

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ОРГАНИЗМА.

### 2. ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ РИТМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

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

**1. Растение как ансамбль электрофизиологических осцилляторов.** Растительный организм – целостная интегрированная система, обладающая сложной иерархической структурой функционального объединения отдельных физиологических механизмов и координации их приспособительной деятельности. Поддержание гомеостаза растительного организма предполагает наряду с существованием пространственно соподчиненных механизмов физиологической регуляции на разных уровнях организации наличие систем с временной организацией, основу которой составляют колебательные процессы [1, 2]. Ритмические процессы наблюдаются уже на субклеточном уровне (конформационные колебания макромолекул, периодическое изменение объема и формы органелл и др.) и присущи всем без исключения уровням организации, вплоть до ценотического. В свою очередь, на каждом уровне организации существует целый спектр ритмической активности [3]. Нами показано [4], что закономерности возникновения и распространения колебаний биоэлектрических потенциалов (БЭП), индуцированных внешними факторами в растительных организмах, могут быть описаны в рамках предложенной Шабалой осцилляторной модели [4–6]. Согласно этой модели целостное растение на организменном уровне рассматривается как ансамбль нелинейных связанных макроосцилляторов, каждый из которых (отдельные части и органы растения) представляет собой систему связанных осцилляторов более низкого уровня.

В первых экспериментах нами получены автоколебания БЭП у coleoptилей кукурузы [7], которые согласуются с данными по осцилляции электрических токов у развивающихся объектов [8]. На саженце винограда обнаружены серии ПД от разовой подачи химического фактора [9]. У проростка фасоли получены автоколебания БЭП после подачи света и АБК, что может быть связано с движением устьиц [10]. В данном случае к ритмике БЭП подстраивалась ритмика физиологических процессов (водного потока по стеблю, транспирации) (рис. 1, I), то есть происходило затягивание частот, что характеризует работу системы осцилляторов, из которых электрофизиологический является пейсмейкером. При выключении света тотальная ритмика исчезает.

Представляют интерес опыты по активации автоколебаний БЭП объекта с помощью внешнего периодического фактора (лазерный луч с  $\lambda = 633,8$  нм). Фактор подстраивали под временные параметры автоколебаний БЭП, возникших от первичной локальной подачи фактора (свет включался и выключался на экстремумах реакции [11]). Получены эффекты: раскачки колебаний БЭП, проторения электрического возбуждения (постепенного увеличения маршрута распространения), синхронизации колебаний БЭП (рис. 1, II). Особенно наглядно это проявляется, когда первичная асинхронность двух вынужденных осцилляций БЭП постепенно выравнивается, один из осцилляторов становится доминантным, и объект входит в состояние общего возбуждения (рис. 1, II).

Данные подтверждены в варианте подачи светового фактора без учета эндогенных колебаний БЭП [12] (рис. 4, а). Были дополнительно показаны эффекты “модуляции” – периодического изменения амплитуды реакции [12] и бифуркации БЭП [5, 6, 13], что характеризует работу электрофизиологических осцилляторов, смещенных друг относительно друга по фазе.

