

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФАСЦИАЦИЙ У ГРЕЧИХИ (*FAGOPYRUM ESCULENTUM MOENCH*)

Л.Р. КЛИМОВА, младший научный сотрудник, E-mail: li21@mail.ru

Д.О. ОМЕЛЬЧЕНКО, кандидат биологических наук, E-mail: omdeno@yandex.ru

Г.И. ИМАТУЛЛИНА, младший научный сотрудник, E-mail: morozisummer@gmail.com

М.Д. ЛОГАЧЕВА, кандидат биологических наук, E-mail: maria.log@gmail.com

ФГБНУ ФИЦ «КАЗАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН»

Аннотация. Проведенное комплексное исследование направлено на анализ морфологической дифференциации морфотипов гречихи, ассоциированных с фасциацией, с применением многомерных статистических методов. Актуальность работы обусловлена необходимостью выявления фундаментальных закономерностей структуры изменчивости для целей селекции. Новизна заключается в установлении двух альтернативных стратегий продуктивности: развития боковых побегов (ГК1) и доминирования главного побега (ГК2), выявленных с помощью анализа главных компонент (PCA). Основные положения работы подтверждаются цифровыми данными: статистически значимые различия по 12 из 16 признаков (75%), высокая эффективность классификации методом LDA (общая точность 95%) и градиент изменчивости от нефасцированных форм к фасцированным. Установлено, что фасциация выступает фактором количественной интенсификации существующих программ развития, а не формирования качественно новых типов. Ключевой вывод заключается в том, что дифференциация морфотипов носит непрерывный характер, а селекция на продуктивность должна быть направлена на комбинирование выявленных стратегий. Результаты работы предоставляют диагностическую основу для оптимизации структуры урожая на основе таких информативных признаков, как вес зерна с главного побега и параметры зоны плодообразования.

Ключевые слова: гречиха (*Fagopyrum esculentum*, M.), фасциация, габитус растения, морфология растения, статистическая обработка.

Для цитирования: Климова Л.Р., Омельченко Д.О., Иматуллина Г.И., Логачева М.Д. Морфологический анализ фасциаций у гречихи (*Fagopyrum esculentum Moench*). Зернобобовые и крупяные культуры. 2025. № 4 (56):85-97 DOI: 10.24412/2309-348X-2025-4-85-97

MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF FASCIATIONS IN BUCKWHEAT (*FAGOPYRUM ESCULENTUM MOENCH*)

L.R. Klimova, D.O. Omelchenko, G.I. Imatullina, M.D. Logacheva

FEDERAL RESEARCH CENTER OF THE KAZAN SCIENTIFIC CENTER OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, Kazan, Russia

Abstract: This comprehensive study aimed to analyze the morphological differentiation of buckwheat morphotypes associated with fasciation using multivariate statistical methods. The relevance of the work is driven by the need to identify fundamental patterns in the structure of variability for breeding purposes. The novelty lies in establishing two alternative productivity strategies: the development of lateral shoots (PC1) and the dominance of the main stem (PC2), identified through principal component analysis (PCA). The main findings are supported by numerical data: statistically significant differences in 12 out of 16 traits (75%), high classification efficiency using LDA (overall accuracy of 95%), and a gradient of variability from non-fasciated to fasciated forms. It was established that fasciation acts as a factor of quantitative intensification of

Научно – производственный журнал «Зернобобовые и крупяные культуры» № 4 (56) 2025 г.
existing developmental programs rather than the formation of qualitatively new types. The key conclusion is that the differentiation of morphotypes is continuous, and breeding for productivity should be aimed at combining the identified strategies. The results provide a diagnostic basis for optimizing yield structure based on informative traits such as grain weight from the main stem and parameters of the fruiting zone.

Keywords: buckwheat (*Fagopyrum esculentum*, M.), fasciation, plant habitus, productivity, plant morphology, static analysis.

Введение

В условиях глобальных вызовов, связанных с обеспечением продовольственной безопасности, возрастает стратегическая значимость культур, обладающих высокой питательной ценностью и адаптационной пластичностью. К числу таких растений относится гречиха посевная (*Fagopyrum esculentum* Moench) – важная псевдозерновая культура, зерно которой служит источником полноценного белка, рутина, кверцетина и других биологически активных соединений [1]. Однако ее продуктивный потенциал реализуется не в полной мере вследствие ряда биологических особенностей, таких как гетеростилия и самонесовместимость, что лимитирует урожайность и осложняет селекционный процесс [2]. В этой связи поиск и мобилизация новых источников ценных морфологических признаков для создания высокопродуктивных сортов является актуальным направлением современных агробиологических исследований.

Одним из малоизученных, но потенциально значимых феноменов, представляющих интерес для селекции, является фасциация (от лат. *fascia* – повязка, полоса). Данная терратологическая модификация характеризуется уплощением и срастанием осевых органов растения (побегов, соцветий, стеблей), что приводит к формированию атипичных структур гребневидной, ленточной или веерообразной формы [3, 4]. Исторически фасциация рассматривалась как курьёзная аномалия развития, не имеющая практической ценности. Однако накопленный к настоящему времени массив данных позволяет пересмотреть эту точку зрения и рассматривать фасциацию как комплексный морфогенетический процесс, способный оказывать существенное влияние на продукционные характеристики растения [5, 6].

Этиология фасциации носит полиэтиологический характер. Как показывают исследования, ее проявление может быть индуцировано как генетическими факторами (мутации, затрагивающие функционирование апикальных меристем), так и абиотическими стрессами, действием фитопатогенов (бактерий, вирусов, фитоплазм), химическими мутагенами и гормональными дисбалансами, в частности, нарушением синтеза и транспорта ауксинов [4, 7]. Сложность и вариабельность проявления фасциации, подробно рассмотренные в трудах [5, 8, 9], требуют применения комплексного подхода, интегрирующего методы морфологии, анатомии, генетики и физиологии растений.

Влияние фасциации на продуктивность сельскохозяйственных культур неоднозначно и зависит от вида растения, типа пораженного органа и условий окружающей среды. С одной стороны, фасциация может негативно сказываться на устойчивости растений, нарушая архитектонику побеговой системы и проводящие пути, что повышает риск полегания и снижает эффективность ассимиляции [4]. С другой стороны, у ряда видов, включая тыквенные, фасциация генеративных органов может сопровождаться увеличением количества цветков и размеров плодов, что потенциально способствует росту урожайности [10]. Подобная двойственность делает целесообразным детальное изучение данного феномена в отношении конкретных культур.

