

Муниципальное бюджетное образовательное учреждение «Средняя школа №72
с углубленным изучением немецкого языка»
Муниципальное бюджетное учреждение дополнительного
образования «Центр детского творчества «Танкодром»

**ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ
В ЛИСТЬЯХ ДРЕВЕСНЫХ И ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ
ПО СПЕКТРАЛЬНОЙ АБСОРБЦИИ ЛИСТЬЕВ**

Выполнил:
Марданов А.Г., 10 класс

Научный руководитель:
к.г.н., доцент кафедры
прикладной экологии КФУ
Никитин О.В.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1 ПОДХОДЫ В ДИАГНОСТИРОВАНИИ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ РАСТЕНИЙ	5
1.1 Спектрофотометрическое определение содержания пигментов растений	5
1.2 Косвенная регистрация фотосинтетической активности по показателям флуоресценции и спектрального отражения.....	6
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	8
2.1 Спектрофотометрическое определение хлорофилла	8
2.2 Косвенная регистрация фотосинтетической активности.....	8
2.3 Вегетационные опыты	9
2.4 Оценка содержания фотосинтетических пигментов в листьях березы	10
ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	11
3.1 Содержание фотосинтетических пигментов в листьях пшеницы.....	11
3.2 Содержание фотосинтетических пигментов в листьях березы.....	13
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	17
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	18
ПРИЛОЖЕНИЕ	21

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы объясняется тем, что определение содержания фотосинтетических пигментов позволяет получить важную информацию о состоянии растений и проходящих процессах фотосинтеза, а также позволяет судить о состоянии почвенных условий и качестве окружающей среды в целом.

Листья – основные ассимилирующие органы растений, они обеспечивают все функциональные процессы организма пластическими веществами. Осуществляя фотосинтез, листовой аппарат приспосабливается к крайне многообразным условиям среды, в том числе техногенным, отличаясь высокой морфологической пластичностью, разнообразием форм и существенными адаптационными возможностями (Сарсацкая, 2017). Фотосинтез очень чувствительно реагирует на всякое изменение факторов внешней среды. В связи с этим его всё чаще используют для определения реакции растений на всевозможные стрессоры, включая антропогенные (Шуберт, 1988).

Содержание хлорофилла также является индикатором количества азота в растительных тканях. Азот – это питательное вещество, которое больше всего требуется растениям. Однако избыток азотистых соединений, особенно в сельскохозяйственной среде, приводит к загрязнению. Одним из способов уменьшения опасности вымывания нитратов из почвы является применение азотных удобрений в том количестве, которое требует определенная культура в течение вегетационного периода. Как результат, только минимально необходимое количество азота будет оставаться в почве после уборки урожая, уменьшая вымывание азота. Однако, уменьшая дозу азотных удобрений, также увеличивается риск недостатка азота на ранних стадиях роста, что может привести к снижению урожая. Кроме того, при применении низких доз азотных удобрений, фермеры нуждаются в четких инструкциях, позволяющих быстро и просто определять обеспеченность растений азотом, чтобы дать возможность правильно применять подкормку, если предварительная обеспеченность азотом неудовлетворительна.

Способность растений реагировать на почвенное питание, загрязнение атмосферного воздуха и в целом на состояние окружающей среды позволяет проводить биологический мониторинг по растительным организмам, в том числе **и для оценки возможных экологических рисков.**

Для определения содержания хлорофилла применяются различные прямые и косвенные методы. Среди прямых методов наибольшее распространение получили методы спектрофотометрической регистрации хлорофилла, после его экстракции различными растворителями. Недостатком данного подхода является трудоемкость выполняемых процедур и необходимость наличия лабораторной базы. Поэтому в настоящее время большое распространение получили методы косвенной регистрации параметров фотосинтетической активности. Наибольшее распространение для подобной регистрации получили флуориметрические и спектральные методы исследования. Однако подобные подходы также не лишены недостатков, в том числе и из-за высокой стоимости оборудования. Поэтому продолжается поиск подходов, направленных на регистрацию фотосинтетической активности растений альтернативными методами, в частности с привлечением

средств, доступных широкому кругу лиц, в частности смартфонов (Vesali et al., 2017).

В связи с чем, **цель** данной научной работы – оценить содержание фотосинтетических пигментов в листьях древесных и травянистых растений по спектральной абсорбции листьев.

Для достижения поставленной цели были сформулированы **задачи**:

1. Оценить содержание фотосинтетических пигментов в древесных и травянистых растениях при помощи спектрофотометрической регистрации, после экстракции этанолом.

2. Провести косвенную оценку содержания фотосинтетических пигментов в растениях при помощи флуориметрической регистрации (при помощи приборов SPAD-502, Dualex Scientific+).

3. Выполнить косвенную оценку содержания фотосинтетических пигментов растений по спектральной абсорбции листьев при помощи фотокамеры смартфона.

Гипотеза: характеристики фотоизображения листовой пластинки древесных и травянистых растений, полученное при помощи фотокамеры смартфона после прохождения сквозь нее света (спектральная абсорбция), позволяет косвенно судить о содержании фотосинтетических пигментов и фотосинтетической активности растений.

Объект исследования: озимая пшеница (*Triticum aestivum*, сорт скипетр), береза повислая (*Betula pendula* Roth.).

Предмет исследования: содержание фотосинтетических пигментов в растениях, косвенные показатели фотосинтетической активности растений.

Район исследования: исследования проводились в лабораторных условиях на кафедре прикладной экологии КФУ.

ГЛАВА 1 ПОДХОДЫ В ДИАГНОСТИРОВАНИИ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ РАСТЕНИЙ

1.1 Спектрофотометрическое определение содержания пигментов растений

Фотосинтез зеленых растений, т.е. преобразование энергии света в химическую энергию, является основой всей жизни на Земле. Он очень чувствительно реагирует на всякое изменение факторов внешней среды. В связи с этим его всё чаще используют для определения реакции растений на стрессоры, в особенности на загрязнение воздуха (Шуберт, 1988).

К основным группам пигментов растительного происхождения, принимающим непосредственное участие в фотосинтезе, относятся хлорофиллы – соединения тетрапиррольной природы, каротиноиды – пигменты, относящиеся к группе полиизопреноидов. Каждая группа включает различные пигментные формы, из которых наиболее важными у растений являются хлорофиллы *a* и *b*, каротины, ксантофилы.

Характерным свойством растительных пигментов является их способность поглощать лучи света определенной длины волны. Поглощение световой энергии обусловлено наличием в молекулярной структуре пигментов определенных групп атомов, т.н. хромофорных групп. Поглощение энергии света молекулой пигмента связано с изменением ее энергетического состояния. Процесс поглощения кванта сопровождается переходом электрона на более высокий энергетический уровень, возвращение электрона на прежнюю орбиталь связано с излучением света флуоресценции. У разных атомов разность между энергиями отдельных уровней представляет разные и вполне определенные величины, поэтому атом может поглотить или излучить лишь определенное количество энергии, т.е. поглотить или испустить свет определенной длины волны. Длина волны поглощаемого или излучаемого света является характерным признаком данного химического соединения.

На измерении количества света, поглощенного пигментами, основаны методы их количественного определения. Для количественной оценки содержания пигментов широко используется фотометрический метод. Фотометрический анализ основан на измерении количества света, поглощенного веществом или раствором какого-либо вещества. В соответствии с основным и законами светопоглощения между поглощением света раствором, толщиной слоя и концентрацией в растворе поглощающего вещества существует определенная зависимость:

$$D = \varepsilon \cdot C \cdot d,$$

где D – оптическая плотность раствора, ε – молярный коэффициент поглощения, выражающий количество света, поглощаемое 1М раствором вещества при толщине слоя в 1 см, d – толщина слоя раствора.

Необходимо отметить, что величина коэффициента поглощения зависит от природы растворителя, поэтому при анализе пигментов для расчета необходимо брать соответствующие значения коэффициентов (Валеева, 2007).

Качественный и количественный состав пигментов является (в физиологическом смысле) показателем приспособленности растения к условиям окружающей среды. Так количество хлорофилла и каротиноидов, приходящееся на единицу веса, различно у растений, адаптированных к разным условиям

освещения: наибольшее общее содержание хлорофилла и каротиноидов наблюдается у теневыносливых растений. Соотношение хлорофиллов *a* и *b* (Chl *a*/Chl *b*) также является показателем хроматической адаптации и меняется в ряду растений теневыносливые → светолюбивые → альпийские: 2,5→3,5-3,9→до 5,5. Часто содержание хлорофилла в исследуемом образце необходимо знать, чтобы рассчитать удельную интенсивность какой-либо фотосинтетической реакции.

Количество пигментов выражают в миллиграммах на единицу сырой или сухой массы, на единицу площади листа и в % от сухой (сырой) массы. Обычно в нормальных зеленых листьях содержание хлорофилла составляет 0,5–3,0 мг/г сырой массы при отношении Chl_{*a*}/Chl_{*b*} = 2,5–3,0. Содержание каротиноидов – 0,1–0,5 мг/г сырой массы. Отношение (Chl_{*a+b*})/car = 3–8, отношение ксантофиллов к каротину 3–5 (Пигменты..., 1964).

1.2 Косвенная регистрация фотосинтетической активности по показателям флуоресценции и спектрального отражения

Ввиду трудоемкости прямого количественного определения хлорофилла в растениях, используют косвенную регистрацию фотосинтетической активности. Наибольшее распространение для подобной регистрации получили флуориметрические и спектральные методы исследования.

В частности, хлорофиллометр SPAD-502 (Япония) является одним из наиболее часто используемых измерительных приборов хлорофилла, также он широко используется исследователями для определения содержания азота у разных видов растений (Yadav et al., 2010). SPAD-502 (рисунок 1.1) испускает излучение на двух длинах волн (940 и 650 нм), направленное на листовую пластинку растений, после чего регистрирует свет от растений, возникающий в следствие явления флуоресценции. Разница между излученным прибором и зарегистрированным после флуоресценции светом является показателем относительного содержания хлорофилла на единицу площади листа (Demotes-Mainard et al., 2008).

