

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра микробиологии и физиологии растений

**РАЗНОКАЧЕСТВЕННОСТЬ СЕМЯН ПШЕНИЦЫ В ЗАВИСИМОСТИ  
ОТ МЕСТА ИХ ФОРМИРОВАНИЯ В КОЛОСЕ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 423 группы  
направления 06.03.01. Биология  
биологического факультета  
Кутлимурадова Атабека

Научный руководитель:

канд. биол. наук, доцент

\_\_\_\_\_

М.Ю. Касаткин

Зав. кафедрой:

д-р биол. наук, доцент

\_\_\_\_\_

Д. В. Уткин

Саратов 2026

**Актуальность темы.** Качество семян как пшеницы, собранного с одного и того же поля, так и других сельскохозяйственных культур, неоднородно. Они разные по размерам, физиологическому состоянию и химическому составу. Одним из основных факторов разнокачественности семян является место формирования их на материнском растении (матрикальная разнокачественность). В тоже время закономерности формирования и степень проявления матрикальной разнокачественности, обоснование способов выделения семян пшеницы разного потребительского качества, остаются актуальными и требующими пристального изучения в современных условиях.

### **Цели и задачи исследования**

Цель исследований состояла в изучении влияния места формирования семян в колосе на их морфолого-физиологические характеристики.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- Проанализировать изменение особенностей морфологических характеристик зерновок в зависимости от их местоположения в колосе: массу, размеры, форму и цвет.
- Исследовать изменение специфики распределения крахмальных зёрен эндосперма по их размерам у зерновок в пределах одного колоса.
- Определить ростовые характеристики проростков, сформированных в разных колосках колоса.
- Изучить содержание хлорофиллов проростков из разных частей колоса.

### **Материалы и методы исследований**

Исследования проведены в 2024-2026 гг. на кафедре микробиологии и физиологии растений СГУ имени Н.Г. Чернышевского. Объекты исследования - зерновки сорта Саратовская 29 яровой пшеницы *Triticum aestivum* саратовской селекции.

## **Объекты исследования**

Пшеница относится к классу однодольных (Monocotyledoneae), порядку мятликоцветных (Poales), семейству злаковых (Poaceae). Пшеница, как и все однолетние злаки, характеризуется мочковатой корневой системой, стеблем–соломиной, четко разделенным на узлы и междоузлия, листьями, состоящими из влагалища, которое охватывает стебель, и листовой пластинки. В месте перехода от влагалища к пластинке образуется язычок (лигула) и ушки. Стебель несёт терминальный сложный колос.

Пшеница мягкая (*T. aestivum* L.). Относится к гексаплоидной группе видов с 42 хромосомами. Наиболее широко распространена на земном шаре и является основной хлебной культурой. Ареал охватывает все континенты земного шара: почти от полярного круга до южных оконечностей Африки и Америки; возделывается на землях, расположенных ниже уровня мирового океана, и поднимается до высоты 4000 м (в горах Перу). Все это свидетельствует об исключительной пластичности мягкой пшеницы. По образу жизни разделяется на озимые и яровые формы, полуозимые и поздние яровые.

Мягкая пшеница — ведущая продовольственная культура многих стран мира. В нашей стране она является главной хлебной культурой. Ныне на этом виде сосредоточено основное внимание селекционеров.

Саратовская 29 — разновидность лютеценс. Сорт НИИСХ Юго-Востока. Выделен методом сложной ступенчатой гибридизации от трех этапов скрещивания. Сорт среднеспелый, соломина средней длины — 90 см, среднеустойчив к полеганию, устойчив к пыльной головне. Засухоустойчивость выше средней. Технологические свойства зерна высокие.

## **Методы исследования**

Линейные размеры и цветовая характеристика зерновок определялись по цифровым изображениям и использованием цветового шаблона шкалы для цветокоррекции Calibrite ColorChecker Classic Mini.

Программа по автоматическому определению размеров зерновок была

реализована на языке программирования Python версии 3.12 для операционной системы Windows с использованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV (Open Source Computer Vision Library).

Описание алгоритма обработки изображения:

- фильтрация шума;
- адаптивный поиск параметров цветовой маски для оптимального контрастирования объектов от фона;
- поиск контуров;
- нумерация зерновок на изображении
- вычисление размеров зерновок в пикселях;
- перевод полученных значений в микрометры;
- создание массива данных с размерами по каждой зерновке.

Для определения ростовых показателей проростков зерновки последовательно брались из колоса главного побега с сохранением порядка следования и фиксации соответствия их конкретному колоску. Семена проращивались в чашках Петри на фильтровальной бумаге с добавлением в каждую чашку 9 мл дистиллированной воды. Нумерация чашек соответствовала порядковому номеру колоска в колосе, начиная с его нижней части.

Определение фотосинтетических пигментов проводилось по общепринятой методике двухволновым методом на спектрофотометре Leik SS2109UV.

