

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ

PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY OF PLANTS

УДК 635.654.3 581.49 631.524.85 581.162.41

doi: 10.21685/2307-9150-2025-1-8

Характеристика устьичного аппарата вигны (*Vigna unguiculata*) при интродукции на юге Западной Сибири

Ц. Сунь¹, Ю. В. Фотев²

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

²Центральный Сибирский ботанический сад СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный аграрный университет, Новосибирск, Россия

¹t.sun1@g.nsu.ru, ²fotev_2009@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Устьичный аппарат видов теплолюбивых растений семейства бобовых отражает экологические особенности его функционирования в (суб)тропических условиях исходного ареала. Для оценки морфометрических параметров листьев определяли плотность расположения и размер устьиц на адаксиальной и абаксиальной стороне листьев и исследовали их связь с холодостойкостью в фазе зрелого мужского гаметофита *in vitro*. *Материалы и методы.* В работе использовали 14 образцов вигны (*Vigna unguiculata*). Для исследования устьичного аппарата использовали сканирующий электронный микроскоп Hitachi TM4000 plus. Жизнеспособность пыльцы *in vitro* оценивали на 20 % растворе ПЭГ 6000 в режиме 25 °C / 3 ч (контроль) и в режиме 6 °C / 24 ч (оценка холодостойкости). Для оценки сходства образцов по параметрам устьичного аппарата использовали кластерный анализ. Для измерения тесноты связи морфометрических параметров листьев с жизнеспособностью пыльцы *in vitro* использовали корреляционный анализ. *Результаты.* Морфологические параметры устьиц различных образцов вигны существенно различались. Плотность устьиц, размер их длинной и короткой оси на адаксиальной и абаксиальной стороне листьев составили 74–230 шт./мм², 231–439 шт./мм², 14,7–20,8 μm, 14,3–20,1 μm, 4,0–6,3 μm и 4,3–8,4 μm соответственно. Корреляционный анализ показал, что плотность устьиц на адаксиальной стороне листа достоверно коррелировала с показателем прорастания (жизнеспособностью) пыльцы при 25 °C ($r = 0,524$), а длина короткой оси устьиц на адаксиальной стороне листа достоверно коррелировала с холодостойкостью ($r = -0,513$). *Выводы.* Проведенная кластеризация разделила образцы вигны на три группы. Zinder, Кудесница и Блэк Сид отнесены к группе с самой высокой плотностью устьиц; Графиня, Лилиана, Ниагара, к-802, Нежная, а также фасоль обыкновенная и адзуки (форма RU-1-NOVB-vegYF-0061) – к категории со средней плотностью устьиц; остальные сорта вошли в группу с самой низкой плотностью устьиц.

© Сунь Ц., Фотев Ю. В., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: вигна, *Vigna unguiculata*, устьичный аппарат, холодостойкость, кластерный анализ, корреляционный анализ

Финансирование: работа поддержана бюджетным проектом ЦСБС СО РАН АААА-А21-121011290027-6.

Для цитирования: Сунь Ц., Фотев Ю. В. Характеристика устьичного аппарата вигны (*Vigna unguiculata*) при интродукции на юге Западной Сибири // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2025. № 1. С. 88–100. doi: 10.21685/2307-9150-2025-1-8

Characteristics of the stomatal apparatus of Vigna (*Vigna unguiculata*) during introduction in the south of Western Siberia

J. Sun¹, Yu.V. Fotev²

¹Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

²Central Siberian Botanical Garden SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russia

¹t.sun1@g.nsu.ru, ²fotev_2009@mail.ru

Abstract. *Background.* The stomatal apparatus of heat-loving legume species reflects the ecological features of its functioning in the (sub) tropical conditions of the original range. To assess the morphometric parameters of leaves, the density of the arrangement and size of stomata on the adaxial and abaxial sides of the leaves were determined and their relationship with cold resistance in the mature male gametophyte phase in vitro was studied. *Materials and methods.* Fourteen accessions of cowpea (*Vigna unguiculata*) were used in the study. The Hitachi TM4000 plus scanning electron microscope was used to examine the stomatal apparatus. Pollen viability in vitro was assessed on a 20 % PEG 6000 solution at 25° / 3 hours (control) and at 6° / 24 hours (cold resistance assessment). The similarity of the accessions by the parameters of the stomatal apparatus was determined using cluster analysis. Correlation analysis was used to assess the relationship between the morphometric parameters of the leaves and the viability of pollen in vitro. *Results.* The morphological parameters of the stomata of different varieties of *Vigna* differed significantly. The stomatal density, stomatal long axis and stomatal short axis on the adaxial and abaxial side of *Vigna* were 74.0–230.0 / mm², 231.0–439 / mm², 14.7–20.8 μm, 14.3–20.1 μm, 4.0–6.3 μm and 4.3–8.4 μm, respectively. Correlation analysis showed that the density of stomata on the adaxial side of the leaf significantly correlated with pollen viability at 25° ($r = 0.524$), and the short axis of the stomata on the adaxial side of the leaf significantly correlated with cold resistance ($r = -0.513$). *Conclusions.* Systematic clustering divided the above varieties into three categories. Zinder, Kudesnitsa, Blaek Sid is a separate category with the highest stomatal density; Grafinya, Liliana, Niagara, k-802, Nezhnaya, and also *Phaseolus vulgaris* and adzuki (form RU-1-NOVB-vegYF-0061) are categories with medium stomatal density; the rest of the varieties were divided into one category, which had the lowest stomatal density.

Keywords: cowpea, *Vigna unguiculata*, stomatal apparatus, cold resistance, cluster analysis, correlation analysis

Financing: the research was financed by the Central Siberian Botanical Garden SB RAS project No. АААА-А21-121011290027-6.

