

УДК 635.654.3 638.138.1 581.162.41 574.24
doi: 10.21685/2307-9150-2025-1-6

Оценка жизнеспособности *in vitro* и морфологии пыльцы образцов 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.* Вигна – новая для России овощная культура с высокой теплолюбивостью, препятствующей расширению области ее выращивания в регионах с континентальным климатом. На основе выбора оптимальной концентрации осмотически активного вещества (сахароза, ПЭГ 6000) оценена связь прорастания пыльцы образцов вигны *in vitro* при оптимальной (25 °C) и низкой (6 °C) температурах с ее морфометрическими показателями. *Материалы и методы.* Исследованы морфометрические особенности и реакция микрогаметофитов восьми образцов вигны (*Vigna unguiculata*) на низкую температуру *in vitro*. Оптимальную концентрацию осмотически активного вещества (сахароза, ПЭГ 6000) определяли при разной ее концентрации в среде (10, 20, 30 %). Для морфометрии пыльцевых зерен (п.з.) использовали электронный микроскоп Hitachi TM 4000 plus. *Результаты.* По критерию минимального варьирования прорастания пыльцы в растворах сахарозы и ПЭГ 6000 (53 % против 60–147 %) при достаточно высоком ее показателе прорастания для большинства образцов (6,2–27,4 %) наилучший результат показал ПЭГ 6000 при 20 % концентрации с добавлением борной кислоты (0,006 %). По холодостойкости пыльцы *in vitro* при температуре 6 °C выделялась пыльца образцов к-36 и Красная поздняя с показателем 52,0 и 53,5 % соответственно, тогда как пыльца сорта Юньнаньская при этих условиях не прорастала. Пыльца пяти сортов вигны трехлопастная, крупная, почти округлая в проекции полярной оси и округлая в экваториальной плоскости. Поверхность эскины с многочисленными бороздками, текстура поверхности крупносетчатая. Длина полярной оси п.з. 63,0–76,5 мкм, экваториальный диаметр 57,2–63 мкм и существенно различаются у разных образцов сортов вигны. Самую крупную пыльцу имел сорт Юньнаньская (76,5×65,2 мкм), а сравнительно небольшого размера – Графиня (63,0×57,2 мкм). *Выводы.* Оптимальной средой для прорастания пыльцы была среда с 20 % ПЭГ 6000 + 0,006 % борной кислоты. В экспериментах по прорастанию пыльцы при температуре 25 и 6 °C, холодостойкость отрицательно коррелировала с длиной полярной оси ($r = -0,603 \dots -0,683$) и экваториальным диаметром ($r = -0,375 \dots -0,549$).

Ключевые слова: вигна, *Vigna unguiculata*, пыльца, прорастание *in vitro*, сахароза, ПЭГ 6000, холодостойкость, морфология

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

Для цитирования: Сунь Ц., Фотев Ю. В. Оценка жизнеспособности *in vitro* и морфологии пыльцы образцов вигны (*Vigna unguiculata*) при интродукции на юге Западной Сибири // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2025. № 1. С. 65–77. doi: 10.21685/2307-9150-2025-1-6

Evaluation of in vitro viability and pollen morphology of asparagus vigna (*Vigna unguiculata*) accessions 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.* Vigna is a new for Russia vegetable crop with high heat requirements, which prevents the expansion of its cultivation in regions with a continental climate. Based on the selection of the optimal concentration of the osmotically active substance (sucrose, PEG 6000), the relationship between pollen germination of vigna accessions in vitro at optimal (25°) and low (6°) temperatures and its morphometric parameters was assessed. *Materials and methods.* The morphometric features and response of microgametophytes of 8 *Vigna unguiculata* accessions to low temperature in vitro were studied. The optimal concentration of the osmotically active substance (sucrose, PEG 6000) was determined at different concentrations in the medium (10, 20, 30 %). A Hitachi TM 4000 plus SEM was used for pollen grain morphometry. *Results.* According to the criterion of minimal variation of pollen germination in sucrose and PEG 6000 solutions (53 % versus 60–147 %) with a fairly high germination rate for most accessions (6.2–27.4 %), the best result was shown by PEG 6000 at a 20 % concentration with the addition of boric acid (0.006 %). According to the cold resistance of pollen in vitro at a temperature of 6°, pollen of k-36 and Krasnaya pozdnyaya accessions stood out with an indicator of 52.0 and 53.5 %, respectively, whereas pollen of the cv. Yunnanskaya did not germinate under these conditions. Pollen of five vigna cvs. is three-lobed, large, almost round in the projection of the polar axis and round in the equatorial plane. The surface of the exine has numerous grooves, the surface texture is coarsely meshed. The length of the p.z. polar axis 63.0–76.5 µm, the equatorial diameter is 57.2–66.3 µm and varies significantly among different vigna accessions. The largest pollen was found in the cv. Yunnanskaya (76.5×65.2 µm), while the cv. Grafinya had a comparatively small pollen (63.0×57.2 µm). *Conclusions.* The optimal medium for pollen germination was a medium with 20 % PEG 6000 + 0.006 % boric acid. In pollen germination experiments at 25° and 6°, cold resistance negatively correlated with the polar axis length ($r = -0.603 - -0.683$) and the equatorial diameter ($r = -0.375 - -0.549$).

Keywords: asparagus vigna, *Vigna unguiculata*, pollen, in vitro germination, sucrose, PEG 6000, cold resistance, morphology

Financing: the research was financed by the Central Siberian Botanical Garden SB RAS project No. AAAA-A21-121011290027-6.