Для анализа листьев пшеницы по фотоизображениям осуществлялось фотографирование на цифровую фотокамеру Panasonic LUMIX GH4 с блокировкой автоматической экспозиции, баланса белого и фокусного расстояния. Световой прибор находился на фиксированном расстоянии 8 см. Уровень световой температуры составлял 9000К. В программу ImageJ последовательно загружали сделанные изображения. На каждом изображении выбиралось 5 зон 10x10px без дефектов листа. Усредненные по выделенной области интересов уровни цветности получали с помощью инструмента «гистограмма» во вкладке «анализ». Усредненные значения измеряемого

канала цвета R, G, B заносили в таблицы Excel и находили содержание  $C_{\text{хл.а+b}}$  по данным формуле:

$$C_{\text{хл.а+b}} = -0,27 \log_e \left( \frac{G - B}{G + B} \right) * 3,5;$$

где G и B средние значения зелёного и синего каналов изображения.

Дополнительно к расчёту содержания хлорофилла по изображениям листьев производился поиск наиболее вариабельных вегетационных индексов.

**1. NGBDI (Normalized Green-Blue Difference Index)** — Нормализованный индекс разности зеленого и синего, использует разницу между зеленым (G) и синим (B) каналами, нормализованную на их сумму:

$$\text{NGBDI} = (G - B) / (G + B)$$

**Физиологический смысл и применение:** Индекс чувствителен к содержанию хлорофилла, так как зеленый канал отражает его содержание, а синий сильно поглощается хлорофиллом. Он может использоваться для оценки общего состояния растительности и стресса. Значения индекса увеличиваются с ростом «зелености» растительности.

**2. NPCI (Normalized Pigment Chlorophyll Index)** — Нормализованный пигментный хлорофилловый индекс, в отличие от других индексов в этом списке, NPCI рассчитывается по узким спектральным каналам, а не по стандартным широкополосным RGB-данным. Он использует коэффициенты отражения в красной и синей областях спектра .

**Формула:**  $\text{NPCI} = (R680 - R430) / (R680 + R430)$ , где R680 и R430 — коэффициенты отражения на длинах волн 680 нм и 430 нм соответственно.

**Физиологический смысл и применение:** Индекс NPCI был разработан для оценки содержания хлорофилла. Он основан на контрасте между сильным поглощением хлорофиллом в синей области (430 нм) и его поглощением в красной области (680 нм).

**3. CEVI (Crop Emergence Vegetation Index)**

$$\text{CEVI} = 0.441 * R - 0.881 * G + 0.385 * B + 18.787$$

#### 4. EGRI (Excess Green Red Index)

$$EGRI = 2 * G - R - B$$

#### 5. VBDVI (Visible-Band Difference Vegetation Index)

$$VBDVI = 2 * (G - R - B) / 2 * (G + R + B)$$

#### 6. NGRDI (Normalized Green Red Difference Index) —

Нормализованный индекс разности зеленого и красного, один из базовых вегетационных индексов, использующий контраст между зеленым и красным каналами.

$$NGRDI = (G - R) / (G + R)$$

**Физиологический смысл и применение:** Здоровая растительность отражает больше зеленого света и поглощает красный для фотосинтеза, поэтому индекс имеет высокие положительные значения. NGRDI хорошо подходит для мониторинга состояния сельскохозяйственных культур, классификации типов земного покрова и оценки биомассы. Он чувствителен к таким стрессам, как засуха, и может использоваться для отслеживания фенологических фаз (от появления всходов до созревания).

**7. VARI (Visible Atmospherically Resistant Index) —** Индекс, устойчивый к атмосферным влияниям. Этот индекс разработан для минимизации влияния атмосферной дымки и различий в освещении при работе с видимым диапазоном спектра.

$$VARI = (G - R) / (G + R - B)$$

**Физиологический смысл и применение:** Благодаря включению синего канала в знаменатель, VARI более устойчив к вариациям освещения, чем NGRDI. Это делает его предпочтительным для анализа RGB-изображений, полученных в различных условиях. Как и другие индексы, он подчеркивает области с растительностью, подавляя влияние фона и атмосферы.

**8. VDMI (Visible Difference Vegetation Index) —** Индекс видимой разницы растительности, использующий все три канала видимого спектра для максимизации различий между растительностью и другими объектами.

$$VDMI = (2G - R - B) / (2G + R + B)$$

**Физиологический смысл и применение:** VDVI, как и ExG, является эффективным инструментом для бинарной классификации (растительность / не-растительность) на RGB-снимках, особенно с беспилотников. Он хорошо работает в условиях, где растительность является доминирующим объектом.

## 9. ENGBI

$$\text{ENGBI} = (G^2 - B^2) / (G^2 + B^2)$$

**10. MGRVI (Modified Green Red Vegetation Index)** — Модифицированный индекс растительности «зеленый-красный». Это усовершенствованная версия NGRDI, использующая квадраты значений каналов для усиления контраста.

$$\text{MGRVI} = (G^2 - R^2) / (G^2 + R^2)$$

**Физиологический смысл и применение:** Благодаря возведению в квадрат, индекс становится более чувствительным к малым изменениям в хлорофилле по сравнению с линейным NGRDI. Его значения обычно находятся в диапазоне от -1 до 1. Используется для более точной оценки биомассы и содержания хлорофилла.