Применительно к гречихе, исследования фасцированных форм носят фрагментарный характер, однако имеющиеся данные свидетельствуют об их перспективности. Работы, выполненные на базе Казанского государственного аграрного университета, указывают на возможность использования новых морфобиотипов, в том числе и с элементами фасциации, в селекционных программах, направленных на создание сортов, адаптированных к засушливым условиям Среднего Поволжья [11]. Более того, изучение формирования

качества плодов в процессе селекции гречихи подчеркивает важность учета морфологических особенностей, к числу которых может быть отнесена и фасциация [12]. Таким образом, выявление, стабилизация и оценка хозяйственно ценных признаков у фасцированных форм гречихи представляет собой актуальную научно-практическую задачу.

Цель исследования – оценить растения гречихи с различными видами фасциаций по хозяйственно ценным признакам методами вариационной статистики.

Условия, материалы и методы

Работу проводили на экспериментальных полях Татарского НИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН в 2025 году, находящихся в Лаишевском муниципальном районе Республики Татарстан. Объектами исследования были различающиеся по архитектонике растения гибридных форм гречихи, разделенные на несколько групп по общим морфологическим признакам.

Нефасцированный морфотип – растения высокорослые, с большим числом узлов и хорошо развитым ветвлением. Генеративная зона растянута по длине растения и образована короткими кистями и крупным щитком. Зона плodoобразования начинается с 4-5 узла.

Морфотип «Кудрявый» – фасциации затрагивают сами побеги, в которых развиваются кудрявые ветви. Кудрявость стеблей и побегов выражается в виде неравномерного роста стебля по оси, что вероятно обусловлено неравномерной концентрацией ростовых веществ на данном участке.

Морфотип «Комковатое верхушечное соцветие» (далее КВС) – у данных растений фасциации охватывают верхушечную часть побега, благодаря которому репродуктивная сфера растения представлена одним хорошо озернённым шаровидным соцветием.

Морфотип «Ветвление боковых соцветий» (далее ВБС) – у растений фасциации затрагивают полностью растение, однако отличительной чертой данной группы является срастание пазушных соцветий на главном стебле, при котором на 1 узле после верхушечного соцветия образуется двойное пазушное соцветие.

Для проведения морфоанатомического анализа были отобраны 25 типичных растений каждой исследуемой группы в фазу уборочной спелости. Образцы высушивали в сушильном шкафу при температуре 105⁰С до абсолютно сухого состояния.

Исследование было проведено на основе морфологических данных растений, включающих количественные показатели вегетативного и генеративного развития. Исходные данные содержали измерения по 21 морфологическому признаку, сгруппированные в следующие категории: параметры роста (высота растения, число узлов), ветвления (число ветвей 1-го, 2-го и 3-го порядков), развития зон вегетативных и побегообразовательных структур, продуктивности (число соцветий, количество и масса зерен главного и боковых побегов) и биомассы (масса соломы, корня).

Многолетними исследованиями были установлены оптимальные значения среднесуточной температуры воздуха и количество выпадающих осадков, при которых формируется максимальная урожайность (Петелина Н.Н., Савинова Г.В., Шакурова Ф.З., 1972). Анализ метеорологических условий вегетации гречихи показал, что гидротермические условия 2025 года были оптимальными для роста и развития гречихи (табл. 1).

Май 2025 года по среднесуточной температуре был на уровне среднемноголетних данных, однако сумма эффективных температур выше 10⁰С была больше нормы на 26⁰С, а количество выпавших осадков было выше в 2,25 раза выше нормы.

Посев был произведен в оптимальные сроки, в первой декаде июня. После посева в межфазный период «посев- всходы» среднесуточная температура была незначительно выше оптимальной среднесуточной температуры (на 0,5⁰С), при этом сумма выпавших осадков составило 37% от оптимальной нормы осадков межфазного периода «посев-всходы».

Гидротермические условия в период вегетации гречихи в 2025 году

Метеорологические условия	Посев - всходы	Всходы - бутонизация	Бутонизация - цветение	Цветение - плodoобразование	Плodoобразование – побурение плодов
Оптимальная среднесуточная температура, °C	18,8	16-20			18-20
Среднесуточная температура воздуха, °C	19,3	17,6	16,8	21,3	20,1
Количество дней с максимальной температурой воздуха +25°C и выше	1	0	0	3	0
Оптимальная норма осадков за период, мм	58	60			90-100
Сумма осадков, мм	22	69,9	22,2	19,9	5,4

Наиболее оптимальные условия за время вегетационного периода 2025 года сложились в межфазный период «всходы-бутонизация». Среднесуточная температура воздуха была в пределах оптимума и составила 17,6°C, а количество выпавших осадков превысило оптимальные значения практически на 10 мм. Такие гидротермические условия позволили растениям раскрыть генетический потенциал при формировании архитектоники растений.

В межфазный период «бутонизация-цветение» был оптимальный температурный режим, при этом стоит отметить, что в 2025 году в этот период не было дней с критически высокой среднесуточной температурой для растений гречихи, которая равняется +25°C и выше. Количество выпавших осадков было ниже оптимального значения, однако гидротермический коэффициент, рассчитанный для этого периода, составил 4,63, что говорит о достаточном количестве влаги для роста и развития растений гречихи. Единственным отрицательным момент является малое количество солнечной инсоляции из-за постоянной облачности, что отразилась на процессах фотосинтеза и было определено по мозаичности листьев.

В критический период «цветение – плodoобразования» среднесуточная температура превысила оптимальные значения на 1,3°C, при этом было отмечено 3 дня с критически высокой среднесуточной температурой. Количество выпавших осадков в этот период составило 19,9 мм, однако симптомом увядания на растениях не зафиксировано из-за достаточного количества почвенной влаги.

В конце вегетации температурный режим был в оптимальных значениях, количество дней со среднесуточной температурой выше +25°C не было зафиксировано. Количество выпавших осадков было ниже оптимальных значений, однако в сочетании с оптимальной среднесуточной температурой создали благоприятные условия для налива зерна.

Анализ включал многомерные методы и алгоритмы машинного обучения. Метод главных компонент (PCA) использовался для снижения размерности и визуализации структуры данных. Линейный дискриминантный анализ (LDA) использовался для классификации морфотипов и выявления наиболее дискриминативных признаков.

Статистическая значимость различий между морфотипами оценивалась с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) для нормально

Научно – производственный журнал «Зернобобовые и крупяные культуры» № 4 (56) 2025 г. распределенных данных и теста Крускала-Уоллиса для ненормальных распределений. Визуализация результатов включала создание биплотов PCA, графика LDA, боксплотов распределения признаков, графиков важности переменных и результатов статистических тестов. Все анализы и визуализация результатов были выполнены в среде R 4.5.1 с использованием пакетов tidyverse, MASS, FactoMineR, factoextra, cluster, vegan, caret, ggpunr и других специализированных пакетов.

