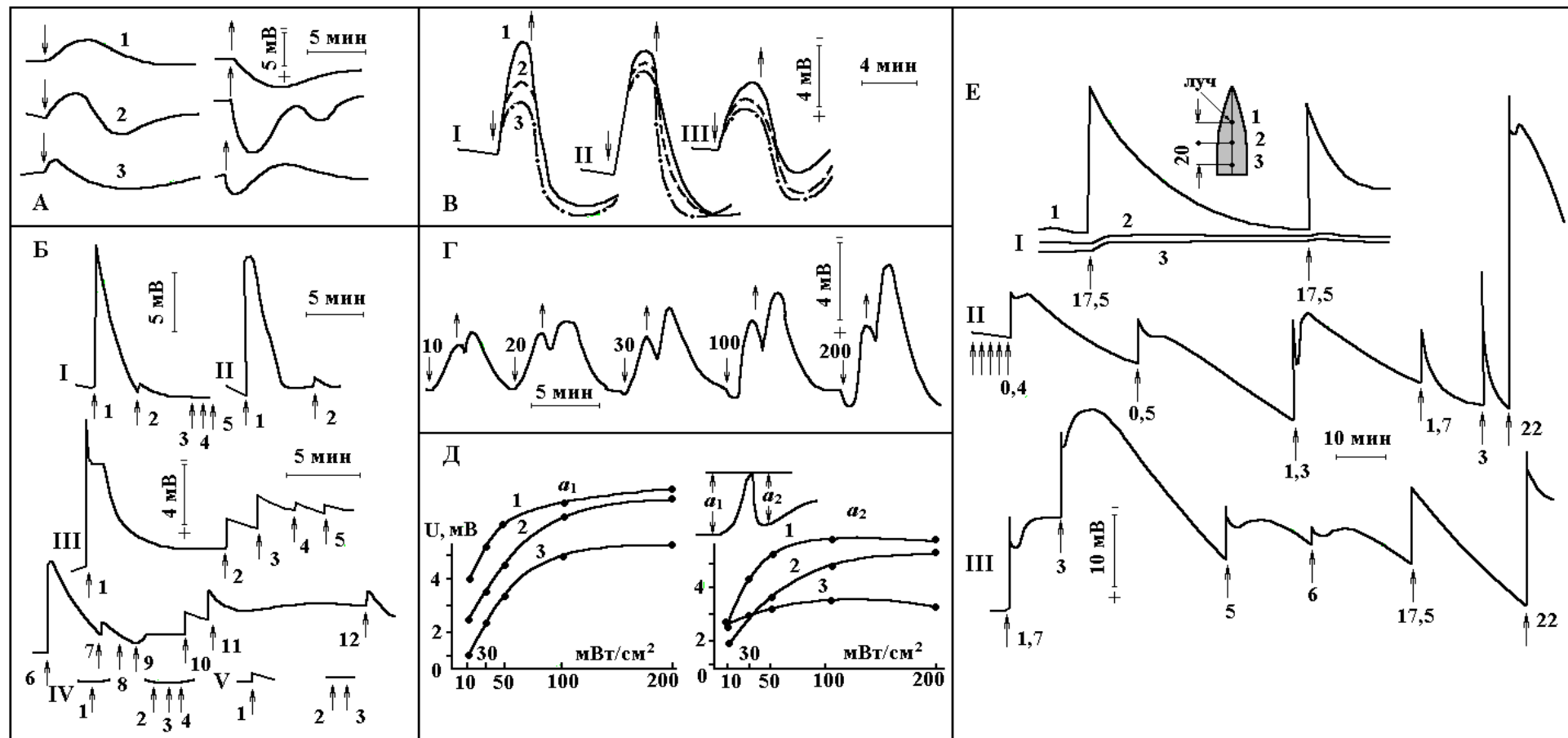


Рис. 6. Характеристики электрической реакции листьев растений (кукурузы) на излучения гелий-неонового лазера (ГНЛ, $\lambda = 632,8$ нм), гелий-кадмиевого лазера (ГКЛ, $\lambda = 440$ нм), перестраиваемого аргонно-ионного лазера (ПАИЛ) и импульсного рубинового лазера (ИРЛ, $\lambda = 694,3$ нм, реакция на одиночный импульс).

