

Эколого-географическое изучение маша (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) из коллекции ВИР

DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-131-141

УДК 635.654.1:631.524.022:57.087.1

Поступление/Received: 28.11.2020

Принято/Accepted: 01.03.2021



М. О. БУРЛЯЕВА^{1*}, М. В. ГУРКИНА¹,
М. Г. САМСОНОВА², М. А. ВИШНЯКОВА¹

¹ Федеральный исследовательский центр
Всероссийский институт генетических ресурсов растений
имени Н.И. Вавилова,
190000 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44
* [✉ m.burlyaeva@vir.nw.ru](mailto:m.burlyaeva@vir.nw.ru)

² Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого,
195251 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
[✉ m.g.samsonova@gmail.com](mailto:m.g.samsonova@gmail.com)

Ecogeographic assessment of mung bean (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) from the collection of the Vavilov Institute (VIR)

M. O. BURLYAEVA^{1*}, M. V. GURKINA¹,
M. G. SAMSONOVA², M. A. VISHNYAKOVA¹

¹ N.I. Vavilov All-Russian Institute
of Plant Genetic Resources,
42, 44 Bolshaya Morskaya Street,
St. Petersburg 190000, Russia
* [✉ m.burlyaeva@vir.nw.ru](mailto:m.burlyaeva@vir.nw.ru)

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
29 Polytekhnikeskaya Street,
St. Petersburg 195251, Russia
[✉ m.g.samsonova@gmail.com](mailto:m.g.samsonova@gmail.com)

Актуальность. Маш (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) – нетрадиционная для Российской Федерации (РФ) культура, основные районы возделывания которой находятся в субтропическом поясе земного шара. Однако положительный опыт выращивания маша в ряде регионов юга Европейской части и Дальнего Востока РФ делает актуальным поиск исходного материала в мировой коллекции ВИР для селекции сортов, адаптированных к этим условиям.

Материалы и методы. Осуществлен сравнительный анализ данных полевого фенотипирования 76 староместных образцов маша из коллекции ВИР в Узбекистане в 1949–1956 гг. и в Астраханской обл. РФ в 2009, 2018, 2019 г. Оценка изменчивости и взаимосвязей фенологических и хозяйственно ценных признаков проведена с помощью методов статистики.

Результаты и обсуждение. Выявлена сильная изменчивость всех изученных признаков и их зависимость от генотипа и среды в обоих регионах исследования. По многолетним данным установлены различия по продолжительности межфазных периодов и вегетативного периода в целом, по семенной продуктивности, высоте растений и массе 1000 семян в двух пунктах. Выявлены значительные различия по силе и структуре корреляций между изученными признаками. В Астраханской области (Россия) и в неблагоприятных для культуры условиях в Ташкентской области (Узбекистан) уровень скоррелированности большинства признаков был выше. Поэтому повышение силы связей между признаками можно рассматривать как показатель (индикатор) неблагоприятных условий произрастания. Наиболее толерантными к изменению условий среды оказались генотипы с короткими периодами «всходы – цветение» и «всходы – созревание». Именно эти признаки прежде всего следует придавать сортам маша при продвижении его производства к северу от традиционного ареала.

Ключевые слова: влияние погодно-климатических условий, продуктивность, фенология, изменчивость, корреляции.

Background. Mung bean (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) is a nontraditional crop for Russia. The crop's main areas of cultivation are situated in the subtropical zone of the planet. However, positive experience with mung bean cultivation in a number of regions – the South of the European part and the Far East of Russia – implies the expediency of a search for source materials suitable for the development of cultivars adapted to these conditions.

Materials and methods. The results of the field phenotyping of 76 mung bean landraces from VIR have been analyzed. The experiments were performed in 1949–1956 in Uzbekistan (former Central Asian Branch of VIR), and in 2009, 2018 and 2019 in Astrakhan Province, where VIR's collection had been reproduced from the early 1990s. The data on the variability of phenological and agronomic characters and their relationships were compared for both areas and analyzed using the methods of multidimensional statistics.