For citation: Sun J., Fotev Yu.V. Characteristics of the stomatal apparatus of Vigna (*Vigna unguiculata*) during introduction in the south of Western Siberia. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences.* 2025;(1):88–100. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-9150-2025-1-8

Введение

Устьица растений являются основными каналами обмена газов, таких как CO_2 и H_2O , между растениями и внешней средой. Они играют важную роль в регулировании физиологической деятельности, такой как фотосинтез, дыхание и транспирация растений. Устьица играют ключевую роль в процессе адаптации растений к окружающей среде [1]. Очевидны различия по таким характеристикам, как плотность и размер устьиц в листьях разных растений [2]; имеются также различия в параметрах устьичного аппарата растений одного и того же рода или разных образцов одного и того же вида. Характеристики устьиц эпидермиса растений являются важной областью исследования ресурсов зародышевой плазмы растений [3]. Устьица – важный орган в изучении филогенетических взаимоотношений растений, а его особенности – важные показатели для изучения происхождения, эволюции и классификации растений [4].

В процессе долговременной эволюции растения адаптируются к изменениям окружающей среды, корректируя организацию и работу устьичного аппарата и механизмы роста и развития. Плотность и размер устьиц, а также чувствительность их открытия и закрытия отражают способность растения адаптироваться к стрессу [5]. Бирлинг и Чалонер обнаружили, что плотность устьиц дуба черешчатого (*Quercus robur*) отрицательно коррелирует с температурой [6]. Исследование Охсуми с соавторами показало, что снижение температуры не оказывает существенного влияния на плотность устьиц риса (*Oryza sativa*) [7]. Сюлин с соавторами обнаружили положительную корреляцию между длиной устьиц кукурузы (*Zea mays*) и разницей температур листьев [8]. Исследования также показали, что софора (*Sophora moorcroftiana*) адаптируется к низким температурам за счет уменьшения плотности расположения, длины и ширины устьиц [9].

Вигна (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) принадлежит к роду *Vigna* Savy семейства бобовых и является важной овощной и зернобобовой культурой. Ее родиной является Африка, а южное происхождение этой культуры определило, что она требует более высоких температур на всех стадиях роста и развития [10]. В России ее выращивают в небольших объемах в Астраханской области и на Дальнем Востоке [11]. Температура является одним из основных факторов, ограничивающих выращивание вигны в регионах с континентальным климатом. При низкотемпературном стрессе всхожесть и скорость появления всходов вигны снижаются с понижением температуры и увеличением продолжительности воздействия низких температур, а рост ее проростков подавляется [12]. Абиотические стрессы, такие как низкие температуры, серьезно влияют на рост и развитие растений. Чтобы адаптироваться к неблагоприятным условиям окружающей среды, растения подвергаются соответствующим изменениям в своей индивидуальной морфологии и фенотипических характеристиках, чтобы противостоять неблагоприятным факторам [13]. Устьица легко подвержены изменениям внешней среды, а их морфологические и структурные характеристики являются результатом длительной адаптации к изменениям внешней среды [14]. Растения могут изменять размер и плотность устьиц, чтобы адаптироваться к различным средам обитания, а также быстро регулировать открытие и закрытие устьиц, чтобы справляться с внезапными изменениями окружающей среды в краткосрочной перспективе

для уменьшения или предотвращения необратимого ущерба самому растению [15]. Предыдущие исследования подтвердили связь между устьичными характеристиками листьев растения и его холодостойкостью [16].

Тем не менее в настоящее время нет сведений о связи характеристик устьичного аппарата и холодостойкостью вигны. Цель исследования – оценка параметров устьичного аппарата образцов *V. unguiculata*, а также их связи с холодостойкостью пыльцы *in vitro*.

Материалы и методы

Исследования проведены в лаборатории интродукции пищевых растений Центрального Сибирского ботанического сада СО РАН (ЦСБС СО РАН). Материалом для испытаний послужили 14 образцов вигны (*Vigna unguiculata*), а также для сравнения один образец адзуки (*Vigna angularis* (Willd.) Ohwi & N. Ohashi) и один образец фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris* L.) разного происхождения, включая коллекции ФИЦ Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова (ВИР) и Коллекции живых растений открытого и защищенного грунта ЦСБС СО РАН УНУ № USU 440534 (табл. 1).

Таблица 1

Образцы, использованные в работе и их происхождение

| Номер | Образцы | Происхождение |
|-------|---|-------------------------------|
| 1 | Блэк Сид | Агрофирма «Плазменные семена» |
| 2 | Графиня | Агрофирма «Гавриш» |
| 3 | к-802 | ВИР |
| 4 | Красно-пестрая | ЦСБС СО РАН |
| 5 | Кудесница | Агрофирма «СЕДЕК» |
| 6 | Лилиана | Агрофирма «Поиск» |
| 7 | Макаретти | Агрофирма «Гавриш» |
| 8 | Нежная | Агрофирма «Гавриш» |
| 9 | Ниагара | Агрофирма «Гавриш» |
| 10 | Сибирский размер | ЦСБС СО РАН |
| 11 | Факир | Агрофирма «СЕДЕК» |
| 12 | Юньнаньская | ЦСБС СО РАН |
| 13 | EarlyProlifacasyXiaoBao #2 | КНР |
| 14 | Zinder | Дания (по Делектусу) |
| 15 | Фасоль обыкновенная, Королева Неккар (Neckar Queen) | ООО СПК «АПД» |
| 16 | Адзуки, форма RU-1-NOVB-vegYF-0061 | ЦСБС СО РАН |

Семена всех образцов выращивали в 2023 г. в одинаковых условиях в пленочной необогреваемой теплице ЦСБС СО РАН (54.820364 с.ш., 83.121464 в.д.). Для исследования устьиц отбирали взрослые, здоровые растения. Использовали взрослые листья среднего яруса (выборка), собранные с растений утром (9:30 – 9:45). Фрагменты листьев (1 см²) вырезали из середины листовой пластинки листа и исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM4000 plus (Япония), оснащенного Deben-CoolStage, в режиме высокого вакуума – 30 °С, в ЦКП ЦСБС СО РАН.