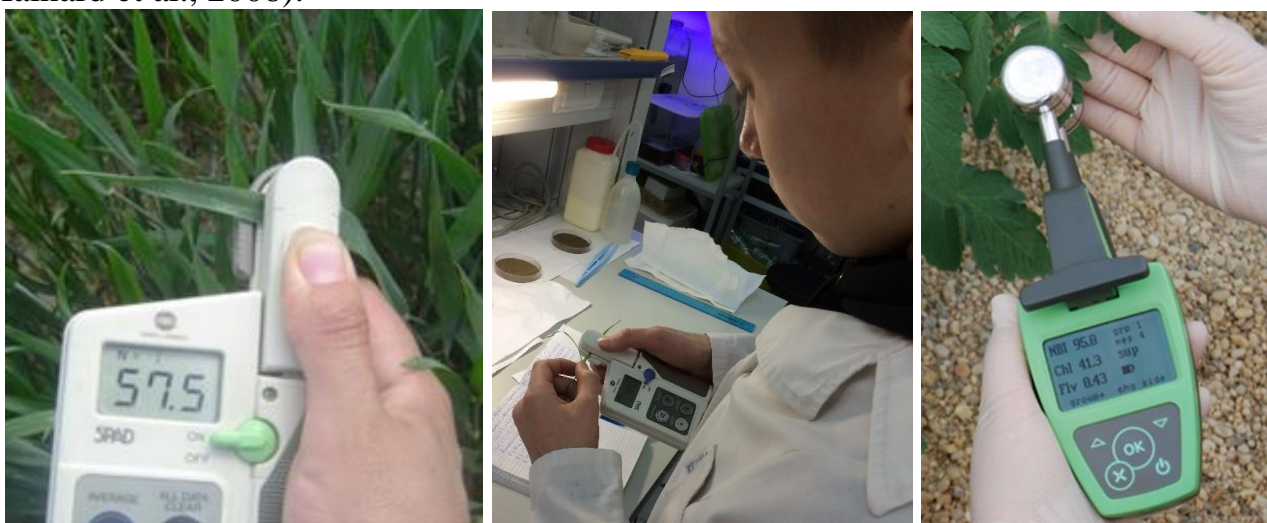


Рисунок 1.1 – Внешний вид прибора SPAD-502 (слева и по центру) и Dualex (справа) в процессе измерения фотосинтетической активности растений

В последние годы были разработаны другие косвенные методы, основанные на различных характеристиках спектрального отражения растениями падающего света (этот подход также используют для определения содержания азота в растениях). Эти косвенные методы обычно реализуются с помощью специальных

фотосенсоров, таких как Dualex (Force-A, Франция) и Multiplex (Force-A, Франция) на уровне листовой пластинки, FieldSpec (ASD Inc., США), CropScan L1 (CropScan Inc., США), Crop Circle (Holland Scientific Inc., США) и Yara N (Yara, Великобритания) на уровне полога, а также Quick Bird (DigitalGlobe, США) – спутникового инструмента, который также использовался для дистанционного измерения содержания хлорофилла и азота в разных растениях (Vesali et al., 2017).

Среди приведенных устройств, приборы использующие цифровые камеры являются самыми дешевыми. Однако в цифровых камерах часто возникают проблемы при их использовании в качестве датчиков, оценивающих содержание азота. Например, различия в условиях освещения, наличие теней могут влиять на получаемые результаты. Чтобы избежать этого, существуют решения по съемке в изолированных условиях, при добавлении искусственного света (Tewari et al., 2013). Другой подход основан на использовании различных индексов, построенных на комбинации сигналов по разным спектральным каналам, чтобы уменьшить влияние изменений естественного освещения в полевых условиях. В частности, Wang с соавт. (2013) использовали подобные индексы, включая GMR (G минус R), G/R, NGI (нормализованный зеленый индекс), NRI (нормализованный красный индекс, Hue (цветовой тон). Они отметили, что показатели GMR и G/R показывают более высокую корреляцию, чем другие показатели для оценки биомассы, содержания хлорофилла и индекса площади листа (LAI). Индекс темно-зеленого цвета (DGCI) был введен на основе цветовой модели HSV и в частности использовался для исследования корреляции содержания хлорофилла и азота в растениях (Vesali et al., 2017).

При дистанционном зондировании Земли из космоса большое распространение получил индекс NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) – Нормализованный Относительный Индекс Растительности – простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом). Один из самых распространенных и используемых индексов для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова.

Для построения индекса используется мультиспектральный привязанный снимок земной поверхности со спутника или летательного аппарата. Используются каналы красной области спектра и ближней инфракрасной области спектра. Для каждого пиксела индекс вычисляется по следующей формуле:

$$NDVI = (NIR - VIS) / (NIR + VIS),$$

где *NIR* – отражение в ближней инфракрасной области спектра, *VIS* – отражение в видимой области спектра. На выходе получается одноканальный растр со значениями пикселей, изменяющихся от -1 до 1 (Drisya et al., 2018).

ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось в четыре этапа. На первом этапе (ноябрь 2017 г. – январь 2018 г.) отработывались методы прямого и косвенного определения фотосинтетических пигментов и способа, основанного на спектральной абсорбции листьев (Никитин, Марданов, 2018). На втором этапе (сентябрь – декабрь 2018 г.) определялись параметры фотосинтетической активности для озимой пшеницы (*Triticum aestivum*) в рамках вегетационных опытов (Shuralev et al., 2019). На третьем этапе (январь – апрель 2019 г.) выполнялись схожие исследования для верификация найденных закономерностей. На четвертом этапе (сентябрь – декабрь 2019 г.) определялись параметры фотосинтетической активности для березы повислой (*Betula pendula* Roth.).

2.1 Спектрофотометрическое определение хлорофилла

Для спектрофотометрического определения хлорофилла, навеску листьев тщательно растирали в фарфоровой ступке с 2 мл экстрагента (этиловый спирт, 96 %), небольшим количеством кварцевого песка и карбоната кальция (для предотвращения феофитинизации). К растертой массе добавляли дополнительное количество (2 мл) экстрагента и снова растирали несколько минут. После отстаивания, экстракт фильтровали в мерную колбу на 25 мл и объем вытяжки доводили чистым растворителем до метки. Полученная вытяжка содержит сумму зеленых и желтых пигментов. Концентрацию пигментов в вытяжке определяли на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ (Экрос, Россия). Для этого часть полученного экстракта заливалась в кювету спектрофотометра. Вторая кювета заполнялась чистым растворителем. Кюветы помещали в кюветную камеру спектрофотометра и определяли оптическую плотность (D) при различных длинах волн: 470, 649 и 665 нм (приложение, рисунок 2.1).

Концентрацию хлорофиллов (a и b) и каротиноидов ($x+c$) в пробах вычисляли по следующим формулам (Lichtenthaler, Wellburn, 1983):

$$C_a = 13,95 \cdot D_{665} - 6,88 \cdot D_{649}$$

$$C_b = 24,96 \cdot D_{649} - 7,32 \cdot D_{665}$$

$$C_{x+c} = (1000 \cdot D_{470} - 2,05 \cdot C_a - 114,8 \cdot C_b) / 245,$$

где C – концентрация соответствующих пигментов в экстракте, мг/л; D – показатель оптической плотности экстракта при указанной длине волны, нм.

Установив концентрацию пигмента в вытяжке, определяли его содержание в исследуемом материале с учетом объема вытяжки и веса пробы:

$$A = C \cdot V / (p \cdot 1000),$$

где C – концентрация пигментов в мг/л, V – объем вытяжки пигментов в мл, p – навеска растительного материала в г, A – содержание пигмента в растительном материале в мг/г сырого веса.

2.2 Косвенная регистрация фотосинтетической активности

Косвенно определяли параметры фотосинтетической активности по флуоресценции: у пшеницы при помощи прибора SPAD-502 plus (Konica Minolta, Япония), у березы при помощи прибора Dualox Scientific+ (Force-A, Франция) в соответствии с инструкцией к прибору.

На основании полученных значений можно рассчитать содержание хлорофилла по формуле (Vesali et al., 2017): $Chl = 10^{M^{0,265}}$, где Chl – содержание хлорофилла в мкмоль/м², M – значение SPAD, по прибору.

Для оценки содержания хлорофилла растений по спектральной абсорбции листьев использовалась фотокамера смартфонов Samsung A5 SM-A510F (Samsung, Корея) и iPhone 5s (Apple, США). Для получения изображения, листовая пластинка помещалась перед объективом камеры (рисунок 2.1), а сзади подсвечивалась подсветкой от одиночного белого светодиода Feron LS603 SMD2835 (мощность 0,08 Вт).

