

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**филиал федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Мурманский арктический государственный университет»
в г. Апатиты
(филиал МАГУ в г. Апатиты)**

КАФЕДРА ФИЗИКИ БИОЛОГИИ И ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОРОИДАЛЬНОГО
СОЛЕНОИДА НА ВЫСШИЕ РАСТЕНИЯ

Выполнил обучающийся 2 курса
Щеглов Глеб Андреевич
Направление подготовки 06.04.01 Биология,
Направленность (профиль): Общая биология
очная форма обучения
группа 2МБИО_АФ

Научный руководитель:
Смирнова Алена Анатольевна, канд. биол.
наук, доц. кафедры физики биологии и
инженерных технологий

Научный консультант:
Кашулин Петр Александрович, д-р. биол.
наук, главный научный сотрудник Полярно-
альпийского ботанического сада-института
им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН

г. Апатиты

2020 г

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РАСТЕНИЯ	7
1.1. Природа электромагнитных полей и их свойства	7
1.2. Общие сведения о процессе фотосинтеза.....	14
1.3. Факторы, влияющие на фотосинтез	15
1.4. Флуоресценция хлорофилла при фотосинтезе.	19
1.5. Флуориметрия как метод оценки физиологического состояния растений	25
1.6. Обзор аналогов.....	33
2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	40
2.1. Объект исследований.....	40
2.2. Предмет исследования.....	41
2.3. Экспериментальные методы	41
2.4. Показатели флуоресценции.....	41
2.5. Методы статистической обработки	42
3. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕКТОРНОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ВЫСШИЕ РАСТЕНИЯ.	43
3.1. Характеристики источника векторного потенциала	43
3.2. Расчетное значение векторного потенциала	44
3.3. Измерительная установка.....	45
3.4. Схема эксперимента	47
3.5. Результаты эксперимента	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	53
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	55
Приложение 1	62
Приложение 2	63

ВВЕДЕНИЕ

Растения имеют большое значение в биосфере земли, и составляет основу всех трофических цепей. Поэтому изменения, происходящие с растительным миром, могут отражаться и на живой природе и в том числе на человеке, как ее составляющей. При этом состояние растений на прямую зависит от условий и факторов окружающей среды.

В XXI веке всё больше растет количество электронных устройств, различных гаджетов и электрических сетей. Все они излучают электромагнитные поля. При этом действие полей на живые организмы остаётся изученной в не полной мере. Остается не понятным то, как поля действуют на живые организмы, механизмы воздействия.

Кроме того Солнце испускает на Землю колоссальные потоки частиц и энергии. Совершенно очевидно, что Солнце влияет на все живые организмы, в том числе на растения. Однако механизмы влияния электромагнитных излучений от Солнца также изучены недостаточно.

Существуют различные агенты связи между Солнцем и Землей. Одним из таких агентов является магнитного поля. Одной из характеристик магнитного поля, описывающая его, является векторный потенциал, который, согласно работам Аронова и Бома 1959г. [1] и Феймана [2], может быть не только расчетной характеристикой, но и иметь физический смысл.

Геофизики в своих работах часто используют именно эту характеристику для описания магнитного поля. Влияние данного параметра на живые организмы практически не исследовано, так как имеются сложности в изучении связанные с наличием естественного фона векторного потенциала магнитного поля от Солнечной активности.

Земля представляет собой большой магнит, на полюсах которого увеличивается напряжённость магнитного поля Земли. Увеличение напряженности приводит к тому, что потоки частиц и энергии

притягиваются к полюсам. Отсюда можно сделать вывод о том, что вблизи полюсов Солнце будет оказывать большее влияние на живые организмы. Мы проживаем в Мурманской области, на севере, в непосредственной близости от магнитных полюсов Земли, поэтому в наших регионах изучение такого влияния наиболее актуально.

Из выше сказанного можно сделать вывод о том, что влияние электромагнитных полей на растения изучено слабо и является актуальной проблемой в фундаментальной науке. А изучение непосредственно влияния векторного потенциала, как одной из характеристик магнитного поля, является новым направлением и задает новизну данному исследованию.

Цель данной работы заключается в изучении влияния электромагнитных полей и векторного потенциала, как характеристики магнитного поля, созданного тороидальным соленоидом, на показатели флюоресценции, по которым оценивалось состояние Перексии шиповой, как представителя высших растений.

Задачи, решенные в рамках выпускной квалификационной работы:

- Изучение и обобщение литературы и имеющихся исследований по теме влияния электромагнитных полей на растения;
- Планирование и проведение экспериментов по воздействию векторного потенциала на растения;
- Анализ полученных в ходе экспериментов данных и подведение итогов по проделанной работе.

Объектом исследования является растение Переския шиповая (*Pereskia aculeata*). Также рассмотрено влияние на Фигус Бенджамина (*Ficus benjamina*) и Сансевиерия трёхполосная (*Sansevieria trifasciata*).

Предметом работы служит влияние векторного потенциала магнитного поля тороидальной катушки соленоида на растения, регистрируемые за счет измерения показателей фотосинтеза растений.

В работе применены экспериментальные методы работы, в рамках которых на растения оказывал воздействие векторный потенциал, создаваемый тороидальным соленоидом. В растениях фиксировались показатели флюоресценции.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения и трех глав. Введение содержит актуальность работы, ее цель и задачи и краткое описание. В первой главе рассмотрены теоретические аспекты влияния электромагнитных полей на растения и приведен обзор исследований на данную тему. Во второй главе описаны материалы и методы исследования, примененные в данной работе. В третьей главе подробно описана экспериментальная часть, в которой представлена характеристика источника излучения, рассчитана интенсивность излучения, описан измерительный прибор, схема эксперимента и представлены их результаты. Далее представлено заключение с основными выводами и список использованных источников, содержащий 110 источников.

Положения, выносимые на защиту:

1. Влияние, оказываемое на растения катушкой, уменьшается с расстоянием и падением величины векторного потенциала, как для двух видов, находящихся на разном расстоянии от источника, так и для разных листьев одного растения.

2. В период воздействия векторного потенциала отмечен следующий эффект: все показатели флюоресценции испытывают колебания в течение двух дней с момента начала воздействия. После чего показатели стабилизируются и имеют более высокое значение по сравнению с показателями до облучения. Данный эффект может говорить о том, что интенсивность фотосинтеза возрастает. После окончания воздействия показатели флюоресценции снова выходят из равновесия и колеблются, сохраняя повышенное значение.

3. Отмечено, что минимальная флюоресценция F_0 увеличивается

во время воздействия на 10%. Для максимальной флюоресценции F_m рост показателя составил 7%.

4. Величина переменной флюоресценции F_v возрастает на 6%. Отсюда можно сделать вывод, что фотосинтетическая активность объекта увеличилась.

5. После выключения показатели меняются в пределах 0,55%, что вкладывается в границы статистической погрешности. Из этого можно сделать вывод, что изменения сохраняются после прекращения воздействия.

Моим научным руководителем от университета стала кандидат биологических наук Смирнова Алена Анатольевна.

Работа проводилась на базе сектора физиологии растений, Лаборатории интродукции и акклиматизации растений, Полярно-альпийского ботанического сада-института (ПАБСИ) им. Н.А. Кольского научного центра Российской академии наук. Научным консультантом выступил доктор биологических наук Кашулин Петр Александрович.

По итогам работы была издана 1 публикация:

Экспериментальное выяснение биологической активности векторного потенциала электромагнитного поля / П.А. Кашулин, Н.В. Калачева, Г.А. Щеглов // Сборник научных трудов VI съезда биофизиков России: в 2 томах / отв. ред.: Рубин А.Б., Ризниченко Г.Ю., Анашкина А.А. – Краснодар: Полиграфическое объединение «Плехановец», 2019. – Т. 2 – 396 с. – С. 40

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РАСТЕНИЯ

1.1. Природа электромагнитных полей и их свойства

Магнитные поля и их свойства

Электрические заряды создают электрические поля, интенсивность которых уменьшается с увеличением расстояния до заряда. Аналогично магнитные поля создаются магнитами и токами заряженных частиц. Эти поля можно обнаружить по воздействию на расположенные в полях проводники с током и магниты [3].

Магнитное поле воздействует на заряды, перемещающиеся в нем и на тела с магнитным моментом независимо от их движения. А электрические поля воздействует на все электрические заряды, и перемещающиеся в нем, и стационарные заряды.

Для описания магнитных полей, необходимо учитывать характеристики рассматриваемого тока. Потому что воздействие магнитных полей на токи связано с направлением токов, положения и формой проводника.

Направление магнитных полей можно фиксировать стрелкой компаса, расположенной в области действия магнитных сил. Стрелка будет направлена по линиям магнитной индукции. Силы, воздействующие на полюса стрелки, будут одинаковы, потому что полюса будут рядом и место воздействует едино для полюсов. В результате чего силы развернут ось стрелки, располагая полюса стрелки подобно направлению поля [3].

Чтобы вычислить величину магнитного поля можно применить рамку с током. Она воспринимает вращающий момент поля, потому что на нее воздействуют две силы, если она расположена в магнитном поле. Согласно формуле(1.1.1.) рассчитывается вращающий момент, зависящий

от конфигурации рамки и характеристик данного поля.

$$M = [p_m B] \quad (1.1.1)$$

где

p_m — вектор магнитного момента рамки;

\vec{B} — вектор магнитной индукции.

Если мы будем размещать различные рамки с отличающимися характеристиками и размерами, то будем получать на них соответственно разные вращающие моменты. Но отношение M_{\max}/p_m , где M_{\max} максимальный вращающий момент, будет одинаковым для любого контура, поэтому им можно описать магнитное поле. Это соотношение описывается магнитной индукцией $\vec{B} = M_{\max}/p_m$ [3].

В условиях, когда рамка перпендикулярна линиям магнитной индукции, мы будем наблюдать на ней воздействие максимального вращательного момента. Такая ситуация верна в том случае, если мы рассматриваем однородное магнитное поле.

Магнитное поле является силовым, также как и электрическое, поэтому оно задается линиями магнитной индукции, касательные к которым соответствуют направлению вектора магнитной индукции в каждой точке поля. С помощью правила правого винта мы можем узнать направление силовых линий этого поля.

Линии магнитной индукции всегда окружают источник магнитного поля и всегда замкнуты на нем. Было показано, что эти линии находятся не только внутри соленоида, но и протекают внутри магнитов и являются продолжением линий, находящихся снаружи магнита. Таким образом, данные линии непрерывны и протекают как внутри, так и снаружи в магнитах и соленоидах [3].

Поле тороида

Тороид описывает систему равных круговых токов, тесно навитых на каркас формой тора (рис. 1). Линии магнитной индукции здесь представляют форму окружностей, центры которых находятся на оси тороида. Рассчитаем циркуляцию вектора \vec{B} по контуру радиуса r , соответствующую с этими окружностями. Во всех местах этого контура величина магнитной индукции равно и вектор \vec{B} направлен по направлению касательной. [4] Следовательно, $\vec{B}_l = \vec{B}$ и тут

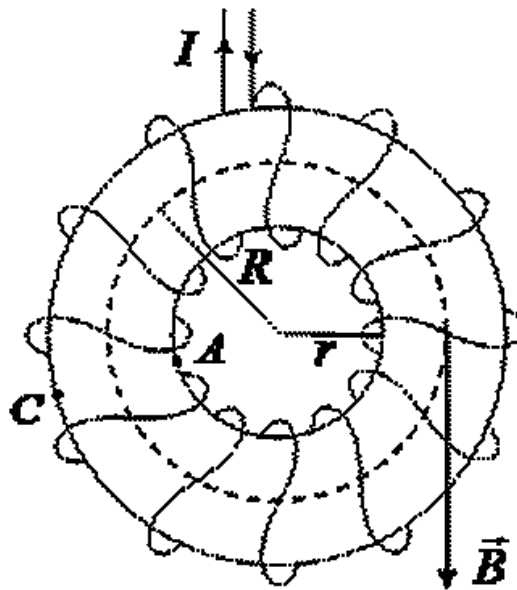


Рис. 1. Схема тороидального соленоида

$$\oint_L \vec{B}_l dl = \vec{B} \int_L dl = \vec{B} * 2\pi r \quad (1.1.2)$$

Воспользуемся законом полного тока (1.1.3) и учтем, токи:

$$\sum_{i=1}^N I_i = NI \quad (1.1.3)$$

Токи, окружающие контуром однонаправленны, т.е., где N – количество витков тороида. Тут из формулы (1.1.2) получаем:

$$\vec{B} * 2\pi r = \mu_0 NI \quad (1.1.4)$$

Отсюда находим:

$$\vec{B} * 2\pi r = \mu_0 \frac{NI}{2\pi r} \quad (1.1.5)$$

Всё поле тороида сосредоточено внутри катушки, однако оно не является однородным. В различных сечениях тороида направление вектора \vec{B} является различным. Помимо того, в пределах некоторой области модуль вектора \vec{B} в различных местах имеет разное значение. Близ внутренней поверхности (в точке А) индукция имеет максимальную величину, близко внешней (в точке С) – минимально. [4]

Количество витков тороида можно выразить его длиной, по средней линии и плотностью намотки: $N=2\pi Rn$. Тут формула (1.1.6) станет иметь вид:

$$\vec{B} = \mu_0 * n * I * \frac{R}{r} \quad (1.1.6)$$

где

R – радиус средней линии.