Results and discussion. A strong variability of all studied characters and their dependence on the environment were observed in both locations. According to the averaged long-term data, differences were found in the duration of interphase periods and the entire growing season, seed yield, plant height, and 1000 seed weight in both sites. Significant differences were shown in the strength of correlations between the studied characters. In Astrakhan Province and in the years with less favorable conditions in Uzbekistan, the level of correlations between most traits was higher. Therefore, an increase in the strength of the relationships between crop characters may be regarded as an indicator of unfavorable growing conditions. The genotypes with short periods from sprouting to flowering and from sprouting to maturation were the most resistant to environmental changes. It is these traits that should first of all be transferred to mung bean cultivars when promoting its production to the north, beyond its traditional area.

Key words: impact of weather and climate, productivity, phenology, variability, correlation.

Введение

Маш (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) – зернобобовая культура многоцелевого использования (продовольственного, кормового, овощного, сидерационного), растение теплого климата и короткого дня. Семена и проростки маша – ценный источник белка и большого количества важнейших микронутриентов (Nair et al., 2013). Вид имеет значительную агрономическую ценность, особенно в маргинальных районах растениеводства, так как хорошо адаптирован к экстремальным условиям среды, в частности к засухе (Pataczek et al., 2018).

Основные районы возделывания маша – весь субтропический пояс земного шара. В России маш выращивают на небольших площадях на юге Европейской части страны и Дальнего Востока (Vishnyakova et al., 2018). Однако ареал его возделывания может быть расширен за счет подбора и создания сортов, отличающихся адаптивностью и стабильной урожайностью. За последние тридцать лет маш из разряда культур, которые принято называть недооцененными, недоиспользованными, превратился в одну из восьми основных зернобобовых культур, наиболее широко возделываемых в мире. В настоящее время он занимает около 7,3 млн га (Nair, Schreinemachers, 2019), что обусловлено и расширением его производственного ареала, в том числе на север.

Меняющийся климат усложняет селекцию сортов всех сельскохозяйственных культур. При этом невысокое генетическое разнообразие, используемое в настоящее время в сельском хозяйстве, препятствует расширению продуктивного и адаптивного потенциала новых сортов. Поиск в мировом генофонде образцов со стабильными в разных условиях агрономическими признаками позволит ускорить селекционный процесс. Для этого важно выявление закономерностей изменчивости признаков, их связи и значимости их вклада в процесс формирования продуктивности растений в различных условиях среды. Лучшим материалом для изучения структуры взаимосвязей и варьирования признаков являются староместные образцы, отличающиеся высоким разнообразием по морфологическим, биологическим и хозяйственным характеристикам (Burlyaeva et al., 2019). Известно, что искусственный отбор (селекция) вызывает не только сокращение размаха внутривидовой изменчивости у сортов культурных растений, но и снижение пластичности системы взаимосвязей (Rostova, 2002). Староместные образцы обладают более пластичной по сравнению с современными сортами структурой корреляций и, соответственно, более устойчивы к изменяющимся условиям произрастания.

В коллекции ВИР сохраняется 2519 образцов маша из всех стран, возделывающих эту культуру, в том числе из центров ее происхождения и доместикации – Центральной Азии и Индии. Большинство образцов в коллекции относятся к староместным сортам, собранным в прошлом веке, начиная с 1910 г. (Burlyaeva et al., 2019). Коллекцию систематически изучают в полевых условиях. В течение долгого времени (1930–1990 гг.) основным местом поддержания жизнеспособности и изучения коллекции был Среднеазиатский филиал ВИР (САФ ВИР, Узбекистан), а с 1992 г. основное место поддержания и изучения коллекции – Астраханская опытная станция – филиал ВИР (АОС ВИР).

Средняя Азия – район традиционного возделывания маша. По сути, этот регион был северной границей

возделывания культуры, основное производство которой долгие годы ограничивалось 40-й параллелью северной и южной широт со среднесуточными температурами во время вегетации не менее 20°C (Lawri, Ahn, 1985). Астраханская область находится за пределами исторически сложившегося производственного ареала культуры, будучи отдаленной от САФ ВИР на север по меридиану не менее чем на 800 км.

Целью данной статьи стал сравнительный анализ изменчивости варьирования и скоррелированности (детерминации) селекционно значимых признаков образцов маша из коллекции ВИР в традиционном районе возделывания культуры и за его границами, в более северном регионе, для выявления закономерностей, определяющих адаптацию образцов к разным климатическим условиям.