## 11. VI (Vegetation Index)

$$\text{VI} = G / (R^{0.667} - B^{1-0.667})$$

**12. RGBVI (Red Green Blue Vegetation Index)** — Индекс растительности по каналам RGB, использующий все три канала для оценки фотосинтетической активности.

$$\text{RGBVI} = (G^2 - (B * R)) / (G^2 + (B * R))$$

**Физиологический смысл и применение:** Этот индекс объединяет информацию из всех трех каналов. В знаменателе стоит произведение синего и красного каналов, что позволяет лучше учитывать влияние почвенного фона и других факторов. Он может быть полезен для оценки содержания хлорофилла и пигментов, когда недоступны данные в ближнем инфракрасном диапазоне.

**Структура и объём работы.** Диплом изложен на 54 страницах и

содержит такие структурные элементы: Содержание, Введение, Основная часть, Заключение, Выводы, Список использованных источников. В свою очередь основная часть содержит такие главы:

## 1 Особенности строения и формирования колоса пшеницы

### 1.1 Понятие разнокачественности семян

### 1.2 Строение колоса пшеницы

#### 1.2.1 Особенности строения соцветий злаков

#### 1.2.2 Анатомо-морфологическое строение колоса пшеницы

#### 1.2.3 Видовые и сортовые различия в строении колоса пшеницы

### 1.3 Рост и развитие колоса

## 2 Материал и методика исследования

### 2.1 Объекты исследования

### 2.2 Методы исследования

## 3 Разнокачественность зерновок колоса пшеницы

3.1 Анатомо-морфологические особенности строения и распределения зерновок в колосе

### 3.2 Различия ростовой активности зерновок из разных элементов колоса

### 3.3 Разнокачественность пигментных систем зерновок колоса

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Для количественной оценки морфологии зерновки используются три основных линейных параметра: длина — расстояние от основания до верхушки; ширина — наибольшее расстояние между боковыми сторонами; толщина — расстояние между спинкой и брюшком. Как правило, соотношение этих размеров подчиняется условию: длина превышает ширину и толщину. Нами был рассчитан средний диаметр зерновки, полученный из площадей контура изображения зерновки на цифровой фотографии. Анализ распределения среднего диаметра зерновок в колосе показал, что наибольшие значения наблюдаются в средней его части (рис. 1).



Рисунок 1 – Распределение среднего диаметра зерновок в колосе

Средняя масса зерновки имеет сходную картину распределения (рис. 2).

1

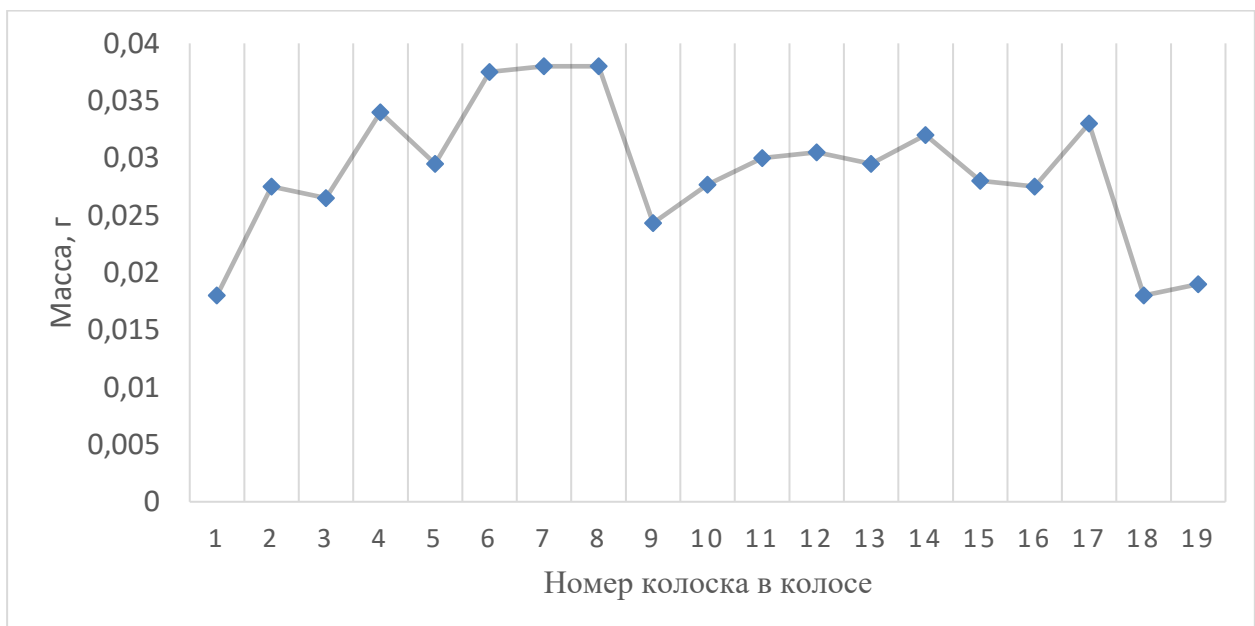


Рисунок 2 – Распределение средней массы зерновок в колосе

Изучение распределения крахмальных зёрен эндосперма зерновки показывают, что зёрна из разных частей колоса различаются по гранулометрическому составу. Ключевое различие заключается в объёмной доле крахмальных зёрен разных типов (рис. 3):