Когда диаметр витка во много раз меньше радиуса средней линии, то во всех точках в тороиде.

$$\frac{R}{r} \approx 1 \quad (1.1.7)$$

Тогда формула (1.1.6) соответствует выражению бесконечного соленоида:

$$\vec{B} = \mu_0 * n * I \quad (1.1.8)$$

Это обозначает, что модуль вектора \vec{B} везде внутри такого тороида заключает равное значение, а в пределах данного поперечного сечения поле однородно. [3]

Когда контур проходит вне катушки, то токов он не окружает и по выражению

$$\vec{B} * 2\pi r = 0 \quad (1.1.9)$$

А это обозначает, что магнитного поля за пределами тороида нет.

Эффект Аронова Бома

Эффект Аронова - Бома — квантовое явление, заключающееся в том, что на частицу с электрическим зарядом либо магнитным моментом электромагнитное поле действует даже в тех областях, в которых индукция магнитного поля B и напряжённость электрического поля E имеют значение ноль. Однако, не нулевые скалярный или/и векторный потенциал электромагнитного поля. Когда не нулевой электромагнитный потенциал.

В 1939 и 1949 г. [5] был предположен, затем открыт в 1959 г. [6] эффект, в дальнейшем названный эффектом Аронова-Бома (ЭАБ). Суть данного явления заключается в том, что на заряженную частицу магнитное поле оказывает влияние даже в тех областях, в которых магнитная индукция равна нулю, то есть поля нет. Но присутствует векторный или скалярный потенциал этого поля [7,1]. Нужным положением существования ЭАБ является наличие постоянных для калибровочных преобразований потенциалов, не делающих электромагнитных полей. Поскольку такие потенциалы должны соответствовать (1.1.10):

$$A^0 = \text{grad}\psi, \quad \varphi_0 = -\frac{1}{c} * \frac{\partial\psi}{\partial t} \quad (1.1.10)$$

Векторный потенциал магнитного поля соленоида

Векторный потенциал — в электродинамике, векторный потенциал, его ротор подобен магнитной индукции [2]:

$$\vec{B} = \text{rot}A = \nabla \times A \quad (1.1.11)$$

Часто имеется в виду, что векторный потенциал — характеристика, не содержащая определенного физического смысла, используемая только ради математических расчетов. Впрочем, удалось поставить опыты, демонстрирующие непосредственное измерение векторного потенциала. Векторный потенциал раскрывает плотную связь с представлением импульса, подобно тому, как представление энергии связано с электростатическим потенциалом [2].

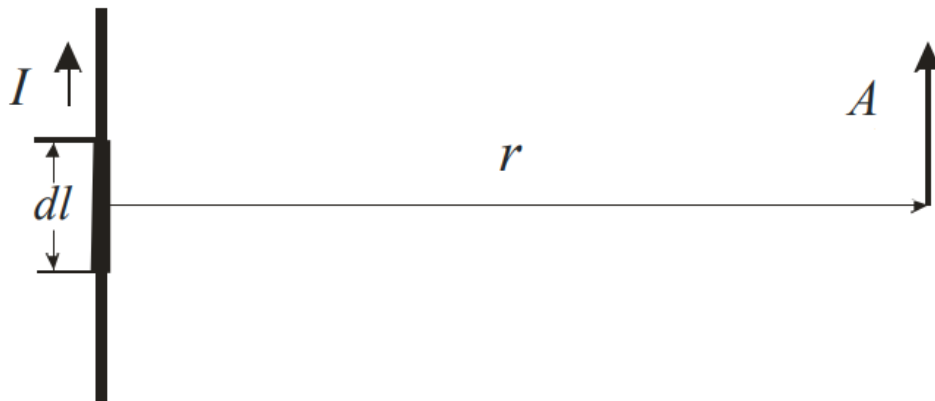


Рис. 2. Образование векторного потенциала частью проводника dl , с током I .

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{dl}{r} \quad (1.1.12)$$

Где

μ_0 – магнитная постоянная $1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$;

I – сила тока;

dl – длина проводника;

r – расстояние до проводника с током.

В данном выражении видно, что величина векторного потенциала уменьшается с увеличением расстояния до источника излучения, что свидетельствует о его природе излучения.

1.2. Общие сведения о процессе фотосинтеза

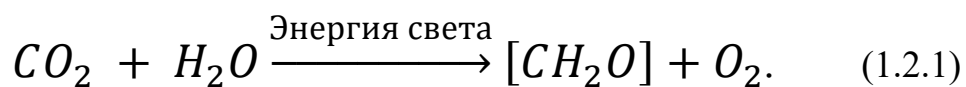
Благодаря наличию света запускаются реакции, в результате которых запасается энергия в виде сложных молекул сахара [8].

Нужно понимать то, что энергия, которую запасают растения в виде сахаров - это та же солнечная энергия, только в другой ионной форме. Благодаря процессам фотосинтеза световая энергия трансформируется в химические соединения запасующие энергию. Трансформация световой энергии в химическую энергию происходит за счет работы молекул хлорофилла в мембранах хлоропластов вместе с другими молекулами [8].

Фотосинтез подразделяется на световую стадию и темновую. В световых реакциях электроны переходят от одного соединения к другому вдоль электрон-транспортной цепи.

Полученная энергия идет на создание молекул АТФ и возобновление НАДФ. В результате реакции создаются молекулы водорода и кислорода. При этом кислород является побочным продуктом [8].

В ходе темновой фазы фотосинтеза АТФ и водород, связанный с НАДФ применяются для восстановления диоксида углерода до 3С-сахара. Уравнение данного процесса примет следующий вид (1.2.1):



1.3. Факторы, влияющие на фотосинтез

Главными внешними факторами, оказывающим влияние на продуктивность фотосинтеза, являются освещенность, концентрация диоксида углерода и температура. Прежде при усилении любого из факторов происходит линейное нарастание интенсивности фотосинтеза. После по мере того, как иная причина или факторы становятся лимитирующими, выходит снижение интенсивности и стабильность реакции [9].

Дальше будем рассчитывать, что меняется только один, рассматриваемый, фактор, а прочие находятся в оптимуме.

Освещенность

При малой освещенности продуктивность фотосинтеза увеличивается сообразно усилению числа падающего света. Прогрессивно под воздействием других факторов интенсивность фотосинтеза уменьшается. Освещенность в светлый летний день имеет значение порядка 100 000 люкс (10 000 фут-кандел), тогда как для правильного процесса фотосинтеза нужна освещенность около 10 000 люкс. Следовательно, для большинства растений, исключая растения, находящихся в тени, освещенность не является основным лимитирующим фактором фотосинтеза. Чрезвычайно большие значения интенсивности света могут создавать обесцвечивание хлорофилла и снижать интенсивность реакций фотосинтеза. Кроме того растения, непрерывно находящиеся в близких условиях, часто прекрасно к ним адаптированы; скажем, листья у них покрыты толстой кутикулой либо часто опушены [9].

Концентрация диоксида углерода

Главным лимитирующим фактором в нормальных условиях является диоксид углерода. Он необходим в темновой фазе фотосинтеза для синтеза сахара. Атмосфера включает в себя от 0,03 до 0,04% диоксида углерода.

Повышение концентрации этого газа приводит к увеличению интенсивности фотосинтеза. На непродолжительном периоде можно поддерживать концентрацию порядка 0,5%, однако в долгосрочной перспективе такая концентрация пагубна для растений. Показано, что наиболее благоприятными условиями является концентрация диоксида углерода 0,1%. Часть агрокультур выращивают именно в таких условиях, например, томаты [9].

Температура

Процессы, проходящие в темновой и частично световой фазе, регулируются ферментами, которые чувствительны к изменению температур. Поэтому температура является одним из лимитирующих факторов фотосинтетических реакций. Так для большинства растений умеренного климата оптимальным значением температуры является 25 °С. Имеются данные, по которым интенсивность реакций возрастает в два раза на каждые 10 °С вплоть до 35 °С, однако есть и другие данные, показывающие, что при температуре 25 °С растения развиваются быстрее всего [9].

Концентрация хлорофилла

Концентрация хлорофилла не является лимитирующим фактором, однако может служить индикатором других пагубных для растений процессов. Например, старение, нехватка микроэлементов, различные болезни растений. Так, например, процесс пожелтения листьев называется хлорозом, а пожелтевший лист хлоротичным. Такие желтые пятна могут свидетельствовать о болезни или нехватки элементов таких, как магний, азот и железо, присутствующие в молекуле хлорофилла. Кроме того желтые пятна могут вызываться дефицитом освещенности. Это связано с тем, что наличие света необходимо в финальных стадиях процесса синтеза хлорофилла [9].

Специфические ингибиторы

Когда растение не может фотосинтезировать оно погибает. На этом основано действие всех гербицидов, например ДХММ (ди хлор фенил ди метил мочевины). Этот гербицид меняет процесс тока электронов в растении, прекращая световые реакции. Изучение воздействий этого препарата дало большую роль в исследовании фотосинтетических процессов [9].

Вода

Самым важным соединением для фотосинтеза является вода, но при этом чрезвычайно сложно оценить ее вклад в данный процесс, так как она участвует во всех биологических процессах организма. Но изучая количество воды, которая синтезируется растением в процессе фотосинтеза в условиях недостатка влаги, можно сделать выводы по вкладу воды в фотосинтез.

Так было показано, что незначительный недостаток воды может привести к уменьшению урожая сельскохозяйственных культур. Хотя причины изучены не до конца, уже известно, что это связано с пересыханием, в результате чего закрываются устьица, в результате уменьшается доступ углекислого газа для фотосинтеза. Так же замечено, что в результате недостатка воды накапливается абсцизовая кислота, который замедляет процессы роста растений [9].

Загрязнение окружающей среды

В результате выбросов газов в атмосферу от промышленности увеличивается концентрация диоксида серы и озона, которые даже при небольшом возрастании концентрации пагубно влияют на растения и очень опасны для их листьев, хотя до конца механизмы воздействия этих газов не изучены. Например, показано, что лишайник имеет высокую чувствительность к диоксиду серы, так как сажа забивает устьица растения, снижает прозрачность эпидермиса листьев. А зерновые культуры

могут терять до 15% биомассы [9].

Электромагнитные волны

В настоящее время всё больше растёт количество искусственных источников электромагнитного излучения в виде электроприборов и линий электропередач. Однако, нет понимания каким образом излучения данных источников влияет на процессы фотосинтеза растений.

1.4. Флюоресценция хлорофилла при фотосинтезе.

Механизмы испускания флюоресценции хлорофиллом.

Вещества способны испускать сияние в оптической спектральной области при нагреве [10-12] либо за счет люминесценции. По определению словаря терминов IUPAC [13] люминесценция – это спонтанное испускания радиации электронно- либо вибрационно- возбужденными молекулярными частицами либо вибрационно-возбужденными, однако не прибывающими в тепловом равновесии с окружающей средой молекулярными частицами.

По определению С.И. Вавилова люминесценцией тела в определенной спектральной области именуется излишком излучения над температурным при условии, что это лишнее излучение имеет ограниченную длительность, превосходящей период световых колебаний. В начале этой формулировки Вавилов разделяет люминесценцию с теплового излучения, а дальше – от рассеянного объектами света. Люминесценция испускается возбужденными молекулами, при этом источник энергии возбуждения может являться разным [10].

В зависимости от типа энергии используемой при возбуждении – могут быть разные типы люминесценции.

Наиболее частый тип люминесценции – фотолюминесценция. При фотолюминесценции источником энергии возбуждения является поглощенная энергия ультрафиолетового света, видимого, либо инфракрасного [13]. Во время поглощения фотона молекула переходит в возбужденное состояние. На диаграмме Яблонского, схематично описаны электронные и вибрационные энергетические уровни молекул и их переходы (рис. 3).