Результаты и обсуждение

Анализ распределения ключевых морфологических признаков с использованием диаграмм размаха выявил сложный характер дифференциации морфотипов. Наблюдается значительное перекрытие межквартильных диапазонов у фасцированных морфотипов при относительном обособлении нефасцированной формы по части признаков. Раздельная визуализация генеративных (рис. 1) и вегетативных (рис. 2) параметров показывает, что наиболее выраженные различия между морфотипами наблюдаются в 3 из 6 признаках продуктивности (число соцветий на главном стебле, число зерен с главного побега, вес зерна с главного побега), и в 4 из 10 вегетативных признаках (число узлов на главном стебле, длина и число узлов ЗПС, вес соломы). Остальные признаки демонстрируют более сглаженные градиенты изменчивости.

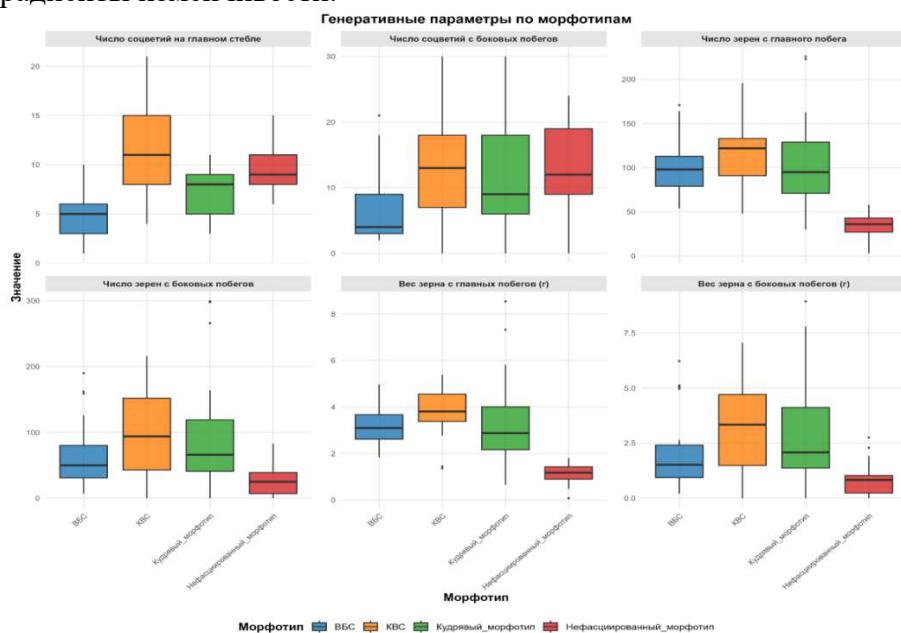


Рис. 1. Диаграммы размаха генеративных признаков по морфотипам

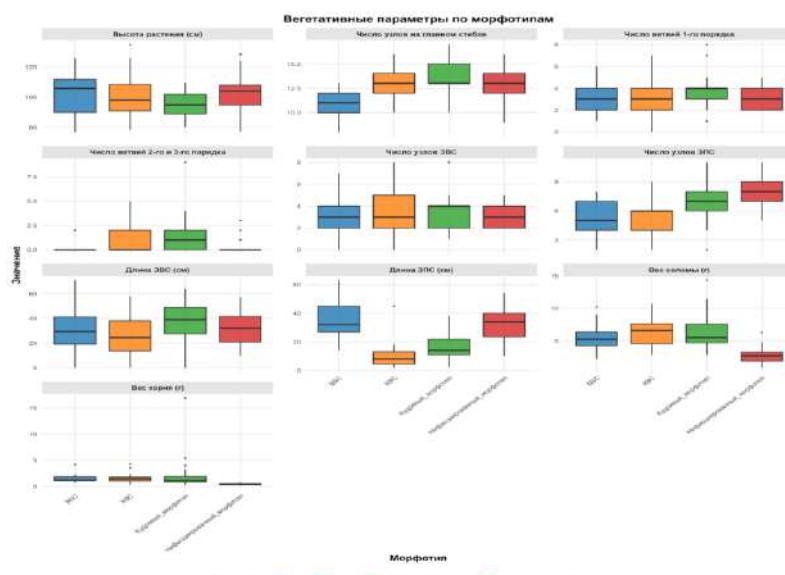


Рис. 2. Диаграммы размаха вегетативных признаков по морфотипам

Проведенный анализ методом главных компонент выявил многомерную структуру морфометрических и продукционных характеристик растений. Анализ нагрузки первых пяти главных компонент позволяет адекватно описать основные закономерности варьирования изучаемых признаков (рис. 3).

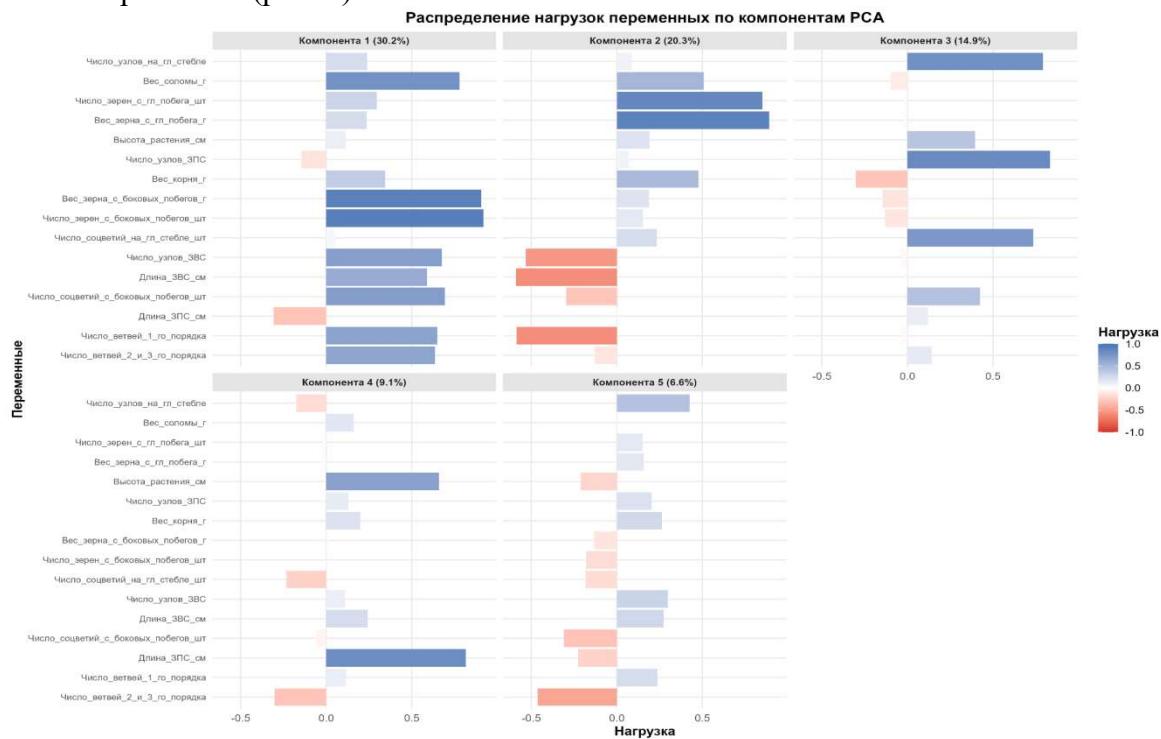


Рис. 3. Анализ нагрузки первых пяти главных компонент по всем исследуемым признакам