For citation: Sun J., Fotev Yu.V. Evaluation of in vitro viability and pollen morphology of asparagus vigna (*Vigna unguiculata*) accessions during introduction in the south of Western Siberia. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences.* 2025;(1):65–77. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-9150-2025-1-6

Введение

Вигна (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) – важная овощная и зернобобовая культура африканского происхождения, принадлежит к роду *Vigna* Sav. семейства Fabaceae Lindl. [1]. Ее ежегодная площадь посевов в мире, преимуще-

ственно в качестве зернобобовой культуры, составляет около 15 млн га, а общий объем производства – около 8,9 млн т. Это основная продовольственная культура для жителей развивающихся стран к югу от африканской Сахары, в Южной Америке и в некоторых странах Азии [2]. Среди десяти крупнейших овощных культур Азии ежегодная площадь посевов вигны в КНР составляет около 500 000 га, что составляет 1/5 общей площади мира [3]. Нежные плоды вигны богаты белком с высоким содержанием лизина, микроэлементов Zn, Fe, Mo [4]. Вигна устойчива к засухе, растет на малоплодородных почвах и обладает высокой способностью к адаптации в разных условиях окружающей среды. Тем не менее южное происхождение культуры определило ее высокую теплотребовательность на всех этапах роста и развития. Так, ее семена при прорастании требуют температуру от 30 до 35 °C [5]. Именно температурный фактор является одним из основных, ограничивающих выращивание вигны в регионах с резко-континентальным климатом. При отборе более холодостойких форм, например томата и момордики *Momordica charantia* L., среди наиболее эффективных методов оказался метод оценки ростовой реакции пыльцы на искусственной среде *in vitro* при температуре 6–10 °C [6–8]. Есть данные о связи между холодостойкостью в гапло- и диплофазах жизненного цикла растений. Так, в межвидовой гибридной популяции F_2 (*L. esculentum* «Пионерский» × *L. pimpinellifolium* «Red Currant») обнаружили положительную взаимосвязь между холодостойкостью пыльцы и интенсивностью гуттации проростков при низкой температуре ($r = 0,697$) [6]. Для проращивания пыльцы томата *in vitro* в качестве осмотически активного вещества вместо сахарозы ранее было предложено использовать полиэтиленгликоль с молекулярной массой 6000 [6], не участвующий в процессах метаболизма растительных клеток [9].

Основанием для оценки низкотемпературной устойчивости в гаплофазе служат полученные разными авторами данные об экспрессии части генов спорофитного поколения в фазе зрелого мужского гаметофита [10]. Примерно 60 % структурных генов, которые экспрессируются в спорофитной части растений, также экспрессируются и подвергаются отбору в пыльце [11]. Например, в пыльце *Arabidopsis* более 40 % экспрессируемых генов, возможно, участвуют в развитии пыльцы и росте пыльцевой трубки при низкой температуре, включая гены, кодирующие ферменты модификации клеточной стенки [12].

Известно, что морфология пыльцы вместе с молекулярными подходами эффективно использовалась для идентификации образцов вигны и таксономии подрода *Ceratotropis* [13]. Тем не менее констатировано, что морфологические исследования пыльцы в роде *Vigna* Savy недостаточны [14].

Вигна – относительно новая для России теплолюбивая овощная культура. Хотя в 30–50-е гг. XX в. в СССР проводилась большая работа по ее интродукции и селекции [15, 16], сортов, пригодных для выращивания в регионах с холодным климатом, не было получено. В 2006 г. Центральный Сибирский ботанический сад СО РАН (ЦСБС СО РАН) впервые в России зарегистрировал в Госсорткомиссии РФ два сорта этой культуры – Сибирский размер и Юньнаньская – для выращивания в 12 регионах страны [17]. Одним из важных выводов, полученных на основе первых результатов выращивания вигны в нашей стране, стал вывод об агробиологических особенностях этой культуры, ограничивающих расширение ее производства во многих регионах. Это слабая устойчивость к низким температурам и восприимчивость к отдельным возбудителям болезней.

Жизнеспособность пыльцы является одним из важных показателей, отражающих ее фертильность (плодовитость). Из исходного материала родительские формы могут быть выбраны на основе жизнеспособности пыльцы, что дает информацию для отбора родительских форм и создания гибридов.

Изучение морфологии пыльцы очень важно для понимания систематики, филогении и палеоботанической истории растений [18]. Определение меж- и внутривидовых взаимоотношений у растений опирается в значительной мере на изучение морфологии пыльцы, которая влияет на процессы опыления, оплодотворения и окончательного развития плодов. Идентификация и дифференциация таксонов растений, классификация близкородственных и неизвестных таксонов также опираются на морфологические данные пыльцы [19]. Размер, форма пыльцы, структура экзины являются одними из основных морфологических и структурных характеристик для идентификации видов растений [20]. Среди различных инструментов изучения морфологии пыльцы использование сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) является наиболее широко используемым инструментарием для изучения морфологии пыльцы, в том числе в целях классификации и идентификации видов или сортов [21]. Размер пыльцы – важная характеристика, влияющая на результат опыления растений. Растения с более крупной пылью имеют ряд преимуществ по сравнению с растениями с более мелкой пылью, например, более быстрое прорастание и более высокая жизнеспособность благодаря большим запасам энергии [22]. Размер пылевых зерен влияет на их способность прорасти и участвовать в сингамии [23]. Размер пыльцы положительно коррелирует с длиной пестика, длиной столбика и ростом пылевой трубки, влияет на привлекательность цветков для опылителей [24]. Путем наблюдения за морфологией пыльцы вигны с помощью СЭМ Айдж с соавторами обнаружили положительную и значимую корреляцию между длиной пылевой трубки и прорастанием пыльцы [25]. Цзян с соавторами наблюдали за морфологией пыльцы вигны под СЭМ и обнаружили, что стенка пыльцы вигны утолщается, а длина пылевой трубки уменьшается в условиях абиотического стресса [26]. В целом пылевой анализ позволяет определить репродуктивный потенциал растений [27]. Для более эффективного отбора и использования ресурсов зародышевой плазмы целесообразно в качестве объектов исследования использовать пыльцу разных образцов вигны, предварительно выбрав оптимальную концентрацию из двух осмотически активных веществ – сахарозы и ПЭГ 6000.