А – общий вид реакции от лампы накаливания (1), ГНЛ (2) и ГКЛ (3) при одинаковой плотности мощности ($W = 0,1$ мВт/см²). Б – ИЛР ($W = 20$ мВт/см²): I–V – № растений, 1–12 – № воздействий: 1–12 (I–III) – на лист в зоне измерительного электрода; 1 (IV) – на корневую шейку; 2, 3 (IV) – на корни; 1, 3 (V) – на лист (точка воздействия удалена от электрода на 40 мм). В – ПАИЛ ($\lambda = 459$ нм, $W = 3$ мВт/см²): I–III – повторности опыта; 1 – поляризованный когерентный свет; 2 – неполяризованный когерентный свет; 3 – неполяризованный некогерентный свет. Г – ПАИЛ ($\lambda = 459$ нм, $W = 10, 20, 30, 100, 200$ мВт/см²). Д – ПАИЛ (λ : 1 – 457 нм; 2 – 488 нм; 3 – 514 нм); a_1, a_2 – амплитуды реакции. Е – ИРЛ: I–III – № опыта; 1–3 – точки измерения потенциалов на листе; цифры под стрелками – W в мВт/см². Для А, В, Г – стрелками вниз показано начало воздействия, стрелками вверх – конец воздействия; для Б, Е – стрелками вверх – начало воздействия.