Первая главная компонента, объясняющая наибольшую долю дисперсии, интерпретируется как ось "продуктивности боковых побегов и вегетативной массы". Наибольший положительный вклад в эту компоненту вносят такие признаки как число зерен с боковых побегов (0,92), вес зерна с боковых побегов (0,91), вес соломы (0,78), число узлов в зоне ветвления стебля (0,68) и число соцветий с боковых побегов (0,69). Высокие значения по данной компоненте характерны для растений с хорошо развитой системой бокового ветвления и высокой урожайностью, формируемой преимущественно за счет боковых побегов.

Вторая главная компонента отражает "продуктивность главного побега" и демонстрирует противоположную тенденцию по сравнению с первой компонентой. Максимальные положительные нагрузки наблюдаются для числа зерен с главного побега (0,85) и веса зерна с главного побега (0,89). При этом выявлены существенные отрицательные нагрузки по признакам, связанным с развитием боковых ветвей: число ветвей 1-го порядка (-0,59), длина зоны ветвления стебля (-0,59) и число узлов в зоне ветвления стебля (-0,53). Данная компонента выявляет альтернативную стратегию продуктивности, ориентированную на развитие главного побега при меньшем ветвлении.

Третья компонента характеризует «развитие репродуктивных структур главного стебля». Наибольший вклад вносят число узлов в зоне плодообразования стебля (0,83), число узлов на главном стебле (0,79) и число соцветий на главном стебле (0,74). Эта компонента отражает потенциал плодообразования, связанный непосредственно с главным стеблем растения.

Четвертая компонента интерпретируется как «высотные характеристики растения». Доминирующие положительные нагрузки отмечены для длины зоны плодообразования стебля (0,82) и общей высоты растения (0,66), что указывает на взаимосвязанность этих линейных параметров.

Пятая компонента демонстрирует менее выраженную, но также значимую структуру, которую можно охарактеризовать как «структурную сложность ветвления». Наблюдается

Научно – производственный журнал «Зернобобовые и крупяные культуры» № 4 (56) 2025 г. противопоставление числа узлов на главном стебле (0,43) и числа ветвей 2-го и 3-го порядков (-0,46), что, возможно, отражает различные стратегии архитектурного построения растения.

Проведенный анализ выявил существование двух основных независимых стратегий продуктивности: ориентированной на развитие боковых побегов (компоненты 1) и ориентированной на развитие главного побега (компоненты 2). Обнаруженные модули признаков соответствуют основным морфофункциональным блокам растения: вегетативному росту, репродуктивному развитию и архитектурной организации. Выявленные закономерности имеют важное значение для разработки стратегий селекции, направленных на оптимизацию структуры урожая гречихи.

Визуализация результатов метода главных компонент в виде биплота с наложенными доверительными эллипсами для четырех морфотипов выявила четкие закономерности в распределении растений по осям главных компонент (рис. 4).

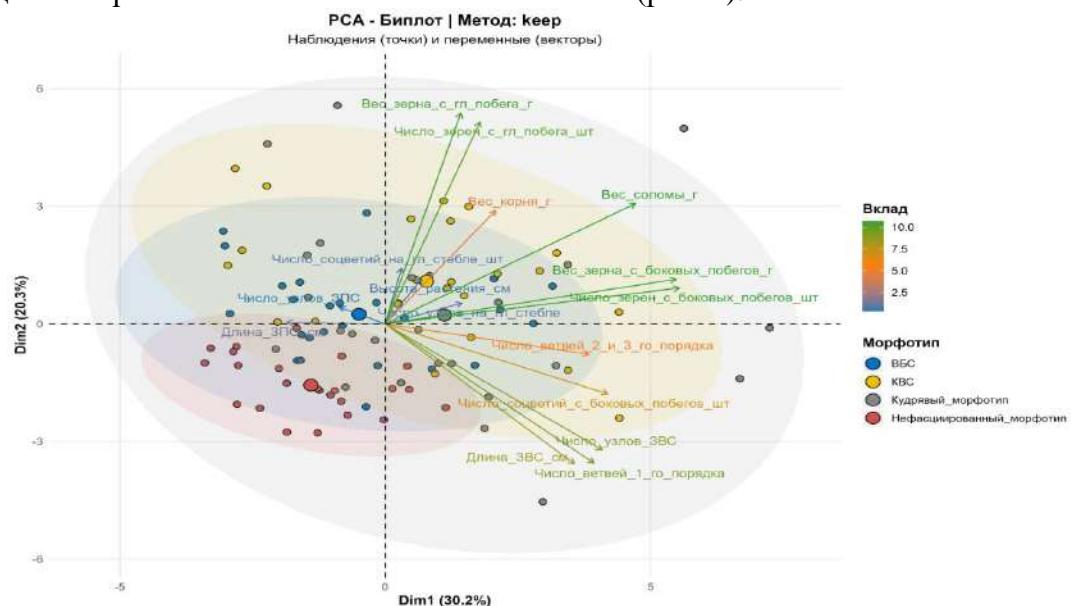


Рис. 4. Биплот PCA исследуемых признаков и морфотипов

Положение морфотипов в пространстве первых двух главных компонент демонстрирует градиент морфологической изменчивости, связанный с характером фасциации. Наблюдается последовательное смещение центроидов групп в положительном направлении как по первой, так и по второй компонентам в следующем порядке:

1. Нефасцированные растения сконцентрированы в области минимальных значений по обеим осям (левый нижний квадрант). Это характеризует их как форму с относительно низкой общей продуктивностью, слабым развитием как главного, так и боковых побегов, относительно фасцированных морфотипов.

2. Фасцированные растения с ветвящимся боковым соцветием занимают промежуточное положение. Их смещение от базовой группы указывает на умеренное увеличение продуктивности, причем, учитывая их положение, возможно, с несколько большим вкладом продуктивности главного побега (Dim2).

3. Фасцированные растения с комкующимся верхним соцветием демонстрируют дальнейшее смещение в правый верхний квадрант. Это свидетельствует о значительном увеличении продуктивности, которая, судя по положению, обеспечивается за счет совместного усиления продуктивности как главного побега (Dim2), так и боковых побегов (Dim2).