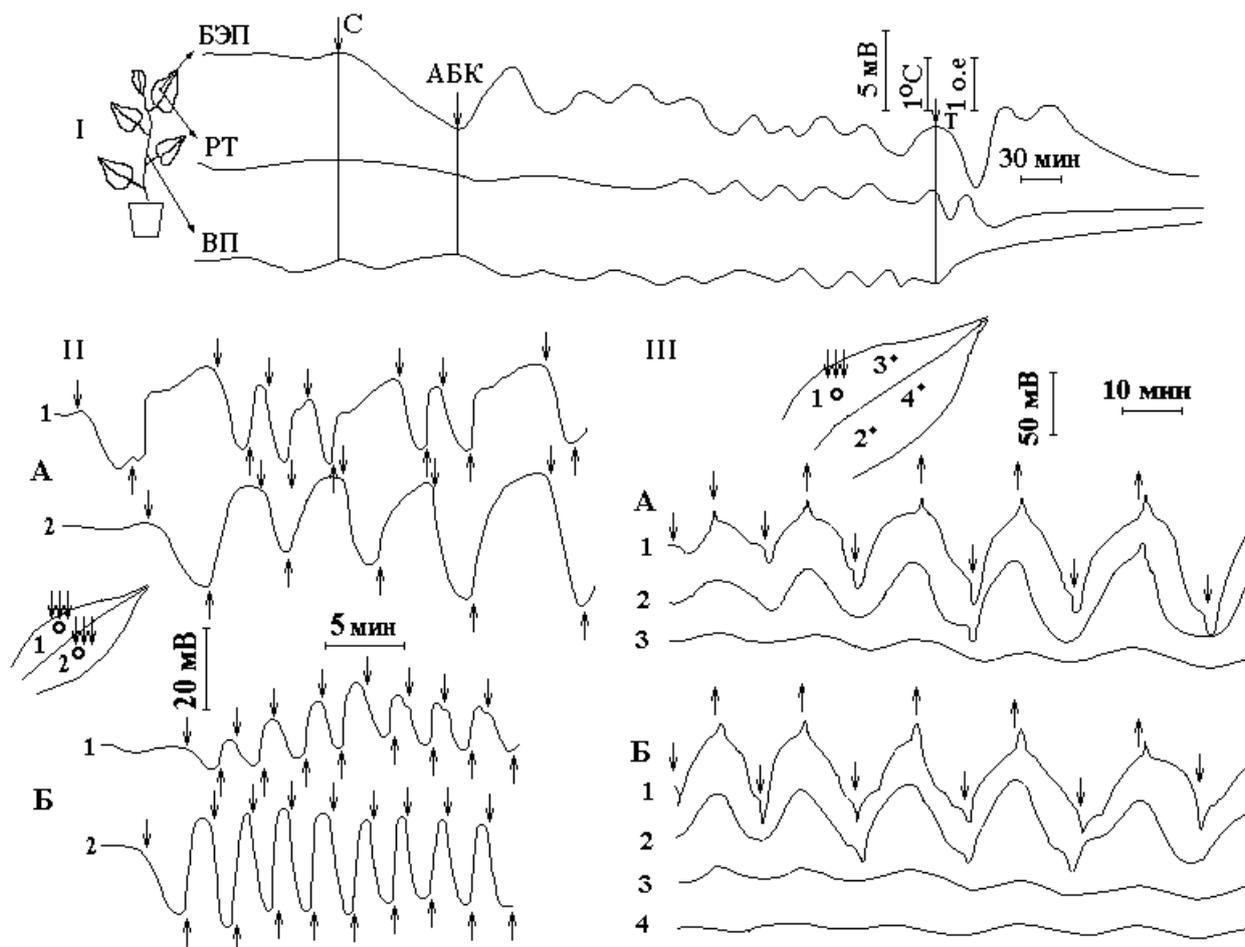


Рис. 1. Эффекты синхронизации электрических и физиологических осцилляторов у растительных объектов.

I – проросток фасоли: БЭП – потенциал; РТ – разность температур лист-воздух; ВП – водный поток по стеблю; С – свет; Т – темнота; АБК – абсцизовая кислота, воздействие на лист. II – лист кукурузы: 1, 2 – зоны локального воздействия лазерным излучением ( $\lambda = 633,8 \text{ нм}$ ,  $W = 3 \text{ мВт/см}^2$ ) и запись потенциалов. А, Б – номера опытов. III – аналогично II: 1 – зона воздействия. Стрелки – начало и конец воздействия.