Морфологическое описание устьиц проводили по опубликованной ранее методике [17]. Случайным образом выбирали по три листа из каждой выборки, измеряли, фотографировали и записывали количество и размер устьиц, обращая внимание на их морфологию. Плотность устьиц и частоту устьиц рассчитывают по формулам [18]:

$$\text{Плотность устьиц} = \frac{\text{Количество устьиц}}{\text{область поля зрения}};$$

$$\text{Устьичная частота} = \text{Количество устьиц на адаксиальной стороне} + \\ + \text{Количество устьиц на абаксиальной стороне}.$$

Для определения холодостойкости собранную пыльцу помещали на среду с полиэтиленгликолем с молекулярной массой 6000 (ПЭГ 6000), являющимся синтетическим осмотиком, не участвующим в метаболизме растительных клеток. Далее пыльцу помещали в каплю среды на предметное стекло и переносили в термостат на режим 25 °C / 3 ч – для определения жизнеспособности (контроль) и в холодильник на режим 6 °C / 24 ч – для оценки прорастания при низкой температуре. После инкубации предметные стекла помещали под микроскоп Carl Zeiss Primo Star и просматривали при 100-кратном увеличении. Проросшей (жизнеспособной) считали пыльцу с длиной пыльцевой трубки, превышающей 1/2 диаметра пыльцевого зерна [19]. Случайным образом подсчитывали число проросших пыльцевых зерен в трех полях зрения. В каждом поле содержалось не менее 50 пыльцевых зерен, рассчитывалось число проросших пыльцевых зерен. Жизнеспособность в виде прорастания пыльцы при разной температуре (25 и 6 °C) и холодостойкость рассчитывали по формулам [20]:

$$\text{Жизнеспособность (\%)} = \left(\frac{\text{Количество проросшей пыльцы}}{\text{Общее количество пыльцы}} \right) \times 100;$$

$$\text{Холодостойкость (\%)} = \frac{\text{Количество проросшей пыльцы при 6 °C}}{\text{Количество проросшей пыльцы при 25 °C}} \times 100.$$

Статистическая обработка опытных данных включала использование программ Excel, SPSS для анализа значимости, корреляционного и кластерного анализа.

Результаты

Характеристика устьиц листьев вигны

Результаты микроскопических исследований морфологии устьиц разных сортов вигны представлены на рис. 1. Морфологические различия эпидермальных клеток листьев у 14 образцов вигны очень малы, при этом форма верхних и нижних эпидермальных клеток листьев полигональная. С точки зрения распределения устьиц, все устьица в листьях 14 образцов вигны расположены неправильно и имеют неправильную ориентацию. Установлен паразитный тип устьичного аппарата листьев вигны. Все устьица в листьях 14 образцов вигны имеют продолговатую форму и имеют заметные углубления.

Устьица копланарны с клетками эпидермиса, при этом каждая устьица окружена от 2 до 6 клеток эпидермиса. Почковидные замыкающие клетки по обе стороны устьиц расположены симметрично по обе стороны от устьицы. По обеим сторонам замыкающих клеток нет дополнительных клеток, и они заметно выделяются по сравнению с эпидермальными клетками.

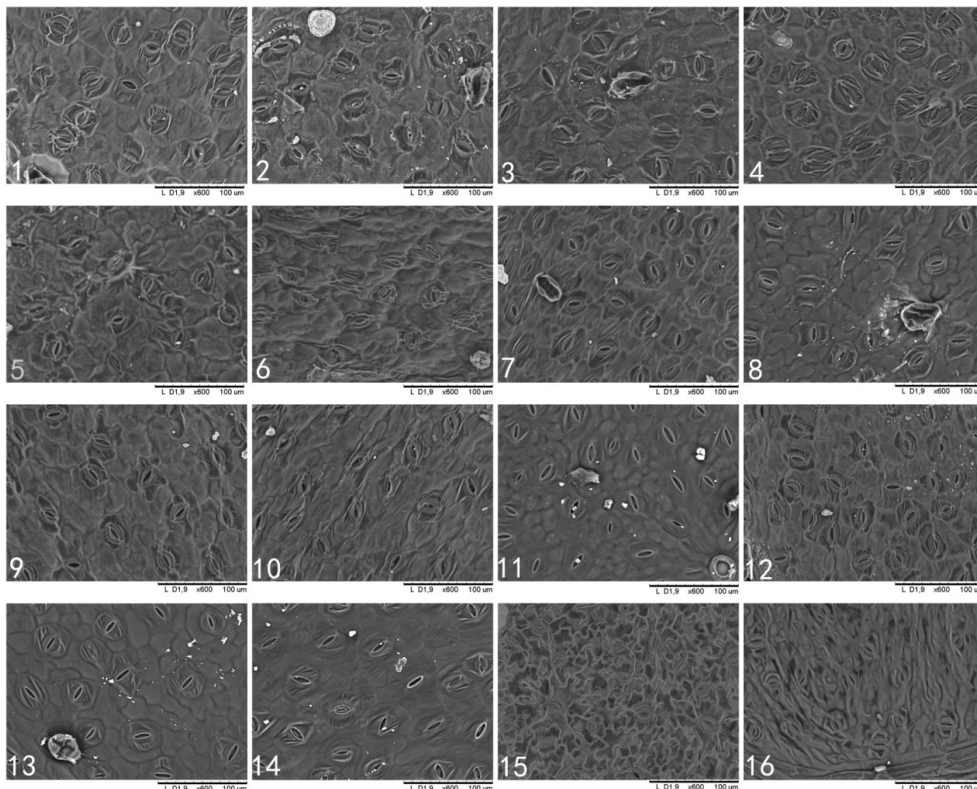


Рис 1. Морфология устьиц эпидермиса листьев вигны разных сортов: 1 – Сибирский размер; 2 – Юньнаньская; 3 – Графиня; 4 – Красно-пестрая; 5 – к-802; 6 – Early Prolifacasy Xiao Bao #2; 7 – Zinder; 8 – Факир; 9 – Лилиана; 10 – Макаретти; 11 – Блэк Сид; 12 – Кудесница; 13 – Нежная; 14 – Ниагара; 15 – фасоль обыкновенная, сорт Neckar Queen; 16 – адзуки, форма RU-1-NOVB-vegYF-0061

Результаты анализа семи устьичных признаков листьев вигны показали, что у всех сортов устьица располагались на адаксиальной и абаксиальной стороне, а плотность устьиц на адаксиальной стороне всех разновидностей меньше, чем на абаксиальной стороне (табл. 2). Плотность устьиц на адаксиальной стороне тестируемых сортов колебалась от 33 до 230 шт./мм², а плотность устьиц на абаксиальной стороне – от 20 до 439 шт./мм². Различия между сортами были большими, со значениями коэффициента вариации (CV) – 41 и 31 % соответственно. Наибольшая плотность устьиц наблюдалась у сорта Блэк Сид (668 шт./мм²), наименьшая – у сорта Нежная (305 шт./мм²), у других образцов плотность устьиц изменяется от 347 до 586 шт./мм².