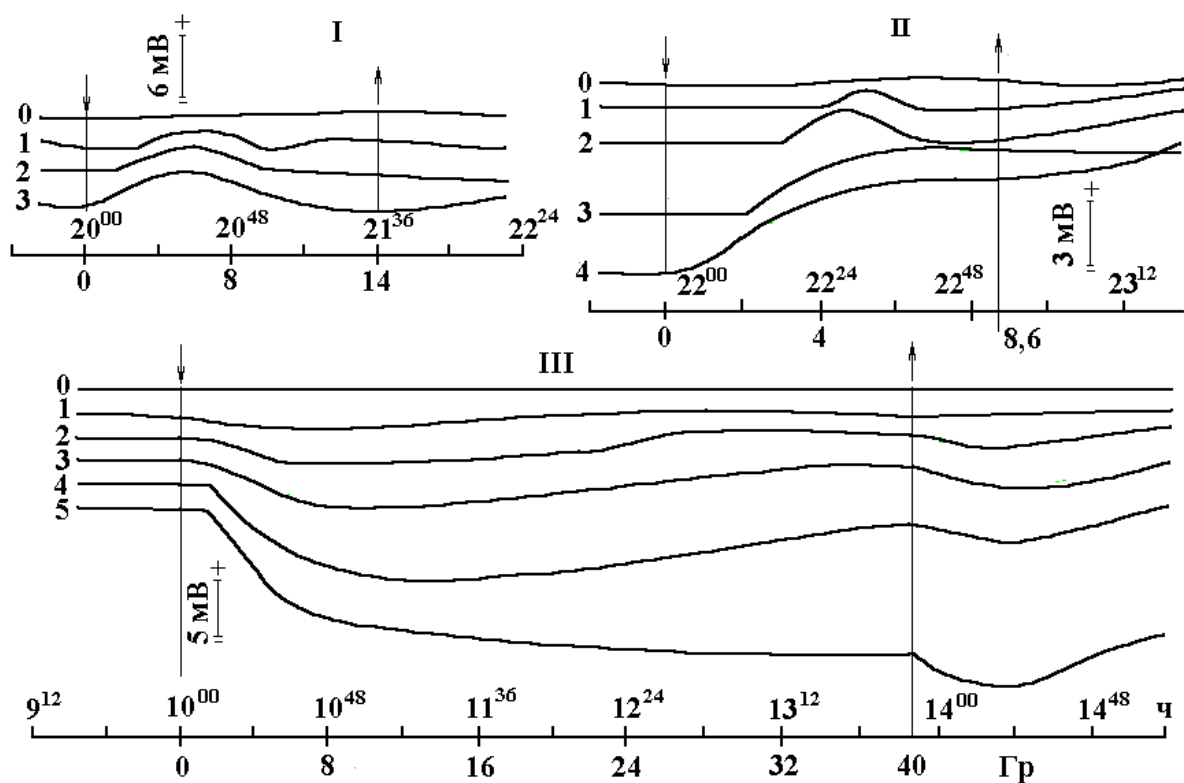


Рис. 7. Типы электрической реакции листьев 15-дневных проростков кукурузы на острое γ -облучение. I, II – отчлененные листья (линия А632 и гибрид М420); III – лист на целом растении (гибрид М420). 1–5 – № растений; О – потенциал электрода сравнения, стрелки – начало и конец воздействия.

Параметры реакции зависят от генотипа объекта, его возраста и физиологического состояния.

Изучалось также электрическое состояние растений кукурузы, произрастающих на γ -поле на разных расстояниях от γ -источника и тем самым получающих разные дозы [40, 45]. На первом этапе опыта (30–35 дней после посева) хроническое облучение вегетирующих растений привело к позитивации стационарных БЭП листьев лишь на участке с мощностью дозы 0,1 Гр/ч (контроль и опыт, в мВ: $-49,7 \pm 4,4$ и $-33,9 \pm 1,7$) еще до видимых морфологических различий у листьев. На втором этапе опыта (40–45 дней после посева) позитивация БЭП усилилась и захватила объекты всех участков поля (при этом контроль и облучение мощностью дозы 0,1 Гр/ч, составил, в мВ: $-74,7 \pm 2,5$ и $-48,8 \pm 2,9$). И в данном случае морфологические и физиологические изменения у растений проявились незначительно.

Таким образом, растения электрически реагируют как на острое, так и на хроническое γ -излучение значительно оперативнее, чем их морфология и физиология.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслоброд С.Н. Пространственно-временная организация поверхностных биоэлектрических потенциалов растительного организма. 1. Электрофизиологическая стереополярность // Электронная обработка материалов. 1999. № 6. С. 49–64.
2. Маслоброд С.Н. Пространственно-временная организация поверхностных биоэлектрических потенциалов растительного организма. 2. Электрофизиологическая ритмическая активность // Электронная обработка материалов. 2000. № 1. С. 65–72.
3. Полевой В.В. Физиология растений. М., 1989.
4. Маслоброд С.Н. Электрофизиологическая полярность растений. Кишинев, 1973.
5. Шабала С.Н., Маслоброд С.Н. Электромагнитное взаимодействие в системе прорастающих семян // Электронная обработка материалов. 1993. № 6. С. 51–53.