С помощью методики воздействия на растения (кукурузы, фасоли, томата, сои) внешним фактором на разной частоте (или с разным периодом колебаний) и регистрации электрического отклика объекта был выявлен ряд резонансных частот (по максимальной амплитуде отклика), т.е. были идентифицированы некоторые эндогенные электрофизиологические осцилляторы растительного организма [4–6, 14, 15] (рис. 2). Так, при подаче света выявлено два осциллятора с резонансными периодами в  $30 \pm 0,3$  мин и  $20 \pm 0,1$  мин [4–6]. Первый идентифицирован как осциллятор, связанный с процессом фотосинтеза, так как такой же период имел осциллятор движения устьиц (по данным, полученным с помощью датчиков разности температур лист-воздух [4]), второй, предположительно, отвечает за процесс фоторегуляции. При ритмическом воздействии питательного раствора Кнопа на корни растения был выявлен осциллятор с резонансным периодом  $5 \pm 0,4$  мин [14, 15]. Возможно, он связан с процессом поглощения и выделения элементов минерального питания. Фактор периодического изменения давления водного потока в области корней позволил обнаружить осциллятор с резонансным периодом  $6 \pm 0,5$  мин [14, 15]. Такой период имела спонтанная ритмика водного потока по стеблю, измеренная датчиками водного потока [15]. На основе закономерностей вынужденных колебаний светозависимых БЭП на разных частотах была предложена упоминавшаяся модель и соответствующие этой модели уравнения [4–6]. Идентификация параметров уравнений по экспериментальным данным показала хорошее соответствие с данными, полученными другими авторами [16].

Таким образом, получено принципиальное доказательство положения, что растение является ансамблем электрофизиологических осцилляторов, связанных с такими физиологическими

процессами, как фотосинтез, минеральное питание и водный обмен растительного организма. Эти осцилляторы – низкочастотные. На прорастающих семенах нами выявлены низкочастотные электромагнитные осцилляторы [17]. Это согласуется с данными, что растущие клетки являются генераторами электромагнитного излучения [18, 19].

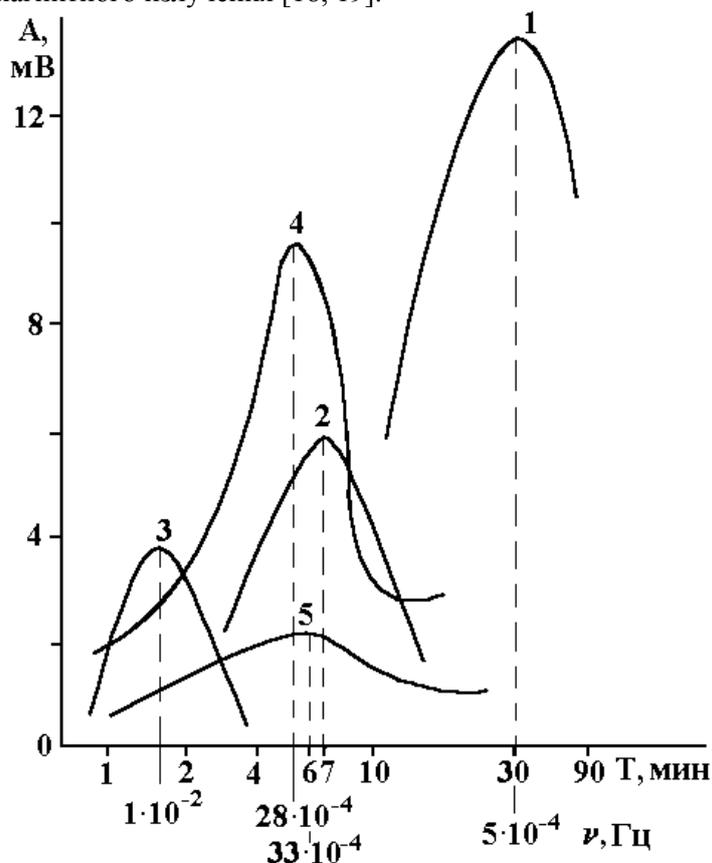


Рис. 2. Резонансный характер зависимости амплитуды колебаний биопотенциалов растений от частоты внешнего ритмического воздействия.