4. Растения с кудрявой фасциацией, обладая самым большим по площади доверительным эллипсом, также смещены в зону высоких значений продуктивности. Однако их ключевой особенностью является исключительно высокая вариабельность, в результате чего эллипс этой группы перекрывает области всех остальных морфотипов. Это указывает на

Научно – производственный журнал «Зернобобовые и крупяные культуры» № 4 (56) 2025 г. то, что данный морфотип не является стабильной формой, а представляет собой крайне полиморфную группу, в которой встречаются особи с самыми разными соотношениями продуктивности главного и боковых побегов.

Выявленный градиент от нефасцированных растений к формам с выраженной фасциацией отражает последовательное усиление общей продуктивности растения, достигаемое за счет комплексного увеличения продуктивности как боковых, так и главного побегов. Существенное перекрытие доверительных эллипсов всех морфотипов подтверждает, что фасциация связана не с появлением качественно новых типов роста, а с количественным усилением существующих программ развития. Таким образом, фасциация может рассматриваться как фактор, интенсифицирующий оба выявленных в анализе пути реализации продуктивного потенциала.

Особое положение морфотипа с кудрявой фасциацией, для которого характерна наибольшая дисперсия и широта перекрытия с другими группами, указывает на его повышенную вариабельность и, возможно, на его роль как переходной и наиболее полиморфной формы фасциации.

Для количественной оценки различий между выделенными морфотипами был проведен линейный дискриминантный анализ (LDA), который показал высокую эффективность классификации – общая точность составила 95%. Первые две дискриминантные функции объясняют 87% общей дисперсии, причем на первую функцию приходится 51,6%, а на вторую – 35,4% дисперсии, что свидетельствует о хорошей разделительной способности использованных морфометрических признаков (рис. 5). Анализ нагрузки дискриминантных функций выявил ключевые признаки, определяющие различие между морфотипами. Наибольший вклад в первую дискриминантную функцию вносят вес зерна с главного побега (-0,745), число зерен с главного побега (-0,725) и вес соломы (-0,598) с отрицательной стороны, а также длина зоны плодообразования стебля (0,670) и число узлов в этой зоне (0,386) – с положительной. Эта функция противопоставляет растения с высокой продуктивностью главного побега и большой вегетативной массой растениям с развитой зоной плодообразования стебля.

Вторая дискриминантная функция в основном определяется числом соцветий на главном стебле (-0,750), числом узлов на главном стебле (-0,384) с отрицательной стороны, и длиной зоны плодообразования стебля (0,403) и весом соломы (0,279) – с положительной. Таким образом, вторая функция отражает противопоставление между общим количеством репродуктивных структур на главном стебле и линейными размерами растения.

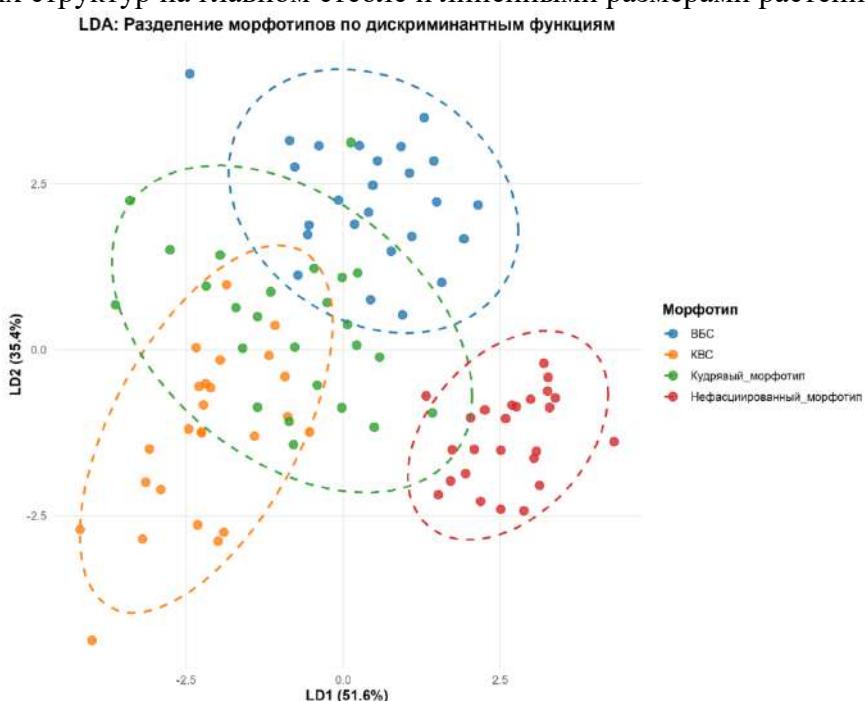


Рис. 5. График LDA исследуемых морфотипов

Для практического построения классификатора и идентификации морфотипов важны коэффициенты дискриминантных функций (рис. 6). Анализ стандартизованных коэффициентов показал, что наиболее значимые признаки для LD1:

1. Вес зерна с главного побега (коэффициент -0,583)
2. Число узлов ЗПС (0,488)
3. Число узлов на главном стебле (-0,351)

Наиболее значимые признаки для LD2:

1. Вес зерна с главного побега (-0,434)
2. Вес соломы (0,343)
3. Число соцветий на главном стебле (-0,278)

Сравнение нагрузок и коэффициентов выявило высокую согласованность в определении наиболее диагностически ценных признаков, что подтверждает надежность полученных результатов.

Анализ попарных различий между морфотипами показал, что наиболее дискретными являются нефасцированные растения и растения с ветвящимся боковым соцветием (расстояние Махalanобиса = 4,87, точность классификации 100%). Напротив, наибольшее сходство наблюдается между кудрявым морфотипом и растениями с комкующимся верхним соцветием (расстояние = 3,08, точность классификации 90%). Среднее расстояние между всеми морфотипами составило 3,98.