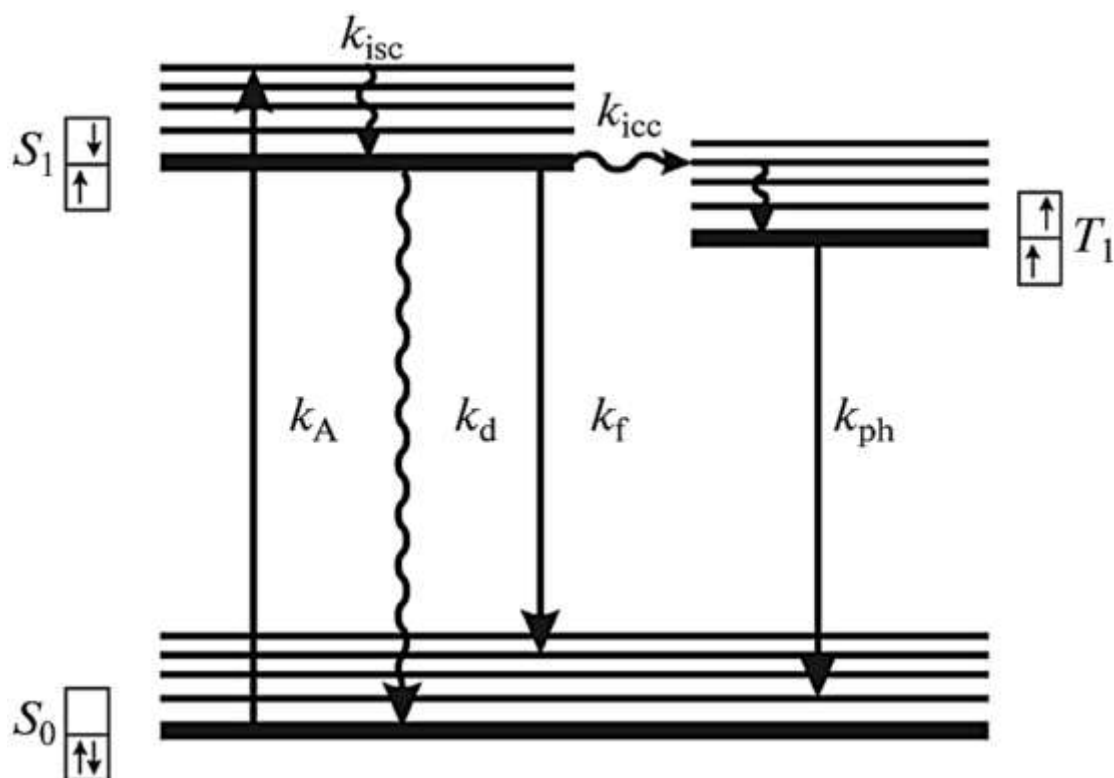


Рис. 3. Диаграмма Яблонского.

Жирные горизонтальные линии показывают уровни энергии главного 0 либо возбужденного 1 положения молекулы. S и T обозначены синглетный и триплетный уровень соответственно. А стрелками в двойных квадратах показаны ориентации спинового момента электрона на главной и возбужденной орбитали. k_f , k_d , k_A , k_{isc} , k_{icc} , k_{ph} обозначены постоянные скоростей фотофизических процессов поглощения света, внутреннего изменения энергии возбуждения во флуоресценции, теплоту, фосфоресценции, интеркомбинационной и внутрисистемной конверсии, сопровождающейся обращением спинового момента возбужденного электрона, соответственно.

Главным пигментом в большинстве растений является молекула хлорофилла А [14]. Молекулы хлорофилла А, ассоциированные с антенными комплексами исполняют светособирающую функцию.

Квантовый выход флуоресценции φ_f , зависит от совокупности

констант скоростей излучающего процесса и всех безызлучательных процессов дезактивации (1.4.1):

$$\varphi_f = \frac{k_f}{k_f + k_d + k_p + k_t + k_{ic} + k_q [Q]} \quad (1.4.1)$$

Где символами $k_f, k_d, k_p, k_t, k_{ic}, k_q$ изображены константы скоростей флюоресценции, внутренней конверсии, фотохимической реакции, миграции возбуждения между близкими молекулами, интеркомбинационной конверсии и тушения возбуждения молекулами тушителей. Период жизни возбужденного состояния молекулы, который будет равен и экспериментально рассчитываемой скорости затухания флюоресценции (τ), равен сумме скорости процессов дезактивации энергии возбуждения молекулы (1.4.2):

$$\tau = \frac{1}{k_f + k_d + k_p + k_t + k_{ic} + k_q [Q]} \quad (1.4.2)$$

Активность излучения флюоресценции пропорциональна скорости поглощения света молекулами пигмента (I_a) и квантовому выходу флюоресценции (φ_f) (1.4.3):

$$F = I_a \varphi_f \quad (1.4.3)$$

Флюоресценция при комнатной температуре в основном испускается антенными комплексами Фотосистемы II (ФС II), а вклад Фотосистемы I (ФС I) имеет значение 5–30% для СЗ растений [15], однако может сильно возрастать при малых температурах, либо при регистрации испускания длинноволнового света.

Большинство квантов флюоресценции испускается антенной комплекса – белками CP43 и CP47 [16]. Все не связанные с фотохимической реакцией процессы сгруппированы под одним названием “нефотохимическое рассеивание” либо “нефотохимическое тушение” с константой скорости k_N . И фотохимическая реакция в реакционном центре ФС II с константой скорости k_P (1.4.4):

$$F = I_a \frac{k_f}{k_N + k_P} \quad (1.4.4)$$

Константа нефотохимического тушения энергии возбуждения описывает собой сумму констант скоростей флюоресценции, внутренней конверсии, диссипации возбуждения молекулами тушителей либо миграции энергии возбуждения к ФС I (k_T):

$$k_N = \sum k_i = k_f + k_d + k_T + k_q [Q] \quad (1.4.5)$$

Вопреки тому, что флюоресценция испускается главным образом молекулами антенного хлорофилла А в ФС II, исходя из уравнений (1.4.4 и 1.4.5) интенсивность излучения связана с соотношением скоростей расходования энергии возбуждения в каждой из молекул, в антенном комплексе, ее перераспределения среди фотосистем, и скорости фотохимических процессов.

Динамика переменной флюоресценции – индукционные кривые.

Флюоресценция хлорофилла А описывается вторичным излучением световой энергии, принятой молекулой хлорофилла.

Доля поглощенной энергии, уходящей на флюоресценцию в процессе фотосинтеза мала и, хоть и составляет около 3-5%, может дать нам важную

информацию. Флюоресценция хлорофилла А (Фл) в фотосинтезе играет роль индикатора энергии поглощаемых квантов света, которые не использовались в процессе фотосинтеза. При правильной и эффективной работе фотосинтетических реакций продуктивность Фл хлорофилла А сохраняется низкой, все изменения в процессе фотосинтеза снижает его эффективность, это приводит к сильному возрастанию Фл [17].

В присутствии света у фотосинтезирующих объектов, заранее адаптированных к темноте, скорость флюоресценции меняется, испытывая характерную динамику, называемую индукцией переменной флюоресценции [18] либо кривыми Каутского [19]. Изучение флюоресценции и индукционных кривых (ИК) досконально рассмотрено в [17, 20].

На рисунке 4 представлены индукционные кривые переменной флюоресценции адаптированных к темноте в течение 30 минут листьев фасоли, в разных периодах времени. Главная линия описывает индукционную кривую в полулогарифмическом масштабе. Во вставках показаны индукционные кривые, представленные в линейном масштабе: а – показатель флюоресценции за первые 40 мс измерения; б – значение переменной флюоресценции на протяжении 10 минут.

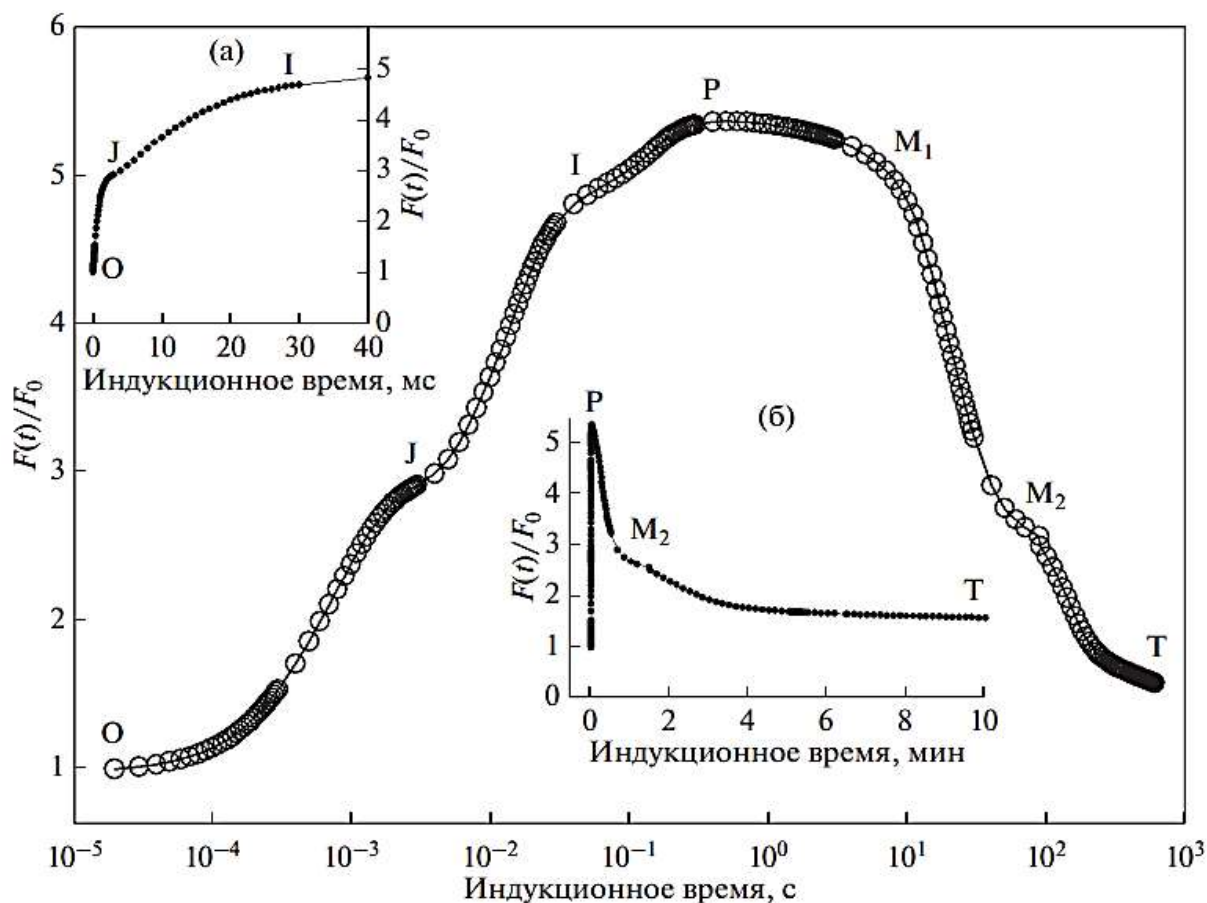


Рис. 4. Индукционные кривые переменной флуоресценции адаптированных к темноте растений

Основы изучения кинетики переменной части флуоресценции положено Duysens и Sweers [21]. По их предположению, затем поддержанной Butler [22], реакционные центры ФС II могут быть в двух разных положениях, отличающихся квантовым выходом флуоресценции – «открытом» и «закрытом». Положение реакционного центра называют открытым, когда возбуждение реакционного центра способно привести к фотохимической реакции. Тогда поглощенная энергия кванта света используется в фотосинтезе и квантовый выход флуоресценции невысокий. Первопричиной «закрывания» реакционного центра служит восстановление хинонового акцептора электронов в ФС II, QA.

На рисунке 5 представлены типичный вид индукционной кривой

флюоресценции хлорофилла и разъяснение процессов, обозначающих переменную интенсивности флюоресценции.

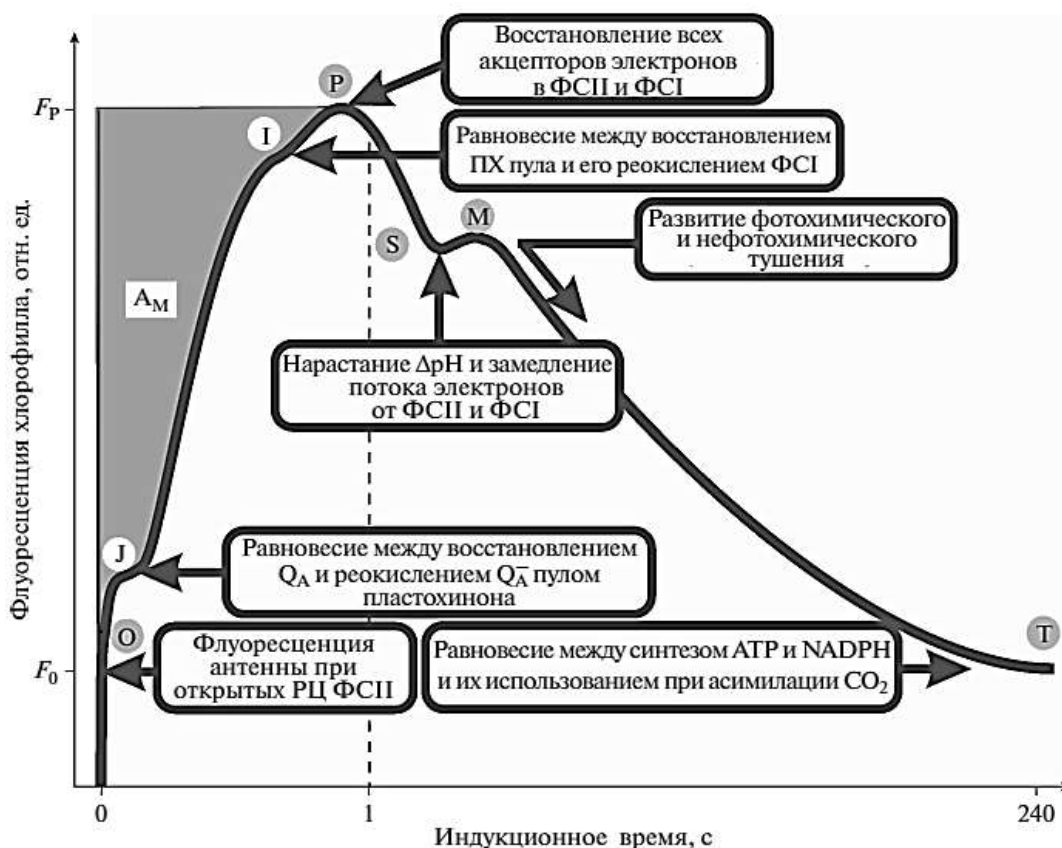


Рис. 5. Типовой вид индукционной кривой

1.5. Флуориметрия как метод оценки физиологического состояния растений

Для рассмотрения поведения растений в различных условиях окружающей среды необходимо наличие точных методов оценки происходящих в растении реакций. Проверенным источником информации о состоянии растения может быть фотосинтетический аппарат и его адаптация на влияние стрессовых факторов. На данный момент самым информативным способом мониторинга, основанным на анализе биофизических параметров растений, служит измерение, и анализ испускаемого растениями светового излучения флюоресценции хлорофилла А. На данный момент создаётся большое число моделей

флуориметров, для применения которых не нужна специализированная подготовка. Однако для того, чтобы верно интерпретировать получаемые данные, нужно обладать определенными знаниями для представления показываемых прибором параметров в нужную информацию о состоянии изучаемого растения.