1, 2, 3 – свет: соя, сорт Кишиневский 116 (1, 2, 3), фасоль, сорт Нина (1, 2), кукуруза, гибрид М385 (1). 4 – питательный раствор (Кнопа): кукуруза, гибрид М385. 5 – давление водного потока: кукуруза, гибрид М385.

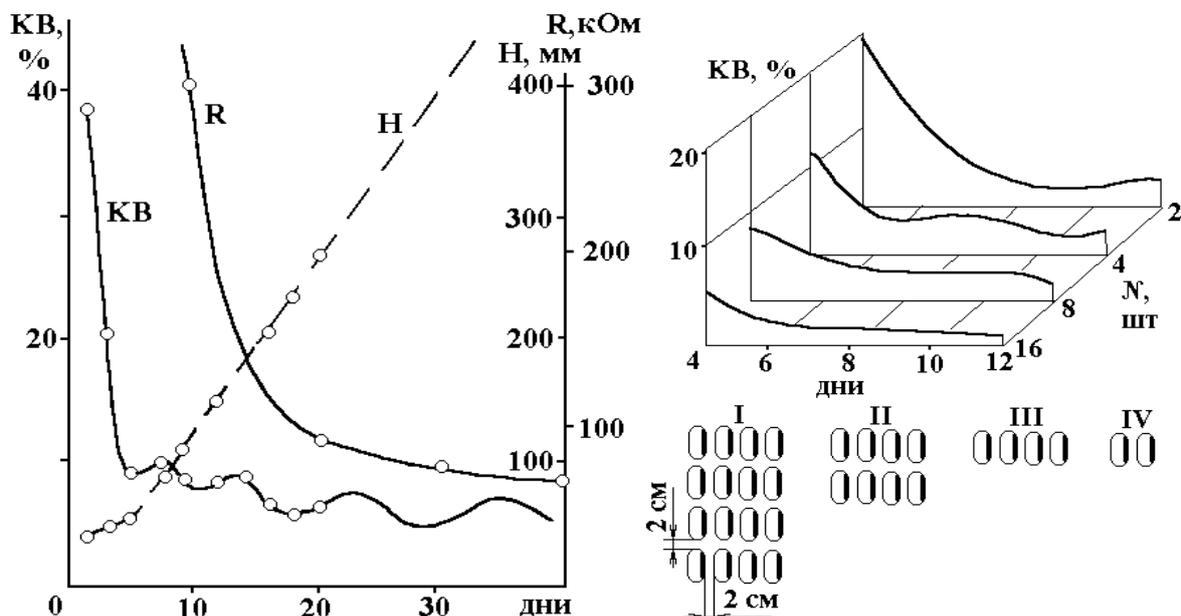
## 2. Фитоценоз как ансамбль электрофизиологических осцилляторов.

### 2.1. Факторы формирования функциональной и структурной целостности фитоценоза.

Положение о растительном объекте как ансамбле осцилляторов правомерно распространить и на сообщество растений – фитоценоз, где компонентами общей колебательной системы являются растения ценоза [17, 20–24]. Доказательство электромагнитного взаимодействия между компонентами ценоза было получено на уровне прорастающих семян – по критерию синхронизации БЭП у семян кукурузы в группе [7]. Показано, что зародыш семени является приемником эндогенных осцилляций БЭП семени-индуктора. Наличие единой системы в группе прорастающих семян подтверждается и способностью ее передавать электрический сигнал на все компоненты [7].