Цель исследования – на основе выбора оптимальной концентрации осмотически активного вещества (сахароза, ПЭГ 6000) оценить связь прорастания пыльцы образцов *V. unguiculata* in vitro при оптимальной и низкой температурах с ее морфометрическими показателями.

Материалы и методы

Исследования проведены в лаборатории интродукции пищевых растений Центрального сибирского ботанического сада СО РАН (ЦСБС СО РАН). В качестве материала для исследований была использована пыльца восьми образцов зародышевой плазмы вигны, включая сорта (cv.): cv. Сибирский размер, cv. Юньнаньская, cv. Графиня, Красная поздняя, к-802, к-36, Красно-пестрая и Zinder из 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. Растения, использовавшиеся в качестве источника пыльцы, выращивали в необогреваемой пленочной теплице ЦСБС СО РАН (54°82' в.д., 83°12' с.ш.).

Пыльцу вигны из цветков собирали в 10:00 утра и помещали в каплю среды на предметном стекле в закрытой чашке Петри, на дне которой была смоченная водой фильтровальная бумага. В ходе опыта использовали различные массовые концентрации (10, 20, 30 %) сахарозы и ПЭГ 6000 для выявления наиболее подходящего осмотического компонента сред. В каждый вариант среды на основе дистиллированной воды добавляли борную кислоту в концентрации 0,006 %. В результате по критерию минимального варьирования прорастания пыльцы (коэффициент вариации – C_v , %) при достаточно высоком показателе прорастания (жизнеспособности) отбирали лучший вариант для последующей оценки ее прорастания при оптимальной (25 °C в течение 3 ч) и низкой (6 °C в течение 24 ч) температуре. После завершения культивирования пыльцу в капле среды просматривали под микроскопом Carl Zeiss Primo Star (Германия) при увеличении $\times 100$. Прорастание определяли при длине пыльцевой трубки, превышающей 1/2 диаметра пыльцевого зерна [21]. Каждую обработку повторяли трижды, случайным образом учитывали три поля зрения. В каждом поле зрения находилось не менее 50 пыльцевых зерен для расчета среднего показателя прорастания и холодостойкости. Расчет показателя прорастания (жизнеспособности) пыльцы и холодостойкости проведен по формулам (1) и (2):

$$\text{Жизнеспособность (\%)} = \left(\frac{\text{Количество проросшей пыльцы}}{\text{Общее количество пыльцы}} \right) \times 100; \quad (1)$$

$$\text{Холодостойкость (\%)} = \left(\frac{\text{Скорость прорастания пыльцы при 6 °C}}{\text{Скорость прорастания пыльцы при 25 °C}} \right) \times 100. \quad (2)$$

Морфологию пыльцевых зерен исследовали при использовании сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM4000 plus (Япония), находящегося в ЦКП ЦСБС СО РАН. Морфологическое описание пыльцевых зерен проводили в соответствии с опубликованной методикой [28]. Из каждого образца случайным образом отбирали шесть пыльцевых зерен, фотографировали, измеряли и записывали их размеры в полярной и экваториальной плоскости, обращая внимание на морфологию экзины.

Для статистической обработки данных использовали стандартные методы обработки с помощью пакетов программ SPSS 25.0 и Minitab 4.0.

Результаты и обсуждение

Влияние различных концентраций сахарозы и ПЭГ на прорастание пыльцы

Сорта вигны показали значительные изменения в скорости прорастания пыльцы при использовании различных тестируемых сред (табл. 1). В 10–30%-м растворе сахарозы жизнеспособность пыльцы пяти образцов вигны составила 0,4–5,2 %. В 10–30%-м растворе ПЭГ 6000 этот же показатель был 16,4–21,9 %. В целом пыльца вигны лучше прорастала на растворе ПЭГ 6000, по сравнению с раствором сахарозы.

Таблица 1

Скорость прорастания пыльцы на средах
с различной концентрацией сахарозы и ПЭГ 6000

Концентрация осмотически активного вещества	Тип пыльцы					Cv, %
	Сибирский размер	Юньнаньская	Графиня	Красно-пестрая	Zinder	
10 % раствор сахарозы	$0,0 \pm 0,0^{d*}$	$1,0 \pm 0,6^c$	$0,0 \pm 0,0^d$	$0,8 \pm 0,8^c$	$0,0 \pm 0,0^c$	138
20 % раствор сахарозы	$3,9 \pm 2,5^d$	$8,2 \pm 0,7^b$	$0,0 \pm 0,0^d$	$0,5 \pm 0,3^c$	$0,0 \pm 0,0^c$	142
30 % раствор сахарозы	$17,8 \pm 0,4^c$	$7,4 \pm 0,8^b$	$0,0 \pm 0,0^d$	$0,9 \pm 0,9^c$	$0,0 \pm 0,0^c$	147
10 % раствор ПЭГ 6000	$16,4 \pm 0,8^c$	$41,3 \pm 0,7^a$	$15,4 \pm 0,9^c$	$0,0 \pm 0,0^c$	$8,8 \pm 1,0^b$	94
20 % раствор ПЭГ 6000	$27,4 \pm 0,6^b$	$6,2 \pm 2,2^b$	$24,1 \pm 1,1^b$	$13,3 \pm 0,9^b$	$12,0 \pm 0,6^a$	53
30 % раствор ПЭГ 6000	$32,0 \pm 1,0^a$	$3,0 \pm 2,2^c$	$33,7 \pm 2,1^a$	$27,9 \pm 3,3^a$	$12,7 \pm 1,2^a$	60
Cv, %	77	133	119	157	112	

* Одинаковые буквы при значениях указывают на отсутствие различий между ними при 0,05 % уровне значимости.