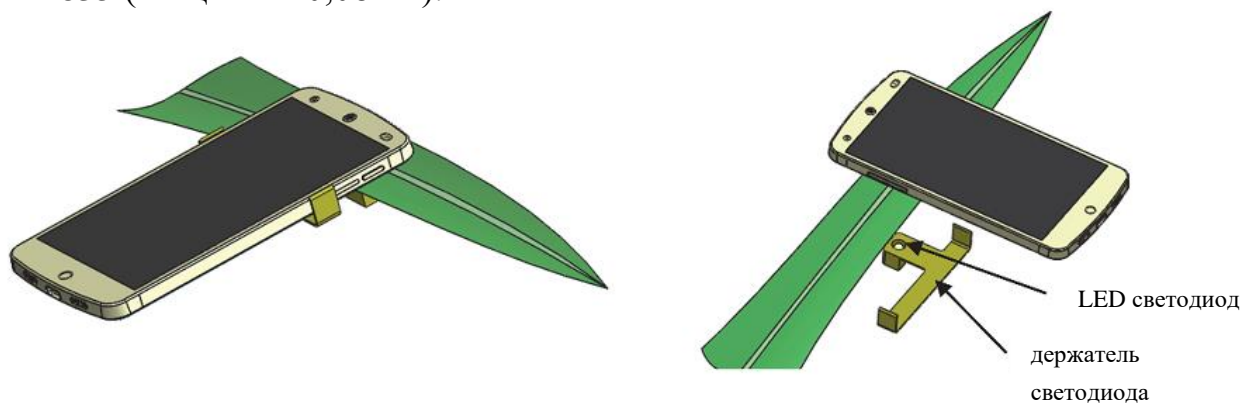


Рисунок 2.1 – Принцип измерения спектральной абсорбции

Цветовая температура светодиода (6500 К) позволяет получать однородный спектр белого цвета, включающий в себя все основные составные цвета (рисунок 2.2). Подобный подход позволяет получать однотипные изображения, без учета влияния освещенности и прочих мешающих факторов). Полученное RGB-изображение анализировалось при помощи программы Photoshop 14.2 (Adobe Systems, США), для получения информации по интенсивности цвета в различных каналах: R – красном, G – зеленом, B – синем.



Рисунок 2.2 – Спектр используемого светодиода LS603 SMD2835, полученный при помощи дифракционной решетки

Дополнительно на основании полученных значений вычислялись различные спектральные индексы (Vesali et al., 2017) (приложение, таблица 2.2).

2.3 Вегетационные опыты

В лабораторных условиях проводились вегетационные опыты, в рамках которых осуществлялось выращивание озимой пшеницы (*Triticum aestivum*, сорт скипетр) на модельных субстратах, приготовленных из почвенно-грунтовой смеси и песка в различных соотношениях (для моделирования различных почвенных и питательных условий, приложение таблица 2.1; рисунок 2.2). Каждый вариант выполнялся в пятикратной повторности.

Вегетационные опыты выполнялись в термостате (температура: 25±2 °С, влажность воздуха: 15–20 %) при искусственном освещении (световой режим

день/ночь – 16/8 ч) в течении 2 месяцев. Полив растений осуществлялся 1 раз в 3 дня дистиллированной водой (25 мл на каждый вариант).

По прошествии четырех недель (стадия кущения) у растений определяли содержание фотосинтетических пигментов, а также косвенные показатели фотосинтетической активности (показатели SPAD и спектральной абсорбции).

2.4 Оценка содержания фотосинтетических пигментов в листьях березы

Для прямого и косвенного определения содержания фотосинтетических пигментов в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в конце сентября 2019 г. было отобрано 15 листьев с трех равновозрастных деревьев, произрастающих во дворе Казанского университета (центральная часть г. Казани, 55°47'21.3"с.ш., 49°07'18.0"в.д.). Листья собирались с нижнего яруса.

Спектрофотометрическое определение хлорофилла выполняли как указано в разделе 2.1. (в навеске, полученной из правой части листа). Косвенную регистрацию фотосинтетической активности выполняли как указано в разделе 2.2 для левой и правой стороны листа (между первой и второй жилками листа).

Статистическая обработка полученных данных производилась при помощи пакета программ STATISTICA 10.0. Вычислялись следующие показатели: среднее, минимум, максимум, стандартное отклонение, стандартная ошибка среднего. Проводился корреляционный анализ.

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Содержание фотосинтетических пигментов в листьях пшеницы

В рамках проведенных исследований спектрофотометрически определено содержание хлорофиллов *a* и *b*, а также каротиноидов в 26 образцах пшеницы. Полученные значения представлены в таблице 3.1 (приложение).

Содержание хлорофилла *a* варьировало в диапазоне 0,34–2,08 мг на грамм сырой биомассы пшеницы, содержание хлорофилла *b* – в диапазоне 0,11–0,56, (при их соотношении 1,53–9,13), количество каротиноидов – в диапазоне 0,06–0,45. Существенных различий между различными вариантами опыта не наблюдалось.

До проведения экстракции, в тех же образцах было выполнено измерение показателей флуоресценции при помощи SPAD-502. Полученные значения приведены в таблице 3.2 (приложение). Из представленных данных видно, что величина SPAD варьирует в пределах 22–48 единиц, в среднем составляя 37 единиц. Содержание хлорофилла, оцененное по этому параметру – в диапазоне 187–615 мкмоль/м². В целом можно отметить, что также не было обнаружено существенных различий между различными вариантами опыта.

Параллельно с измерением SPAD проводилось измерение спектральной абсорбции листьев при помощи смартфона (рисунок 3.1, приложение), а также вычислялись различные спектральные индексы. Полученные результаты представлены в таблице 3.3 (приложение).

Можно отметить различие в значениях цветовых каналов R-G-B, полученных при помощи различных моделей смартфонов. Это может быть связано с различными типами фотографических матриц, используемых производителями.

В качестве общих характеристик можно выделить практически отсутствие светопропускания по синему каналу. Вероятно, это связано с тем, что в этой области лежит максимум поглощения хлорофилла, и свет данной области спектра был практически полностью поглощен растением. Также можно отметить идентичность значений индекса «Saturation» (насыщенность) для всех вариантов.

Для сопоставления полученных значений с ранее оцененными показателями фотосинтетической активности пшеницы, был выполнен корреляционный анализ. Коэффициент корреляции меняется от -1 (обратная связь) до 1 (прямая связь), показывая степень связи между различными параметрами. Данные анализа представлены в таблице 3.1.

Установлены статистически значимые значения коэффициентов корреляции между значениями SPAD и количеством хлорофилла *a* ($r = 0,67$), SPAD и количеством каротиноидов ($r = 0,64$). Коэффициент корреляции между SPAD и суммой хлорофиллов, несмотря на значимость, по всей видимости определяется хлорофиллом *a*.

Таблица 3.1 – Результаты корреляционного анализа полученных данных (красным выделены значимые коэффициенты корреляции, $p < 0,05$)

	Chl a, мг/г	Chl b, мг/г	Chl a+b, мг/г	Cx+c, мг/г
SPAD	0,67 p=0,000	0,29 p=0,170	0,62 p=0,001	0,64 p=0,001

Дополнительно были построены зависимости между количеством фотосинтетических пигментов и показаниями SPAD (приложение, рисунок 3.2).

В частности, зависимость, выражающая связь между параметрами SPAD и количеством хлорофиллов (мг/г), может быть выражена уравнением:

$$\text{Chl}_{a+b} = 0,0387 \times \text{SPAD} - 0,0631 \quad (r = 0,62, p = 0,0012, R^2 = 0,38)$$

В таблице 3.2 представлены данные корреляционного анализа, полученных спектральных данных по отдельным каналам регистрации, индексами, показателями SPAD и количеством фотосинтетических пигментов (канал В и индекс Saturation не приведены, т.к. для них отмечались одинаковые значения, в связи с чем отсутствовала линейная связь).

Таблица 3.2 – Результаты корреляционного анализа данных, полученных при помощи смартфонов (красным выделены значимые коэффициенты, $p < 0,05$)

	R	G	Hue	Brig.	GMR	GDR	VI	DGCI	VARI
<i>Samsung A5</i>									
SPAD	-0,54 $p=0,007$	0,30 $p=0,148$	0,68 $p=0,000$	0,30 $p=0,148$	0,68 $p=0,000$	0,67 $p=0,000$	0,68 $p=0,000$	0,44 $p=0,033$	0,68 $p=0,000$
Chl a по SPAD	-0,54 $p=0,006$	0,32 $p=0,130$	0,69 $p=0,000$	0,32 $p=0,130$	0,69 $p=0,000$	0,68 $p=0,000$	0,69 $p=0,000$	0,45 $p=0,027$	0,69 $p=0,000$
Chl a, мг/г	-0,61 $p=0,002$	0,16 $p=0,459$	0,67 $p=0,000$	0,16 $p=0,459$	0,65 $p=0,001$	0,66 $p=0,000$	0,67 $p=0,000$	0,49 $p=0,015$	0,67 $p=0,000$
Chl b, мг/г	-0,28 $p=0,188$	0,26 $p=0,225$	0,40 $p=0,054$	0,26 $p=0,225$	0,42 $p=0,044$	0,41 $p=0,047$	0,40 $p=0,051$	0,23 $p=0,270$	0,40 $p=0,051$
Chl a+b, мг/г	-0,57 $p=0,004$	0,20 $p=0,343$	0,65 $p=0,001$	0,20 $p=0,343$	0,64 $p=0,001$	0,65 $p=0,001$	0,65 $p=0,001$	0,46 $p=0,024$	0,65 $p=0,001$
Cx+c, мг/г	-0,61 $p=0,002$	0,05 $p=0,808$	0,62 $p=0,001$	0,05 $p=0,808$	0,58 $p=0,003$	0,60 $p=0,002$	0,61 $p=0,002$	0,50 $p=0,013$	0,61 $p=0,002$
<i>iPhone 5s</i>									
SPAD	-0,28 $p=0,183$	0,17 $p=0,436$	0,60 $p=0,002$	0,17 $p=0,436$	0,86 $p=0,000$	0,65 $p=0,001$	0,67 $p=0,000$	-0,13 $p=0,554$	0,64 $p=0,001$
Chl a по SPAD	-0,25 $p=0,233$	0,18 $p=0,389$	0,58 $p=0,003$	0,18 $p=0,389$	0,84 $p=0,000$	0,62 $p=0,001$	0,64 $p=0,001$	-0,12 $p=0,568$	0,61 $p=0,001$
Chl a, мг/г	-0,21 $p=0,320$	0,11 $p=0,611$	0,38 $p=0,066$	0,11 $p=0,611$	0,62 $p=0,001$	0,45 $p=0,027$	0,47 $p=0,021$	-0,16 $p=0,468$	0,43 $p=0,035$
Chl b, мг/г	0,26 $p=0,229$	0,48 $p=0,018$	0,04 $p=0,870$	0,48 $p=0,018$	0,41 $p=0,046$	0,05 $p=0,805$	0,06 $p=0,777$	-0,40 $p=0,056$	0,05 $p=0,823$
Chl a+b, мг/г	-0,09 $p=0,666$	0,23 $p=0,282$	0,31 $p=0,136$	0,23 $p=0,282$	0,61 $p=0,001$	0,37 $p=0,072$	0,39 $p=0,058$	-0,24 $p=0,257$	0,36 $p=0,086$
Cx+c, мг/г	-0,35 $p=0,089$	-0,09 $p=0,693$	0,43 $p=0,038$	-0,09 $p=0,693$	0,53 $p=0,008$	0,49 $p=0,015$	0,51 $p=0,011$	0,01 $p=0,978$	0,47 $p=0,019$

Примечание: Brig. – Brightness

Отмечается значимая связь между указанными параметрами, полученными различными моделями смартфонов.