Материалы и методы

Исследовали 76 староместных образцов маша из коллекции ВИР, привезенных экспедициями ВИР из 17 стран в период с 1922 по 1946 г. Все образцы – с детерминантным типом роста.

Анализировали исторические данные изучения этих образцов, проведенного в 1949–1956 гг. в Узбекистане (Ташкентская обл.) на САФ ВИР (из оригинальных полевых журналов), и современные данные нашей оценки в 2009, 2018, 2019 г. в России (Астраханская обл.) на АОС ВИР.

Посев и изучение образцов (фенологические наблюдения и морфолого-биологические описания) проводили по общепринятым в ВИР методикам (Vishnyakova et al., 2018). Сеяли семена вручную во влажный, хорошо прогретый слой почвы, когда средняя дневная температура воздуха достигала 14–16°C. Ширина междурядий составляла 70 см, расстояние между семенами в ряду – 10 см, глубина заделки семян – 3–5 см. Образцы культивировали в условиях орошения: в течение вегетации проводили шесть поливов дождеванием нормой 250–300 м³/га на АОС и три полива на САФ ВИР.

Изучали наиболее значимые в селекции маша признаки: продолжительность межфазных периодов («посев – всходы», «всходы – цветение», «цветение – созревание») и вегетационного периода («всходы – созревание»), продуктивность семян с одного растения, массу 1000 семян, высоту растения. Признаки оценивали в соответствии с дескрипторами (Burlyaeva et al., 2016; Descriptors..., 1980).

Признаки анализировали с помощью описательных статистик (среднее, минимум, максимум, среднеквадратичное отклонение, стандартная ошибка среднего и др.), однофакторного дисперсионного анализа, корреляционного анализа (ранговые коэффициенты корреляции – Spearman Rank Order Correlations) (StatSoft..., 2013). Особенности варьирования хозяйственно-биологических признаков в разных условиях среды выявляли путем определения их детерминированности (средний коэффициент детерминации – R^2) и изменчивости (коэффициент вариации – CV). Этот подход позволяет выявить природу изменчивости признака, зависимость его варьирования от внешней среды или от специфики генотипа, определить признаки, наиболее сильно скоррелированные с другими или практически независимые от последних (Rostova, 2002). Средний коэффициент детерминации и коэффициент вариации определяли для каждого года изучения. Средний коэф-

коэффициент детерминации признака рассчитывали по матрице корреляций, используя формулу (1):

$$R^2 = (R_1^2 + R_2^2 + \dots + R_n^2)/(n - 1); (1);$$

где n – число признаков (Rostova, 2002).

Достоверность влияния генотипа, погодных условий и места репродукции на исследованные признаки устанавливали, используя однофакторный дисперсионный анализ. Долю влияния фактора (η^2 , %) по Фишеру вычисляли по формуле (2) (Ivanter, Korosov, 2011):

$$\eta^2 = \frac{SS_{factor}}{SS_{total}} \times 100\%; (2);$$

где: η^2 , % – доля влияния фактора, SS_{factor} – факторная сумма квадратов отклонений, SS_{total} – общая сумма квадратов отклонений.

Сумма активных температур выше 15°C и количество осадков за время вегетации растений на АОС рассчитаны с использованием метеорологических данных сайта ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (RINMI-WDC..., 2014). Аналогичные показатели для САФ рассчитаны по данным Геоинформационной системы «Метео измерения онлайн» (ThermoKarelia.ru..., 2000-2020).

Результаты

В районе Ташкента на САФ (41°24' с. ш., 69°29' в. д.) климат субтропический, резко континентальный, засушливый, жаркий. Сумма активных температур выше 15°C в регионе достигает за год в среднем 4000°C, количество осадков – 380 мм. В районе АОС (46°07' с. ш., 41°01' в. д.) климат сухой и резко континентальный, по степени засушливости он уступает лишь среднеазиатским пустыням и полупустыням. Сумма активных температур выше 15°C в год в области достигает 3500–3600°C, количество осадков – 180–290 мм. Между тем многолетний опыт поддержания коллекции в пригородном районе Астрахани показал хороший потенциал продуктивности скороспелых и среднеспелых образцов маша (Burlyaeva et al., 2014).