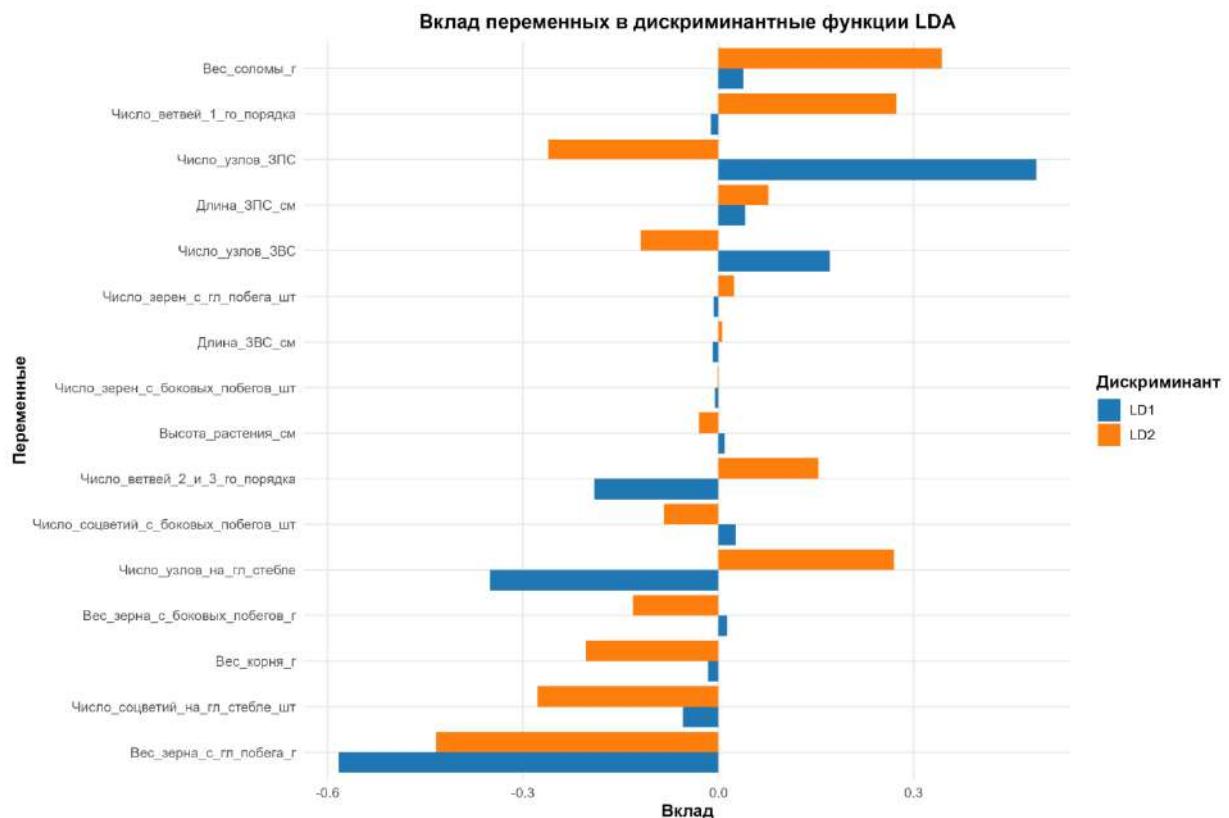


Рис. 6. Вклад признаков в дискриминантные функции LDA согласно коэффициентам

Наибольшие затруднения в классификации возникают между кудрявым морфотипом и растениями с комкующимся верхним соцветием, что свидетельствует о плавном переходе между этими формами (табл. 2).

Матрица расстояний между центрами кластеров морфотипов и матрица точности попарной классификации

Матрица расстояний между центрами морфотипов				
	ВБС	КВС	Кудрявый	Нефасцированный
ВБС	0.00	4.41	3.13	4.25
КВС	4.41	0.00	3.08	4.87
Кудрявый	3.13	3.08	0.00	4.16
Нефасцированный	4.25	4.87	4.16	0.00

Матрица точности попарной классификации				
	ВБС	КВС	Кудрявый	Нефасцированный
ВБС		0,98	0,98	1
КВС	0,98		0,9	1
Кудрявый	0,98	0,9		0,98
Нефасцированный	1	1	0,98	

Среди наиболее информативных признаков для различения морфотипов выделяются длина зоны плодообразования стебля (средняя нагрузка 0,437), число узлов в этой зоне (0,397), число соцветий на главном стебле (0,352), число зерен с главного побега (0,349) и число узлов на главном стебле (0,346) (рис. 7).

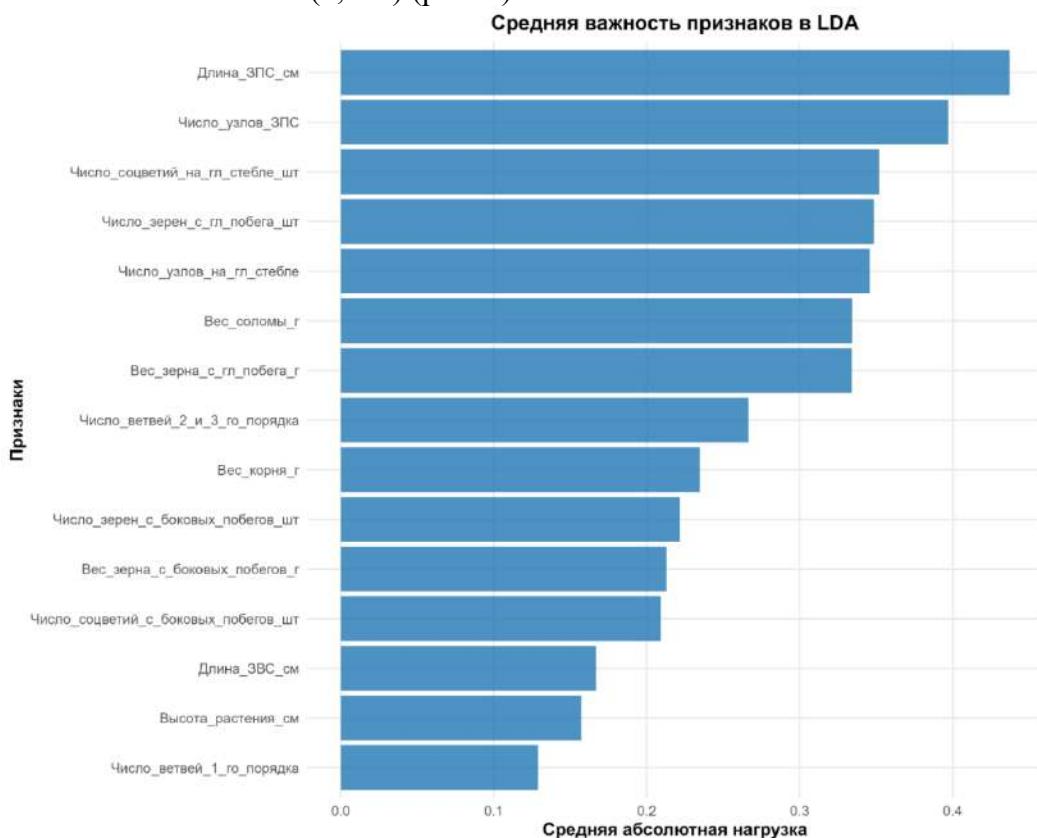


Рис. 7. Средняя важность признаков в LDA

Результаты LDA в целом подтверждают закономерности, выявленные в PCA анализе: градиент изменчивости от нефасцированных растений к формам с выраженной фасциацией, непрерывность изменчивости (особенно между кудрявым морфотипом и растениями с комкующимся верхним соцветием), а также важность параметров, связанных с зоной плодообразования и продуктивностью главного побега в качестве диагностических признаков. LDA дополнительно позволил количественно оценить степень дискретности морфотипов и идентифицировать наиболее информативные признаки для их различия, что имеет важное значение для разработки диагностических ключей и селекционных программ. Результаты LDA достаточно стабильны и подтверждаются кросс-валидацией (10-fold): $83 \pm 6,6\%$.