Сравнение размеров устьиц на адаксиальной и абаксиальной стороне листьев показало различия в размерах устьиц. У испытуемых сортов на адаксиальной стороне размер длинной оси устьиц был зафиксирован в пределах

от 14,7 до 20,8 μm , короткой оси – от 4,0 до 6,3 μm , на абаксиальной стороне размер длинной оси составлял от 14,3 до 20,1 μm , короткой оси – от 4,9 до 8,4 μm .

Таблица 2

Характеристика устьиц разных образцов вигны

| Образцы | Плотность устьиц на 1 мм ² | | Размер устьиц, μm | | | |
|---------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| | адаксиальная поверхность листа | абаксиальная поверхность листа | адаксиальная поверхность листа | | абаксиальная поверхность листа | |
| | | | длина | ширина | длина | ширина |
| 1 | 174,7 ± 3,7 ^b | 337,0 ± 7,8 ^d | 20,6 ± 0,9 ^{bc} | 5,2 ± 0,6 ^{ab} | 17,3 ± 1,5 ^{abcde} | 8,4 ± 0,9 ^a |
| 2 | 133,3 ± 2,7 ^e | 283,0 ± 5,0 ^{efg} | 18,4 ± 1,0 ^{abcd} | 6,3 ± 1,1 ^a | 16,9 ± 1,0 ^{abcde} | 7,6 ± 0,3 ^{ab} |
| 3 | 97,3 ± 0,9 ^g | 301,7 ± 1,9 ^e | 19,2 ± 1,0 ^{abcd} | 5,2 ± 0,4 ^{ab} | 20,1 ± 0,9 ^a | 6,8 ± 0,1 ^{abc} |
| 4 | 159,0 ± 2,9 ^{cd} | 360,0 ± 11,0 ^c | 19,7 ± 0,4 ^{abc} | 5,7 ± 0,2 ^{ab} | 17,2 ± 0,8 ^{abcde} | 6,4 ± 1,3 ^{abcd} |
| 5 | 112,0 ± 0,6 ^f | 243,3 ± 1,8 ^h | 18,4 ± 0,8 ^{abcd} | 5,4 ± 0,8 ^{ab} | 14,3 ± 0,8 ^e | 5,0 ± 0,6 ^{cd} |
| 6 | 169,7 ± 2,6 ^{bc} | 280,3 ± 2,4 ^{efg} | 14,7 ± 0,3 ^e | 4,6 ± 0,7 ^{abc} | 14,9 ± 1,7 ^{de} | 4,9 ± 0,7 ^{cd} |
| 7 | 169,0 ± 0,6 ^{bc} | 405,3 ± 2,9 ^b | 16,3 ± 0,5 ^{de} | 4,1 ± 0,7 ^{bc} | 15,6 ± 1,5 ^{cde} | 6,4 ± 0,3 ^{abcd} |
| 8 | 147,3 ± 8,3 ^d | 276,7 ± 1,8 ^{fg} | 18,2 ± 1,6 ^{abcd} | 4,7 ± 0,5 ^{abc} | 17,4 ± 0,5 ^{abcde} | 5,6 ± 0,2 ^{bcd} |
| 9 | 89,3 ± 4,5 ^{gh} | 280,7 ± 2,4 ^{efg} | 17,6 ± 0,9 ^{bcde} | 5,4 ± 0,3 ^{ab} | 19,1 ± 0,7 ^{abc} | 6,1 ± 0,3 ^{abcd} |
| 10 | 75,3 ± 1,5 ⁱ | 272,0 ± 4,5 ^g | 18,8 ± 0,6 ^{abcd} | 4,7 ± 0,7 ^{abc} | 19,0 ± 0,2 ^{abc} | 5,9 ± 0,2 ^{bcd} |
| 11 | 229,7 ± 2,7 ^a | 438,7 ± 13,1 ^a | 19,0 ± 0,4 ^{abcd} | 5,1 ± 0,8 ^{abc} | 19,5 ± 0,7 ^{bc} | 5,9 ± 1,2 ^{bcd} |
| 12 | 181,3 ± 5,2 ^b | 404,3 ± 5,2 ^b | 16,6 ± 0,8 ^{de} | 5,5 ± 0,1 ^{ab} | 16,0 ± 0,7 ^{bcde} | 6,3 ± 0,3 ^{abcd} |
| 13 | 73,7 ± 1,3 ⁱ | 231,0 ± 3,8 ^h | 16,3 ± 1,1 ^{de} | 4,6 ± 0,1 ^{abc} | 18,3 ± 0,9 ^{abcd} | 5,8 ± 0,4 ^{bcd} |
| 14 | 92,7 ± 2,2 ^g | 290,0 ± 12,6 ^{efg} | 20,8 ± 0,9 ^a | 4,0 ± 0,3 ^{bc} | 17,6 ± 0,6 ^{abcde} | 7,3 ± 0,9 ^{ab} |
| 15 | 93,0 ± 6,0 ^g | 303,0 ± 3,0 ^e | 16,8 ± 0,8 ^{cde} | 5,5 ± 0,1 ^{ab} | 18,9 ± 1,9 ^{abc} | 4,3 ± 0,5 ^d |
| 16 | 78,0 ± 6,0 ^{hi} | 297,0 ± 5,0 ^{ef} | 11,2 ± 0,7 ^f | 3,1 ± 0,1 ^c | 14,8 ± 0,1 ^{de} | 4,5 ± 0,1 ^d |

Образцы вигны: 1 – Сибирский размер; 2 – Юньнаньская; 3 – Графиня; 4 – Краснопестрая; 5 – к-802; 6 – Early Prolifacasy Xiao Bao #2; 7 – Zinder; 8 – Факир; 9 – Лилиана; 10 – Макаретти; 11 – Блэк Сид; 12 – Кудесница; 13 – Нежная; 14 – Ниагара; 15 – фасоль обыкновенная, сорт Neckar Queen; 16 – адзуки, форма RU-1-NOVB-vegYF-0061. Разные буквы в одном столбце обозначают существенные различия при 0,05 % уровне значимости, одинаковые буквы – отсутствие различий.