Различия погодных условий в годы изучения в Узбекистане и в Астрахани отражают следующие показатели. Сумма положительных температур воздуха выше 15°C в период вегетации достигала 3288,4–3619,0°C на АОС и 3279,1–3978,7°C на САФ. Количество осадков за вегетационный период колебалось от 48,9 до 223,0 мм на АОС, от 90,7 до 334,6 мм на САФ. То есть температурный показатель был выше на 179,5°C в условиях Узбекистана, и количество осадков здесь также было выше в среднем на 63,5 мм, чем в Астрахани. Климат на САФ смягчен близостью гор, благодаря которым в этом районе и выпадает большее количество осадков, чем в пустынях и полупустынях на западе Узбекистана и в окрестностях Астрахани. Весна в Ташкентской области наступает раньше, температура воздуха выше 15°C наблюдается уже в марте; в Астраханской области переход температуры через 15°C фиксируется только в апреле.

В обоих пунктах исследования наблюдалась сильная изменчивость фенологических и хозяйственно ценных признаков и их зависимость от среды. Межсортовая изменчивость продолжительности вегетационного периода («всходы – созревание») варьировала от 55,0 до 142,0 сут.; средняя продуктивность семян с растения менялась от 0,0 (образцы не вызревали) до

57,5 г, масса 1000 семян – от 20,0 до 87,4 г, высота растения – от 31,2 до 140,0 см.

По усредненным данным, продолжительность вегетационного периода была меньше на САФ (91,5), чем на АОС (105,8) на 11,4 суток, периода «посев – всходы» – на 1,4 сут., периода «всходы – цветение» – на 3,0 сут., периода «цветение – созревание» – на 12,4 сут. (рис. 1, а–г). Продуктивность семян была выше на АОС (12,4 г), чем на САФ (7,5 г) (рис. 1, е). Высота растений на САФ была больше на 5,4 см по сравнению с АОС (рис. 1, ж). Масса 1000 семян была примерно одинаковой на обеих станциях (около 41,0–42,0 г) (рис. 1, д).

Однофакторный дисперсионный анализ выявил достоверное влияние места репродукции на изменчивость длительности периодов «цветение – созревание» (доля влияния – $\eta^2 = 21,0\%$) и «всходы – созревание» (10,3%), а также на продуктивность семян (6,1%) (табл. 1). От погодных условий зависели все изученные признаки: продолжительность периодов «посев – всходы» (63,3%), «всходы – цветение» (28,3%), «цветение – созревание» (23,7%), «всходы – созревание» (22,5%), продуктивность семян (19,8%), масса 1000 семян (9,1%). Причем сумма активных температур достоверно воздействовала на продолжительность всех периодов вегетации и продуктивность семян, а количество осадков – только на продолжительность периодов вегетации. Генотип достоверно влиял на варьирование продолжительности периодов «всходы – цветение» (49,4%), «всходы – созревание» (54,4%) и массы 1000 семян (47,0%). Таким образом, изменчивость периодов «всходы – цветение», «всходы – созревание», массы 1000 семян больше связана с индивидуальными особенностями образцов, меньше – с условиями возделывания. Высота растения не зависела ни от одного из изученных факторов.

Корреляционный анализ признаков, измеренных во все годы исследования (1949–1956 гг.) на САФ, выявил общие взаимосвязи между ними, характерные для всех генотипов при выращивании маша в Ташкентской области (рис. 2). Растения, прорастающие с большей скоростью, быстрее переходили к стадии цветения ($r = 0,5$). Продолжительность вегетационного периода была больше связана с периодом «всходы – цветение» ($r = 0,9$), меньше – с периодом «цветение – созревание» ($r = 0,7$). Длина периода «всходы – цветение» была взаимосвязана с периодом «цветение – созревание» ($r = 0,5$). Продуктивность семян положительно коррелировала с массой 1000 семян ($r = 0,6$) и отрицательно с периодом «цветение – созревание» ($r = -0,5$). Масса 1000 семян была отрицательно взаимосвязана с продолжительностью периода «цветение – созревание» ($r = -0,4$). Высота растения согласованно изменялась с длинами периодов «цветение – созревание» ($r = 0,7$) и «всходы – созревание» ($r = 0,5$).