Наиболее высокие значения индексов корреляции отмечаются для индекса GMR (значения зеленого канала минус значения красного) и VARI, при этом степень связи (r до 0,67) с количеством фотосинтетических пигментов аналогична, полученной для показателя SPAD. Коэффициенты корреляции между спектральными индексами и значениями SPAD также в большинстве случаев значимы и достигают значений 0,68 для Samsung A5 и 0,86 для iPhone 5s.

Полученные зависимости могут быть использованы для оценки содержания хлорофилла по показателям спектральной абсорбции, полученными при помощи смартфонов (приложение, рисунок 3.3).

Например, показатель SPAD и количество хлорофиллов (мг/г) могут быть найдены по значению спектральной абсорбции (для iPhone 5s) по уравнениям:

$$SPAD = (GMR - 46,8719) / 1,1104 (R^2 = 0,74)$$

$$Chl_{a+b} = (GMR - 70,8363) / 12,653 (R^2 = 0,38)$$

Работы, выполненные на третьем этапе (в рамках верификации метода), продемонстрировали хорошую сходимость результатов по определению фотосинтетических пигментов, найденных по полученным зависимостям и определенных прямым спектрофотометрическим способом. Погрешность определения находилась в пределах 20 %, что соответствует погрешностям традиционных методик физико-химического анализа.

3.2 Содержание фотосинтетических пигментов в листьях березы

Содержание хлорофиллов *a* и *b*, а также каротиноидов в листовых пластинках березы повислой представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилл *a*, *b*, каротиноидов) в листьях березы

	Среднее	Минимум	Максимум	Ст.откл.	Ст.ошибка
Chl a, мг/г	1,14	0,73	1,89	0,27	0,07
Chl b, мг/г	0,49	0,30	0,75	0,11	0,03
Chl a+b, мг/г	1,63	1,03	2,64	0,38	0,10
Chl a / Chl b	2,30	2,03	2,52	0,13	0,03
Cx+c, мг/г	0,37	0,24	0,61	0,08	0,02

Содержание хлорофилла *a* варьировало в диапазоне 0,73–1,89 мг на грамм сырой биомассы листа, содержание хлорофилла *b* – в диапазоне 0,30–0,75 (при их соотношении 2,03–2,52), количество каротиноидов – в диапазоне 0,24–0,61 мг/г.

Содержание пигментов в листьях зеленых растений является важным эколого-физиологическим признаком, отражающим влияние среды произрастания. Встречаются различные точки зрения относительно характера изменения пигментных комплексов в ответ на действие загрязнителей. В одних случаях авторы отмечают повышение содержания пигментов в листьях растений, в других наоборот снижение или же изменений не обнаруживается. Отмечается также и видоспецифичность реакции растений (Параскевопуло и др., 2017). В частности, для листьев березы, при развитии в экстремальных лесорастительных условиях, отмечается увеличение суммы пигментов за счет каротиноидов и хлорофилла *b*, при этом количество хлорофилла *a* сокращается (Кулагин, 2006). Исходя из этого, для диагностики состояния окружающей среды можно использовать не только содержание отдельных фотосинтетических пигментов, но и их соотношение.

До проведения экстракции, в тех же листьях было выполнено измерение показателей флуоресценции при помощи прибора Dualex. Полученные значения приведены в таблице 3.4 (приложение). Из представленных данных видно, что величина хлорофилла варьирует в пределах 25–34 единиц, в среднем составляя 30,6. Статистически значимых различий в параметрах, измеренных на левой и на правой стороне листа не наблюдалось (таблица 3.5, приложение).

Для содержания хлорофилла, определяемого по SPAD и Dualex исследователями установлена значимая статистическая связь (Casa et al., 2015):

$$SPAD = -1,963 + 1,435 \times Dualex - 0,006 \times Dualex^2 (R^2=0,93, p<0,001)$$

Можно отметить, что SPAD дает в целом более высокие показания, чем Dualex, особенно при средних концентрациях хлорофилла. В дальнейшем планируется провести самостоятельное изучение взаимосвязи этих параметров.

Параллельно с измерением флуоресценции проводилось измерение спектральной абсорбции листьев при помощи камеры смартфона, а также вычислялись различные спектральные индексы. Полученные результаты представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры спектральной абсорбции листьев березы

Сторона листа	R	G	B	Hue	Sat.	Brig.	GMR	GDR	VI	DGCI	VARI
	<i>Samsung A5</i>										
Правая	145,0	192,1	38,0	78,38	0,80	0,75	47,13	1,33	0,14	0,25	0,16
Левая	145,4	192,5	30,9	77,69	0,84	0,75	47,07	1,33	0,14	0,23	0,15
Среднее	145,2	192,3	34,4	78,04	0,82	0,75	47,10	1,33	0,14	0,24	0,16
<i>iPhone 5s</i>											
правая	157,1	241,2	30,1	83,94	0,87	0,95	84,07	1,54	0,21	0,19	0,23
левая	156,7	241,0	25,3	83,47	0,89	0,95	84,27	1,54	0,21	0,18	0,23
среднее	156,9	241,1	27,7	83,71	0,88	0,95	84,17	1,54	0,21	0,19	0,23

Примечание: Sat. – Saturation, Brig. – Brightness

Аналогично измерениям, выполненным на листьях пшеницы, отмечается различие в значениях цветовых каналов R-G-B, полученных при помощи различных моделей смартфонов. В целом изображения листовых пластинок можно представить в виде следующих усредненных цветов (рисунок 3.1).



Samsung A5, RGB=(145, 192, 34)

iPhone 5s, RGB=(157, 241, 28)

Рисунок 3.1 – Усредненное представление цвета листьев березы, определенного при помощи различных моделей смартфонов

Можно отметить отсутствие статистически значимых различий в параметрах, измеренных на левой и на правой стороне листа (таблица 3.5, приложение).

Установлено статистически значимое значение коэффициента корреляции между значениями Chl и отношением содержания хлорофиллов *a* и *b* ($r = 0,65$). Между остальными параметрами связь не выявлена, возможно требуется более объемная выборка с более широким диапазоном определяемых значений (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Результаты корреляционного анализа полученных данных (красным выделены значимые коэффициенты корреляции, $p < 0,05$)

	Chl a, мг/г	Chl b, мг/г	Chl a+b, мг/г	Chl a / Chl b	Cx+c, мг/г
Chl	0,352 $p=0,199$	0,206 $p=,462$	0,313 $p=0,257$	0,652 $p=0,008$	0,353 $p=0,197$

Зависимость, выражающая эту связь, может быть выражена уравнением:

$$\text{Chl a} / \text{Chl b} = 0,0273 \times \text{Chl} + 1,464 \quad (r = 0,65, p = 0,0084, R^2 = 0,43)$$

В таблицах 3.6 и 3.7 представлены данные корреляционного анализа, полученных спектральных данных по отдельным каналам регистрации, индексами, показателями флуоресценции и количеством фотосинтетических пигментов.

Значимые коэффициенты корреляции между значениями флуоресценции и спектральными индексами отмечены для пар Flav–G ($r = -0,506$), Flav–Brig. ($r = -0,506$), Flav–GMR ($r = -0,365$), NBI–G ($r = 0,491$), NBI–Brig. ($r = 0,491$), NBI–GMR

($r = 0,362$) для Samsung A5; для пар NBI–R ($r = -0,451$), NBI–Hue ($r = 0,601$), NBI–GMR÷VARI ($r = 0,431 \div 0,536$) для iPhone 5s.

Между фактическим содержанием фотосинтетических пигментов и спектральными индексами, статистически значимые коэффициенты корреляции выявлены лишь для модели Samsung – для пар Chl a / Chl b и индексами GMR ($r = -0,613$), GDR ($r = -0,635$), VI ($r = -0,644$), VARI ($r = -0,608$).