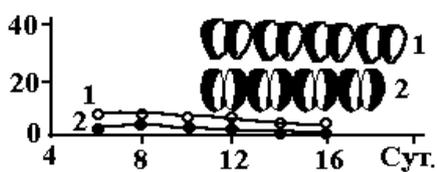
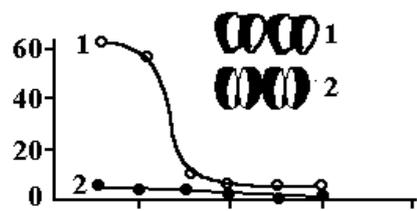
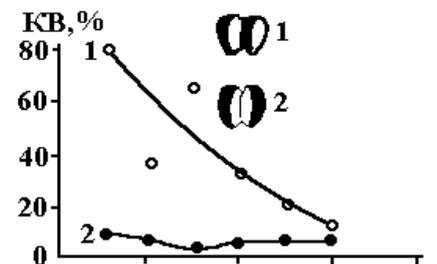
На уровне группы проростков выявлены факторы формирования функциональной и структурной целостности фитоценоза [24] (рис. 3). Первый фактор – возраст компонентов. Низкий коэффициент вариации (КВ) длины проростков, то есть высокая синхронизация их роста, показывает, что ценоз уже сформировался (синхронизация создает систему [25]) к 5-дневному возрасту проростков (рис. 3,а). С этого момента ускоряется и рост проростков (эффект группы по Титову [26]). Сопротивление корневых контактов ( $R$ ) проростков резко снижается только к 20-дневному возрасту проростков [20, 24], когда корни растений начинают тесно соприкасаться. Таким образом, функциональная целостность фитоценоза возникает задолго до его структурной целостности. В фитоценозе из двух проростков обращает на себя внимание ритмическое изменение КВ их длин, свидетельствующее о пульсирующем попеременном (противофазном) росте проростков (эффект “биения” роста [20, 24]), (рис. 3,а). Второй фактор – число компонентов. Фитоценоз начинает формироваться раньше в группе проростков с наибольшим их числом (рис. 3,б). Здесь создается и

более мощное общее биоэлектрическое поле. Третий фактор – ориентация компонентов. Фитоценоз возникает с самого начала опыта у пары проростков из семян, соприкасающихся зародышами. В варианте контакта “эндосперм-зародыш” фитоценоз возникает значительно позже. Вместе с тем эффект ориентации компонентов перестает работать с увеличением числа компонентов (рис. 3,в).



а

б



в

Рис. 3. Формирование функциональной и структурной целостности фитоценоза (на примере группы проростков кукурузы) в зависимости от возраста компонентов (а), их числа (б) и ориентации по отношению друг к другу (в).

*KV* – коэффициент вариации длины пары проростков; *R* – электрическое сопротивление (импеданс) корневых контактов пары проростков на частоте 200 Гц; *H* – длина проростков; I–IV – группы из 2, 4, 8, 16 семян; 1 – ориентация “зародыш-эндосперм”; 2 – ориентация “зародыш-эндосперм”.

## 2.2. Передача вынужденных и спонтанных колебаний потенциала от одного растения ценоза к другому растению

При подаче периодического светового фактора (период 7 мин) на одно из растений системы трех растений, соприкасающихся корнями (10-дневные проростки кукурузы, линия М167), обнаружен эффект передачи колебаний БЭП от освещенного растения неосвещенному [12] (рис. 4,а). Процесс установления колебаний БЭП на втором растении наступает через 8 часов после подачи света на первое растение. По теории колебаний наличие связи между осцилляторами приводит к

периодическому обмену энергии между ними [27]. Это получено в опыте с системами 8-дневных проростков кукурузы, линия F7 (рис. 4,б). О факте перераспределения энергии между элементами