Флюоресценция хлорофилла также применялась с целью прогнозирования урожайности при разных экологических условиях [23]. В настоящее время показатели флюоресценции хлорофилла применяются в качестве критериев оценки в селекционных программах с целью улучшения селекции растений [24].

Дальше представлено, какие методы измерения флюоресценции применяются в настоящее время.

Методы измерения флюоресценции хлорофилла

С целью измерения флюоресценции хлорофилла применяют спектрофлуориметры, механизм измерения которых строится на эмиссионной спектроскопии.

Прямая регистрация флюоресценции хлорофилла

В данном методе измеряются показатели флюоресценции после адаптации изучаемого объекта к темноте в течение 20–30 минут. Благодаря применению специальных фильтров, диодных лазеров или диодов объект непрерывно облучается светом обладающим длиной волны короче 670 нм. При включении света оборудование регистрирует испускаемую флюоресценцию с длинами волн в спектре 680-760 нм. По виду индуктивной кривой флюоресценции можно делать выводы о некоторых характеристиках фотосинтетического аппарата у данного образца и динамике протекающих реакций фотосинтеза [25]. После фазы индукции флюоресценции хлорофилла, когда достигается стабильный уровень F_T , при постоянном освещении объекта флуориметр измеряет стационарную интенсивность флюоресценции. Данная система измерения называется

системой постоянного возбуждения.

Во время применения данного метода определяются следующие показатели (более подробно они будут рассмотрены далее):

- F_0 – нулевая флюоресценция;
- F_m – максимальная флюоресценция;
- $F_V = (F_m - F_0)$ – переменная флюоресценция;
- F_V/F_m – максимальная квантовая эффективность ФС II;

Флуориметры новых образцов могут измерять все основные параметры флюоресценции, рассчитываемые по форме изначальной фазы кривой Каутского.

При анализе флюоресценции применяется ряд разных параметров флюоресценции. Было приложено большое количество усилий по систематизации, но до сих пор один и тот же параметр часто представлен по-разному у разных исследователей [40].

F_0 – первичная флюоресценция объектов, адаптированных к темноте

Характеристика F_0 начальная или нулевая во времени флюоресценция является индикатором потерь энергии время передачи энергии возбуждения антенне и от нее к реакционному центру ФС II [26, 27]. Начальная флюоресценция здорового листа обозначает первую точку на кривой индукции флюоресценции. Она характеризует излучение флюоресценции активизированных молекул хлорофилла А в антенне ФС II, когда акцепторы QA (молекулы пластохинона) целиком окислены, все реакционные центры ФС II открыты, то есть могут принимать энергию возбуждения и безвозвратно проводить первичную фотохимическую реакцию. А также не происходит нефотохимического угасание qN. Для выполнения данных условий необходимо предварительная адаптация изучаемых образцов к темноте [28]. Потери энергии в антенне в форме излучения связаны не только с интенсивностью возбуждающего света в

области ФАР, но и с эффективностью передачи энергии возбуждения от ССК II к реакционному центру ФС II. Первичная флюоресценция измеряется при низких интенсивностях ФАР, порядка 0.01 мкмоль/м²с [29].

Повышение показания F_0 говорит о уменьшении эффективности передачи энергии возбуждения между пигментными молекулами в собирающей свет антенне ФС II [26]. Повышение значения F_0 также может связываться со снижением эффективности переноса энергии к реакционному центру ФС II, вызванной диссоциацией ССК II от ядра ФС II [30]. Подобный эффект может достигаться, например, в ситуации солевого стресса [31].

F_m – максимальная флюоресценция

Параметр определяется после адаптации растения к темноте и последующим насыщением импульсом света реакционного центра ФС II продолжительностью 0.8-2 секунд. Максимальную интенсивность флюоресценции F_m можно увидеть благодаря настройке мощности в насыщающем импульсе, чтобы значение PPFD находилось в районе 3500-10000 мкмоль/м²с. При таких параметрах все реакционные центры фотосистемы II временно закрыты и не имеют возможности принимать дополнительные электроны, и молекулы пластохинона в ФС II восстановлены. Кроме этого, с целью правильного определения параметра нужно выполняться условие отсутствия нефотохимического тушения (qN). F_m зависит, и от содержания хлорофилла в исследуемых тканях даже при наличии насыщающего импульса. Снижение F_m показывает, что исследуемое растение испытывает стресс, и как следствие, не все акцепторы электронов ФС II полностью восстановлены. После достижения максимальной интенсивности флюоресценции, эффективность флюоресценции быстро снижается до уровня F_T , близкого к начальному значению F_0 .

Иногда применяют параметр соотношения F_m/F_0 – отношение

максимального уровня флюоресценции (F_m) к нулевому уровню (F_0). В здоровых листьях, отношение примерно равняется 4–6, и его величина зависит от воздействия некоторых стрессовых факторов на растение, например, при засухе показатель может быть уменьшен до 1 [32], что свидетельствует о разрушении ФС II.

$$F_V = F_m - F_0 - \text{переменная флюоресценция}$$

Параметр F_V либо $F_{variable}$ означает разницу между величинами флюоресценции F_m и F_0 измеряемыми после темновой адаптации. F_V зависит от максимального квантового выхода ФС II. Низкая величина показатель говорит о снижении фотосинтетической активности и рассеивании энергии возбуждения на тепло. Показатель F_V уменьшается под действием стресса от окружающей среды, например, низких либо высоких температур, и тому подобное, который вызывает повреждение тилакоидов [33].

$F_V/F_0 = kp/kn$ – соотношение констант скоростей реакции фотохимической и нефотохимической дезактивации возбуждения в ФС II

Эта характеристика определяется после адаптации к темноте. Оно показывает эффективность использования энергии в ФС II и равняется соотношению констант скоростей первичной фотохимической реакции (kp) и общей скорости нефотохимических потерь (kn) [34].

$$F_V/F_m - \text{максимальная фотохимическая эффективность ФС II}$$

Большое количество работ показывают, что характеристика F_V/F_m , которая есть не что иное, как отношение $(F_m - F_0)/F_m$, взятое у растений адаптированных к темноте, показывает потенциальную квантовую эффективность ФС II и может использоваться как надежный индикатор фотохимической активности фотосинтеза. Изменение величины соотношения F_V/F_m считается индикатором снижения фотосинтеза и повреждение фотосинтетического аппарата при высокой интенсивности света [35].

F_T – стационарная флюоресценция

Характеристика F_T (она же F_S) представляет интенсивность флюоресценции хлорофилла, излучаемую фотосинтезирующими объектами в условиях стандартной освещенности. По окончании темновой адаптации достижение постоянного состояния на индукционной кривой флюоресценции на уровень F_T занимает около 3–5 минут.

F_T/F_0 – соотношение стационарной и нулевой флюоресценции

Данная характеристика негативно коррелирует с нефотохимическим тушением, а при сильной интенсивности светового излучения демонстрирует негативную корреляцию со скоростью переноса электронов, с ассимиляцией двуокси углерода, а также с устьичной проводимостью. Параметр F_T/F_0 является достоверным индикатором водного состояния растения [36].

F'_m – максимальная флюоресценция хлорофилла А в листьях, адаптированных к свету

Эта величина определяется с помощью насыщающих импульсов света при фоновом фотосинтетически активном освещении. Ниже значения максимальной флюоресценции, зафиксированной после темновой адаптации (F_m), так как в этом данном случае акцепторы ФС II частично редуцированы.

F'_0 нулевая флюоресценция на фоне освещения

Данная величина чаще оценивается после дополнительного освещения импульсом дальнего красного света с $\lambda \approx 735$ нм (вместе с действующим светом фотосинтетически активной радиации), что запускает окисление акцепторов электронов ФС II. В данном случае активируется в основном ФС I, что позволяет вывести электроны из ФС II и перевести большинство реакционных центров в открытое состояние. Создаваемая в таком случае флюоресценция будет соответствовать минимальной нулевой флюоресценции, измеренной на свету.

$F'_V = F'_m - F'_0$ – переменная флюоресценция в адаптированных на свету листьях

Величина пропорциональна фактическому квантовому выходу ФС II при освещении, на фоне действующего света. На данную величину также влияет и нефотохимическое угасание (qN).

Параметры фотохимического тушения флюоресценции

Снижение импульса флюоресценции называется угасанием. Резкое снижение интенсивности флюоресценции, связывается с повышением расходования энергии возбуждения в фотосинтетических реакциях, называется фотохимическим угасанием. При фиксировании понижения сигнала флюоресценции по итогу диссипации энергии возбуждения в виде тепла, то такое угасание называют нефотохимическим. Характеристики фотохимического тушения показывают часть поглощенной растениями энергии света, используемой в фотохимических реакций фотосинтеза [37].

$$\text{Квантовый выход } (F'_m - F_T) / F'_m = \Delta F / F'_m$$

Характеристика квантовый выход дает возможность вычислить квантовый выход фотохимической реакции в ФС II. Это наиболее значимая и распространенная характеристика, которая представляет собой соотношение количество квантов, задействованных в фотохимических преобразованиях к общему числу поглощенных квантов ФАР [38].

$F'_V / F'_m = (F'_m - F_0) / F'_m$ – эффективность открытых реакционных центров ФС II на свету

Снижение размера соотношения может быть спровоцировано дезоксидированием ксантофилловых пигментов в результате ксантофилового цикла, изменяющего соотношение пигментов $(A + Z) / (V + A + Z)$. Это говорит о значении данного процесса при регуляции активности ФС II в естественных условиях. При ярком освещении больше всего пигментов зеаксантин (Z) и антероксантин (A), а в темноте преобладает пигмент виолоксантин (V) [39].

Параметры нефотохимического тушения флюоресценции

Нефотохимическое угасание (q_N , NPQ), связывают с реакциями, преобразующими часть энергии в тепло, полученной во время световой фазы фотосинтеза [40]. Эти реакции запускаются при чрезмерном поглощении света листьями, также здесь происходит фотоингибирование. Либо в растениях, деформированных в результате иного стресса. В этих случаях интенсивность повреждения ФС II превышает интенсивность ее регенерации.

Rosenqvist и Kooten [41] показали, что количество измеренных параметров флюоресценции, фотохимического (q_P) и нефотохимического (q_N) тушения, зависит от состояния ФС II и разницы концентраций протонов по обе стороны тилакоидной мембраны (таблица 1).

Табл. 1

Соотношение между величинами измеренных параметров флюоресценции и разницы концентрации протонов

Параметр	Реакционный центр ФС II	ΔpH	q_P	q_N
F_0	Все открыты	Отсутствует	1	0
F'_0	Открыты	Низкий	1	$0 < q_N \leq 1$
F_m	Все закрыты	Отсутствует	0	0
F'_m	Все закрыты	Низкий	0	$0 < q_N \leq 1$
F_V	Закрываются во время насыщающего импульса после темновой адаптации	–	$1 \rightarrow 0$	0
F'_V	Закрываются во время насыщающего импульса на фоне освещения	–	$X \rightarrow 0$	$0 < q_N \leq 1$
F_T	Некоторые закрыты	Низкий	$0 < q_P \leq 1$	$0 < q_N \leq 1$

1.6. Обзор аналогов

Изучение влияния электромагнитных полей на организмы становится всё более актуальной задачей, в связи с увеличением количества электронных устройств, окружающих нас. Электроприборы сегодня есть практически в каждом доме, почти у каждого человека и мы перестаём жить без них. Все электрические устройства испускают электромагнитные волны. Однако то, как влияет электромагнитное излучение на организмы остается не изученным. Поэтому и растет количество исследований, целью которых является понять и объяснить это влияние. В том числе влияние полей на растения, как частный случай живых организмов. Понимание воздействия электромагнитных волн на растения очень важно, ведь растения лежат в основе всех трофических цепей. Растения поглощают и накапливают энергию от Солнца, передавая эту энергию дальше по трофическим цепочкам и до человека. Поэтому любые изменения и воздействия на растения могут повлиять и на человека.