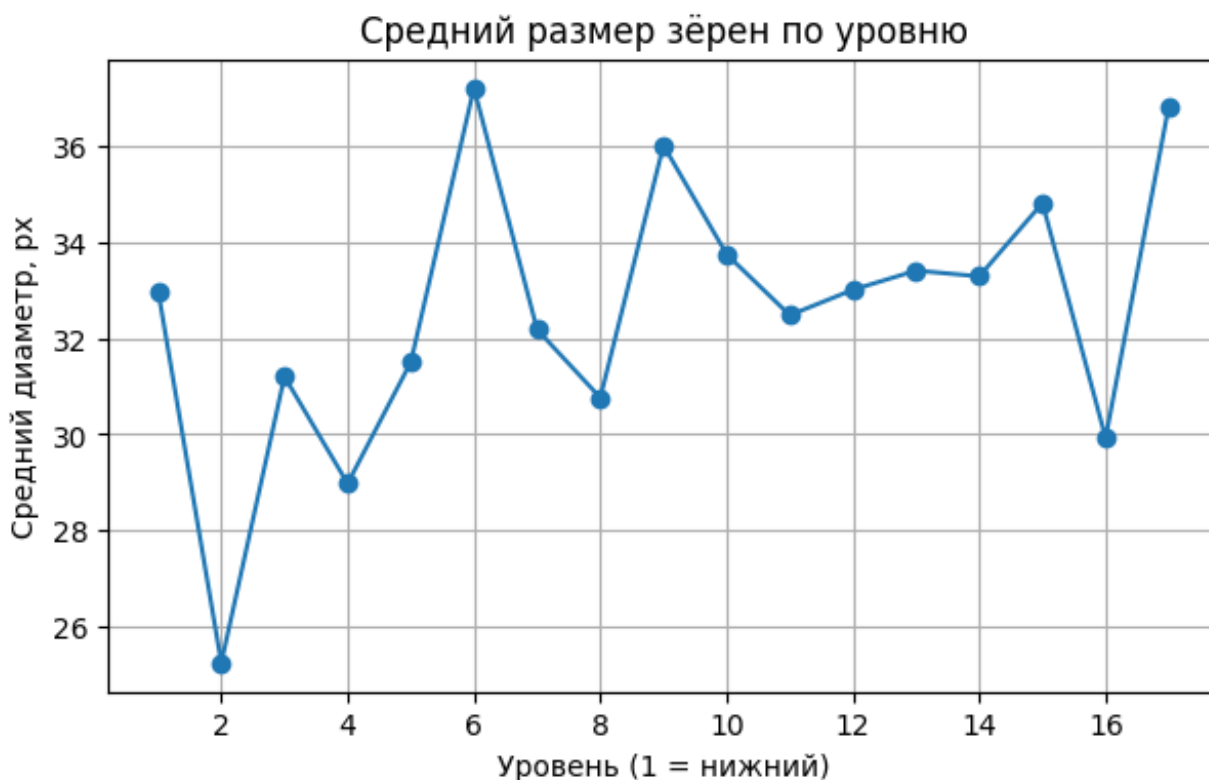


Рисунок 3 – Изменение размеров крахмальных зёрен в зерновках колоса

Считается, что окраска зерновок в колосе пшеницы — это сортовой признак, который не зависит от их местоположения в колосе. Однако в некоторых случаях изменение цвета (особенно появление розового или бурого оттенка у отдельных зерновок) может служить важным сигналом и часто указывает на поражение болезнями и общего снижения качества всего урожая.

В нашем исследовании выявлена небольшая по значениям флуктуация окраски зерновок колоса (рис. 4). Наиболее вариативными были вегетационные индексы CTVI и EGRI, которые распределялись стохастически в пределах всего колоса, не проявляя сколько-нибудь устойчивой тенденции к изменению в

зависимости от своего местоположения в колосе. Визуальная оценка особенностей окраски семян пшеницы в пределах колоса показала, что вариация цветовой гаммы поверхности семян скорее всего носила признаки патологии и приводила к неравномерной интенсивности окраски зерновки. Таким образом, вариативность цветовых индексов окраски зерновок в колосе косвенно может служить индикатором степени повреждённости колоса указывать на уровень устойчивости сорта к повреждениям и болезням.