В Астраханской области, в отличие от Ташкентской, длительность вегетации растений была одинаково связана как с длительностью периода «цветение – созревание» ($r = 0,7$), так и периода «всходы – цветение» ($r = 0,7$). Наблюдалась слабая отрицательная корреляция между продуктивностью и продолжительностью периода «всходы – цветение» ($r = -0,3$) и периода «всходы – созревание» ($r = -0,3$). Растения, быстрее достигавшие стадии цветения, отличались меньшей высотой ($r = 0,3$). Масса 1000 семян имела менее сильную отрицательную корреляцию с периодом «цветение – созревание» ($r = -0,3$). Взаимосвязи между высотой растения и продолжительностью периодов «цветение – созревание»

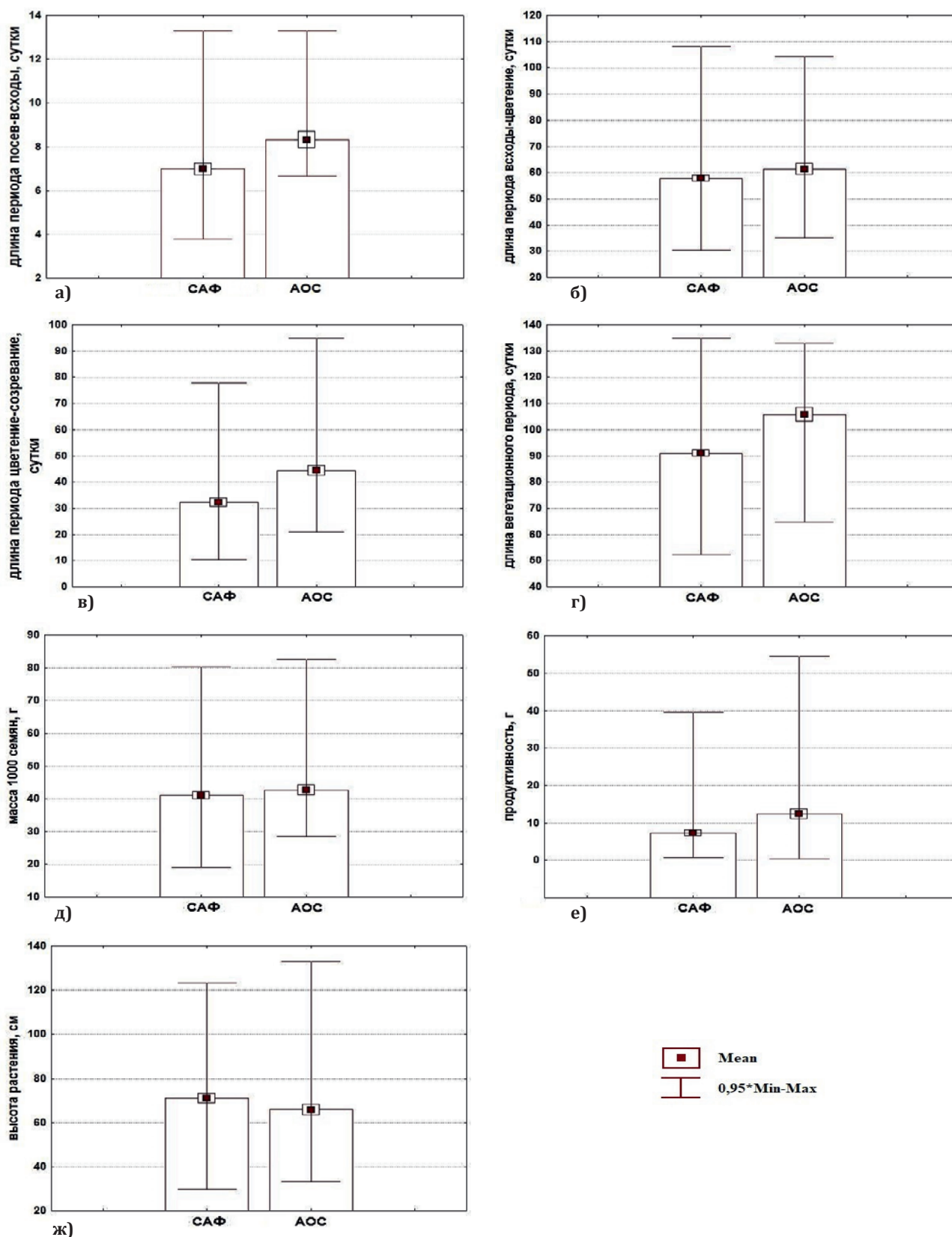


Рис. 1. Изменчивость фенологических и хозяйственно ценных признаков маша в разных эколого-географических условиях: а – продолжительность периода «посев – всходы», сут; б – «всходы – цветение», сут; в – «цветение – созревание», сут; г – «вегетационный период», сут; д – масса 1000 семян, г; е – семенная продуктивность растения, г; ж – высота растения, см. Mean – среднее, Min – минимум, Max – максимум. САФ – Среднеазиатский филиал, АОС – Астраханская опытная станция

Fig. 1. Variability of phenological and agronomic characters in mung bean under different ecogeographic conditions: а – number of days from sowing to sprouting; б – days from sprouting to flowering; в – days from flowering to maturation; г – days from sprouting to maturation; д – 1000 seed weight (g); е – seed yield per plant (g); ж – plant height (cm). Min – minimum, Max – maximum. САФ – Central Asian Branch of VIR, АОС – Astrakhan Experiment Station of VIR

Таблица 1. Результаты однофакторного дисперсионного анализа по выявлению ассоциаций между изменчивостью хозяйственно ценных и фенологических признаков *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek и генотипом, а также эколого-географическими условиями