Таблица 3.6 – Результаты корреляционного анализа данных, полученных при помощи смартфонов (красным выделены значимые коэффициенты, $p < 0,05$)

	R	G	B	Hue	Sat.	Brig.	GMR	GDR	VI	DGCI	VARI
<i>Samsung A5</i>											
Chl	-0,053	-0,077	0,215	0,146	-0,217	-0,077	-0,021	-0,002	-0,002	0,220	0,066
	p=,783	p=,685	p=,254	p=,441	p=,250	p=,685	p=,913	p=,993	p=,994	p=,242	p=,730
Flav	-0,172	-0,506	0,278	0,024	-0,313	-0,506	-0,365	-0,234	-0,235	0,348	-0,141
	p=,363	p=,004	p=,137	p=,900	p=,092	p=,004	p=,047	p=,213	p=,212	p=,059	p=,459
Anth	0,244	0,037	0,079	-0,196	-0,080	0,037	-0,279	-0,310	-0,304	-0,018	-0,279
	p=,195	p=,845	p=,679	p=,299	p=,674	p=,845	p=,136	p=,095	p=,103	p=,925	p=,136
NBI	0,161	0,491	-0,109	0,093	0,146	0,491	0,362	0,232	0,233	-0,187	0,193
	p=,395	p=,006	p=,566	p=,626	p=,443	p=,006	p=,049	p=,218	p=,215	p=,322	p=,307
<i>iPhone 5s</i>											
Chl	-0,211	0,075	0,046	0,350	-0,046	0,075	0,316	0,288	0,290	0,179	0,330
	p=,264	p=,694	p=,810	p=,058	p=,809	p=,694	p=,089	p=,122	p=,121	p=,345	p=,075
Flav	0,325	0,289	-0,109	-0,353	0,119	0,289	-0,212	-0,242	-0,258	-0,332	-0,309
	p=,080	p=,122	p=,568	p=,056	p=,533	p=,122	p=,261	p=,198	p=,169	p=,073	p=,096
Anth	0,182	-0,071	-0,005	-0,283	0,005	-0,071	-0,278	-0,228	-0,241	-0,122	-0,267
	p=,335	p=,708	p=,979	p=,130	p=,981	p=,708	p=,137	p=,226	p=,200	p=,521	p=,153
NBI	-0,451	-0,201	0,165	0,601	-0,173	-0,201	0,431	0,432	0,450	0,461	0,536
	p=,012	p=,287	p=,384	p=,000	p=,361	p=,287	p=,018	p=,017	p=,013	p=,010	p=,002

Таблица 3.7 – Результаты корреляционного анализа данных, полученных при помощи смартфона Samsung (красным выделены значимые коэффициенты)

	GMR	GDR	VI	VARI
Chl a, мг/г	0,228	0,159	0,137	0,132
	p=,413	p=,572	p=,627	p=,640
Chl b, мг/г	0,394	0,324	0,305	0,288
	p=,146	p=,238	p=,269	p=,297
Chl a+b, мг/г	0,277	0,207	0,186	0,177
	p=,318	p=,459	p=,508	p=,528
Chl a / Chl b	-0,613	-0,635	-0,644	-0,608
	p=,015	p=,011	p=,010	p=,016
Cx+c, мг/г	0,233	0,166	0,143	0,147
	p=,403	p=,554	p=,612	p=,602

Полученные зависимости могут быть использованы для оценки содержания фотосинтетических пигментов по показателям спектральной абсорбции, (приложение, рисунок 3.4), например:

$$\text{Chl a / Chl b} = -0,0096 \times \text{GMR} + 2,7505 \quad (r = -0,61, p = 0,015, R^2 = 0,38)$$

Таким образом, предложен простой, оперативный, неразрушающий и недорогой метод по определению фотосинтетической активности как травянистых, так и древесных растений по сравнению с традиционно используемыми для этих целей трудоемким и отнимающим много времени разрушающим спектрофотометрическим методом и методом при помощи анализаторов SPAD (стоимость прибора ~190 тыс. руб.) и Dualex (стоимость прибора ~460 тыс. руб.).

Подобный подход может позволить удешевить анализ параметров фотосинтеза, а учитывая ранее полученные закономерности между показателями SPAD и азотным питанием растений (приложение, рисунок 3.5, таблица 3.6), оптимизировать применение азотных удобрений, что в свою очередь позволит снизить затраты при выращивании культур и минимизирует отрицательное воздействие на окружающую среду, что в свою очередь позволяет говорить о потенциальном **снижении экологических рисков** при ведении сельского хозяйства, а также о перспективе использования метода спектральной абсорбции для целей экологического мониторинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В пшенице содержание хлорофилла *a* варьировало в диапазоне 0,34–2,08 мг на грамм сырой биомассы пшеницы, содержание хлорофилла *b* – в диапазоне 0,11–0,56 (при их соотношении 1,5–9,1), количество каротиноидов – в диапазоне 0,06–0,45.

2. В листьях березы содержание хлорофилла *a* варьировало в диапазоне 0,73–1,89 мг на грамм сырой биомассы листа, содержание хлорофилла *b* – в диапазоне 0,30–0,75 (при их соотношении 2,03–2,52), количество каротиноидов – в диапазоне 0,24–0,61 мг/г.

3. Величина SPAD для листьев пшеницы изменялась в пределах 22,13–47,93 единиц, в среднем составляя 37,19 единиц. Содержание хлорофилла, оцененное по этому параметру, лежало в диапазоне 187–615 мкмоль/м².

4. Величина хлорофилла (Dualex) для листьев березы варьировала в пределах 25–34 единиц, в среднем составляя 30,6. Статистически значимых различий в параметрах, измеренных на левой и на правой стороне листа не наблюдалось.

5. Показатели спектральной абсорбции листовых пластинок пшеницы, полученные разными моделями смартфонов, статистически значимо коррелируют с показателями фотосинтетической активности растений, оцененной по параметру SPAD, так и напрямую ($r = 0,68–0,86$ и $0,41–0,67$). Наиболее высокие значения отмечаются для спектральных индексов GMR и VARI. Значения корреляционной связи с фотосинтетическими пигментами, полученные при помощи смартфонов, в целом идентичны значениям, полученным при помощи показателя SPAD.

6. Верификация метода продемонстрировала хорошую сходимость результатов по определению фотосинтетических пигментов, найденных по полученным зависимостям и определенных прямым спектрофотометрическим способом. Погрешность определения находилась в пределах 20 %, что соответствует погрешностям традиционных методик физико-химического анализа.

7. Между фактическим содержанием фотосинтетических пигментов и спектральными индексами, статистически значимые коэффициенты корреляции выявлены лишь для модели Samsung – для пар Chl *a* / Chl *b* и индексами GMR ($r = -0,613$), GDR ($r = -0,635$), VI ($r = -0,644$), VARI ($r = -0,608$). Показатели спектральной абсорбции листовых пластинок березы, полученные разными моделями смартфонов, статистически значимо коррелируют с показателями фотосинтетической активности растений, оцененной при помощи индексов прибора Dualex ($r = -0,51–0,60$).

Таким образом, гипотеза «характеристики фотоизображения листовой пластинки древесных и травянистых растений, полученное при помощи фотокамеры смартфона, после прохождения сквозь нее света (спектральная абсорбция), позволяет косвенно судить о содержании фотосинтетических

пигментов и фотосинтетической активности растений» нашла свое подтверждение в ходе выполненных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валеева Г.Р. Практикум по биогеохимии. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2007. – С. 16-20.
2. Никитин О.В., Марданов А.Г. Оценка содержания хлорофилла растений по спектральной абсорбции листьев, определяемой при помощи смартфона // Сборник научных трудов молодых ученых (по материалам III Республиканской молодежной экологической научной конференции, г. Казань, 5-6 апреля 2018 г.). – Казань: Издательство Академии наук Республики Татарстан, 2018. – С. 188-197.
3. Кулагин А.А. Реализация адаптивного потенциала древесных растений в экстремальных лесорастительных условиях: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Тольятти, 2006. – 40 с.
4. Параскевопуло М.Ф., Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М. Изучение пигментного состава некоторых видов древесных в условиях техногенного загрязнения города Красноярск // Хвойные бореальной зоны. – 2017. – Т. XXXV, № 1-2. – С. 54-59.
5. Пигменты пластид зеленых растений и методика их исследования / под ред. Д.И. Сапожникова. – М.: Наука, 1964. – 123 с.
6. Сарсацкая А.С. Содержание фотосинтетических пигментов у древесных пород городских насаждений // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Биологические, технические науки и науки о Земле. – 2017. – №4. – С. 9-14.
7. Шуберт Р. (ред.) Биоиндикация загрязнений наземных экосистем: Пер. с нем. – М: Мир, 1988. – 350 с.
8. Casa R., Castaldi F., Pascucci S., Pignatti S. Chlorophyll estimation in field crops: an assessment of handheld leaf meters and spectral reflectance measurements // The Journal of Agricultural Science. – 2015. – Vol. 153 (5). – P. 876-890.
9. Demotes-Mainard S., Boumaza R., Meyer S., Cerovic Z.G. Indicators of nitrogen status for ornamental woody plants based on optical measurements of leaf epidermal polyphenol and chlorophyll contents // Sci Hort.-Amsterdam. – 2008. – Vol. 115. – P. 377-385.
10. Drisya J., Kumar D.S., Roshni T. Spatiotemporal variability of soil moisture and drought estimation using a distributed hydrological model // Integrating Disaster Science and Management: Global Case Studies in Mitigation and Recovery. – Elsevier, 2018. – P. 451-460.
11. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents // Biochemical Society Transactions Oct. – 1983. – Vol. 11(5). – P. 591-592.
12. Shuralev E.A., Nikitin O.V., Mardanov A.G., Osyanin K.A. Evaluation of the wheat photosynthetic pigments content by spectral absorption of leaves determined using a smartphone // Book of Abstracts. 4th Edition of Global Conference on Plant Science and Molecular Biology. September 19-21, 2019. – London, UK, 2019. – P. 67.
13. Tewari V.K., Aruda A.K., Kumar S.P. Estimation of plant nitrogen content using digital image processing // Agric. Eng. Int. CIGR J. – 2013. – Vol. 15. – P. 78-86.
14. Vesali F., Omid M., Mobli H., Kaleita A. Feasibility of using smart phones to estimate chlorophyll content in corn plants // Photosynthetica. – 2017. – Vol. 55. – P. 603-610.