Результаты кластерного анализа параметров устьичного аппарата

Параметры устьичного аппарата листьев 14 образцов вигны, а также образца фасоли обыкновенной и адзуки использовали в качестве переменных

при проведении кластерного анализа (рис. 2). Результаты показали, что сорта можно разделить на три группы. В первую вошли сорта Блэк Сид, Кудесница и Zinder, у которых была самая высокая плотность устьиц на адаксиальной и абаксиальной стороне листьев, 169,0–229,7 и 404,3–438,7 шт./мм² соответственно. Во второй группе оказались образцы к-802, Лилиана, Макаретти, Нежная, Ниагара, фасоль обыкновенная и адзуки; в третьей: Сибирский размер, Юньнаньская, Графиня, Красно-пестрая, Early Prolificacy Xiao Bao #2 и Факир. Вторая (II) и третья (III) группы представляют собой подкластеры, сформировавшие один большой кластер (II + III), резко отличающийся от кластера I. Можно предположить, что экологические условия формирования анатомической структуры листьев образцов внутри I кластера в регионе их происхождения могли быть сходными.

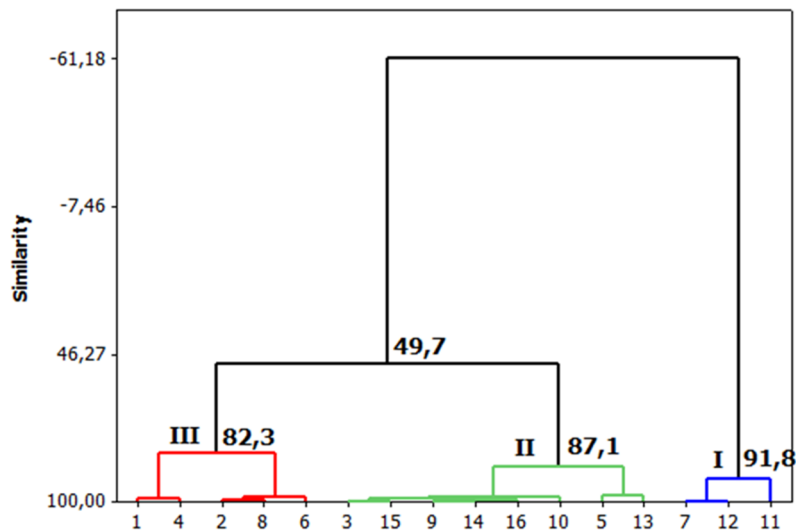


Рис. 2. Результаты кластерного анализа на основе характеристик устьичного аппарата листьев образцов вигны:

1 – Сибирский размер; 2 – Юньнаньская; 3 – Графиня; 4 – Красно-пестрая; 5 – к-802; 6 – Early Prolificacy Xiao Bao #2; 7 – Zinder; 8 – Факир; 9 – Лилиана; 10 – Макаретти; 11 – Блэк Сид; 12 – Кудесница; 13 – Нежная; 14 – Ниагара; 15 – фасоль обыкновенная, сорт Necker Queen; 16 – адзуки, форма RU-1-NOVB-vegYF-0061

Влияние низкой температуры на жизнеспособность пыльцы вигны

Для определения наличия связи между параметрами устьичного аппарата образцов вигны и жизнеспособностью пыльцы при ее проращивании на растворе ПЭГ 6000 *in vitro* было проведено специальное исследование.

Результаты дисперсионного анализа показали (табл. 3), что имеются достоверные различия в прорастании пыльцы *in vitro* у разных образцов при температуре 25 °С ($p < 0,05$). Наибольшую всхожесть (95,2 %) имел сорт Блэк Сид, а наименьшую – сорт Красно-пестрая (7,7 %).

При проращивании пыльцы в условиях низкой температуры (6 °С) отмечены достоверные различия в жизнеспособности пыльцы разных сортов ($p < 0,05$) (табл. 3), жизнеспособность пыльцы снижается с понижением температуры. По сравнению с нормальной температурой (25 °С) жизнеспособность пыльцы образцов снизилась от 8 до 100 %. Среди испытанных сортов

вигны не проросла только пыльца сорта Юньнаньская, оказавшаяся наиболее «теплолюбивой». Сорт Графиня имел близкий к нулю показатель низкотемпературного прорастания пыльцы (2,2 %). Наибольшую жизнеспособность при таких условиях показала пыльца сорта Кудесница (57,9 %). Наибольшее снижение отмечено у сортов Юньнаньская и Графиня, коллекционных образцов Красно-пестрая и к-802 – на 78–100 %, наименьшее – у сорта вигны Кудесница.

Наиболее холодостойкими оказались образцы Zinder, Лилиана и Кудесница с показателями от 97,9 до 73,8 % к показателю прорастания пыльцы при 25 °С. Самыми «теплолюбивыми» были Early Prolificacy Xiao Bao #2 (34,9 %), Графиня (14,5 %) , к-802 (13,3 %) и сорт Юньнаньская (0,0 %).