В данном разделе будет представлен обзор работ изучающих влияние электромагнитных полей на растения.

Так в работе [42] выявлена возможность значимого изменения скорости гравитропической реакции в апикальных сегментах, вырезанных из четырех дневных ростков льна (*Linum bienne*), при стимулировании их комбинированными магнитными полями (КМП) двух принципиально разных характеров: КМП, выставленный на параметрический резонанс для Ca^{2+} ; КМП с очень низкими дозами магнитной индукции переменной компоненты. Выявленные результаты показывают наличие двух разных механизмов воздействия КМП на гравитропизм растений. Первый отвечает ионному параметрическому резонансу. Механизм воздействия, создаваемых КМП с очень низкими амплитудами переменной компоненты магнитного поля, пока не ясен.

Другая работа [43] изучала воздействие на зерна растений. В ней было показано, что влияние внешних физических полей на зерна помогает ускорению развития растений. При воздействии в течении одного, шести двадцати четырех часов постоянным магнитным полем и одного и шести часов УФ излучения зерна растений оказали стимулирующие эффекты. Которые приводят к изменению биологической активности клеток (их деление и фотосинтетическая активность); повышению ростовых характеристик растений (преимущественно в присутствии в земле Cu^{2+}), повышению на 10–12 % эффективности фиторемедиации земли. Более долгое воздействие ультрафиолетом приводит растения к стрессу, при котором нарушаются функции клеток и растения утрачивают свои накопительные функции.

Еще в одной работе [44] рассматривалось влияние на семена. В ней пришли к следующим выводам. Предпосевная обработка зерен электромагнитным полем дает стимулирующий эффект на зерна за счёт информационного воздействия и рекомендуется для улучшения качества и маслянистости семян подсолнечника.

В отличие от предыдущих работ в данном исследовании [45] рассматривали переменное магнитное поле. Исследовали воздействие переменного магнитного поля низкой интенсивности (1,5 мТл, частота 15Гц), гипертермии (42 °С) и их соединения на функциональное состояние тилакоидных мембран (по скорости реакции Хилла) и ростовые характеристики гороха - длину стебля и корня. Выявлено, что влияние переменным магнитным полем на протяжении 0,5 и 2 ч не провоцировало изменений выбранных параметров, но гипертермия их ингибировала. предпосевная обработка растений переменным магнитным полем перед гипертермией мешала как снижению скорости реакции Хилла, так и ингибированию роста стебля, однако целого возвращения к контрольным значениями не происходило. В данном случае в отличие от предыдущих

воздействие полей негативно.

А в работе [46] также исследовалось воздействие переменного магнитного поля, однако здесь воздействие оказалось положительным. Переменное магнитное поле (25 мТл, частота 1-12 Гц) создает стимулирующее воздействие на митотическую активность апикальных меристем однодольных и двудольных растений. Для магнитного поля с частотами 15 и 30 Гц аналогичное воздействие не установлено. Стимулирующее воздействие магнитного поля обнаруживается у растений, принадлежащих к различным систематическим категориям и характеризующихся видовыми, сортовыми и линейными генетическими различиями на уровне ядра и цитоплазмы. Стимулирующее воздействие обнаруживается при воздействии магнитного поля на прорастающие зерна либо проростки. Длительность воздействия для возникновения стимулирующего эффекта должна составлять не менее: 45 мин. Повторные воздействия не приводят к усилению значения стимулирующего эффекта.

В работе [47] рассматривалось уже СВЧ излучение. Выводы следующие: глубина проникновения излучений СВЧ связана с длиной волны. Оптимальным для стимулирования зерен являются диапазоны в пределах от миллиметров до дециметров СВЧ излучений. Дециметровое излучение проникает сильнее и причиняет воздействие на внутренние ткани, тогда как сантиметровое и миллиметровое излучение поглощается всю поверхность ткани, всхожесть зерен возрастает на 5-10 %, поражение болезнями уменьшается на 20-30, урожайность возрастает на 15-20 %.

В работе [48] сравнивалось воздействие слабых и мощных полей. Были получены следующие результаты. Слабое МП оказывает стимулирующий эффект на всхожесть зерен (процент всхожести зерен возрастает примерно вдвое); и на способность к росту ростков (в среднем стебель выше на 10 мм, корень – на 5,25 мм по сопоставлению с контролем). Мощное МП возбуждает ориентированный рост растений в

направлении наименее сильного напряжения (тропизмы), что объясняется циркуляцией крахмальных частиц из нижележащих клеток в сторону изгиба. Мощное МП возбуждает цитоморфологические изменения у растений, заключающееся в задержке клеточного размножения в среднем на 3-4 часа и в хромосомных абберациях в отдельных клетках. Мощное МП причиняет воздействие на обменные процессы у растений: снижает поглощение кислорода на 15-20% сообразно сопоставлению с контрольными группами. Мощное МП уменьшает интенсивность фотосинтеза, причем торможение этого процесса возрастает с увеличением напряженности.

Становится ясно, что поля оказывают влияние на растения. Причем разные по интенсивности, времени воздействия и свойствам поля оказывают различные эффекты, иногда положительно сказывающиеся на растениях, а иногда отрицательно. В связи с этим и изучать эти эффекты можно с разных точек зрения и совершенно различными методами. Одним из таких методов может стать флуориметрия, которая оценивает количество флюоресцированного света и по нему может оценить эффективность процесса фотосинтеза. А фотосинтез является одним из основных процессов в жизнедеятельности растений и всей природы. Поэтому мы дальше мы решили рассмотреть, как в разных работах с помощью метода флуориметрии показано влияние полей на фотосинтез.

По данной теме были найдены следующие работы.

В работе [49] Изучено воздействие хронической и острой гипертермии, переменного магнитного поля (15 Гц, 1.5 мТл) на состояние фотосинтетического аппарата *Pisum sativum L.* Выявлено, что хроническая и острая гипертермия снижают фотосинтетическую активность. Магнитное поле не меняет скорость реакции Хилла, однако создает корректирующее воздействие на квантовый выход фотосистемы II и содержимое хлорофилла b.

В другой работе [50] изучалось импульсное магнитное поле. Было выявлено, что импульсное магнитное поле возбуждало изменения квантовых выходов фотосистем. После воздействия в течение 15 минут они не отличались от контрольных показателей, вырастали от воздействий 30 и 60 минут, что показывает более быструю активацию электрон-транспортной цепи и фотосистем. А после падали ниже контрольного уровня при воздействии длительностью 120 минут, что, возможно, связано с нарушением функционирования мембран. Эти результаты показывают негативное воздействие импульсного магнитного поля для квантового выхода фотосинтеза растений.

В следующей работе [51] было показано воздействие переменного потенциала на фотосинтез. Переменный потенциал может воздействовать на стабильность фотосинтетического аппарата к созданию высокотемпературного стресса, повышая устойчивость фотосистемы I. Такое воздействие на стабильность, в основном, связано с индуцированным переменным потенциалом уменьшением активности темновой фазы фотосинтеза. Способами увеличения стабильности фотосистемы I могут быть возрастание не фотохимического тушения флуоресценции, нарастание циклического потока электронов, инактивация фотосистемы II.

Авторами работы [52] изучено воздействие магнитного и электромагнитного поля (ЭМП), источником которых являются терапевтические устройства, на кресс-салат (*Lepidium sativum* L.). Выявлено, что при воздействии ЭМП замечалось гарантированное нарастание концентрации каротиноидов и хлорофилла А. В разновидности эксперимента длительностью 30 мин скорость всхожести зерен не меняется, а в вариантах эксперимента длительностью 1 час и экспериментах с применением МП всхожесть зерен возрастает. При воздействии ЭМП на протяжении 30 минут и в эксперименте с МП

фиксируется улучшение выживаемости, однако при росте времени влияния ЭМП до 1 часа этот показатель падает. Показано нарастание рассмотренных морфометрических характеристик во всех разновидностях эксперимента. Изменение при воздействии ЭМП исследованных морфометрических показателей в экспериментальных вариантах шире, а при воздействии МП она падает. Можно заключить, что показано позитивное воздействие магнитных и электромагнитных полей на показатели фотосинтеза и прорастание зерен.

Проведя обзор имеющихся исследований в области изучения влияния полей на растения, мы пришли к следующим выводам. Влияние на растения в целом и процессы фотосинтеза в частности неоднозначно, в каких-то случаях имеет позитивное значение, в каких то негативное. Причем эффекты могут различаться или не быть зафиксированы в зависимости от различных видов полей и их интенсивности, а также данные поля могут по-разному влиять на различные аспекты онтогенеза и функционирования растений. Данная тема требует дальнейшего изучения и систематизации результатов, для их четкого понимания и возможности обобщения.

Также стоит отметить, что во всех исследованиях рассмотрено кратковременное воздействие полей на растения. По данным исследованиям нельзя судить о долговременном воздействии полей. Данный вопрос остается актуальным.

По итогу обзора мы пришли к выводу, что наиболее актуальным будет изучение влияния строго определенного магнитного поля, в нашем случае она будет постоянным и создаваться будет тороидальным соленоидом, а по своей интенсивности причислено к слабым. Данное решение обусловлено тем, что электроприборы чаще всего испускают именно слабые магнитные поля. В первую очередь будет изучаться влияние на процессы фотосинтеза, как основного и наиболее важного процесса в

физиологии растений. Данное влияние будет изучаться в ходе серии опытов общей протяжённостью в несколько месяцев, что позволит делать выводы о продолжительном воздействии и его изменении в течение относительно длительного периода времени. И изучаться влияние поля будет сразу на несколько видов высших растений, что позволит обеспечить достоверность результатов и позволит обобщить их для большего числа высших растений. Виды будут взяты с наибольшими показателями флюоресценции. Это позволит лучше увидеть и отследить изменения и дать им грамотную оценку.

2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Объект исследований

В качестве объектов использовали оранжерейные растения: Переския шиповатая (*Pereskia aculeata*), Фигус Бенджамина (*Ficus benjamina*), Сансевиерия трёхполосная (*Sansevieria trifasciata*), Гибискус (Китайская роза) (*Hibiscus rosa-sinensis*) культивируемые в стандартных условиях. Растения были выбраны в связи с высокими показателями флюоресценции у данных видов. В экспериментальной части рассмотрены данные полученные с Перескии шиповой.

В рамках экспериментов растения находились вблизи включенной катушки в течении 4 ч. на расстоянии 5-20 см. В вариантах опытов использовали обмотанная на катушку лиана, согласно рекомендациям [53]. Для этого использовались лианы *P. aculeata*, растение оборачивалось в один моток вокруг соленоида для создания замкнутого кольца, для закрепления использовались зажимы.



Рис. 6. Переския шиповатая (*Pereskia aculeata*)

Переския шиповатая (Переския колючая, Барбадосский крыжовник)

(лат. *Pereskia aculeata*) — вид быстрорастущих лиан.

Царство: Растения; Отдел: Покрытосеменные; Класс: Двудольные; Порядок: Гвоздичноцветные; Семейство: Кактусовые; Род: Переския; Вид: Переския шиповатая.

Переския шиповатая — обвивающаяся вокруг опоры лиана, длина которой достигает 10 м. Листья размером 3,2-10см, овальной формы, мясистые и глянцевые на вид (54).

2.2. Предмет исследования

Предметом исследований являются воздействия, оказываемые на выбранные растения векторным потенциалом, создаваемым тороидальной катушкой соленоидом с постоянным током. В работе изучались изменения флюоресценции растений в процессе фотосинтеза. По данным изменения флюоресценции можно судить о продуктивности фотосинтеза, а как следствие о наличии стресса и общем состоянии растений.

2.3. Экспериментальные методы

Метод модулированной флуоресценции хлорофилла А. Позволяет проводить измерения показателей флуоресценции при наличии источника освещения, без адаптации объекта исследования к темноте. Это возможно благодаря испусканию модулированного света от измеряющего прибора с чередованием включения и выключения источника в определённом промежутке времени. Давая возможность проводить измерения в присутствии солнечного или дополнительного освещения.

2.4. Показатели флуоресценции

В экспериментах измерялись такие показатели флуоресценции как:

F_m - максимальная флюоресценция хлорофилла А; F_0 - начальная флюоресценции при фоновом свете; $F_V = F_m - F_0$ - переменная флюоресценция.

F_m – максимальная флюоресценция хлорофилла А. Данный параметр отражает максимально возможную флюоресценцию у данного растения. Измеряется при вспышках света, созданных прибором.

F_0 – начальная флюоресценция при фоновом свете. Измеряется, когда максимальное число реакционных центров находятся в открытом состоянии и максимальное количество энергии переходит на фотосинтез с минимальными потерями, вследствие чего наблюдается минимальная флюоресценция для данного объекта.