15. Wang Y., Wang D., Zhang G., Wang J. Estimating nitrogen status of rice using the image segmentation of G-R thresholding method // *Field Crop. Res.* – 2013. – Vol. 149. – P. 33-39.
16. Yadav S., Ibaraki Y., Dutta Gupta S. Estimation of the chlorophyll content of micropropagated potato plants using RGB based image analysis // *Plant Cell Tiss. Organ Cult.* – 2010. – Vol. 100. – P. 183-188.

ПРИЛОЖЕНИЕ



Рисунок 2.1 – Проведение лабораторных измерений морфометрических показателей (верхний рисунок) и фотосинтетических пигментов растений (нижний рисунок)

Таблица 2.1 – Варианты почвенно-грунтовых смесей, используемых в экспериментах

Вариант	Соотношение грунт : песок (частей)
№1	4 : 0
№2	3 : 1
№3	2 : 2
№4	1 : 3
№5	0 : 4

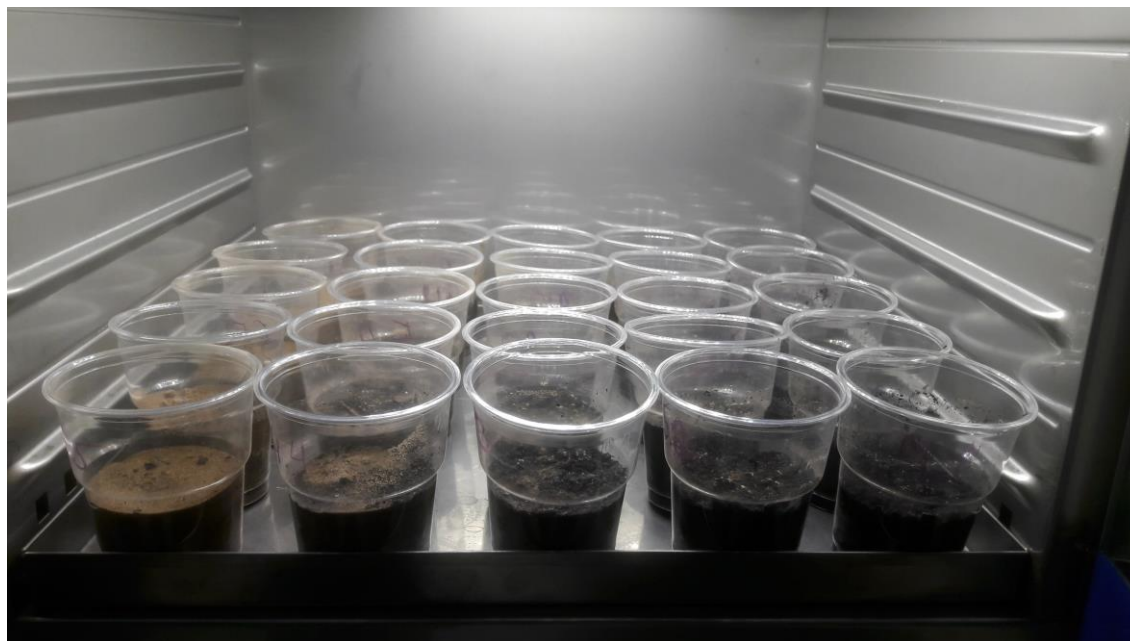


Рисунок 2.2 – Постановка вегетационных опытов в лабораторных условиях (верхний рисунок – начало эксперимента, нижний рисунок – конец эксперимента)

Таблица 2.2 – Вычисляемые в работе спектральные индексы

$$Hue = \begin{cases} 60 \cdot \left(\frac{G - B}{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)} \right), & \max(R, G, B) = R \\ 60 \cdot \left(2 + \frac{B - R}{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)} \right), & \max(R, G, B) = G \\ 60 \cdot \left(4 + \frac{G - B}{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)} \right), & \max(R, G, B) = B \end{cases}$$

$$Saturation (S) = \begin{cases} 0, & V = 0 \\ \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\max(R, G, B)}, & V \neq 0 \end{cases}$$

$$Brightness (B') = \frac{\max(R, G, B)}{255}$$

$$GMR = G - R$$

$$GDR = \frac{G}{R}$$

$$I = \frac{G - R}{G + R}$$

$$DGCI = \left[\left(\frac{Hue}{60} - 1 \right) + (1 - S) + (1 - B') \right] / 3$$

$$VARI = \frac{R_{GREEN} - R_{RED}}{R_{GREEN} + R_{RED} - R_{BLUE}}$$

Таблица 3.1 – Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилл а, в, каротиноидов) в листьях пшеницы

	Вариант	Среднее	Минимум	Максимум	Ст.откл.	Ст.ошибка
Chl a, мг/г	Вар.1	1,12	0,82	1,48	0,22	0,06
	Вар.2	1,15	0,70	1,59	0,31	0,12
	Вар.3	1,27	1,06	1,38	0,18	0,10
	Вар.4	1,22	0,34	2,08	0,71	0,36
	Все группы	1,16	0,34	2,08	0,33	0,06
Chl b, мг/г	Вар.1	0,20	0,11	0,29	0,07	0,02
	Вар.2	0,33	0,26	0,44	0,06	0,03
	Вар.3	0,39	0,29	0,52	0,12	0,07
	Вар.4	0,37	0,22	0,56	0,14	0,07
	Все группы	0,28	0,11	0,56	0,12	0,02
Chl a+b, мг/г	Вар.1	1,32	0,94	1,75	0,28	0,08
	Вар.2	1,48	0,96	2,03	0,37	0,15
	Вар.3	1,66	1,35	1,90	0,28	0,16
	Вар.4	1,58	0,56	2,63	0,85	0,42
	Все группы	1,43	0,56	2,63	0,42	0,08
Chl a / Chl b	Вар.1	6,01	4,54	9,13	1,36	0,38
	Вар.2	3,43	2,66	3,72	0,42	0,17
	Вар.3	3,34	2,63	3,77	0,62	0,36
	Вар.4	3,09	1,53	3,77	1,06	0,53
	Все группы	4,66	1,53	9,13	1,73	0,34
Сх+с, мг/г	Вар.1	0,27	0,21	0,36	0,05	0,01
	Вар.2	0,24	0,12	0,35	0,08	0,03
	Вар.3	0,26	0,24	0,28	0,02	0,01
	Вар.4	0,26	0,06	0,45	0,16	0,08
	Все группы	0,26	0,06	0,45	0,07	0,01

Таблица 3.2 – Параметры фотосинтетической активности образцов пшеницы, оцененные при помощи хлорофиллометра SPAD-502 plus

	Вариант	Среднее	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение	Ст. ошибка среднего
SPAD, ед.	Вар.1	37,28	27,20	43,80	4,36	1,21
	Вар.2	40,83	31,77	47,93	5,28	2,15
	Вар.3	36,90	31,70	40,03	4,53	2,62
	Вар.4	31,64	22,13	38,27	6,81	3,41
	Все группы	37,19	22,13	47,93	5,48	1,07
Chl по SPAD, мкмоль/м ²	Вар.1	409,80	251,03	528,01	73,71	20,44
	Вар.2	475,08	316,57	614,45	96,64	39,45
	Вар.3	402,40	315,56	455,54	75,83	43,78
	Вар.4	321,17	187,13	423,57	98,52	49,26
	Все группы	410,38	187,13	614,45	91,58	17,96

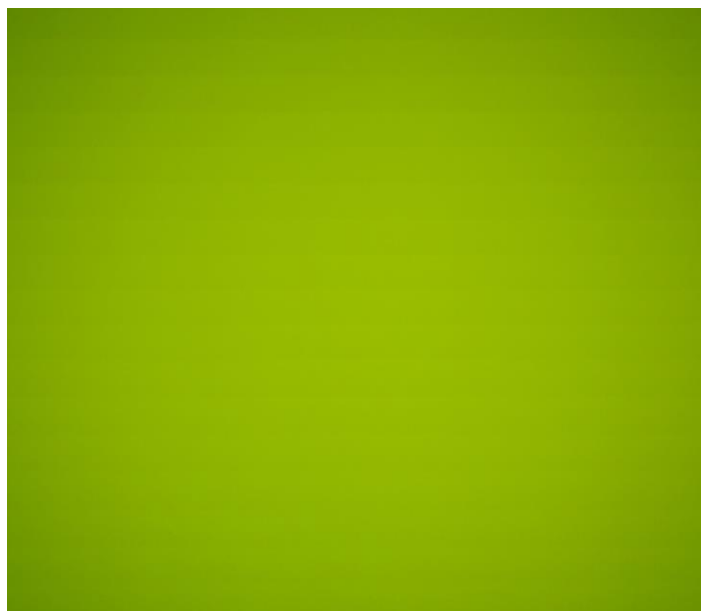


Рисунок 3.1 – Пример фотоизображения, полученного методом спектральной абсорбции с помощью смартфона Samsung A5 (RGB = 151, 186, 1, усредненные значения для области диаметром 100 писк.)