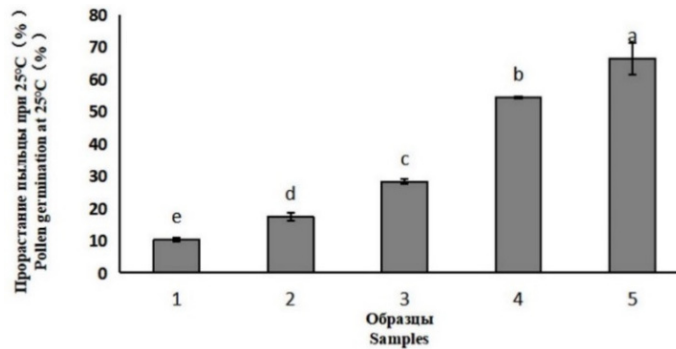
Среди различных растворов ПЭГ 6000 средний показатель прорастания пыльцы в 30%-м растворе ПЭГ 6000 был самым высоким (21,9 %), за ним следовали 20%-й раствор (16,6 %) и 10%-й раствор ПЭГ 6000 (16,4 %). В 30%-м растворе ПЭГ 6000 жизнеспособность пыльцы четырех образцов из пяти (Графиня (33,7 %), Сибирский размер (32,0 %), Красно-пестрая (27,9 %) и Zinder (12,7 %)) достигла максимального значения. Однако для сорта Юньнаньская прорастание пыльцы было наилучшим в 10%-м растворе ПЭГ 6000. При концентрациях ПЭГ 6000 20 и 30%-я всхожесть этого сорта снижалась, соответственно, в 7–14 раз. Причина может быть связана с генетическими различиями между образцами. В 20%-м растворе ПЭГ 6000 средний показатель прорастания был несколько ниже, чем в 30%-м растворе ПЭГ 6000, но при этом наблюдалась минимальная изменчивость его по разным образцам вигны – 53 % против 60 %.

Изменчивость (Cv, %) показателя прорастания пыльцы образцов вигны в растворах разных осмотиков (сахароза, ПЭГ 6000) располагалась в порядке от низкой к высокой: cv. Сибирский размер (77), Zinder (112), cv. Графиня (119), cv. Юньнаньская (133), Красно-пестрая (157). Всхожесть пыльцы сорта Сибирский размер в условиях осмотического стресса относительно стабильна и степень изменчивости минимальна, тогда как всхожесть коллекционного образца Красно-пестрая нестабильна и степень изменчивости значительна. В силу имеющихся данных о связи устойчивости к стрессу и энергетического гомеостаза [29], возможно, сорт Сибирский размер можно рассматривать в качестве генетического источника с высокой адаптивной способностью по этому признаку в гаплофазе.

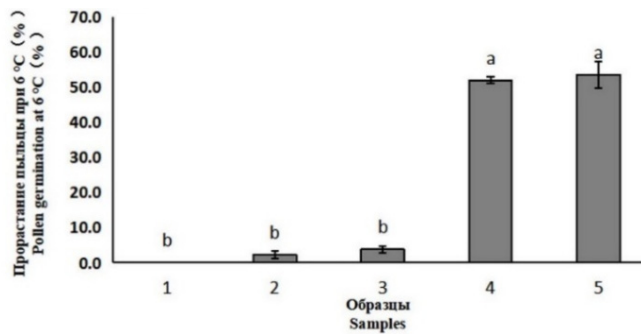
Таким образом, ПЭГ 6000 в концентрации 20 % оказался оптимальным вариантом осмотически активного вещества для прорастания пыльцы образцов вигны *in vitro*.

Влияние низкой температуры на жизнеспособность пыльцы

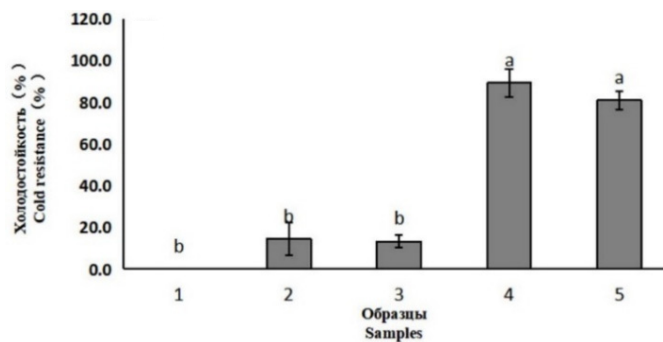
В дальнейшем, на варианте с ПЭГ 6000 20 % было оценено прорастание пыльцы образцов вигны при оптимальной (25 °C) и низкой (6 °C) температуре (рис. 1). При температуре 25 °C наблюдались существенные различия в жизнеспособности пыльцы изучаемых образцов вигны. Наибольший показатель имел образец Красная поздняя (66,46 %), за ней следовал к-36 (54,36 %), к-802 (28,24 %), св. Графиня (17,37 %) и св. Юньнаньская (10,24 %).



a)



б)



в)