$F_V = F_m - F_0$ – переменная флюоресценция. Значение, отражающее квантовый выход у фотосистемы II при нормальном, фоновом освещении. Этот параметр отражает эффективность всего процесса фотосинтеза.

2.5. Методы статистической обработки

Статистическая обработка осуществлялась с помощью программы Microsoft Excel 2010. Получаемые в ходе экспериментов данные сводились в электронные таблицы и обрабатывались с помощью функций программы, рассчитывая средние значения, проценты и строя на их основе сводные графики.

3. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕКТОРНОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ВЫСШИЕ РАСТЕНИЯ.

3.1. Характеристики источника векторного потенциала

В качестве источника векторного потенциала магнитного поля использовался соленоид тороидальной формы, представленный на рисунке 7. Размеры соленоида: 136,6мм во внешнем диаметре; 116,6мм внутренний диаметр; 20мм диаметр сердечника. Обмотка состоит из 858 витков медного провода диаметром 0.5мм.

Тороидальная конструкция соленоида обеспечивает сосредоточение магнитного поля, создаваемого им, в сердечнике. Таким образом, достигается воздействие лишь векторного потенциала на изучаемый объект.



Рис. 7. Тороидальный соленоид

3.2. Расчетное значение векторного потенциала

С помощью формулы (3.2.1.) найдем расчётное значение векторного (A) потенциала на расстоянии 20см, создаваемого катушкой.

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{dl}{r} \text{ (Тл)}, \quad (3.2.1)$$

где:

$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\Gamma_{\text{H}}}{\text{M}}\right)$ – магнитная постоянная;

$I = 0,9 \text{ (A)}$ – сила тока в проводнике;

$r = 0,2 \text{ (м)}$ – расстояние от катушки с током;

$dl = \pi \cdot d \cdot n = \pi \cdot 0,2 \cdot 858 = 53,9 \text{ (м)}$ – длина проводника с током;

$n = 858$ – число витков в катушке;

$d = 0,2 \text{ (м)}$ – диаметр сечения тора.

Отсюда получаем:

$$A = \frac{1,256 \cdot 10^{-6}}{4\pi} 0,9 \frac{53,9}{0,2} = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ (Тл)}$$

3.3. Измерительная установка

Воздействие векторного потенциала оценивались по изменению показателей флюоресценции образцов.

Показатели флюоресценции измерялись с помощью флуориметра WALZ Chlorophyll Fluorometer PAM Analyzer, фирмы «WALZ, Effetrich», модель PAM 101 (рисунок 8).



Рис. 8. Флуориметр WALZ PAM 101

Более подробно интерфейс флуориметра можно рассмотреть на рисунке 9. Где представлены основные элементы управления прибором.



Рис. 9. Интерфейс флуориметра.

Измерялись флуоресцентные параметры: F_0 , F_m , F_V/F_m и другие [55].
Для модулирования света на изучаемый объект использовался Schott KL 1500 Lcd. Источник холодного света с 15В/150Вт галогенной эллипсоидной зеркальной лампой. Макс. интенсивность света: 600Im.

3.4. Схема эксперимента

В рамках эксперимента изучались параметры флюоресценции, которые измерялись у выбранных растений в течение месяца ежедневно дважды в день независимо от включения катушки.

В определенный период растения ежедневно ставились к работающему тороидальному соленоиду с током 0,9А на расстоянии до 20 сантиметров. Таким образом, растения находились вблизи соленоида на протяжении четырех часов, подвергаясь воздействию создаваемого векторного потенциала магнитного поля соленоида. Показатели флюоресценции измерялись до включения и после окончания работы катушки.

Данный эксперимент повторялся четыре раза с периодичностью раз в месяц, для каждого из четырех рассматриваемых растений. Таким образом, была проведена серия опытов, включающая в себя серию из 16 экспериментов. Все собранные данные в дальнейшем обрабатывались и сравнивались.

3.5. Результаты эксперимента

На рисунках 11 и 12 представлены графики показывающие значение минимальной (F_0) и максимальной (F_m) флюоресценции для растения Перексия шиповая (*Pereskia aculeata*).

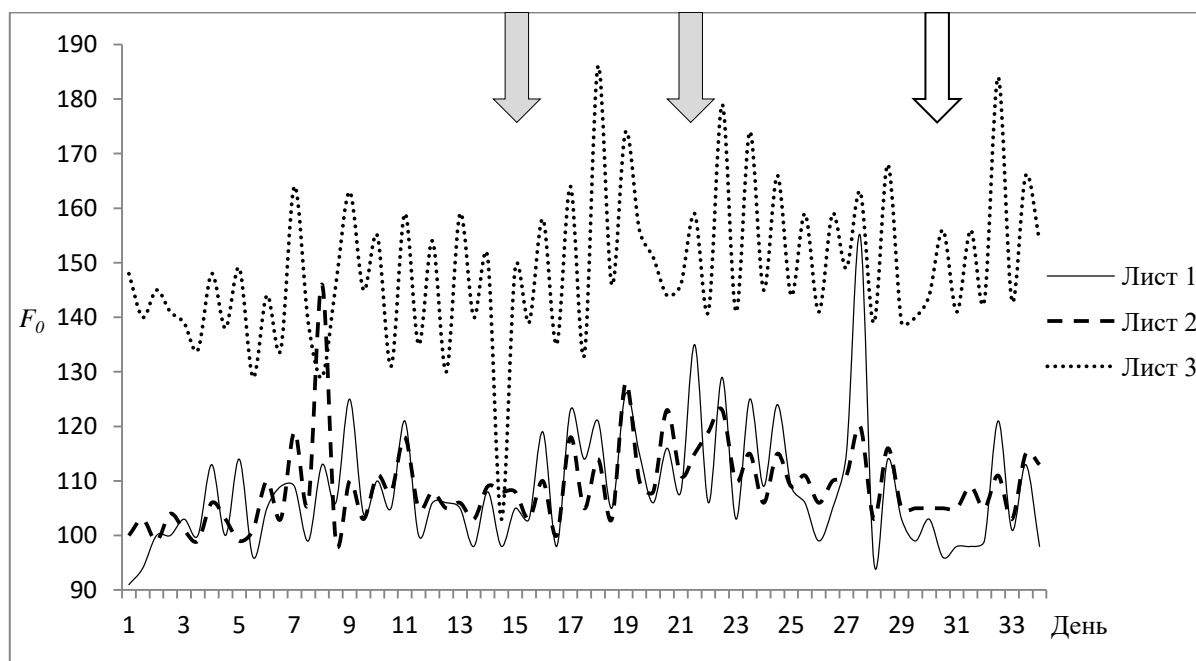


Рис. 11. F_0 для Перексии шиповатой (*Pereskia aculeata*).

Измерения проводились ежедневно дважды в день. Один раз с утра, один раз вечером. Серые стрелки указывают начало и конец периода, когда катушка ежедневно включалась на 4 часа днем. Белой стрелкой обозначено единичное включение на 4 часа.

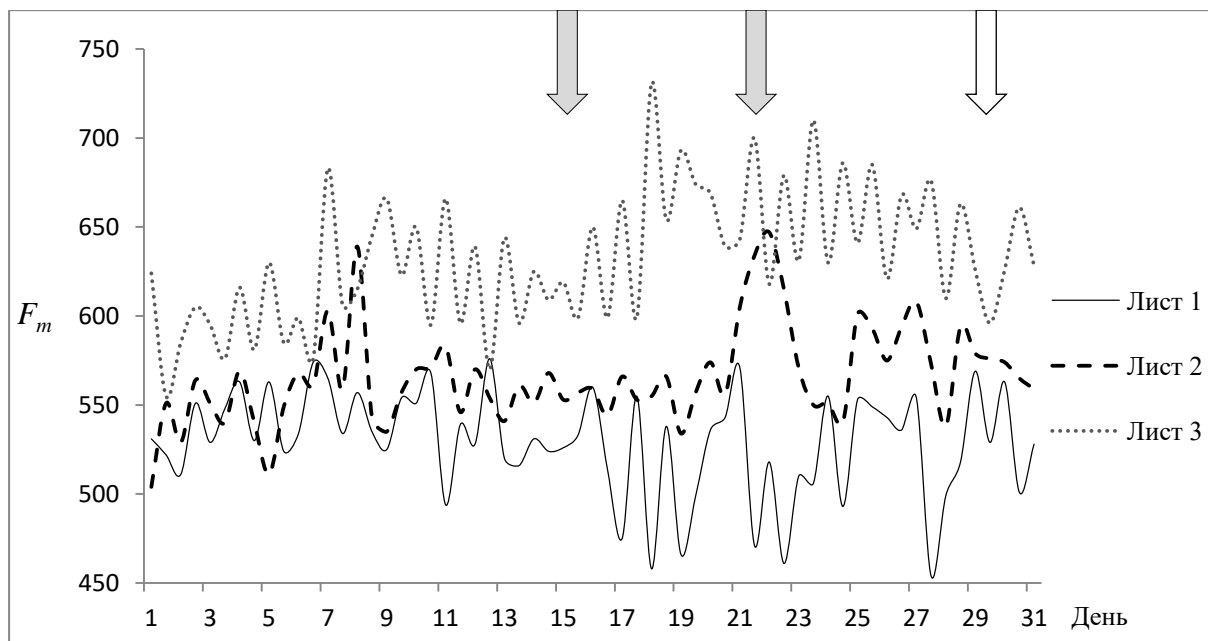


Рис. 12. F_m для Перескии шиповой (*Pereskia aculeata*).

Можно обратить внимание, что листья по-разному реагируют на включение катушки. Это связано с разным расстоянием листьев от источника излучения и тем, что интенсивность излучения падает с расстоянием от его источника.

Также можно заметить, что показания имеют колебательный характер, это связано с суточными ритмами растений.

На рисунке 13 взяты промежуток данные, когда включалась катушка. Период включения с 4 по 9 день и находится в диапазоне между двумя черными линиями на графике.

Из предыдущих графиков взяты показатели флюоресценции F_0 и F_m для листа 3, по ним рассчитан показатель F_V , как разница между максимальной и минимальной флюоресценцией.

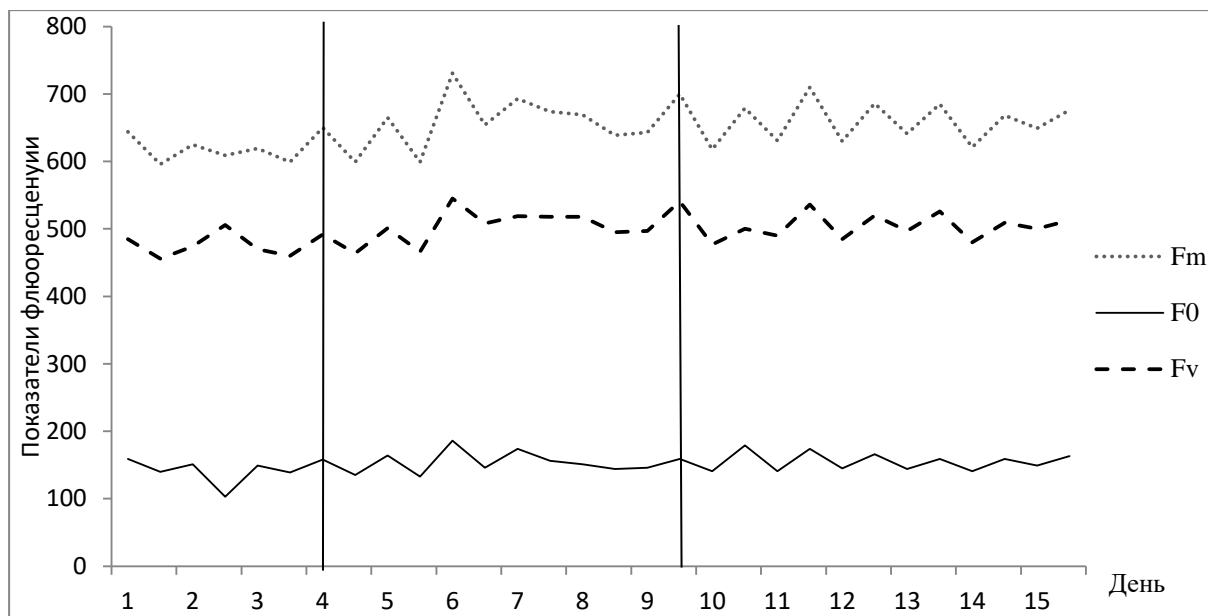


Рис. 13. Показатели флюоресценции для Перексии шиповой (*Pereskia aculeata*).

Как видно из графиков на рисунке 13 все показатели флюоресценции испытывают колебания после воздействия катушки в течение двух дней. После чего показатели стабилизируются и имеют более высокое значение по сравнению с предыдущими замерами. Данный факт может говорить о том, что интенсивность и продуктивность фотосинтеза возрастает. Однако после выключения показатели снова претерпевают колебания. Можно заметить, что колебания F_v постепенно сглаживаются и выравниваются.