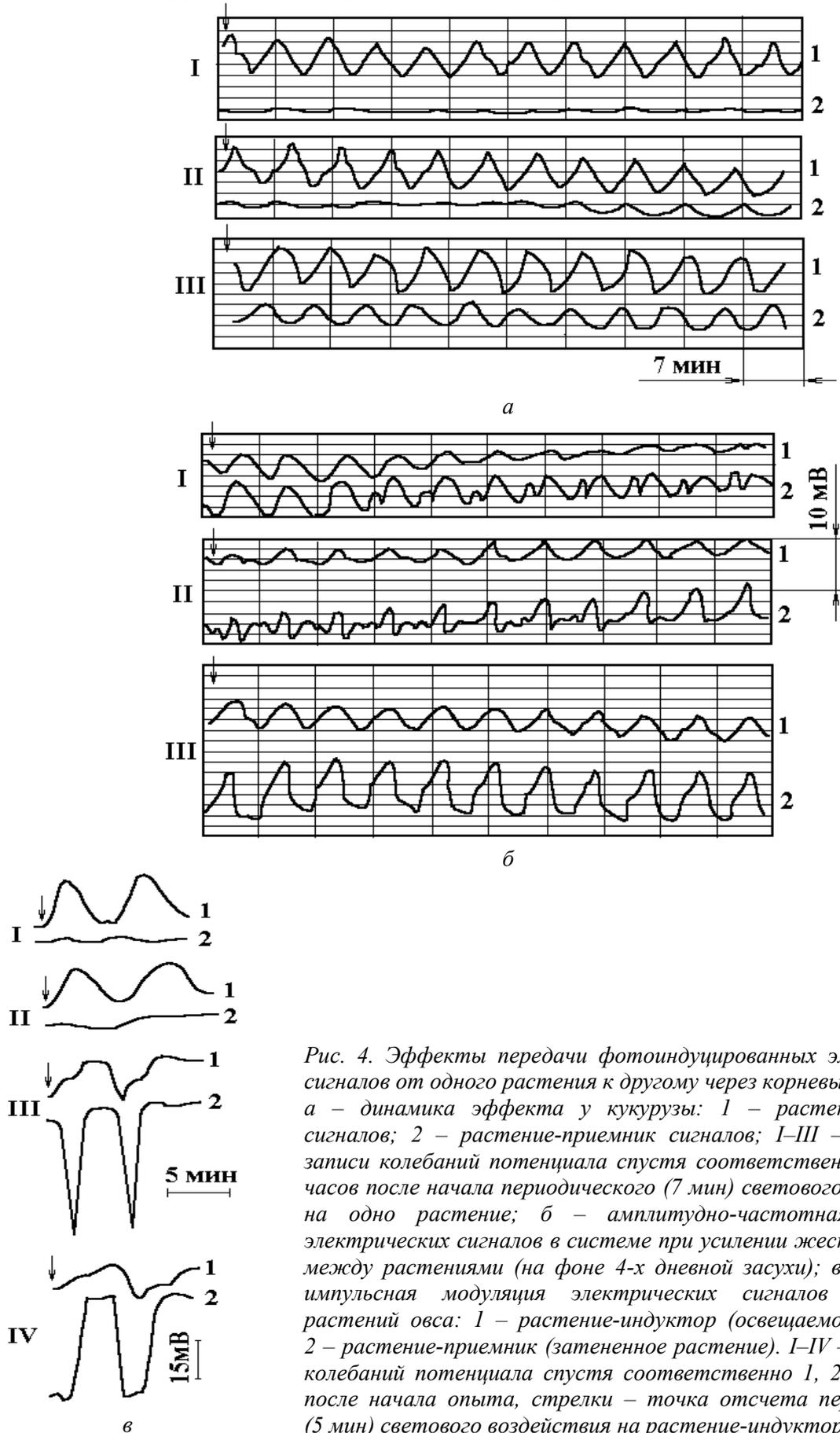


Рис. 4. Эффекты передачи фотоиндуцированных электрических сигналов от одного растения к другому через корневые контакты. а – динамика эффекта у кукурузы: 1 – растение-индуктор сигналов; 2 – растение-приемник сигналов; I–III – фрагменты записи колебаний потенциала спустя соответственно 0,5; 2 и 6 часов после начала периодического (7 мин) светового воздействия на одно растение; б – амплитудно-частотная модуляция электрических сигналов в системе при усилении жесткости связи между растениями (на фоне 4-х дневной засухи); в – широтно-импульсная модуляция электрических сигналов в системе растений овса: 1 – растение-индуктор (освещаемое растение); 2 – растение-приемник (затененное растение). I–IV – фрагменты колебаний потенциала спустя соответственно 1, 2, 6, 18 часов после начала опыта, стрелки – точка отсчета периодического (5 мин) светового воздействия на растение-индуктор.