Рис. 1. Жизнеспособность и холодостойкость пыльцы разных сортов вигны:
 а – при температуре 25 °C (контроль); б – при низкой температуре (6 °C);
 в – холодостойкость. Образцы: 1 – св. Юньнаньская; 2 – св. Графиня;
 3 – к-802; 4 – к-36; 5 – Красная поздняя. Одинаковые буквы
 при значениях указывают на отсутствие различий между ними ($p > 0,05$)

При температуре 6 °С пыльца сорта Юньнаньская не прорастала, а жизнеспособность пыльцы четырех других образцов (св. Графиня, к-802, к-36 и Красная поздняя) была ниже, чем у контроля (25 °С), на 87, 87, 4 и 20 % соответственно. Холодостойкость каждого сорта в порядке убывания составила: к-36 (89,2 %) – Красная поздняя (80,9 %) – св. Графиня (14 %) – к-802 (13,3 %) – св. Юньнаньская (0 %) (рис. 1, в). Таким образом, пыльцу первых двух образцов с высокой холодостойкостью при прорастании пыльцы *in vitro* можно рассматривать в качестве исходного материала для селекции на холодостойкость.

Морфологическая характеристика пыльцевых зерен вигны

Для исследования морфометрических и морфологических различий пыльцы пяти образцов вигны при использовании сканирующего электронного микроскопа (SEM) было обнаружено, что все пыльцевые зерна представляли собой одиночные пыльцевые зерна одинаковой формы (рис. 2).

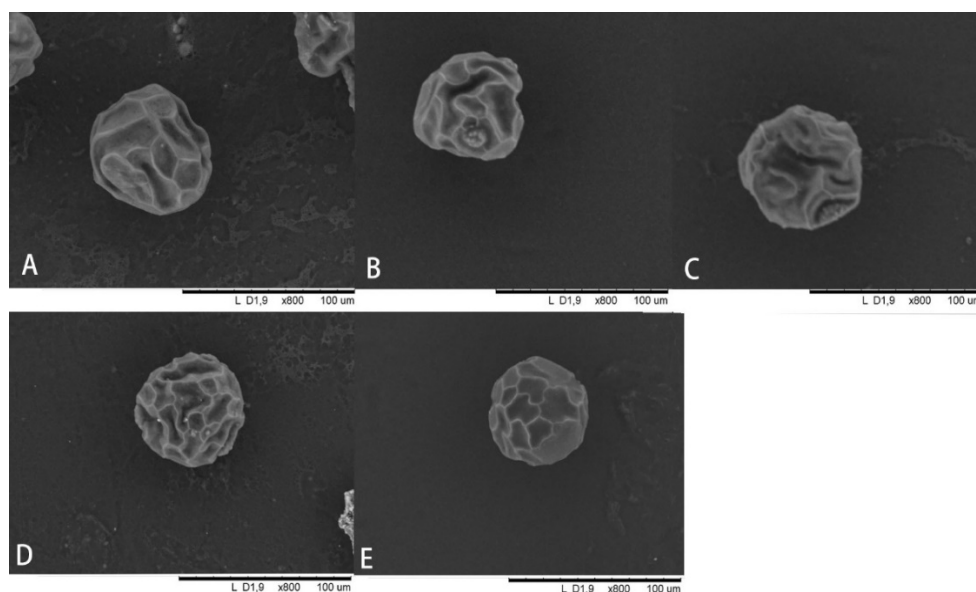


Рис. 2. Морфология пыльцы вигны, исследованная с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM4000 plus:

A – Юньнаньская; *B* – Графиня; *C* – к-802; *D* – к-36; *E* – Красная поздняя

Пыльцевые зерна образцов были крупными (*dimension magna*), имели почти сферическую форму и были радиально-симметричными. Поверхность экины с многочисленными бороздками, текстура поверхности сетчатая. По размеру пыльцевых зерен (как известно, размер пыльцы обычно выражается длиной полярной оси пыльцы), имеются существенные различия между св. Юньнаньская, к-802 и другими образцами вигны. Среди исследованных образцов наибольший размер отмечен у пыльцевых зерен св. Юньнаньская ($76,5 \pm 5,8$), а наименьший – у св. Графиня ($63,0 \pm 1,2$) (табл. 2).

Таблица 2

Морфологическая характеристика пыльцевых зерен вигны

Образцы	Длина полярной оси, μm (PD)	Длина экваториальной оси, μm (ED)	PD/ED	Форма	Структура экины
cv. Юньнаньская	$76,5 \pm 5,8^{a*}$	$65,2 \pm 4,2^{a,b}$	$1,2 \pm 0,0^a$	Почти округлая	Крупно-сетчатая
cv. Графиня	$63,0 \pm 1,2^b$	$57,2 \pm 0,9^b$	$1,1 \pm 0,0^a$	Почти округлая	Крупно-сетчатая
к-802	$71,9 \pm 0,7^a$	$66,3 \pm 2,4^a$	$1,1 \pm 0,0^a$	Почти округлая	Крупно-сетчатая
к-36	$63,3 \pm 2,0^b$	$58,0 \pm 2,1^{a,b}$	$1,1 \pm 0,0^a$	Почти округлая	Крупно-сетчатая
Красная поздняя	$64,3 \pm 1,5^b$	$60,4 \pm 1,1^{a,b}$	$1,1 \pm 0,0^a$	Почти округлая	Крупно-сетчатая

* Одинаковые буквы при значениях указывают на отсутствие различий между ними ($p > 0,05$).