Table 1. Results of a univariate analysis of variance for identifying associations of the variability of agronomic and phenological characters in *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek with the genotype and ecogeographic conditions

Фактор	Df	SS	F	p	SS	F	p	SS	F	p
Место репродукции (регион возделывания)										
		<i>Длительность периода «цветение – созревание»</i>			<i>Длительность периода «всходы – созревание»</i>			<i>Продуктивность</i>		
Место репродукции	1	29899	160,62	0,0000	30296	69,32	0,0003	3459	39,41	0,006
Остаточная изменчивость	607	112213			263486			52924		
Общая изменчивость	608	142115			293782			56384		
η^2 , %		21,0			10,3			6,1		
Генотип										
		<i>Длительность периода «всходы – цветение»</i>			<i>Длительность периода «всходы – созревание»</i>			<i>Масса 1000 семян</i>		
Генотип	75	96903	6,42	0,0000	170103	7,82	0,0000	17120	5,84	0,0000
Остаточная изменчивость	533	99273			202886			19294		
Общая изменчивость	608	196177			312979			36414		
η^2 , %		49,4			54,4			47,0		
Год										
		<i>Длительность периода «посев – всходы»</i>			<i>Длительность периода «всходы – цветение»</i>			<i>Длительность периода «цветение – созревание»</i>		
Год	8	1286	82,71	0,0000	50061	18,88	0,0000	31509	14,93	0,0000
Остаточная изменчивость	600	746			122440			101212		
Общая изменчивость	608	2032			177181			132722		
η^2 , %		63,3			28,3			23,7		
		<i>Длительность периода «всходы – созревание»</i>			<i>Масса 1000 семян</i>			<i>Продуктивность</i>		
Год	8	65539	13,94	0,0000	3812	4,77	0,0216	8843	11,87	0,0000
Остаточная изменчивость	600	225612			27687			35756		
Общая изменчивость	608	403132			13440			444740		
η^2 , %		22,5			9,1			19,8		