Таблица 3.3 – Параметры спектральной абсорбции листьев пшеницы, полученные при помощи смартфона Samsung A5 и iPhone 5s

	R	G	B	Hue	Sat.	Brig.	GMR	GDR	VI	DGCI	VARI
	<i>Samsung A5</i>										
Вар.1	151,3	188,5	1,8	71,94	0,99	0,74	37,15	1,25	0,11	0,16	0,11
Вар.2	147,8	193,8	1,3	74,29	0,99	0,76	46,00	1,31	0,13	0,16	0,14
Вар.3	155,3	190,7	1,3	71,20	0,99	0,75	35,33	1,23	0,10	0,15	0,10
Вар.4	155,5	187,0	5,5	70,21	0,97	0,73	31,50	1,21	0,09	0,16	0,09
Все группы	151,3	190,0	1,9	72,29	0,99	0,74	38,67	1,26	0,11	0,16	0,11
	<i>iPhone 5s</i>										
Вар.1	145,1	232,2	0,4	82,60	1,00	0,91	87,08	1,61	0,23	0,16	0,23
Вар.2	155,8	250,0	0,0	82,62	1,00	0,98	94,17	1,61	0,23	0,13	0,23
Вар.3	161,7	250,7	0,0	81,31	1,00	0,98	89,00	1,55	0,22	0,12	0,22
Вар.4	162,0	240,0	16,0	80,81	0,93	0,94	78,00	1,49	0,20	0,16	0,20
Все группы	151,3	239,6	1,5	82,29	0,99	0,94	88,33	1,59	0,23	0,15	0,23

Примечание: Sat. – Saturation, Brig. – Brightness

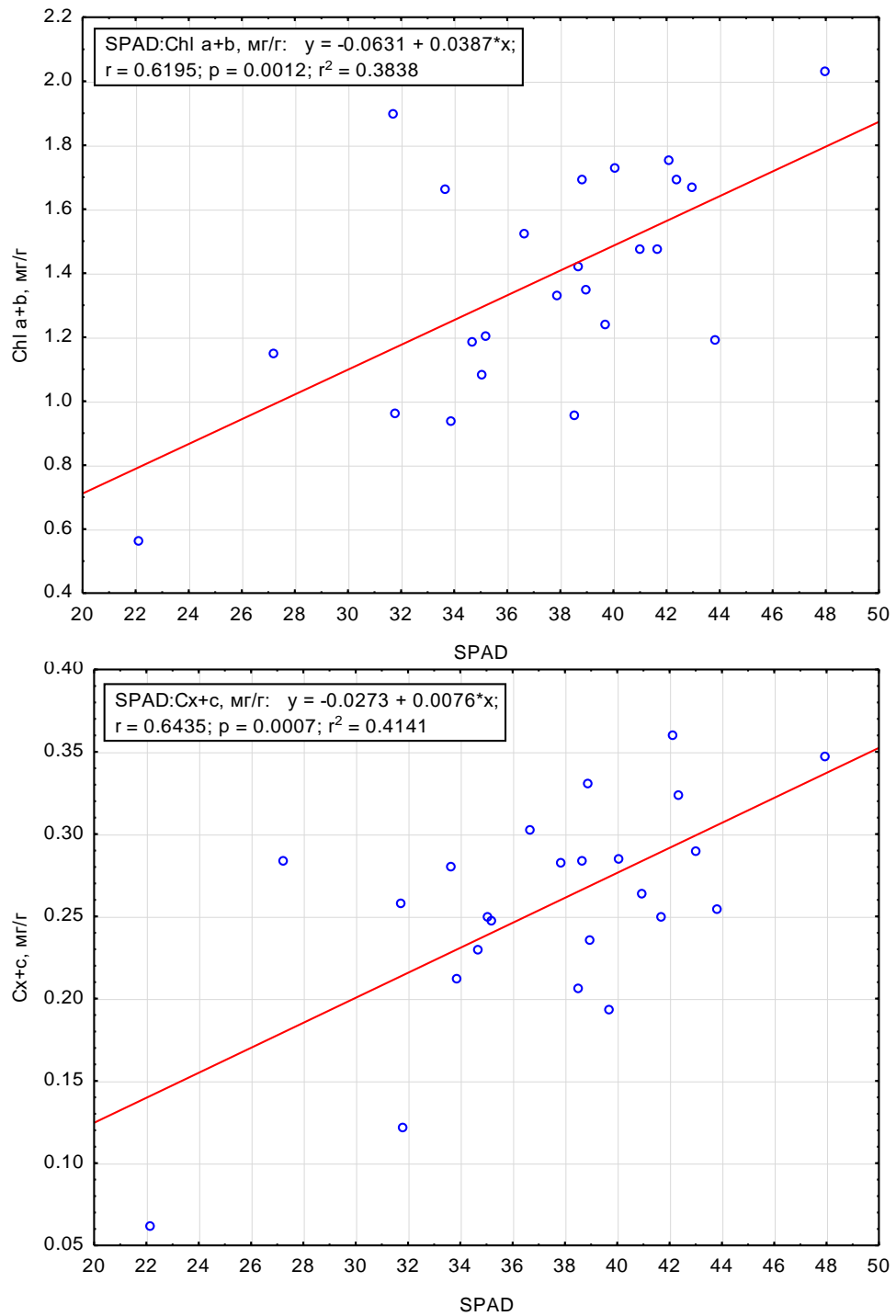


Рисунок 3.2 – Найденные зависимости между показаниями SPAD и содержанием пигментов в пшенице

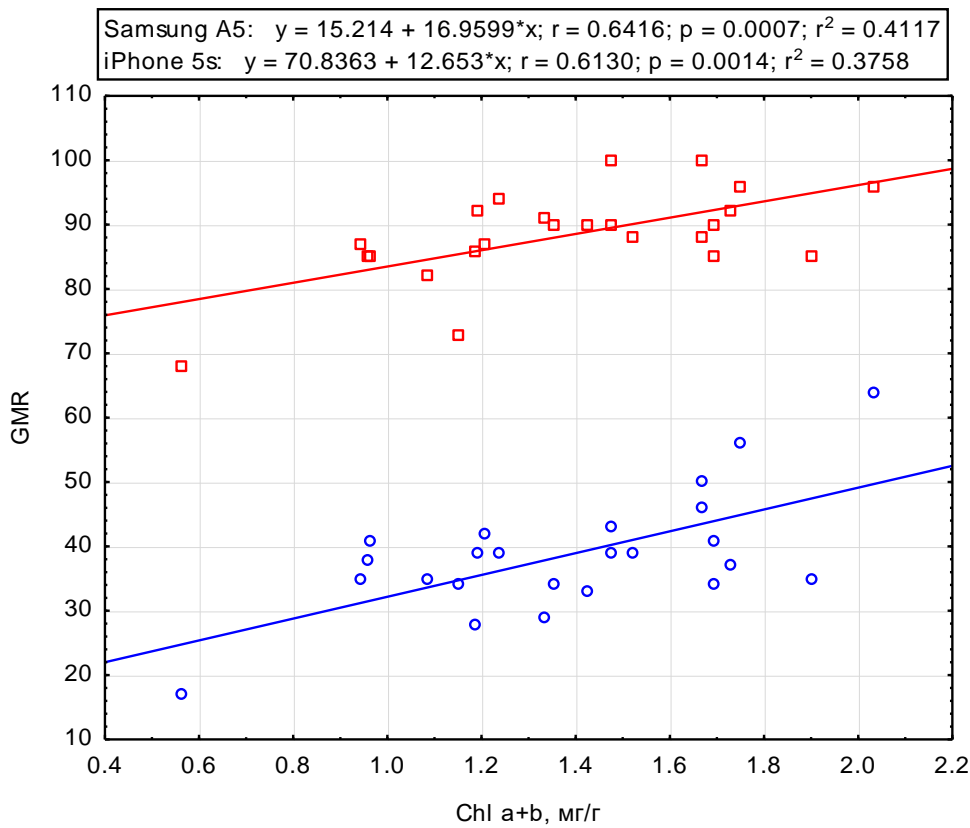
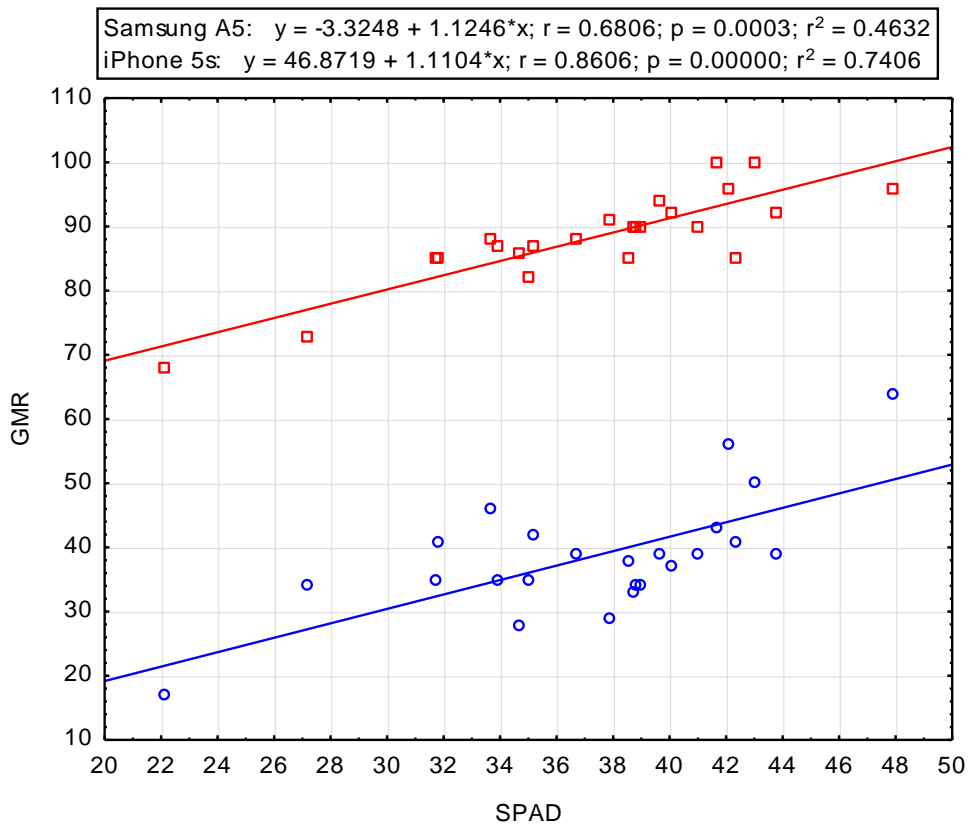


Рисунок 3.3 – Найденные зависимости между значениями SPAD, количеством фотосинтетических пигментов и спектральным индексом GMR