Результаты корреляционного анализа

При температуре 25 °С установлена отрицательная корреляция между жизнеспособностью пыльцы и длиной полярной оси ($r = -0,603$), между жизнеспособностью пыльцы и длиной экваториальной оси ($r = -0,375$) (табл. 3). Установлена отрицательная корреляция с 0,05 % уровнем значимости между жизнеспособностью пыльцы при 25 °С и коэффициентом вариации этого показателя ($r = -0,924$); также достоверная отрицательная корреляция между показателем прорастания пыльцы при 6 °С и коэффициентом вариации этого показателя ($r = -0,693$). Вероятно, в данном случае причиной такой устойчивой связи могут быть механизмы поддержания клеточного гомеостаза в гаплофазе.

Установлена отрицательная корреляционная связь средней силы между прорастанием пыльцы при низкой температуре (6 °С) и длиной полярной ($r = -0,612$), а также экваториальной ($r = -0,481$) осей.

Таблица 3

Корреляционная связь между показателями прорастания пыльцы, длиной экваториальной и полярной оси в условиях оптимальной (25 °С) и низкой (6 °С) температуры

Показатели прорастания (ПП) пыльцы, %	Длина полярной оси	Длина экваториальной оси	Коэффициент вариации прорастания пыльцы
ПП при 25 °С	-0,603	-0,375	-0,924*
ПП при 6 °С	-0,612	-0,481	-0,693
Холодостойкость	-0,683	-0,549	-0,254

* Корреляция достоверна ($p \leq 0,05$).

Заключение

Оптимальной средой для прорастания пыльцы *V. unguiculata* была среда с 20 % ПЭГ 6000 + 0,006 % борной кислоты. Растворы ПЭГ 6000 с концентрациями 10 и 30 % способствуют прорастанию пыльцы вигны и более

эффективно увеличивает скорость прорастания пыльцы образцов вигны по сравнению с растворами сахарозы в концентрации 10, 20 и 30 %.

При сравнении образцов вигны установлены существенные различия в размере пыльцы у cv. Юньнаньская и к-802. Наибольший размер отмечен у пыльцевых зерен сорта Юньнаньская ($76,5 \pm 5,8$), а наименьший – у сорта Графиня ($63,0 \pm 1,2$). Пыльца всех образцов почти сферической формы, трехлопастная, поверхность экзины крупносетчатая, с многочисленными бороздками, длина полярной оси пыльцевых зерен составляет 63,0–76,5 мкм, длина экваториальной оси 57,2–66,3 мкм, отношение PD/ED – 1,1–1,2.

Установлена отрицательная корреляция между длиной полярной оси и показателем прорастания пыльцы при 25 °C ($r = -0,603$), при 6 °C ($r = -0,612$), холодостойкостью пыльцы ($r = -0,683$).

Список литературы

1. Herniter I. A., Close T. J. Genetic, textual, and archeological evidence of the historical global spread of cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.) // Legume Science. 2020. Vol. 2, № 4. P. e57. doi: 10.1002/leg3.57
2. Nielsen S. S., Brandt W. E., Singh B. B. Genetic Variability for Nutritional Composition and Cooking Time of Improved Cowpea Lines // Crop Science. 1993. Vol. 33, № 3. P. 469–472. doi: 10.2135/cropsci1993.0011183x003300030010x
3. Wu j. [et al.]. Genome-wide association analysis of rust resistance in cowpea // Journal of Plant Genetic Resources. 2024. Vol. 25, №11. P. 1907–1922. doi: 10.13430/j.cnki.jpgr.20240217002
4. Фотев Ю. В., Пивоваров В. Ф., Артемьева А. М. Концепция создания Российской национальной системы функциональных продуктов питания // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018. Т. 22, № 7. С. 776–783. doi: 10.18699/VJ18.421
5. Melo N. F. [et al.]. Optimal temperature for germination and seedling development of cowpea seeds // Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. 2020. Vol. 14, № 2. P. 231–239. doi: 10.17584/rcch.2020v14i2.10339
6. Фотев Ю. В. Исходный материал для селекции томата с устойчивостью к стрессовым температурам и болезням // Методические указания по гаметной селекции растений (методология, результаты и перспективы). М. : ГНУ ВНИИССОК, 2001. С. 224–238.
7. Лукьянчик И. Д., Ломакова О. О. Методы гаметной селекции для оценки холодостойкости некоторых сортов томатов // Клеточная биология и биотехнология растений : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. М., 2013. С. 100.
8. Fotev Y. V. Assessment of cold resistance in *Momordica charantia* L. accessions according to pollen germination at low temperatures in vitro // Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2022. Vol. 183, № 3. P. 39–47. doi: 10.30901/2227-8834-2022-3-39-47
9. Steuter A. A., Mozafar A., Goodin J. R. Water potential of aqueous polyethylene glycol // Plant physiology. 1981. Vol. 67, № 1. P. 64–67. doi: 10.30901/2227-8834-2022-3-39-47
10. Somers J., Nelms B. The sporophyte-to-gametophyte transition: The haploid generation comes of age // Current Opinion in Plant Biology. 2023. Vol. 75, P. 102416. doi: 10.1016/j.pbi.2023.102416
11. Mulcahy D. L., Sari-Gorla M., Mulcahy G. B. Pollen selection – past, present and future // Sexual Plant Reproduction. 1996. Vol. 9. P. 353–356. doi: 10.1007/BF02441955
12. Lee J. Y., Lee D. H. Use of serial analysis of gene expression technology to reveal changes in gene expression in Arabidopsis pollen undergoing cold stress // Plant Physiology. 2003. Vol. 132, № 2. P. 517–529. doi: 10.1104/pp.103.020511