Для удобства сравнения показателей флюоресценции в таблице 2 приведены средние значения показателей по трем периодам: до включения катушки, 1-3 дни наблюдения; во время работы катушки, 4-9 день; после выключения катушки, 10-15 день. А также значения переведены в проценты, где период до включения взят за 100%

Средние показатели флюоресценции

Дни эксперимента	1...3	4...9	10...15	1...3	4...9	10...15
F_m	615,33	659,66	657,83	100%	107,20%	106,90%
F_0	140,16	154,33	155,08	100%	110,10%	110,64%
F_v	475,16	505,33	502,75	100%	106,34%	105,80%

Для удобства восприятия данные из таблицы представлены в виде графика на рисунке 14.

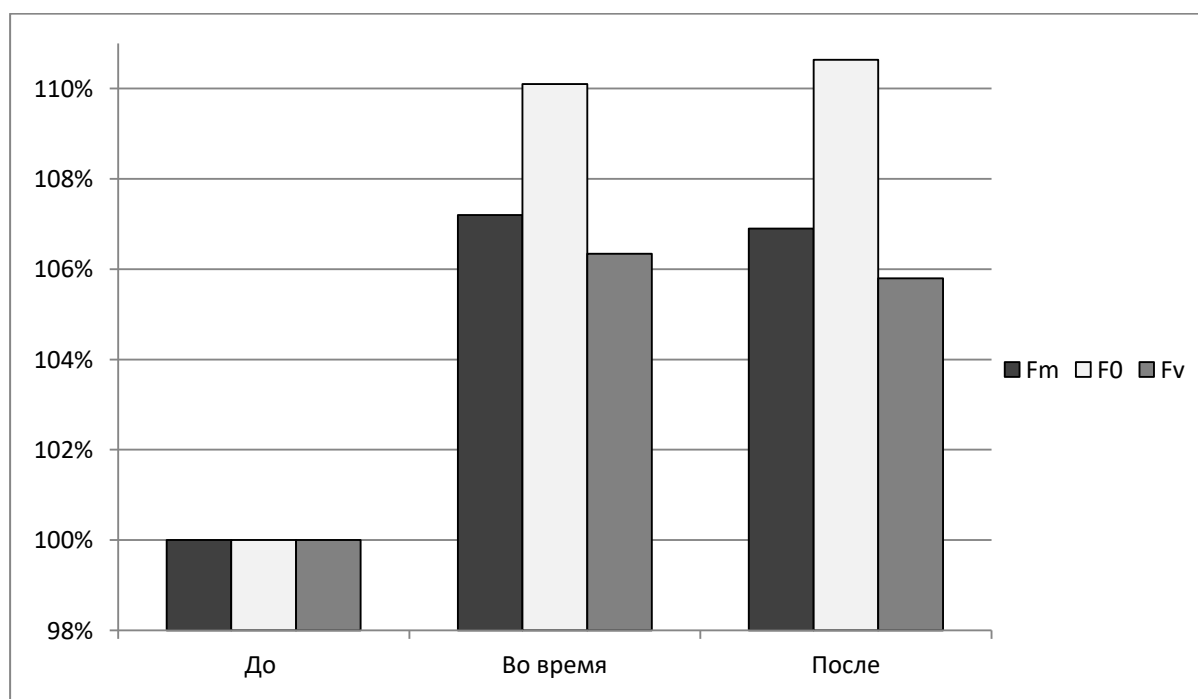


Рис. 14. Средние показатели флюоресценции для Перескии шиповой (*Pereskia aculeata*).

Как можно видеть из рисунка 14 и таблицы 2, все показатели флюоресценции возрастают после включения катушки.

Наибольшее возрастание замечено у показателя минимальной флюоресценции F_0 , оно составило 10%.

Для максимальной флюоресценции F_m рост показателя составил 7%. Что говорит о том, что растение находится в комфортных для него условиях.

Величина переменной флюоресценции F_V поднялась на 6%. Отсюда можно сделать вывод, что фотосинтетическая активность объекта увеличилась, и процессы фотосинтеза идут более интенсивно и продуктивно.

После выключения показатели меняются в пределах 0,55%, что вкладывается в границы статистической погрешности. Из чего можно сделать вывод о том, что показатели сохраняют повышенное значение в течение 5 дней после воздействия.

С данными полученными от измерений показателей флюоресценции для Сансевиерии трёхполосной (*Sansevieria trifasciata*) и Фикуса Бенджамина (*Ficus benjamina*) можно ознакомиться в приложении 1 и 2 соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было изучено влияние векторного потенциала созданного тороидальным соленоидом, на показатели флюоресценции, по которым оценивалось состояние высших растений.

По итогам работы были получены следующие результаты:

1. Было замечено, что влияние, оказываемое на растения катушкой, уменьшается с расстоянием и падением величины векторного потенциала, как для двух видов, находящихся на разном расстоянии от источника, так и для разных листьев одного растения.

2. В период воздействия векторного потенциала отмечен следующий эффект: все показатели флюоресценции испытывают колебания в течение двух дней с момента начала воздействия. После чего показатели стабилизируются и имеют более высокое значение по сравнению с показателями до облучения. Данный эффект может говорить о том, что интенсивность фотосинтеза возрастает. После окончания воздействия показатели флюоресценции снова выходят из равновесия и колеблются, сохраняя повышенное значение.

3. Отмечено, что минимальная флюоресценция F_0 увеличивается во время воздействия на 10%. Для максимальной флюоресценции F_m рост показателя составил 7%.

4. Величина переменной флюоресценции F_V возрастает на 6%. Отсюда можно сделать вывод, что фотосинтетическая активность объекта увеличилась.

5. После выключения показатели меняются в пределах 0,55%, что вкладывается в границы статистической погрешности. Из этого можно сделать вывод, что изменения сохраняются после прекращения воздействия.

Эксперименты воспроизводились в серии из 16 экспериментов в

течение 5 месяцев с января по май 2019г.

F_0 говорит об эффективности переноса энергии в фотосистеме II. Увеличение параметра указывает на снижение эффективности переноса энергии.

Увеличение F_m может говорить об отсутствии стрессовых факторов у растения и наличии стимулирующего действия на процессы фотосинтеза.

Повышение F_v свидетельствует о итоговом увеличении интенсивности процесса фотосинтеза.

Обобщив информацию, получили вывод о том, что тороидальный соленоид под нагрузкой оказывает воздействие на процессы фотосинтеза в высших растениях, приводя к увеличению интенсивности фотосинтеза.

Механизм воздействия требует дальнейшего исследования. Также необходимо изучить, какой эффект будет оказываться на другие виды растений в аналогичных условиях; какой эффект будут оказывать поля большей мощности, поля создаваемые переменными токами; какие последствия для растений могут иметь данные воздействия в долгосрочной перспективе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Aharonov, Y. and D. Bohm, «Significance of electromagnetic potentials in quantum theory», *Phys. Rev.* 115, 485—491 (1959).
2. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. М: Мир, 1977.
3. Огурцов А. Н. Физика для студентов (8 частей).—2013.—264 с. // Физика для студентов URL: http://msk.edu.ua/ivk/Fizika/2_kurs/Ogurtsov/lect1mech-disp.pdf (дата обращения: 19.03.2020).—Интернет-ресурс.
4. Мартынов, М. С. Физика: курс лекций. В 5 ч. Ч. 2: Магнитное поле тока. Электромагнитная индукция. Электромагнитное поле. Квазистационарные процессы / М. С. Мартынов. – Орел: Академия ФСО России, 2010. - 142 с.
5. Ehrenberg, W. and R. E. Siday, «The Refractive Index in Electron Optics and the Principles of Dynamics», *Proc. Phys. Soc. (London)* B62, 8—21 (1949)
6. R. G. Chambers, «Shift of an Electron Interference Pattern by Enclosed Magnetic Flux», *Phys. Rev. Lett.* 5, 3 (1960); G. Möllenstedt and W. Bayh, *Physikalische Blätter* 18, 299 (1961)
7. Osakabe, N., T. Matsuda, T. Kawasaki, J. Endo, A. Tonomura, S. Yano, and H. Yamada et al. Experimental confirmation of Aharonov–Bohm effect using a toroidal magnetic field confined by a superconductor (англ.) // *Physical Review A: journal.* — 1986. — Vol. 34, no. 2. — P. 815—822.
8. Краткое изложение процесса фотосинтеза. Метаболизм фосфоглицерата и триозофосфата. // МедУнивер: интернет-изд. URL: <https://meduniver.com/Medical/Biology/167.html> (дата обращения: 19.03.2020).
9. Графики интенсивности фотосинтеза. От чего зависит

интенсивность фотосинтеза? // МедУнивер: интернет-изд. URL: <https://meduniver.com/Medical/Biology/169.html> (дата обращения: 19.03.2020).

10. Гольцев В. Н. и др. Использование переменной флуоресценции хлорофилла для оценки физиологического состояния фотосинтетического аппарата растений // Физиология растений. – 2016. – Т. 63. – №. 6. – С. 881 - 907.

11. Tsimilli-Michael M., Strasser R.J. In vivo assessment of stress impact on plants' vitality: applications in detecting and evaluating the beneficial role of Mycorrhization on host plants // Mycorrhiza: State of the art, genetics and molecular biology, eco-function, biotechnology, eco-physiology, structure and systematics, vol. 3 / Ed. Varma A. Heidelberg, Berlin: SpringerVerlag, 2008. P. 679–703.

12. Terazima M., Hirota N., Braslavsky S.E., Mandelis A., Bialkowski S.E., Diebold G.J., Miller R.J.D., Fournier D., Palmer R.A., Tam A. Quantities, terminology, and symbols in photothermal and related spectroscopies // Pure Appl. Chem. 2004. V. 76. P. 1083–1118.

13. Braslavsky S.E. Glossary of terms used in photochemistry 3rd edition // Pure Appl. Chem. 2007. V. 79. P. 293–465.

14. Björn L.O., Papageorgiou G.C., Blankenship R.E., Govindjee A viewpoint: Why chlorophyll a? // Photosynth. Res. 2009. V. 99. P. 85–98.

15. Trissl H.W., Gao Y., Wulf K. Theoretical fluorescence induction curves derived from coupled differential equations describing the primary photochemistry of photosystem II by an exciton/radical pair equilibrium // Biophys. J. 1993. V. 64. P. 984–998.

16. Govindjee. Sixty-three years since Kautsky: chlorophyll a fluorescence // Aust. J. Plant Physiol. 1995. V. 22. P. 131–160.

17. Lichtenthaler H.K., Rinderle U. The role of chlorophyll fluorescence in the detection of stress conditions in plants // Crit. Rev. Anal.

Chem. 1988. V. 19. P. 29–85.

18. Kautsky H., Hirsch A. Neue Versuche zur Kohlensaureassimilation // *Naturwissenschaften*. 1931. V. 19. P. 964.

19. Papageorgiou G. Chlorophyll fluorescence: an intrinsic probe of photosynthesis // *Bioenergetics of Photosynthesis* / Ed. Govindjee. New York: Academy Press, 1975. P. 319–371.

20. Kalaji H., Govindjee, Goltsev V., Bosa K., Allakhverdiev S.I., Strasser R. Experimental in vivo measurements of light emission in plants: A perspective dedicated to David Walker // *Photosynth Res*. 2012. V. 114. P. 69–96.

21. Duysens L.N.M., Sweers H.E. Mechanism of two photochemical reaction in algae as studied by means of fluorescence // *Studies on Microalgae and Photosynthetic Bacteria* / Ed. Ashida J. Tokyo: Tokyo University Press, 1963. P. 353–372.

22. Butler W.L. Fluorescence yield in photosynthetic systems and its relation to electron transport // *Current topics in bioenergetics* / Ed. Sanadi D.R. New York: Academic Press, 1966. P. 49–73.

23. Murkowski A. Oddziaływanie czynników stresowych na luminescencję chlorofilu w aparacie fotosyntetycznym roślin uprawnych. Monografia 61. Lublin, Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN. 2002.

24. Kalaji M.H., Pietkiewicz S. Some physiological indices to be exploited as a crucial tool in plant breeding // *Plant Breed Seeds Sci*. 2004. V. 49. P. 19–39.

25. Flexas J., Escalona J.M., Evain S., Gulías J., Moya I., Osmond C.B., Medrano H. Steady-state chlorophyll fluorescence (Fs) measurements as a tool to follow variations of net CO₂ assimilation and stomatal conductance during water-stress in C₃ plants // *Physiol. Plantarum*. 2002. V. 114. P. 231–240.

26. Kalaji M.H., Guo P. Chlorophyll Fluorescence: A useful tool in

barley plant breeding programs // Photochemistry research progress / Eds. Sanchez A., Gutierrez S.J. (eds). New York, USA: Nova Science Publishers Inc., 2008. P. 439–463.

27. Strasser R.J., Tsimilli-Michael M., Qiang S., Goltsev V. Simultaneous in vivo recording of prompt and delayed fluorescence and 820-nm reflection changes during drying and after rehydration of the resurrection plant *Haberlea rhodopensis* // *Biochim. Biophys. Acta*. 2010. V. 1797. P. 1313–1326.

28. Schreiber U. Detection of rapid induction kinetics with a new type of high-frequency modulated chlorophyll fluorometer // *Photosynth. Res.* 1986. V. 9. P. 261–272.