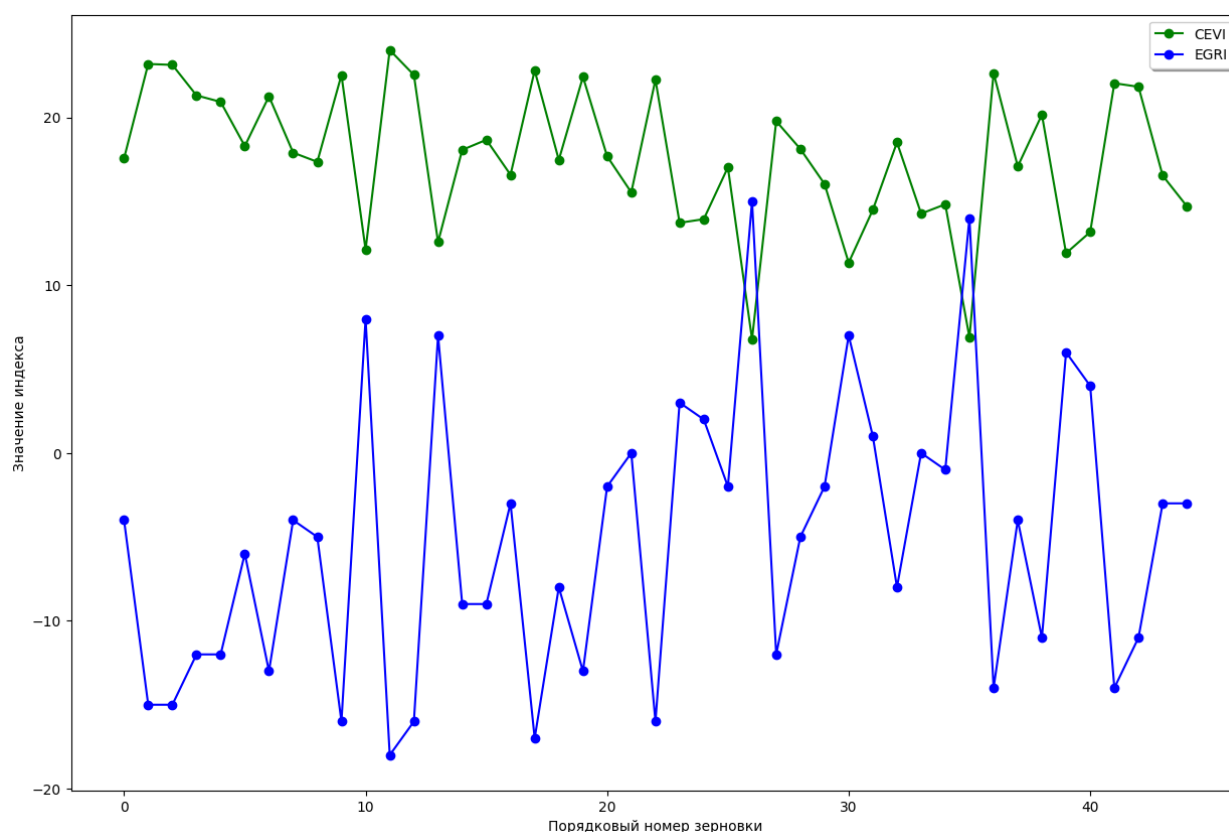


Рисунок 4 – Наиболее вариативные цветовые индексы окраски зерновок

Изменение размеров побеговых структур проростка показано на рисунке 5. Линейные размеры колеоптиля практически не изменяются у зерновок из разных частей колоса, поскольку рост этого органа зависит только от интенсивности освещения проростка. Напротив, длина первого и второго листьев была не столь постоянна, хотя и не проявляла устойчивой тенденции.