13. Maréchal R. Etude taxonomique d'un groupe complexe d'espèces des genres *Phaseolus* et *Vigna* (Papilionaceae) sur la base de données morphologiques et polliniques, traitées par l'analyse informatique // Boissiera. 1978. Vol. 28, P. 1–273. doi: 10.1080/00837792.1984.10670306
14. Umdale S. D., Aitawade M. M., Gaikwad N. [et al.]. Pollen morphology of Asian *Vigna* species (genus *Vigna*; subgenus *Ceratotropis*) from India and its taxonomic implications // Turkish Journal of Botany. 2017. Vol. 41, № 1. P. 75–87. doi: 10.3906/bot-1603-31
15. Павлова А. М. Вигна // Культурная флора СССР. Зерновые бобовые. М. : Государственное издательство совхозной и колхозной литературы, 1937. Т. IV. С. 621–646.
16. Павлова А. М. Вигна – сестра фасоли // Зернобобовые культуры. 1964. Т. 1. С. 16–18.
17. Вишнякова М. А. Видовое разнообразие коллекции генетических ресурсов зернобобовых ВИР и его использование в отечественной селекции (обзор) // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2019. Т. 180, № 2. С. 109–123. doi: 10.30901/2227-8834-2019-2-109-123
18. Mog B., Veena G. L., Adiga J. D. [et al.]. Pollen morphological study and temperature effect on the pollen germination of cashew (*Anacardium occidentale* L.) varieties // Scientia Horticulturae. 2023. Vol. 314. P. 111957. doi: 10.1016/j.scienta.2023.111957
19. Dong R. [et al.]. Scanning electron microscopy observations of pollen morphology in common vetch (*Vicia sativa*) subspecies // The Journal of Agricultural Science. 2020. Vol. 158, № 8-9. P. 646–659. doi: 10.1017/S0021859620001033
20. Bahadur S. [et al.]. Identification of monocot flora using pollen features through scanning electron microscopy // Microscopy Research Technique. 2018. Vol. 81, № 6. P. 599–613. doi: 10.1002/jemt.23015
21. Khaleghi E., Karamnezhad F., Moallemi N. Study of pollen morphology and salinity effect on the pollen grains of four olive (*Olea europaea*) cultivars // South African Journal of Botany. 2019. Vol. 127. P. 51–57. doi: 10.1016/j.sajb.2019.08.031
22. Callum B., Chang S. M. Pollen competition in style: Effects of pollen size on siring success in the hermaphroditic common morning glory, *Ipomoea purpurea* // American Journal of Botany. 2016. Vol. 103, № 3. P. 460–470. doi: 10.3732/ajb.1500211
23. Колясников Н. Л. Роль репродуктивной биологии в решении проблемы повышения семенной продуктивности кормовых бобовых трав // Пермский аграрный вестник. 2015. Т. 4, № 12. С. 60–64. doi: 633.32:631.559
24. Mazer S. J. [et al.]. Winning in style: Longer styles receive more pollen, but style length does not affect pollen attrition in wild *Clarkia* populations // American Journal of Botany. 2016. Vol. 103, № 3. P. 408–422. doi: 10.3732/ajb.1500192
25. Khanna V. K. Studies on hybridization and genetic diversity in cowpea (*Vigna unguiculata* L.) // Open Access Journal of Oncology and Medicine. 2018. Vol. 2, № 1. P. 1–10. doi: 10.32474/OAJOM.2018.02.000132
26. Jiang Y. [et al.]. Seed set, pollen morphology and pollen surface composition response to heat stress in field pea // Plant, cell & environment. 2015. Vol. 38, № 11. P. 2387–2397. doi: 10.1111/pce.12589
27. Цаценко Л. В., Синельникова А. С. Пыльцевой анализ в селекции растений // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 77. С. 38–48. doi: 57.088.1:581.331.2:633/ 635(076)
28. Куприянова А. Б., Алешина Л. А. Пыльца и споры растений флоры Европейской части СССР : руководство. Л. : Наука, 1972. 171 с.
29. Halbritter H., Ulrich S., Grímsson F. Illustrated Pollen Terminology. Cham : Springer, 2018. 483 p.

References

1. Herniter I.A., Close T.J. Genetic, textual, and archeological evidence of the historical global spread of cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.). *Legume Science*. 2020;2(4): e57. doi: 10.1002/leg3.57
2. Nielsen S.S., Brandt W.E., Singh B.B. Genetic Variability for Nutritional Composition and Cooking Time of Improved Cowpea Lines. *Crop Science*. 1993;33(3):469–472. doi: 10.2135/cropsci1993.0011183x003300030010x