системы свидетельствуют изменения величины и формы колебаний БЭП растений при засухе, когда усиливается жесткость связи между растениями (при поливе жесткость связи резко уменьшается и эффект исчезает). Следовательно, в принципиальном плане конкуренция между растениями ценоза представляет собой энергетический процесс. Эффект может быть объяснен резонансной активацией ионных каналов клеток корней вследствие внутреннего резонанса между элементами системы на частоте внешнего воздействия [28].

В системе из 8 растений овса (сорт Орловский, фаза колошения) обнаружен неизвестный ранее эффект кодирования информации путем преобразования электрического сигнала одной формы в другую, что обеспечивает повышение качества, точности и надежности управления. БЭП на растении-приемнике имеет не синусоидальную форму, как на растении-индукторе, а импульсную в виде ПД (рис. 4,в) [20]. Данный опыт – еще одно доказательство синергетического взаимодействия растений в ценозе посредством биоэлектрических полей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гунар И.И., Крастина Е.Е., Петров-Спиридонов А.Е. Ритмичность поглотительной и выделительной деятельности корней // Известия ТСХА. В.4. 1957. С. 181–206.
2. Марри Д. Нелинейные дифференциальные уравнения в биологии. М., 1983.
3. Шноль С.Э. Конформационные колебания макромолекул. В сб: Колебательные процессы в биологических и химических системах. М., 1967.
4. Шабала С.Н., Маслоброд С.Н. Осцилляторная модель высшего растения, описывающая закономерности вынужденных колебаний светозависимых биопотенциалов // Электронная обработка материалов. 1990. № 2. С. 76–80.
5. Шабала С.Н. Светоиндуцированные колебания биопотенциалов и их связь с некоторыми физиологическими процессами у растений. Автореф. дис. канд. биол. наук. Минск, 1989.
6. Shabala S.N. Leave bioelectric responses to rhythmical light Identification of the contributions from stomatal and mesophyll cells // Austral. Journ. Pl. Physiol. 1997. V. 24. P. 741–749.
7. Маслоброд С.Н. Электрофизиологическая полярность растений. Кишинев, 1973.
8. Jaffe L.F. Control of development by ionic currents // Membrane transduction mechanisms. Ed N.Y. Raven, 1979. P. 199–231.
9. Киляничук В.И., Земшман А.Я., Маслоброд С.Н. Транспорт радиофосфора у винограда. Кишинев, 1979.
10. Reich P.V. Loss of stomatal function in ageing hybrid poplar leaves // Ann. Bot. 1984. V.53. № 5. P. 691–698.
11. Маслоброд С.Н., Лысиков В.Н., Духовный А.И., Олоер Ф.Г. Электрофизиология кукурузы. Кишинев, 1978.
12. Шабала С.Н., Маслоброд С.Н., Жакотэ А.Г. Вынужденные колебания биопотенциала как характеристика взаимодействия растений в ценозе // Доклады АН СССР. 1988. Т. 299. № 3. С. 766–768.
13. Девятков Н.Д., Лысиков В.Н., Маслоброд С.Н., Макеева Н.С., Боярских Г.В. Исследование лазерного излучения как фактора, изменяющего электрическое состояние растений. В сб: Проблемы фотоэнергетики растений. Кишинев, 1975. В.3. С. 142–158.
14. Шабала С.Н., Шевченко В.А., Маслоброд С.Н., Третьяков Н.Н. Электрофизиологическая характеристика растений при периодическом изменении параметров среды в условиях водной культуры // Физиология и биохимия культурных растений. 1991. Т. 23. № 4. С. 386–390.
15. Шабала С.Н., Шевченко В.А., Маслоброд С.Н., Третьяков Н.Н. Эндогенные осцилляции и резонансные эффекты в условиях ритмических изменений параметров среды корнеобитания растений // Изв. Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1991. В.6. С. 87–97.
16. Лялин О.О. Электрические свойства клеток и межклеточных контактов высших растений. Автореф. дис. докт. биол. наук. М., 1980.
17. Шабала С.Н., Маслоброд С.Н. Электромагнитное взаимодействие в системе прорастающих семян // Электронная обработка материалов. 1993. № 6. С. 51–53.
18. Pohl H.A. Oscillating fields about growing cells // Inter.Jorn.Quantum.Chem. 1980. № 7. P. 411–431.
19. Pohl H.A. Natural oscillating fields of cells // Coherent Exitat.Biol.Syst., Berlin e.a., 1983. P. 199–210.
20. Шабала С.Н., Маслоброд С.Н. Некоторые биофизические особенности функционирования фитоценоза. В сб: Биоэлектрогенез и транспортные процессы у растений. Нижний Новгород, 1991. С. 58–65.