Комплексный анализ статистической значимости различий выявил, что 75% изучаемых признаков (12 из 16) демонстрируют статистически значимые различия между морфотипами ($p < 0,05$). Тепловая карта статистической значимости (рис. 8) и анализ F-статистик ANOVA (рис. 9) позволяют визуализировать эту сложную картину дифференциации.

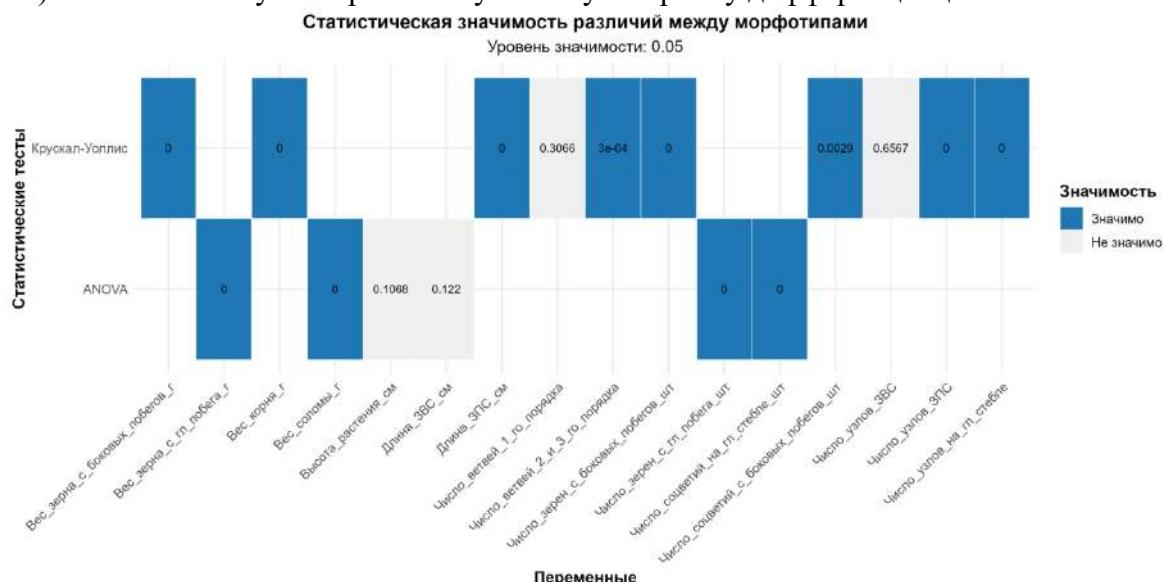


Рис. 8. Тепловая карта статистической значимости ANOVA и Крускал-Уоллис тестов для признаков с нормальным и ненормальным распределением, соответственно.

Порог значимости $p\text{-value}=0,05$

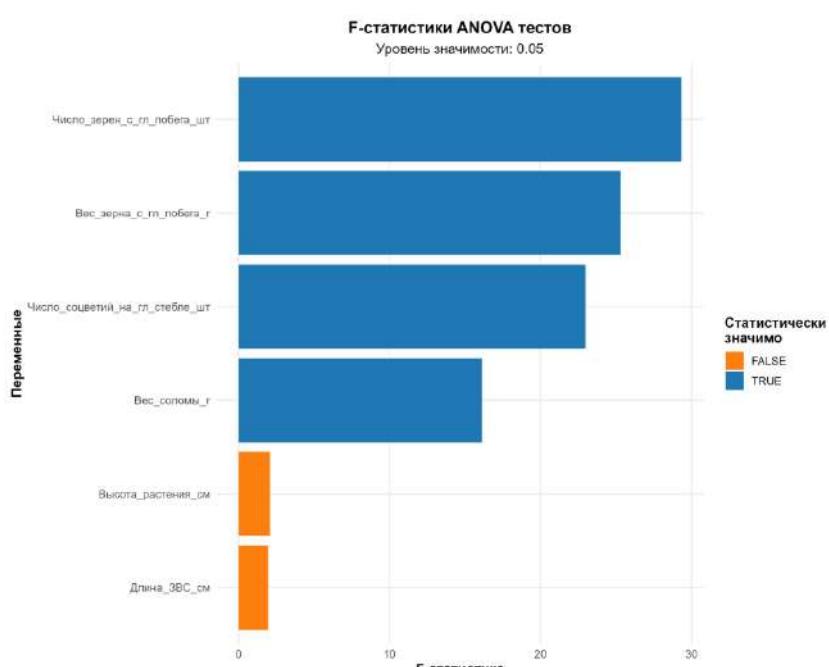


Рис. 9. F-статистики наиболее значимых признаков. Порог значимости $p\text{-value}=0,05$

Таким образом, комплексный статистический анализ свидетельствует о том, что хотя морфотипы гречихи статистически значимо различаются по большинству изучаемых признаков, эти различия носят характер непрерывной вариабельности без четких дискретных границ между группами.

Заключение

Комплексный анализ морфометрических признаков позволил установить, что дифференциация изученных морфотипов гречихи носит выраженный количественный, а не качественный характер. Несмотря на статистически значимые различия по 75% признаков, четкие дискретные границы между группами отсутствуют, о чем свидетельствует значительное перекрытие межквартильных диапазонов и доверительных эллипсов. Метод главных компонент выявил две основные независимые стратегии продуктивности, лежащие в основе изменчивости: первая связана с развитием боковых побегов и вегетативной массы, а вторая — с доминированием главного побега. Установлен непрерывный градиент морфологической изменчивости от нефасцированных растений к формам с выраженной фасциацией, что отражает последовательное усиление общей продуктивности, достигаемое за счет интенсификации обеих выявленных стратегий. При этом морфотип с кудрявой фасциацией идентифицирован как крайне полиморфная и нестабильная форма. Результаты линейного дискриминантного анализа количественно подтвердили высокую диагностическую ценность комплекса признаков (общая точность классификации 95%) и выделили наиболее информативные параметры, связанные с продуктивностью главного побега и структурой зоны плодообразования. Таким образом, фасциация выступает фактором интенсификации существующих программ развития, а выявленные закономерности представляют практическую ценность для селекции гречихи, направленной на оптимизацию структуры урожая через комбинирование идентифицированных стратегий продуктивности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного Фонда и Академии наук Республики Татарстан по проекту № 25-24-20094, <https://rscf.ru/project/25-24-20094/>