3. Wu J. et al. Genome-wide association analysis of rust resistance in cowpea. *Journal of Plant Genetic Resources*. 2024;25(11):1907–1922. doi: 10.13430/j.cnki.jpgr.20240217002
4. Fotev Yu.V., Pivovarov V.F., Artem'eva A.M. The concept of creating a Russian national system of functional food products. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i selektsii* = Vavilov journal of genetics and selection. 2018;22(7):776–783. (In Russ.). doi: 10.18699/VJ18.421
5. Melo N.F. et al. Optimal temperature for germination and seedling development of cowpea seeds. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 2020;14(2):231–239. doi: 10.17584/rcch.2020v14i2.10339
6. Fotev Yu.V. Source material for breeding tomato with resistance to stress temperatures and diseases. *Metodicheskie ukazaniya po gametnoy selektsii rasteniy (metodologiya, rezul'taty i perspektivy)* = Guidelines for gamete selection of plants (methodology, results and prospects). Moscow: GNU VNISSOK, 2001:224–238.
7. Luk'yanchik I.D., Lomakova O.O. Gamete selection methods for assessing cold resistance of some tomato varieties. *Kletochnaya biologiya i biotekhnologiya rasteniy: sb. nauch. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* = Cell biology and plant biotechnology: proceedings of the International scientific and practical conference. Moscow, 2013:100. (In Russ.)
8. Fotev Y.V. Assessment of cold resistance in *Momordica charantia* L. accessions according to pollen germination at low temperatures in vitro. *Proceedings on applied botany, genetics and breeding*. 2022;183(3):39–47. doi: 10.30901/2227-8834-2022-3-39-47
9. Steuter A.A., Mozafar A., Goodin J.R. Water potential of aqueous polyethylene glycol. *Plant physiology*. 1981;67(1):64–67. doi: 10.30901/2227-8834-2022-3-39-47
10. Somers J., Nelms B. The sporophyte-to-gametophyte transition: The haploid generation comes of age. *Current Opinion in Plant Biology*. 2023;75:102416. doi: 10.1016/j.pbi.2023.102416
11. Mulcahy D.L., Sari-Gorla M., Mulcahy G.B. Pollen selection – past, present and future. *Sexual Plant Reproduction*. 1996;9:353–356. doi: 10.1007/BF02441955
12. Lee J.Y., Lee D.H. Use of serial analysis of gene expression technology to reveal changes in gene expression in *Arabidopsis* pollen undergoing cold stress. *Plant Physiology*. 2003;132(2):517–529. doi: 10.1104/pp.103.020511
13. Maréchal R. Etude taxonomique d'un groupe complexé d'espèces des genres *Phaseolus* et *Vigna* (Papilionaceae) sur la base de données morphologiques et polliniques, traitées par l'analyse informatique. *Boissiera*. 1978;28:1–273. doi: 10.1080/00837792.1984.10670306
14. Umdale S.D., Aitawade M.M., Gaikwad N. et al. Pollen morphology of Asian *Vigna* species (genus *Vigna*; subgenus *Ceratotropis*) from India and its taxonomic implications. *Turkish Journal of Botany*. 2017;41(1):75–87. doi: 10.3906/bot-1603-31
15. Pavlova A.M. *Vigna. Kul'turnaya flora SSSR. Zernovye bobovye* = Cultivated flora of the USSR. Grain legumes. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo sovkhoznoy i kol'khoznoy literatury, 1937;4:621–646. (In Russ.)
16. Pavlova A.M. *Vigna* is the bean's sister. *Zernobobovye kul'tury* = . 1964;1:16–18. (In Russ.)
17. Vishnyakova M.A. Species diversity of the collection of genetic resources of grain legumes VYR and its use in domestic breeding (review). *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* = Works on applied botany, genetics and selection. 2019;180(2):109–123. (In Russ.). doi: 10.30901/2227-8834-2019-2-109-123
18. Mog B., Veena G.L., Adiga J.D. et al. Pollen morphological study and temperature effect on the pollen germination of cashew (*Anacardium occidentale* L.) varieties. *Scientia Horticulturae*. 2023;314:111957. doi: 10.1016/j.scienta.2023.111957
19. Dong R. et al. Scanning electron microscopy observations of pollen morphology in common vetch (*Vicia sativa*) subspecies. *The Journal of Agricultural Science*. 2020;158(8-9):646–659. doi: 10.1017/S0021859620001033
20. Bahadur S. et al. Identification of monocot flora using pollen features through scanning electron microscopy. *Microscopy Research Technique*. 2018;81(6):599–613. doi: 10.1002/jemt.23015
21. Khaleghi E., Karamnezhad F., Moallemi N. Study of pollen morphology and salinity effect on the pollen grains of four olive (*Olea europaea*) cultivars. *South African Journal of Botany*. 2019;127:51–57. doi: 10.1016/j.sajb.2019.08.031

22. Callum B., Chang S.M. Pollen competition in style: Effects of pollen size on siring success in the hermaphroditic common morning glory, *Ipomoea purpurea*. *American Journal of Botany*. 2016;103(3):460–470. doi: 10.3732/ajb.1500211
23. Kolyasnikova N.L. The role of reproductive biology in solving the problem of increasing seed productivity of forage legumes. *Permskiy agrarnyy vestnik* = Perm Agrarian Bulletin. 2015;4(12):60–64. (In Russ.). doi: 633.32:631.559
24. Mazer S.J. et al. Winning in style: Longer styles receive more pollen, but style length does not affect pollen attrition in wild *Clarkia* populations. *American Journal of Botany*. 2016;103(3):408–422. doi: 10.3732/ajb.1500192
25. Khanna V.K. Studies on hybridization and genetic diversity in cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Open Access Journal of Oncology and Medicine*. 2018;2(1):1–10. doi: 10.32474/OAJOM.2018.02.000132
26. Jiang Y. et al. Seed set, pollen morphology and pollen surface composition response to heat stress in field pea. *Plant, cell & environment*. 2015;38(11):2387–2397. doi: 10.1111/pce.12589
27. Tsatsenko L.V., Sinel'nikova A.S. Pollen analysis in plant breeding. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Polythematic online electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2012;(77):38–48. (In Russ.). doi: 57.088.1:581.331.2:633/ 635(076)
28. Kupriyanova A.B., Aleshina L.A. *Pyl'tsa i spory rasteniy flory Evropeyskoy chasti SSSR: rukovodstvo* = Pollen and spores of plants of the flora of the European part of the USSR: a guide. Leningrad: Nauka, 1972:171. (In Russ.)
29. Halbritter H., Ulrich S., Grímsson F. *Illustrated Pollen Terminology*. Sham: Springer, 2018:483.

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. Золотолинская, 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 09.01.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 27.01.2025

Принята к публикации / Accepted 05.02.2025