29. Maxwell K., Johnson G.N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide // *J. Exp. Bot.* 2000. V. 51. P. 659–668.

30. van Kooten O., Snel J.H. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology // *Photosynth. Res.* 1990. V. 25. P. 147–150.

31. Hansatech (2008) Chlorophyll Fluorescence. Hansatech Instruments Ltd. <http://www.hansatech-instruments.co.uk>.

32. Lichtenthaler H., Buschmann C., Knapp M. Measurement of chlorophyll fluorescence kinetics (Kautsky effect) and the chlorophyll fluorescence decrease ratio (RFd-values) with the PAM-fluorometer // *Analytical methods in plant stress biology* / Eds. Filek M., Biesaga-Kocielniak J., Marciska I. Krakow, Poland: The Franciszek Gorski Inst. Plant Physiol., Polish Academy of Sciences, 2004. P. 93–111.

33. Havaux M. Rapid photosynthetic adaptation to heat stress triggered in potato leaves by moderately elevated temperatures // *Plant Cell Environ.* 1993. V. 16. P. 461–467.

34. Kalaji M., Rutkowska A. Reakcje aparatu fotosyntetycznego siewek kukurydzy na stres solny // *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 2004. V. 496. P. 545–558.

35. Hansatech (1996) An introduction to fluorescence measurements with the plant efficiency analyser (PEA). Hansatech Instruments Ltd. <http://www.hansatechinstruments.co.uk>.

36. Reigosa R.M.J., Weiss O. Fluorescence techniques // Handbook of plant ecophysiology techniques / Ed. Reigosa R.M. Dordrecht, the Netherlands: Acad. Publ., 2001. P. 155–171.

37. He J., Chee C.W., Goh C.J. ‘Photoinhibition’ of Heliconia under natural tropical conditions: the importance of leaf orientation for light interception and leaf temperature // Plant Cell Environ. 1996. V. 19. P. 1238–1248.

38. Berlin Heidelberg, Springer: Springer Study Edition edn., 1995. P. 49–70.

39. Fracheboud Y. (2000) Using chlorophyll fluorescence to study photosynthesis. <http://jaguar.fcav.unesp.br/download/deptos/biologia/durvalina/TEXT0-71.pdf>.

40. Genty B., Briantais J.-M., Baker N.R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence // Biochim. Biophys. Acta. 1989. V. 990. P. 87–92.

41. Rosenqvist E., van Kooten O. Chlorophyll Fluorescence: a general description and nomenclature // Practical applications of chlorophyll fluorescence in plant biology / Eds. Dell J.R., Toivonen P.M.A. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Acad. Publ., 2003. P. 31–77.

42. Белова Н. А., Леднев В. В. Влияние крайне слабых переменных магнитных полей на гравитропизм растений // Биофизика. – 2001. – Т. 46. – №. 1. – С. 122-125.

43. Ольшанская Л. Н., Титоренко О. В., Еремеева Ю. А. Влияние постоянного магнитного поля и ультрафиолетового излучения на рост высших растений и фиторемедиацию почвы от нефтепродуктов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2015. – №. 5. – С. 43.

44. Чёрная М. А., Косулина Н. Г. Биофизический анализ воздействия информационного электромагнитного поля на биологические объекты //Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2013. – №. 142. – С. 86-87.

45. Синицына Ю. В. и др. Влияние низкочастотного переменного магнитного поля и гипертермии на рост и фотосинтез проростков гороха //Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №. 6. – С. 1374-1374.

46. Беляченко Ю. А. Пролиферация клеток растений при воздействии низкочастотного магнитного поля. – 2009.

47. Чёрная М. А., Косулина Н. Г. Биофизический анализ воздействия информационного электромагнитного поля на биологические объекты //Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2013. – №. 142. – С. 86-87.

48. Колчанов Р. А. Влияние искусственных магнитных полей на ростовые и обменные процессы у колумбовой травы //Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2009. – Т. 9. – №. 11 (66).

49. Середнева Я. В. и др. Влияние условий хронической и острой гипертермии и низкоинтенсивного переменного магнитного поля на функциональное состояние фотосинтетического аппарата растений *Pisum sativum* L //Вестник Нижегородского университета им. НИ Лобачевского. – 2014. – №. 1-2.

50. Кальясова Е. А. и др. Влияние импульсного магнитного поля на некоторые параметры индуцированной флуоресценции хлорофилла //Вестник Нижегородского университета им. НИ Лобачевского. – 2012. – №. 2-3.

51. Сурова Л. М. Влияние переменного потенциала на устойчивость фотосинтетического аппарата гороха посевного (*Pisum sativum* L.) : дис. – Нижний Новгород, ННГУ им. НИ Лобочевского, 2017.111 с, 2017.

52. Чваркова Е. А., Тупицына Л. С. Биологические эффекты у растений при действии магнитного и электромагнитного полей, индуцированных приборами терапевтического назначения //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17. – №. 5-2.

53. Труханов К.А. Векторный потенциал электромагнитного поля // Электромагнитные поля в биосфере. Т. 1. Электромагнитные поля в атмосфере Земли и их биологическое значение. Под ред. Н.В.Красногорской. М: Наука, 1984. С. 331-350.

54. Википедия URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 19.03.2020).

55. Bolhar-Nordenkampf H.R. et al. Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: A review of current instrumentation // *Funct. Ecol.* 1989. Vol. 3. P. 497-514.

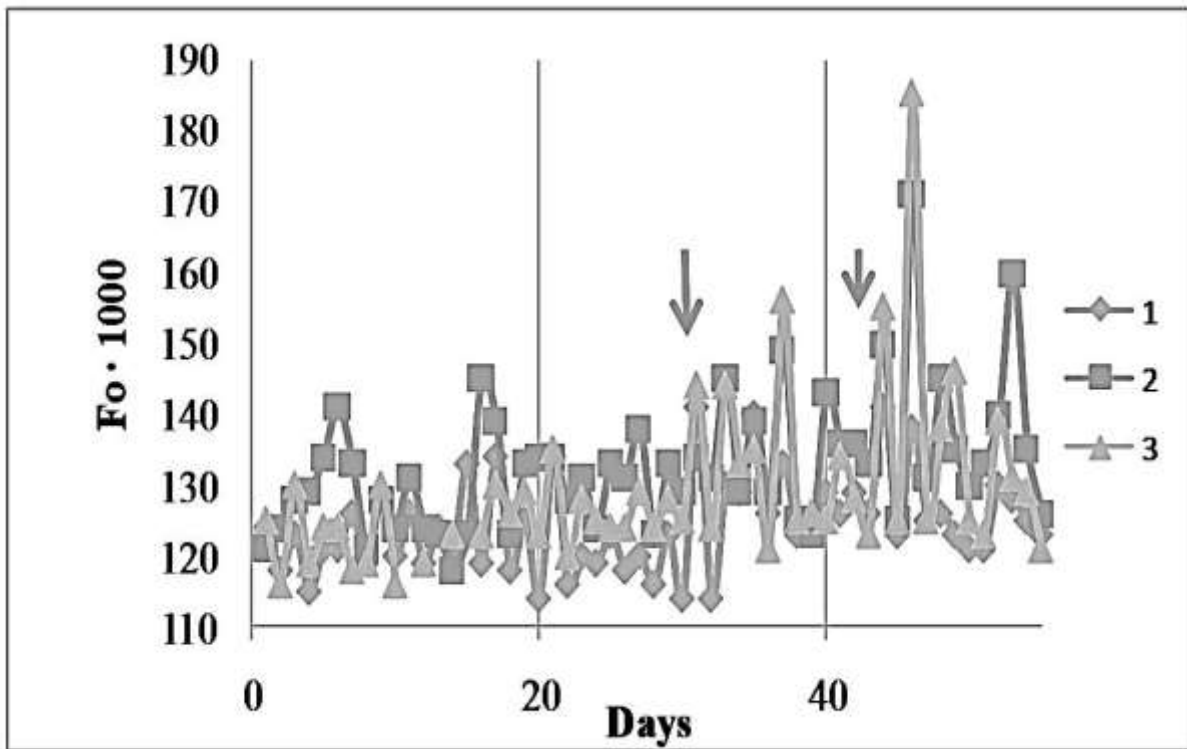


Рис. 15. F_0 для Сансевиерии трёхполосной (*Sansevieria trifasciata*).

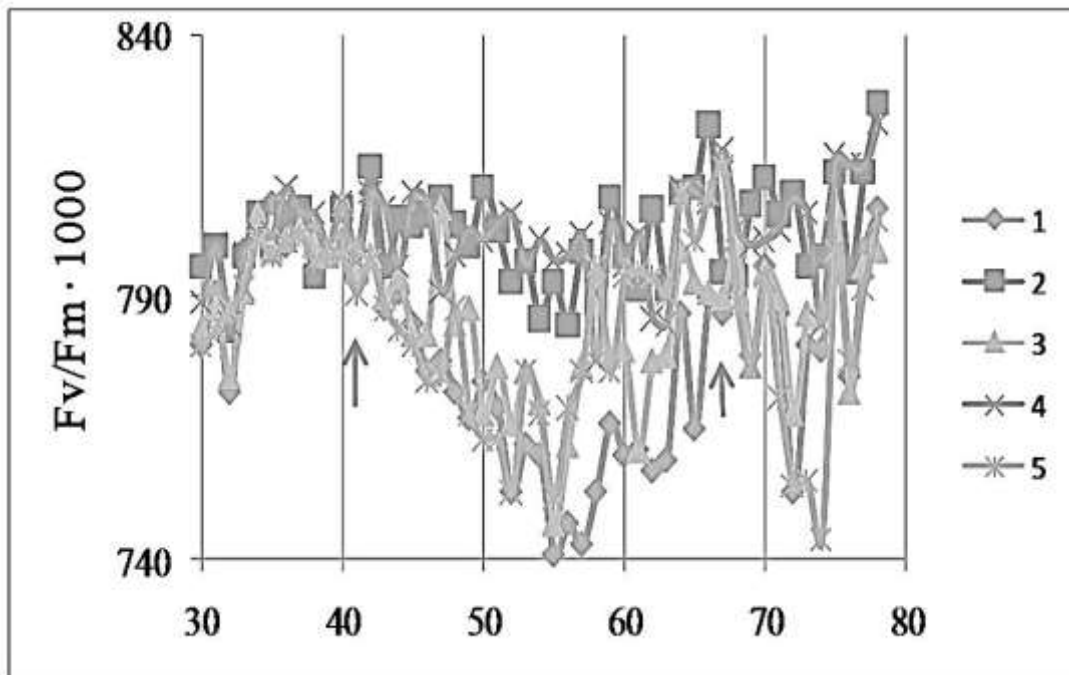


Рис. 16. F_v/F_m для Фикуса Бенджамина (*Ficus benjamina*).

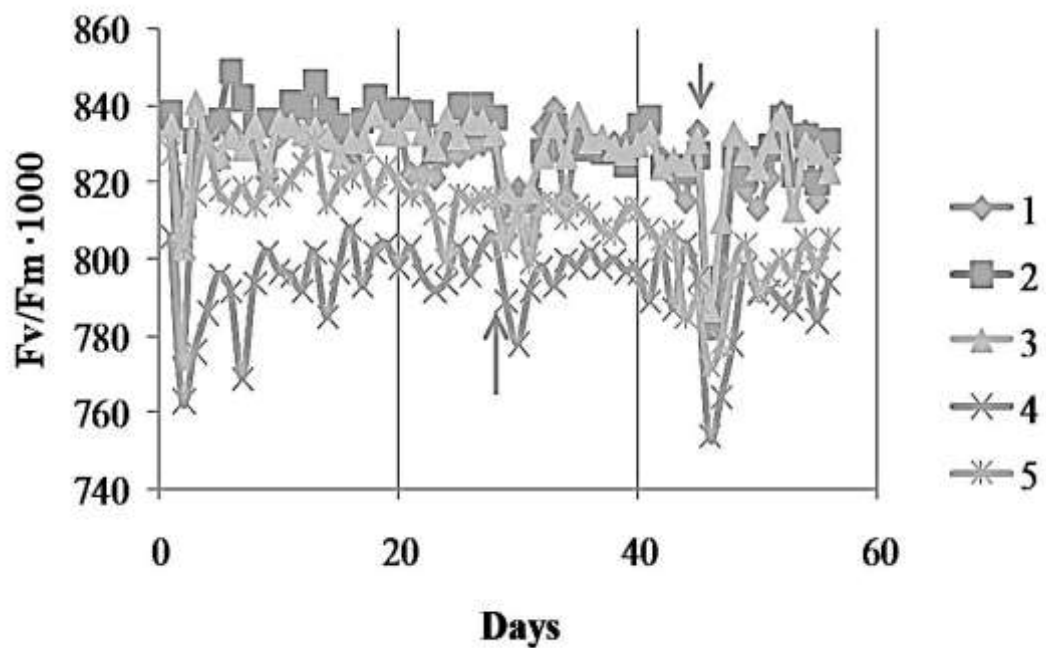


Рис. 17. F_v/F_m для Фикуса Бенджамина (*Ficus benjamina*), в условиях затенения.