Таблица 3.4 – Параметры фотосинтетической активности листьев березы, оцененные при помощи хлорофиллометра Dualex Scientific+

Параметр	Сторона листа	Среднее	Минимум	Максимум	Ст.откл.	Ст.ошибка
Chl	правая	30,63	25,40	34,00	3,12	0,80
	левая	29,59	18,90	34,50	3,96	1,02
	сред.	30,11	18,90	34,50	3,54	0,65
Flav	правая	1,20	0,96	1,55	0,19	0,05
	левая	1,21	0,93	1,63	0,19	0,05
	сред.	1,21	0,93	1,63	0,19	0,03
Anth	правая	0,11	0,09	0,13	0,01	0,00
	левая	0,11	0,01	0,16	0,03	0,01
	сред.	0,11	0,01	0,16	0,02	0,00
NBI	правая	25,91	20,80	31,90	3,22	0,83
	левая	24,80	15,00	30,50	4,01	1,04
	сред.	25,36	15,00	31,90	3,62	0,66

Примечание: «Chl» – содержание хлорофилла, «Flav» – содержание флавонола в эпидермисе в ед. поглощения, «Anth» – содержание антоциана в эпидермисе в ед. поглощения, «NBI» – индекс азотного баланса (Nitrogen Balance Index, вычисляется как отношение Chl и Flv)

Таблица 3.5 – Оценка различий по критерию Стьюдента (t-value) параметров фотосинтетической активности, измеренных с левой и правой стороны листа березы повислой

Параметр	Среднее правая	Среднее левая	t-value	df	p
NBI	25,913	24,800	0,838	28	0,409
Chl	30,627	29,587	0,800	28	0,430
Flav	1,199	1,211	-0,180	28	0,858
Anth	0,107	0,109	-0,151	28	0,881
R'	157,133	156,733	0,094	28	0,925
G'	241,200	241,000	0,087	28	0,931
B'	30,133	25,267	1,237	28	0,226
Hue'	83,937	83,474	0,525	28	0,604
Saturation'	0,875	0,895	-1,189	28	0,245
Brightness'	0,946	0,945	0,087	28	0,931
GMR'	84,067	84,267	-0,059	28	0,953
GDR'	1,541	1,543	-0,058	28	0,954
VI'	0,212	0,213	-0,056	28	0,956
DGCI'	0,193	0,184	0,917	28	0,367
VARI'	0,229	0,227	0,214	28	0,832
R	145,000	145,400	-0,123	28	0,903
G	192,133	192,467	-0,116	28	0,908
B	38,000	30,867	1,160	28	0,256
Hue	78,381	77,695	0,716	28	0,480
Saturation	0,801	0,839	-1,149	28	0,260
Brightness	0,753	0,755	-0,116	28	0,908
GMR	47,133	47,067	0,027	28	0,979
GDR	1,327	1,326	0,057	28	0,955
VI	0,140	0,140	0,016	28	0,988
DGCI	0,251	0,234	1,081	28	0,289
VARI	0,157	0,154	0,380	28	0,707

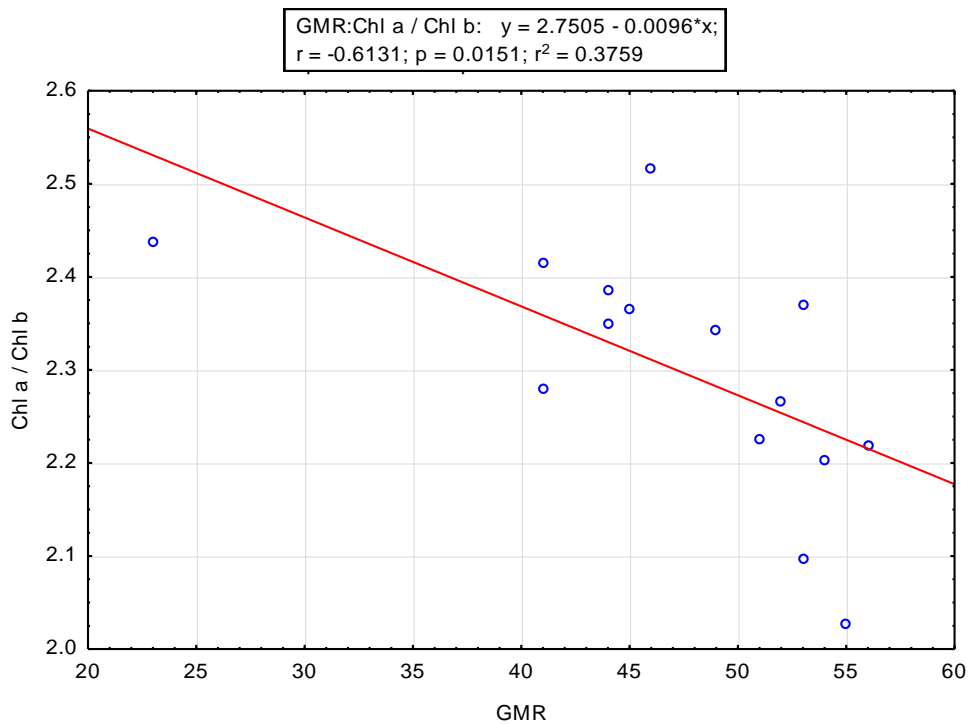


Рисунок 3.4 – Найденная зависимость между количеством фотосинтетических пигментов и спектральным индексом GMR (для Samsung A5)

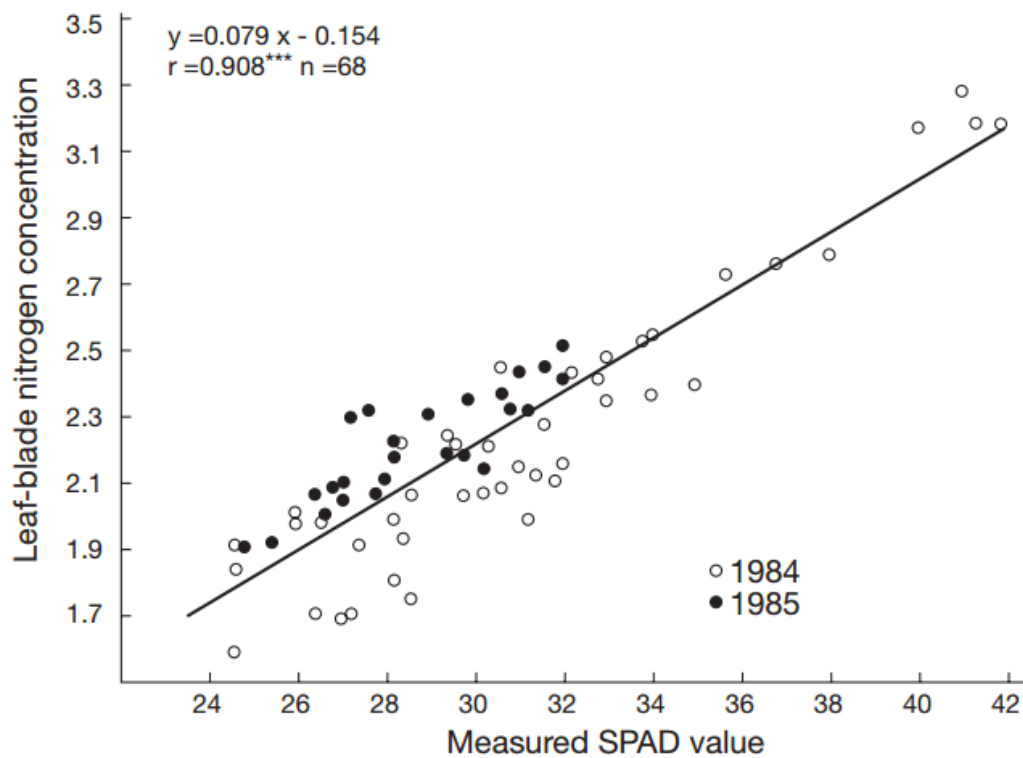


Рисунок 3.5 – Зависимость между показаниями SPAD и содержанием азота в листовых пластинках растений (инструкция к прибору)

Таблица 3.6 – Рекомендуемые нормы внесения азотных удобрений на основе показаний SPAD-502 для внесения в фазе кущения (F3) озимой пшеницы (инструкция к прибору)

Показания прибора	Доза азота, кг/га
<44	95
45-46	85
47-48	70
49-50	60
51-52	45
52-53	30
54-55	20
56	0

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа на наличие заимствований

Проверка выполнена в системе
Антиплагиат.Структура

Автор работы	Марданов Амир
Подразделение	ИнЭП КФУ
Тип работы	Не указано
Название работы	Марданов Амир - 10 класс, 2020 (PT-1)
Название файла	Марданов Амир - 10 класс, 2020 (PT-1).docx
Процент заимствования	14.89 %
Процент цитирования	9.64 %
Процент оригинальности	75.48 %
Дата проверки	20:42:44 10 января 2020г.
Модули поиска	Модуль поиска ИПС "Адилет"; Модуль выделения библиографических записей; Сводная коллекция ЭБС; Коллекция РГБ; Цитирование; Модуль поиска переводных заимствований; Модуль поиска переводных заимствований по elibrary (EnRu); Модуль поиска переводных заимствований по интернет (EnRu); Модуль поиска переводных заимствований по Wiley (RuEn); Коллекция eLIBRARY.RU; Коллекция ГАРАНТ; Модуль поиска Интернет; Модуль поиска "КПФУ"; Коллекция Медицина; Модуль поиска перефразирований eLIBRARY.RU; Модуль поиска
Работу проверил	Никитин Олег Владимирович ФИО проверяющего
Дата подписи	  Подпись проверяющего

Чтобы убедиться
в подлинности справки,
используйте QR-код, который
содержит ссылку на отчет.



Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.