6. *Маслоброд С.Н., Шабала С.Н., Третьяков Н.Н.* Эффект зеркальной симметризации ценотической пары проростков и электромагнитное взаимодействие прорастающих семян // Доклады АН России. 1994. Т. 334. № 3. С. 396–398.
7. *Osterhout W., Hill S.* Salt bridges and negative variation // Journ Gener. Physiol. 1930. V.13. P. 547–552.
8. *Бос Д.* Избранные произведения по раздражимости растений в 2 томах. М., 1964. Т. 1–2.
9. *Синюхин А.М.* Функциональное значение потенциалов действия растительного организма. Вторая функция флоэмного пучка высшего растения // Известия АН СССР, серия биол. 1972. С. 747–755.
10. *Malone M.* Kinetics of wound-induced hydraulic signals and variation potentials in wheat seedlings // Planta. 1992. V. 187. № 34. P. 505–510.
11. *Полевой А.В., Танкелюн О.В., Полевой В.В.* Быстрая дистанционная передача сигнала о локальном стрессовом воздействии у проростков кукурузы // Физиология растений. 1997. Т. 44. № 5. С. 645–651.
12. *Шабала С.Н., Маслоброд С.Н.* Прямое доказательство взаимодействия между растениями посредством распространяющихся электрических сигналов // Электронная обработка материалов. 1991. № 2. С. 69–72.
13. *Маслоброд С.Н., Шабала С.Н., Третьяков Н.Н.* Передача электрических сигналов от одного растения к другому через адекватные стеблевые контакты. Идентификация стереоспецифичности сигнала // Электронная обработка материалов. 1995. № 2. С. 67–70.
14. *Оприлов В.А.* Распространяющееся возбуждение у высших растений // Успехи современной биологии. 1977. Т. 83. № 3. С. 442–458.
15. *Pickard B.G.* Electric signals in higher plants // Naturwiss. 1974. V. 61. P. 60–64.
16. *Шабала С.Н., Маслоброд С.Н.* Частотные характеристики вынужденных колебаний биопотенциалов растений // Биоэлектрогенез и мембранный транспорт у растений. Горький, 1989. С. 78–83.
17. *Shabala S.N.* Leaf bioelectric responses to rhythmic light; identification of the contributions from stomatal and mesophyll cells // Aust. Journ. Plant Physiol. 1997. V.24. P. 741–749.
18. *Урманцев Ю.А.* Симметрия природы и природа симметрии. М., 1976.
19. *Рейд Ф.* Симметрия растений // Узоры симметрии. М., 1980. С. 140–150.
20. *Маслоброд С.Н., Шабала С.Н., Буюкли Л.Б., Корлэтяну Л.Б., Пирожок Е.Ф., Русановская Е.Г.* Оценка взаимодействия растений в группе по зеркальной симметризации пары проростков // Известия АН Республики Молдова, серия биол. и хим. наук. 1994. № 6. С. 14–18.
21. *Becker R.O.* The significance of bioelectric potentials // Bioelectrochem. and Bioenerg. 1974. V. 1. № 1–2. P. 167–189.
22. *Jaffe L.F., Nuccitelli R.* Electrical control of development // Ann. Rev. Biophys. Bioenerg. 1977. V. 6. P. 445–476.
23. *Мелкумян Н.М., Рогатых Н.М., Зубарев Т.Н.* Об информационной роли потенциалов действия у клеток ацетабулярии // Доклады АН СССР. 1975. Т. 224. С. 1223–1225.
24. *Глаголев А.Н., Глаголева Т.Н., Левин С.А., Потапова Т.В., Скулачев В.П., Чайлахян Л.И.* Транспорт энергии посредством передачи электрохимического потенциала вдоль трихома цианобактерий // Доклады АН СССР. 1980. Т. 255. № 6. С. 1490–1493.
25. *Маслоброд С.Н.* Динамика зеркальной симметризации разновозрастных пар проростков кукурузы // Известия АН Республики Молдова, серия биол. и хим. наук. 1997. № 1. С. 3–7.
26. *Титов Ю.В.* Эффект группы у растений. Л., 1978.
27. *Brauner L.* Uber den Primareffect der Schwerkraft beim Geotropismus der Pflanzen // Naturwiss, Rundschau. 1956. V. 9. № 12. P. 446–470.
28. *Гурвич А.Г.* Митогенетическое излучение. М., 1932.
29. *Касинов В.Б.* Биологическая изомерия. Л., 1973.
30. *Курсанов А.Л.* Транспорт ассимилятов в растении. М., 1976.
31. *Маслоброд С.Н., Земиман А.Я., Семин В.С., Степанов К.И., Лысиков В.Н.* О двух механизмах поступления фосфора в растения при световом воздействии. В сб: Проблемы фотоэнергетики растений. Кишинев, 1975. В. 3. С. 171–185.
32. *Маслоброд С.Н., Земиман А.Я., Степанов К.И., Лысиков В.Н., Семин В.С.* О функциональной роли фотоиндуцированной электрической реакции растения в процессе поглощения фосфора из почвы при световом воздействии // Физиология растений. 1975. Т. 22. В. 6. С. 1162–1167.
33. *Маслоброд С.Н., Земиман А.Я., Степанов К.И., Лысиков В.Н., Баркон И.А., Жариченко Г.И.* Динамика поступления в растения элементов минерального питания при световом стрессе. В сб: Минеральное питание и продуктивность растений. Киев, 1978. С. 206–211.