Таблица 3

Ранжированные показатели жизнеспособности (при 25° и 6 °С) и холодостойкости пыльцы разных образцов вигны, фасоли и адзуки

| Образцы | Прорастание пыльцы при 25 °С, % | Образцы | Прорастание пыльцы при 6 °С, % | Образцы | Холодостойкость по пыльце, % |
|---------|---------------------------------|---------|--------------------------------|---------|------------------------------|
| 11 | ↓88,4 ± 5,8 ^a | 12 | ↓57,9 ± 4,8 ^a | 7 | ↓97,9 ± 15,1 ^a |
| 12 | 81,7 ± 9,3 ^{ab} | 15 | 50,0 ± 8,2 ^b | 9 | 81,7 ± 10,1 ^{ab} |
| 6 | 71,1 ± 5,2 ^{bc} | 7 | 41,1 ± 2,7 ^b | 12 | 73,8 ± 13,1 ^{abc} |
| 8 | 70,8 ± 5,3 ^{bc} | 8 | 40,2 ± 3,9 ^b | 16 | 72,9 ± 14,8 ^{abc} |
| 1 | 67,9 ± 3,1 ^c | 9 | 39,9 ± 7,1 ^b | 15 | 71,8 ± 11,7 ^{abc} |
| 15 | 61,0 ± 3,3 ^c | 11 | 34,4 ± 8,3 ^{bc} | 10 | 69,2 ± 13,5 ^{abcd} |
| 9 | 48,9 ± 5,5 ^d | 16 | 34,3 ± 5,7 ^{bc} | 14 | 68,5 ± 3,2 ^{abcd} |
| 16 | 47,7 ± 2,7 ^d | 1 | 32,9 ± 8,9 ^{bc} | 8 | 58,1 ± 9,7 ^{bcde} |
| 7 | 44,6 ± 8,7 ^{de} | 6 | 24,2 ± 5,0 ^{cd} | 13 | 50,9 ± 9,1 ^{cde} |
| 13 | 38,9 ± 4,0 ^{def} | 10 | 23,1 ± 2,8 ^{cd} | 1 | 48,9 ± 13,5 ^{cde} |
| 10 | 34,3 ± 2,6 ^{ef} | 14 | 22,1 ± 1,9 ^{cd} | 4 | 45,7 ± 6,6 ^{cde} |
| 14 | 32,2 ± 1,6 ^f | 13 | 19,1 ± 1,4 ^d | 11 | 40,4 ± 11,2 ^{def} |
| 5 | 28,2 ± 0,7 ^f | 5 | 3,7 ± 0,9 ^e | 6 | 34,9 ± 8,5 ^{ef} |
| 3 | 17,4 ± 1,4 ^g | 4 | 3,4 ± 0,4 ^e | 3 | 14,5 ± 7,7 ^{fg} |
| 2 | 10,2 ± 0,7 ^g | 3 | 2,2 ± 1,1 ^e | 5 | 13,3 ± 3,2 ^{fg} |
| 4 | 7,7 ± 0,8 ^g | 2 | 0,0 ± 0,0 ^e | 2 | 0,0 ± 0,0 ^g |

П р и м е ч а н и е: 1 – Сибирский размер; 2 – Юньнаньская; 3 – Графиня; 4 – Красно-пестрая; 5 – к-802; 6 – Early Prolificacy Xiao Bao #2; 7 – Zinder; 8 – Факир; 9 – Лилиана; 10 – Макаретти; 11 – Блэк Сид; 12 – Кудесница; 13 – Нежная; 14 – Ниагара; 15 – фасоль обыкновенная, сорт Neckar Queen; 16 – адзуки, форма RU-1-NOVB-vegYF-0061. Разные буквы в одном столбце обозначают существенные различия при 0,05 % уровне значимости, одинаковые буквы – отсутствие различий; данные ранжированы по убыванию.

Анализ корреляции между параметрами устьичного аппарата листьев и жизнеспособностью пыльцы вигны

Корреляционный анализ между параметрами устьичного аппарата и жизнеспособностью пыльцы различных сортов вигны показал, что жизнеспособность пыльцы при 25 °С положительно коррелировала с жизнеспособностью пыльцы при 6 °С ($r = 0,808$, $p < 0,01$) и с плотностью устьиц на адаксиальной стороне листьев ($r = 0,524$, $p < 0,05$) (табл. 4). Жизнеспособность пыльцы при 6 °С положительно коррелировала с холодостойкостью пыльцы

($r = 0,776$, $p < 0,01$). Холодостойкость пыльцы отрицательно коррелировала с короткой осью устьиц на адаксиальной стороне листьев ($r = -0,513$, $p < 0,05$). Плотность устьиц на адаксиальной стороне листьев положительно коррелировала с плотностью устьиц на абаксиальной стороне ($r = 0,777$, $p < 0,01$). Длинная ось устьиц на адаксиальной стороне листьев положительно коррелировала с короткой осью устьиц на адаксиальной стороне листьев ($r = 0,517$, $p < 0,05$), а длинная ось устьиц на адаксиальной стороне листьев положительно коррелировала с короткой осью устьиц на абаксиальной стороне листьев ($r = 0,677$, $p < 0,05$).

Таблица 4

Результаты корреляционного анализа параметров устьичного аппарата листьев и показателей жизнеспособности пыльцы вигны

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|---|---------|---------|---------|---------|-------|---------|-------|-------|---|
| A | 1 | | | | | | | | |
| B | 0,808** | 1 | | | | | | | |
| C | 0,369 | 0,776** | 1 | | | | | | |
| D | 0,524* | 0,222 | -0,1 | 1 | | | | | |
| E | 0,411 | 0,411 | 0,284 | 0,777** | 1 | | | | |
| F | -0,234 | -0,33 | -0,284 | 0,186 | 0,096 | 1 | | | |
| G | -0,172 | -0,254 | -0,513* | 0,252 | 0,069 | 0,517* | 1 | | |
| H | -0,035 | -0,001 | 0,011 | -0,167 | 0,045 | 0,491 | 0,282 | 1 | |
| I | -0,243 | -0,257 | -0,188 | 0,243 | 0,22 | 0,677** | 0,299 | 0,237 | 1 |

Примечание: *A* – жизнеспособность пыльцы при 25 °С; *B* – жизнеспособность пыльцы при 6 °С; *C* – холодостойкость пыльцы; *D* – плотность устьиц на адаксиальной стороне листа; *E* – плотность устьиц на абаксиальной стороне листа; *F* – длинная ось устьиц на адаксиальной стороне листа; *G* – короткая ось устьиц на адаксиальной стороне листа; *H* – длинная ось устьиц на абаксиальной стороне листа; *I* – короткая ось устьиц на абаксиальной стороне листа; * – $p < 0,05$, ** – $p < 0,01$.