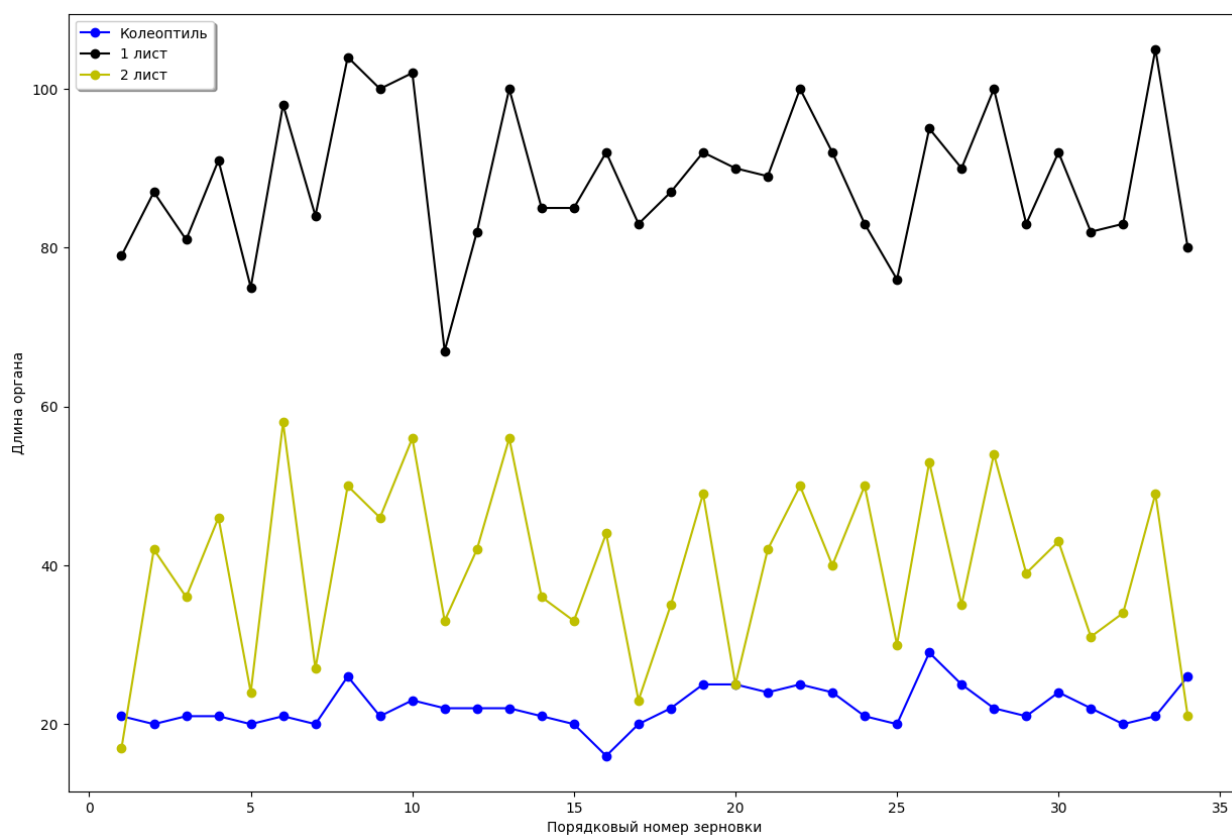


Рисунок 5 – Изменение размеров побеговых структур

Корреляция изучаемых признаков обнаруживает достаточно высокие значения между массой зерновки и суммой придаточных корней, а также длиной второго листа (рис. 6). Данная матрица может быть использована для обоснования выбора тестовых признаков при оценке качества семян из разных частей колоса. Наиболее информативными для дифференциации проростков по происхождению являются масса 2-го листа и суммарная длина корней, тогда как длина coleoptily может быть использована как сортовой стандарт, не зависящий от положения зерновки.



Рисунок 6 – Корреляция изучаемых признаков

Известно, что содержание хлорофилла — это очень пластичный признак, зависящий от нескольких ключевых групп факторов:

- **Матрикальная разнокачественность (опосредованно):** Зерновки из разных частей колоса действительно обладают разной «стартовой» силой роста.
- **Сортовые (генотипические) особенности:** Это один из главных факторов. Сорты и линии пшеницы могут значительно различаться по содержанию хлорофилла *a* и *b* в листьях. Более того, исследования показывают, что в некоторых группах сортов влияние генотипа на содержание хлорофилла *a* и каротиноидов превышает влияние условий выращивания.

- **Условия внешней среды:** Этот фактор часто является определяющим для содержания хлорофилла *b* и может вносить вклад до 58–67%.

Изучение содержания суммы хлорофиллов в верхней и нижней частях первого листа проростков, выращенных из зерновок в различных частях колоса не обнаружило тесной связи концентрации данных пигментов и положении семени в колосе.

Например, Содержание хлорофилла в нижней части 1-го листа проростков не зависит от порядкового номера колоска в колосе, из которого была взята зерновка. Значения показателя колеблются в узком диапазоне от 1,00 до примерно 1,60 мг/г сырого веса. При этом у большинства колосков (с 3-го по 17-й) содержание хлорофилла находится на стабильно высоком уровне — около 1,60 мг/г. Лишь у первых двух колосков (нижняя часть колоса) наблюдается некоторое снижение — до 1,00–1,20 мг/г соответственно.

Отсутствие значимых различий у проростков из колосков средней и верхней части колоса (колоски №3–17) свидетельствует о том, что фотосинтетический аппарат первого листа обладает высокой степенью физиологической автономности. Даже если исходные зерновки различались по массе, процесс биосинтеза хлорофилла у проростков в фазе первого листа достаточно быстро нивелирует эти различия.

Эффект «стартового» минимума: Несколько пониженное содержание хлорофилла у проростков из первых (самых нижних) колосков (№1–2) может отражать пограничное состояние семян из этой части колоса. Поскольку именно нижние колоски часто формируют наиболее мелкие зерновки с меньшими запасами питательных веществ, их проростки могут отставать в развитии пигментной системы, но к фазе второго-третьего листа это отставание, вероятно, полностью компенсируется.

Отсутствие градиента: не наблюдается закономерного увеличения или уменьшения содержания хлорофилла от нижних колосков к верхним. Это означает, что матрикальная разнокачественность (различие зерновок по

положению в колосе) не оказывает долгосрочного влияния на содержание зелёных пигментов в листьях. Данный признак контролируется скорее генотипом и условиями проращивания, чем происхождением семени.

Была проведена оценка корреляции массы зерновки и длины первого листа с некоторыми цветовыми индексами и содержанием хлорофиллов (табл. 1). Масса зерновки больше всего коррелирует с длиной первого листа. И обнаруживает слабую отрицательную корреляцию с 4 вегетационными индексами. Длина первого листа не связана с содержанием хлорофиллов и не коррелирует с цветовыми индексами.