34. *Килянчук В.И., Земиман А.Я., Маслоброд С.Н.* Транспорт радиофосфора у винограда. Кишинев, 1979.
35. *Маслоброд С.Н., Медведев С.С., Максимов Г.Б., Лыиков В.Н.* Влияние светового облучения надземной части проростков кукурузы на поглощение ионов корнями. Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции по фотоэнергетике растений. Львов, 1980. С. 39–40.
36. *Маслоброд С.Н.* Электрический "язык" растений. Кишинев, 1981.
37. *Оприатов В.А., Пятыгин С.С., Ретивин В.Г.* Биоэлектrogenез у высших растений. М., 1991.
38. *Gragam R.D., Bowling D.I.F.* Effect of the shoot on the translocation transmembrane potential of root cortical cells of sunflower // *Journ. Exp. Bot.* 1977. V. 28. № 105. P. 886–893.
39. *Вахмистров Д.Б.* Питание растений. М., 1979.
40. *Маслоброд С.Н., Лыиков В.Н., Духовный А.И., Олоер Ф.Г.* Электрофизиология кукурузы. Кишинев, 1978.
41. *Девятков Н.Д., Лыиков В.Н., Маслоброд С.Н., Макеева Н.С., Боярских Г.В.* Исследование лазерного излучения как фактора, изменяющего электрическое состояние растений // *Проблемы фотоэнергетики растений.* Кишинев, 1975. В.3. С. 142–158.
42. *Frank M.N.* Die Bewegungsreaction des Mougeetia-Chloroplasten bei kontinuierlicher Belichtung mit linear polarisierten langs-schlingendem Belicht // *Zeitsch. Pflanzenphys.* 1977. B. 82. № 3. P. 210–234.
43. *Haupt W., Mortel G., Winkelkemper F.* Demonstration of different dichroic orientation of phytochrome P_R and P_{FR} // *Planta.* 1987. V. 68. P. 183–186.
44. *Frohlich H.* Koherence in biological systems // *Collect Phenom.* 1981. V. 3. № 3–4. P. 139–146.
45. *Маслоброд С.Н., Акимов В.К., Шарбан И.Н., Лыиков В.Н.* Электрофизиологическое изучение растений кукурузы при остром и хроническом облучениях в условиях гамма-поля // *Радиобиология.* 1979. Т. 19. № 6. С. 876–882.
46. Предпосевное γ -облучение семян сельскохозяйственных культур. М., 1974.

Поступила 05.09.99

Summary

The systems of the electrophysiologic regulation of the plant organism ensuring the mechanisms of its spatial and temporal organization of the surface bioelectric potentials have been studied. The systems of the rapid and slow electrophysiologic signalization in plants (when the electric signal is transmitted from one plant to another in the absence of the water-ion canal, as well as under conditions of the electromagnetic distant induction of the seedling leftness and rightness in horizontal and vertical directions) have been identified. An electrophysiologic mechanism of the connection between above-ground and under-ground parts of the plant via a photoinduced electric signal, moving from leaves to roots and stimulating the inflow of mineral nutritive elements into plants before the chemical signal reaches the roots (photoassimilates) has been found out. The electrophysiologic action of untraditional stimulators – laser and γ -irradiation – on the plants has been discovered. A specific influence of the laser irradiation (its polarization, coherence, monochromaticity, power, modulation) and γ -irradiation (dose power and dose) on the parameters of the electric signals induced by them in plants has been shown.