Заключение

Установлена связь характеристик устьичного аппарата образцов вигны с холодостойкостью этой культуры: длина короткой оси устьиц на адаксиальной стороне листа отрицательно коррелирует с холодостойкостью пыльцы при низкой температуре (6 °С) ($r = -0,513$, $p < 0,05$), что может служить важным фенотипическим индикатором адаптации вигны к низкотемпературному стрессу.

Кластерный анализ показал, что сорта с высокой плотностью устьиц (Блэк Сид, Кудесница и Zinder) демонстрируют более высокий показатель прорастания пыльцы при низкой температуре, что может быть связано с экологическими условиями их происхождения.

Такие сорта, как Zinder, Кудесница и Лилиана, обладают высокой жизнеспособностью пыльцы при низких температурах и могут быть использованы в качестве потенциального исходного материала для интродукции или селекции на холодоустойчивость в Западной Сибири.

В дальнейшем исследовании необходимо объединить с экспериментами по выращиванию растений в полевых условиях для проверки надежности связи между характеристиками устьиц и холодостойкостью. Целесообразно интегрировать мультиомные технологии (такие как геномика, транскриптомика и метаболомика) для систематического анализа генетического механизма

регуляции развития устьиц у вигны и его молекулярной сети взаимодействия с устойчивостью к холоду для выявления ключевых генов и метаболических путей. Это обеспечит теоретическую основу для точного скрининга ресурсов зародышевой плазмы, холодостойкости и целенаправленного улучшения сортов вигны, а в конечном итоге будет способствовать выращиванию новых сортов этой культуры с высокой стрессоустойчивостью, способных адаптироваться к умеренному климату.

Список литературы

1. Hsu P. K. Signaling mechanisms in abscisic acid-mediated stomatal closure // *The Plant Journal*. 2021. Vol. 105, № 2. P. 307–321. doi: 10.1111/tpj.15067
2. Beghin T. Shape and texture based plant leaf classification // *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems: 12th International Conference*. Sydney, Australia : Springer, 2010. P. 345–353.
3. Payamnoor V., Sattarian A. Stomatal variations and their position relative to leaf epidermal cells in ten *Maple* species // *Folia Oecologica*. 2024. Vol. 51, № 1. P. 83–92. doi: 10.2478/foecol-2024-0009
4. Hong T. Characteristics and correlations of leaf stomata in different *Aleurites montana* provenances // *PloS one*. 2018. Vol. 13, № 12. P. e0208899. doi: 10.1371/journal.pone.0208899
5. Ro H.-M. Photosynthetic characteristics and growth responses of dwarf apple (*Malus domestica* Borkh. cv. Fuji) saplings after 3 years of exposure to elevated atmospheric carbon dioxide concentration and temperature // *Trees*. 2001. Vol. 15. P. 195–203. doi: 10.1007/s004680100099
6. Beerling D. J., Chaloner W. G. The impact of atmospheric CO₂ and temperature changes on stomatal density: observation from *Quercus robur* lammas leaves // *Annals of Botany*. 1993. Vol. 71, № 3. P. 231–235. doi: 10.1006/anbo.1993.1029
7. Ohsumi A. Genotypic variation of stomatal conductance in relation to stomatal density and length in rice (*Oryza sativa* L.) // *Plant Production Science*. 2007. Vol. 10, № 3. P. 322–328. doi: 10.1626/ppp.10.322
8. Xiuling W. Study on stomatal characteristics and leaf temperature difference of different maize genotypes // *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*. 2004. Vol. 19, № 1. P. 71–74. doi: 10.3321/j.issn:1000-7091.2004.01.020
9. Weijie Y. Responses of stomatal characteristics of *Sophora japonica* leaves to drought and low temperature stress // *Guizhou Agricultural Sciences*. 2015. Vol. 43, № 9. P. 23–29. doi: CNKI:SUN:GATE.0.2015-09-006
10. Smýkal P. Legume crops phylogeny and genetic diversity for science and breeding // *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2015. Vol. 34, № 1-3. P. 43–104. doi: 10.1080/07352689.2014.897904
11. Dzyubenko N. Clusterbeans *Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.-properties, use, plant genetic resources and expected introduction in Russia // *Agricultural Biology*. 2017. Vol. 52, № 6. P. 1116–1128. doi: 10.15389/agrobiol.2017.6.1116eng
12. Barros J. R. A. Optimal temperature for germination and seedling development in cowpea seeds // *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 2020. Vol. 14, № 2. P. 231–239. doi: 10.17584/rcch.2020v14i2.10339
13. Wang X. Studies on Stomatal Characters and Leaf Temperature Gap of Different Maize Genotypes // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2004. Vol. 19, № 1. P. 71–74. doi: 10.3321/j.issn:1000-7091.2004.01.020
14. Liu W. Variation in leaf traits at different altitudes reflects the adaptive strategy of plants to environmental changes // *Ecology and Evolution*. 2020. Vol. 10, № 15. P. 8166–8175. doi: 10.1002/ece3.6519
15. Hetherington A. M., Woodward F. I. The role of stomata in sensing and driving environmental change // *Nature*. 2003. Vol. 424, № 6951. P. 901–908. doi: 10.1038/nature01843