Таблица 1 – Корреляция массы зерновки и длины первого листа с некоторыми цветовыми индексами и содержанием хлорофиллов

	Параметр	Коэффициент корреляции		Параметр	Коэффициент корреляции
	Масса зерновки	VARI		-0.438134	Длина первого листа
MGRVI		-0.424955	B	-0.168488	
NGRDI		-0.423427	Концентрация хлорофилла	-0.162592	
VI		-0.408275	VARI	-0.133624	
Концентрация хлорофилла		-0.341704	G	-0.127423	
B		-0.286084	MGRVI	-0.121231	
G		-0.117177	NGRDI	-0.119168	
CEVI		-0.050606	R	-0.057159	
R		0.088004	CEVI	-0.001177	
EGRI		0.118009	EGRI	0.042857	
VDVI		0.198201	VDVI	0.140709	
VBDVI		0.199847	VBDVI	0.142672	
RGBVI		0.279095	RGBVI	0.160956	
ENGBI		0.372106	ENGBI	0.178543	
NGBDI		0.379317	NGBDI	0.180597	
NPCI		0.429825	NPCI	0.182936	
Длина 1-го Листа	0.604893	Масса зерновки	0.604893		

Масса зерновки влияет на оптические свойства листа, но эта связь имеет отрицательный характер (крупнее зерно → ниже зелёные индексы). Это объясняется разной плотностью тканей и соотношением пигментов в листьях разного размера.

Содержание хлорофилла, рассчитанное по спектральным индексам,

отрицательно коррелирует с массой зерновки ( $r = -0,34$ ). Это согласуется с данными вашего предыдущего графика, где содержание хлорофилла в первом листе слабо зависело от положения колоска, но здесь мы видим, что эта зависимость всё же существует, хотя и не очень сильная.

Длина первого листа является параметром, почти полностью независимым от вегетационных индексов. Это подтверждает идею о том, что ростовые процессы (длина) и физиолого-биохимические процессы (пигментный состав) регулируются разными механизмами и слабо связаны между собой на ранних этапах онтогенеза.

Положительная корреляция индексов, отражающих каротиноиды (NGBDI, NPCI), с массой зерновки ( $r \approx +0,38 \dots +0,43$ ) может указывать на более высокую долю защитных пигментов у проростков из крупных семян, что потенциально делает их более устойчивыми к стрессам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование было направлено на изучение влияния места формирования семян в колосе яровой пшеницы *Triticum aestivum* L. (сорт Саратовская 29) на их морфологические, анатомические и физиолого-биохимические характеристики, а также на ростовые и пигментные показатели формирующихся из них проростков. В работе был реализован комплексный подход, сочетающий методы цифровой морфометрии, микроскопического анализа, спектрофотометрии и цифровой обработки изображений, что позволило получить объективные и статистически обоснованные данные о проявлении матрикальной разнокачественности у изучаемого сорта.

В ходе выполнения работы были решены все поставленные задачи и получены следующие основные результаты.

1. Анатомио-морфологические особенности зерновок и их распределение в колосе. Установлено, что зерновки, формирующиеся в разных частях колоса, закономерно различаются по своим морфометрическим параметрам. Наибольшие значения среднего диаметра и массы зерновок наблюдаются в

средней части колоса, тогда как к основанию и верхушке колоса эти показатели достоверно снижаются. Данная закономерность имеет чёткое физиологическое обоснование: колоски средней части колоса находятся в наиболее благоприятных условиях для поступления ассимилятов и минеральных веществ, тогда как транспорт пластических веществ к апикальным колоскам затруднён в силу анатомических особенностей проводящей системы колосового стержня.

При исследовании гранулометрического состава крахмала эндосперма было выявлено, что зерновки из разных частей колоса различаются по объёмной доле крахмальных зёрен А-типа (крупных) и В-типа (мелких). В наших экспериментах отмечена слабо выраженная тенденция к увеличению средних размеров крахмальных зёрен в акропетальном направлении — от основания колоса к его верхушке. Это может свидетельствовать о сортоспецифических особенностях накопления запасных веществ в эндосперме, поскольку по литературным данным для озимой пшеницы характерно обратное распределение. Таким образом, характер распределения крахмальных зёрен является не только позиционно-зависимым, но и сортовым признаком, что необходимо учитывать при селекционной оценке качества зерна.

Анализ цветовых характеристик зерновок показал, что окраска поверхности семян не имеет устойчивой связи с их положением в колосе. Однако вариабельность цветовых индексов (особенно EGRI и CEVI), выявленная в пределах колоса, может косвенно указывать на наличие патологических изменений и может служить дополнительным диагностическим критерием при оценке фитосанитарного состояния урожая.

2. Ростовая активность проростков из зерновок разных частей колоса. Изучение ростовых параметров проростков показало, что масса зерновки является ключевым фактором, определяющим «стартовую» энергию роста. Выявлены сильные положительные корреляции между массой зерновки и суммарной длиной придаточных корней ( $r = 0,71$ ), а также длиной второго листа ( $r = 0,74$ ). Это указывает на то, что запасы питательных веществ

эндосперма в значительной степени определяют развитие тех органов проростка, которые формируются на более поздних этапах прорастания и требуют большего субстратного обеспечения.