21. Маслоброд С.Н., Шабала С.Н., Балденкова С.И., Кузнецова И.И. Коэффициент вариации морфофизиологических параметров растений ценоза как критерий их устойчивости к загущению // Известия АН Республики Молдова, серия биол. и хим. наук. 1994. № 4. С. 15–19.
22. Маслоброд С.Н., Шабала С.Н., Балденкова С.И. Оценка конкурентоспособности растений в фитоценозе по степени синхронизации морфофизиологических параметров // Сельскохозяйственная биология. 1994. № 3. С. 81–88.
23. Маслоброд С.Н. Агрофитоценоз: феномен, концепции, механизмы. 1995. № 11. С. 23.
24. Маслоброд С.Н. Динамика формирования функциональной и структурной целостности фитоценоза (на примере группы проростков кукурузы). В сб: Lucrarile congresului al VII-lea (Jubilar) al Societatii stiintifice a geneticienilor din Republica Moldova, 10-11 Dec. 1998. P. 96–98.
25. Путилов А.А. Системообразующая функция синхронизации в живой природе. Новосибирск, 1980.
26. Титов Ю.В. Эффект группы у растений. Л., 1978.
27. Рабинович М.И., Трубецков А.И. Введение в теорию колебаний и волн. М., 1984.
28. Маркевич Н.И., Сельков Е.Е. Резонансные явления в мембранах, содержащих ионные каналы с двумя конформационными состояниями // Биофизика. 1983. Т.28. № 2. С. 260–265.

*Поступила 05.09.99*

### **Summary**

The paper shows original experimental and theoretical data on the second component of the problem concerning the spatial-temporal organization of the surface bioelectric potentials of the plant organism – electrophysiologic rhythmic activity. The whole plant has been established to present a complex of electric and physiologic oscillators, the former ones playing a dominant role. Some of these oscillators have been identified. The plant community (phytocenosis) has been shown to be a complex of electric and physiologic oscillators of the organism level making up a single oscillating system. The degree of adjustment and synchronization of these oscillators determines the phytocenosis unity as well as the competing capacity of its components (plants). It has been discovered at the level of seedlings that the functional unity of the phytocenosis (the unity of its bioelectric fields) appears before its structural unity (the unity at the expense of the unification of plant root systems) and depends on the age of the cenosis, the number of its components (plants) and their orientation towards each other. A transmission of the local spontaneous or induced rhythms of the bioelectric potentials through the plant or between the plants of the cenosis has been discovered. The phenomenon is accompanied by a gradually developing synchronization of the potential oscillations of the total object and by the change of their parameters when they move from one plant oscillator to the other, connected to the former one through the contacts of above – and underground organs.

---