16. Liu C. Variation of stomatal traits from cold temperate to tropical forests and association with water use efficiency // *Functional Ecology*. 2018. Vol. 32, № 1. P. 20–28. doi: 10.1111/1365-2435.12973
17. Корягина Н. В., Корягин Ю. В. Ботаника. М. : НИЦИНФРА-М, 2018. 351 с.
18. Zhu J. Rapid estimation of stomatal density and stomatal area of plant leaves based on object-oriented classification and its ecological trade-off strategy analysis // *Forests*. 2018. Vol. 9, № 10. P. 616. doi: 0.3390/f9100616
19. Chen S.-q. Pollen Grain Germination and Pollen Tube Growth in Pistil of Rice // *Rice Science*. 2008. Vol. 15, № 2. P. 125–130. doi: 10.1016/s1672-6308(08)60030-x
20. Фотев Ю. В. Оценка холодостойкости коллекционных образцов момордики (*Momordica charantia* L.) по прорастанию пыльцы при низкой температуре in vitro // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022. № 183. С. 39–47. doi: 10.30901/2227-8834-2022-3-39-47

References

1. Hsu P.K. Signaling mechanisms in abscisic acid-mediated stomatal closure. *The Plant Journal*. 2021;105(2):307–321. doi: 10.1111/tpj.15067
2. Beghin T. Shape and texture based plant leaf classification. *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems: 12th International Conference*. Sydney, Australia: Springer, 2010:345–353.
3. Payamnour V., Sattarian A. Stomatal variations and their position relative to leaf epidermal cells in ten Maple species. *Folia Oecologica*. 2024;51(1):83–92. doi: 10.2478/foecol-2024-0009
4. Hong T. Characteristics and correlations of leaf stomata in different *Aleurites montana* provenances. *PloS one*. 2018;13(12):e0208899. doi: 10.1371/journal.pone.0208899
5. Ro H.-M. Photosynthetic characteristics and growth responses of dwarf apple (*Malus domestica* Borkh. cv. Fuji) saplings after 3 years of exposure to elevated atmospheric carbon dioxide concentration and temperature. *Trees*. 2001;15:195–203. doi: 10.1007/s004680100099
6. Beerling D.J., Chaloner W.G. The impact of atmospheric CO₂ and temperature changes on stomatal density: observation from *Quercus robur* lammas leaves. *Annals of Botany*. 1993;71(3):231–235. doi: 10.1006/anbo.1993.1029
7. Ohsumi A. Genotypic variation of stomatal conductance in relation to stomatal density and length in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*. 2007;10(3):322–328. doi: 10.1626/pp.s.10.322
8. Xiuling W. Study on stomatal characteristics and leaf temperature difference of different maize genotypes. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*. 2004;19(1):71–74. doi: 10.3321/j.issn:1000-7091.2004.01.020
9. Weijie Y. Responses of stomatal characteristics of *Sophora japonica* leaves to drought and low temperature stress. *Guizhou Agricultural Sciences*. 2015;43(9):23–29. doi: CNKI:SUN:GATE.0.2015-09-006
10. Smýkal P. Legume crops phylogeny and genetic diversity for science and breeding. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2015;34(1-3):43–104. doi: 10.1080/07352689.2014.897904
11. Dzyubenko N. Clusterbeans *Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.-properties, use, plant genetic resources and expected introduction in Russia. *Agricultural Biology*. 2017;52(6):1116–1128. doi: 10.15389/agrobiol.2017.6.1116eng
12. Barros J.R.A. Optimal temperature for germination and seedling development in cowpea seeds. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 2020;14(2):231–239. doi: 10.17584/rcch.2020v14i2.10339
13. Wang X. Studies on Stomatal Characters and Leaf Temperature Gap of Different Maize Genotypes. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2004;19(1):71–74. doi: 10.3321/j.issn:1000-7091.2004.01.020

14. Liu W. Variation in leaf traits at different altitudes reflects the adaptive strategy of plants to environmental changes. *Ecology and Evolution*. 2020;10(15):8166–8175. doi: 10.1002/ece3.6519
15. Hetherington A.M., Woodward F.I. The role of stomata in sensing and driving environmental change. *Nature*. 2003;424(6951):901–908. doi: 10.1038/nature01843
16. Liu C. Variation of stomatal traits from cold temperate to tropical forests and association with water use efficiency. *Functional Ecology*. 2018;32(1):20–28. doi: 10.1111/1365-2435.12973
17. Koryagina N.V., Koryagin Yu.V. *Botanika = Botany*. Moscow: NITsINFRA-M, 2018:351. (In Russ.)
18. Zhu J. Rapid estimation of stomatal density and stomatal area of plant leaves based on object-oriented classification and its ecological trade-off strategy analysis. *Forests*. 2018;9(10):616. doi: 0.3390/f9100616
19. Chen S.-q. Pollen Grain Germination and Pollen Tube Growth in Pistil of Rice. *Rice Science*. 2008;15(2):125–130. doi: 10.1016/s1672-6308(08)60030-x
20. Fotev Yu.V. Evaluation of cold resistance of *Momordica charantia* L.) by pollen germination at low temperature in vitro. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i seleksii = Works on applied botany, genetics and selection*. 2022;(183):39–47. (In Russ.). doi: 10.30901/2227-8834-2022-3-39-47

Информация об авторах / Information about the authors

Цзяпин Сунь

аспирант,
Новосибирский государственный
университет
(Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1)
E-mail: t.sunl@g.nsu.ru

Jiaping Sun

Postgraduate student,
Novosibirsk State University
(1 Pirogova street, Novosibirsk, Russia)

Юрий Валентинович Фотев

кандидат сельскохозяйственных наук,
старший научный сотрудник,
Центральный Сибирский
ботанический сад СО РАН
(Россия, г. Новосибирск,
ул. Золотодолинская, 101);
доцент кафедры растениеводства
и кормопроизводства,
Новосибирский государственный
аграрный университет
(Россия, г. Новосибирск,
ул. Добролюбова, 160)
E-mail: fotev_2009@mail.ru

Yury V. Fotev

Candidate of agricultural sciences,
senior researcher,
Central Siberian Botanic Garden SB RAS
(101 Zolotodolinskaya street,
Novosibirsk, Russia);
associate professor of the sub-department
of plant growing and fodder production,
Novosibirsk State Agrarian University
(160 Dobrolubova street,
Novosibirsk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 17.04.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 19.05.2025

Принята к публикации / Accepted 26.05.2025