В то же время длина колеоптиля оказалась практически независимой от массы зерновки и положения семени в колосе (коэффициенты корреляции с другими признаками составили всего 0,19–0,30). Данный факт позволяет рассматривать длину колеоптиля как гомеостатичный сортовой маркер, не подверженный влиянию матрикальной разнокачественности и определяемый главным образом генетическими факторами и условиями освещения. Длина главного зародышевого корня также показала лишь умеренную связь с массой зерновки ( $r = 0,52$ ), что свидетельствует о большей автономности его развития по сравнению с суммарной корневой системой.

3. Пигментные системы проростков и их связь с положением зерновки. Изучение содержания хлорофиллов в первом листе проростков показало, что данный показатель в значительной степени нивелирует исходные различия семян, связанные с их положением в колосе. Для проростков из колосков средней и верхней частей колоса (№ 3–17) содержание хлорофилла было стабильным и находилось на уровне около 1,60 мг/г сырого веса. Лишь для проростков из двух самых нижних колосков наблюдалось некоторое снижение (до 1,00–1,20 мг/г), что может быть объяснено пониженным уровнем запасных веществ в мелких зерновках и задержкой начальных этапов развития пигментного аппарата. Однако в целом матрикальная разнокачественность не оказывает долгосрочного влияния на содержание зелёных пигментов в листьях — этот признак контролируется преимущественно генотипом и условиями проращивания.

Корреляционный анализ между массой зерновки, длиной первого листа и спектральными вегетационными индексами подтвердил, что ростовые и пигментные характеристики проростков регулируются разными механизмами. Была выявлена слабая отрицательная корреляция массы зерновки с такими индексами, как VARI, MGRVI, NGRDI ( $r \approx -0,41 \dots -0,44$ ) и с расчётным

содержанием хлорофилла ( $r = -0,34$ ). Это означает, что у проростков из более крупных зерновок при большей биомассе листа значения «зелёных» индексов могут быть несколько ниже из-за эффекта «разбавления» пигментов в объёме тканей. В то же время положительная корреляция массы зерновки с индексами, отражающими долю каротиноидов (NGBDI, NPCI;  $r \approx +0,38 \dots +0,43$ ), позволяет предположить, что проростки из крупных семян имеют более высокую долю защитных жёлтых пигментов, что потенциально повышает их устойчивость к стрессовым факторам. Длина первого листа, напротив, не коррелировала с вегетационными индексами, что подтверждает независимость ростовых и физиолого-биохимических параметров на ранних этапах онтогенеза.

Результаты проведённого исследования позволили сформулировать следующие теоретические и практические выводы.

Формирование матрикальной разнокачественности семян пшеницы является закономерным следствием асинхронности заложения цветков в колосках и градиентного характера поступления ассимилятов и минеральных элементов к разным частям колоса. Наиболее полноценные по массе, размерам и ростовой активности семена формируются в средней части колоса, тогда как семена из базальных и апикальных колосков характеризуются сниженными посевными качествами.

При этом проявление матрикальной разнокачественности имеет чёткие границы: если ростовые параметры проростков (длина корней, длина второго листа) сильно зависят от исходной массы зерновки и, следовательно, от её положения в колосе, то такие признаки, как длина coleoptили и содержание хлорофилла в первом листе, являются гомеостатичными и практически не зависят от позиционного фактора. Это означает, что запасные вещества эндосперма оказывают преимущественное влияние на «энергетические» (ростовые) процессы, но не на «качественные» (биохимические) параметры, которые регулируются генетической программой развития проростка.

С практической точки зрения, полученные данные обосновывают необходимость фракционирования семенного материала по размерным и

массовым показателям с целью выделения наиболее полноценной семенной фракции из средней части колоса. Выявленная независимость длины колеоптиля от матрикальной разнокачественности позволяет рекомендовать данный признак в качестве стабильного сортового маркера при проведении сортоиспытаний. Кроме того, вариабельность цветовых индексов поверхности зерновок может быть использована в качестве экспресс-метода для оценки фитосанитарного состояния урожая и выявления скрытых форм поражения патогенами.

Таким образом, выполненные исследования вносят вклад в понимание физиологических механизмов формирования неоднородности семенного материала и предоставляют научно обоснованные критерии для улучшения качества семян пшеницы на этапах послеуборочной обработки и предпосевной подготовки.

## **ВЫВОДЫ**

1. Размеры зерновок, сформированных в разных частях колоса, имеют наибольшие значения в его средней части, что хорошо согласуется с распределением их массы.

2. Наиболее вариативными и имеющие наибольший размах значений при оценке цвета зерновок в колосе являются следующие цветовые индексы: EGRI, SEVI, R/V.

3. Средние размеры крахмальных зёрен зерновок имеют слабо выраженную тенденцию к увеличению в акропетальном направлении колоса.

4. Длина колеоптиля является гомеостатичным признаком, слабо коррелирующим с положением зерновки в колосе и определяется только уровнем освещения.

5. Запасные вещества зерновки влияют в основном на ростовые процессы (длину корней и листьев), но не на качественные физиолого-биохимические параметры, такие как пигментный состав. Матрикальная разнокачественность не оказывает долгосрочного влияния на содержание зелёных пигментов в листьях.