Литература

1. Chetry U., Chrungoo N.K. Beyond the Cereal Box: Breeding Buckwheat as a Strategic Crop for Human Nutrition // Plant Foods for Human Nutrition. 2021. Vol. 76, No. 4. P. 399-409. doi: 10.1007/s11130-021-00930-7
2. Matsui K., Yasui Y. Genetic and genomic research for the development of an efficient breeding system in heterostylous self-incompatible common buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) // Theoretical and Applied Genetics. 2020. Vol. 133. P. 1641-1653. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03572-6>
3. Цаценко Л.В., Хилько И.А. Фасциация - феномен роста или аномалия развития у растений? // Генетический потенциал сельскохозяйственных растений и его реализация в селекции, семеноводстве и размножении: сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. Кубанского отделения ВОГиС, Краснодар, 14 февраля 2024 года. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, – 2024. – С. 184-186. EDN HBNFWA.
4. Iliev I., Kitin P. Origin, morphology, and anatomy of fasciation in plants cultured *in vivo* and *in vitro* // Plant Growth Regulation. 2010. Vol. 63, No. 2. P. 115-129. doi: 10.1007/s10725-010-9540-3
5. Цаценко Л. В., Логвинов А. В. Тератные формы растений: подходы и методы изучения. Краснодар: ООО "Просвещение-Юг", 2023. 110 с. ISBN 978-5-93491-946-8. EDN FKDBRZ.
6. Sinjushin A. A., Gostimsky S. A. Fasciation in pea: basic principles of morphogenesis // Russian Journal of Developmental Biology. 2006. Vol. 37, No. 6. P. 375-381. <https://doi.org/10.1134/S1062360406060063>
7. Altae M., Dalas I. S. Abnormal growth in the plant (fasciation) // Science Archives. 2021. Vol. 2, No. 4. P. 339-342. <http://dx.doi.org/10.47587/SA.2021.2412>

8. Mayorov S. et al. Types of fasciation in plants and factors affecting its manifestation // Vegetable crops of Russia. 2012. Vol. 2. P. 54-59. doi: 10.18619/2072-9146-2012-2-54-59
9. Красников А.А. Тераты одуванчиков (*Taraxacum*, Asteraceae): литературный обзор и собственные наблюдения. // Растительный мир Азиатской России. – 2017. – № 3. – С. 34-42.
10. Коротцева И. Б. Фасциация у тыквенных. // Овощные культуры России. – 2023. – Т. 6. – С. 17-21. doi: 10.18619/2072-9146-2023-6-17-21
11. Кадырова Ф.З., Климова Л.Р., Иматуллина Г.И. [и др.]. Эффективность использования новых морфобиотипов гречихи в селекции для засушливых условий среднего Поволжья. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2024. Т. 19, – № 2 (74). – С. 12-17. doi: 10.12737/2073-0462-2024-12-17. EDN OLJCCD.
12. Кадырова Ф.З., Климова Л.Р., Кадырова Л.Р. Формирование качества плодов в процессе селекции гречихи. // Агробиотехнологии и цифровое земледелие. – 2022. – № 4 (4). – С. 29-33. DOI 10.12737/2782-490X-2022-29-33. EDN GTHZSM.

References

1. Chettry U., Chrungoo N. K. Beyond the Cereal Box: Breeding Buckwheat as a Strategic Crop for Human Nutrition. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2021, Vol. 76, No. 4, pp. 399-409. doi: 10.1007/s11130-021-00930-7
2. Matsui K., Yasui Y. Genetic and genomic research for the development of an efficient breeding system in heterostylous self-incompatible common buckwheat (*Fagopyrum esculentum*). *Theoretical and Applied Genetics*. 2020, Vol. 133, pp. 1641–1653. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03572-6>
3. Tsatsenko L. V., Khilko I. A. Fasciationis a phenomenon of growth or an anomaly of development in plants? Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Kuban department of VOGIS, Krasnodar, Febr. 14, 2024. Krasnodar: Trubilin Kuban State Agr. University, 2024, pp. 184-186. EDN HBNFWA. (In Russian)
4. Iliev I., Kitin P. Origin, morphology, and anatomy of fasciation in plants cultured in vivo and in vitro. *Plant Growth Regulation*. 2010, Vol. 63, No. 2, pp. 115-129. doi: 10.1007/s10725-010-9540-3
5. Tsatsenko L. V., Logvinov A.V. Terate forms of plants: approaches and methods of study. Krasnodar: LLC "Prosveshchenie-Yug", 2023, 110 p. ISBN 978-5-93491-946-8. EDN FKDBRZ.
6. Sinjushin A. A., Gostimsky S. A. Fasciation in pea: basic principles of morphogenesis. *Russian Journal of Developmental Biology*. 2006, Vol. 37, No. 6, pp. 375-381. <https://doi.org/10.1134/S1062360406060063>
7. Altai M., Dalas I. S. Abnormal growth in the plant (fasciation). *Science Archives*. 2021. Vol. 2, No. 4, pp. 339-342. <http://dx.doi.org/10.47587/SA.2021.2412>
8. Mayorov S. et al. Types of fasciation in plants and factors affecting its manifestation. *Vegetable crops of Russia*. 2012, Vol. 2, pp. 54-59. doi: 10.18619/2072-9146-2012-2-54-59
9. Krasnikov A. A. Dandelion terats (*Taraxacum*, Asteraceae): a literary review and his own observations. *Rastitel'nyi mir Aziatskoi Rossii – The flora of Asian Russia*. 2017, No. 3, pp. 34-42.
10. Korottseva I. B. Fasciation in pumpkin plants. *Vegetable crops of Russia*. 2023, Vol. 6, pp. 17-21. doi: 10.18619/2072-9146-2023-6-17-21 (In Russian)
11. Kadyrova F. Z., Klimova L. R., Imatullina G. I. [et al.] Efficiency of using new morphobiotypes of buckwheat in breeding for arid conditions of the Middle Volga region. *Bulletin of Kazan State Agrarian University*. 2024, Vol. 19, No. 2(74), pp. 12-17. doi: 10.12737/2073-0462-2024-12-17. EDN OLJCCD. (In Russian)
12. Kadyrova F. Z., Klimova L. R., Kadyrova L. R. Formation of fruit quality in the buckwheat breeding process. *Agrobiotechnology and digital agriculture*. 2022, No. 4(4), pp. 29-33. DOI 10.12737/2782-490X-2022-29-33. EDN GTHZSM. (In Russian)