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

Фактор	Df	SS	F	p	SS	F	p	SS	F	p
Сумма активных температур										
		<i>Длительность периода «посев – всходы»</i>			<i>Длительность периода «всходы – цветение»</i>			<i>Длительность периода «цветение – созревание»</i>		
Температура	8	2106	129,18	0,0000	44461	14,43	0,0000	26751	15,36	0,0000
Остаточная изменчивость	600	802			151715			85730		
Общая изменчивость	608	2909			196176			112482		
η^2 , %		63,3			28,3			23,7		
		<i>Длительность периода «всходы – созревание»</i>			<i>Продуктивность</i>					
Температура	8	57277	11,03	0,0000	5407	7,55	0,0000			
Остаточная изменчивость	600	255702			21855					
Общая изменчивость	608	312979			27263					
η^2 , %		22,5			19,8					
Количество осадков										
		<i>Длительность периода «посев – всходы»</i>			<i>Длительность периода «всходы – цветение»</i>			<i>Длительность периода «цветение – созревание»</i>		
Осадки	8	2106	129,18	0,0000	44461	14,43	0,0000	26751	15,36	0,0000
Остаточная изменчивость	600	802			151715			85730		
Общая изменчивость	608	2909			196176			112482		
η^2 , %		63,3			28,3			23,7		
		<i>Длительность периода «всходы – созревание»</i>								
Осадки	8	57277	11,03	0,0000						
Остаточная изменчивость	600	255702								
Общая изменчивость	608	312979								
η^2 , %		22,5								

Примечание: SS – сумма квадратов; F – значение критерия Фишера; p – уровень значимости;

df – число степеней свободы; η^2 – доля влияния, %

Note: SS – sum of squares; MS – mean squares; F – Fisher criterion value; p – significance level;

df – degrees of freedom; η^2 , % – effect size, percentage

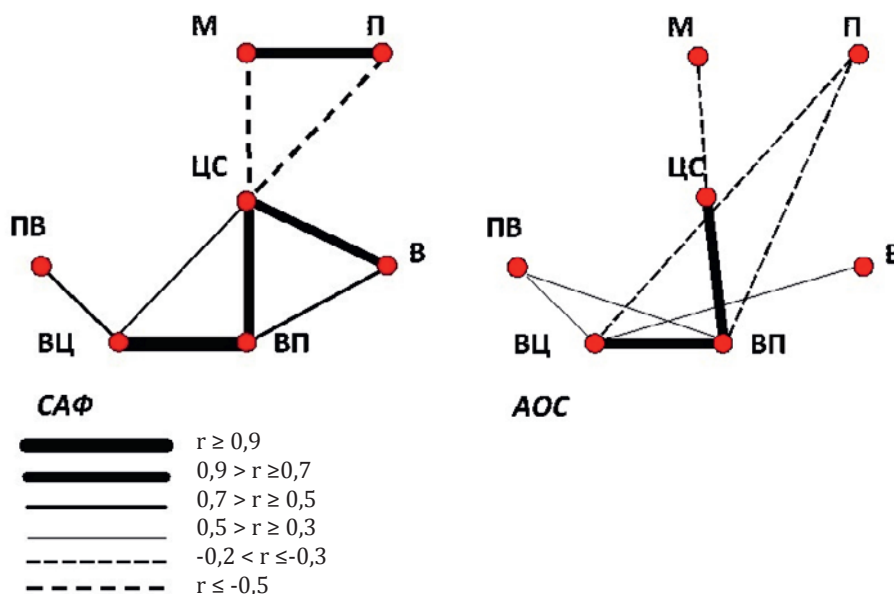


Рис. 2. Структура корреляций (корреляционные плеяды) фенологических и хозяйственно ценных признаков у изученных образцов маша в разных эколого-географических условиях: ВП – продолжительность периода «всходы – созревание», ПВ – продолжительность периода «посев – всходы», ВЦ – продолжительность периода «всходы – цветение», ЦС – продолжительность периода «цветение – созревание»; В – высота растения, М – масса 1000 семян, П – продуктивность семян с растения. САФ – Среднеазиатский филиал, АОС – Астраханская опытная станция

Fig 2. The structure of correlations (correlation pleiades) between phenological and agronomic characters in the studied mung bean accessions under different ecogeographic conditions: ВП – number of days from sprouting to maturation; ПВ – days from sowing to sprouting; ВЦ – days from sprouting to flowering; ЦС – days from flowering to maturation; В – plant height; М – 1000 seed weight; П – seed yield per plant; САФ – Central Asian Branch of VIR; АОС – Astrakhan Experiment Station of VIR

ние» и «всходы – созревание» отсутствовали так же, как и корреляция между длительностью периодов «всходы – цветение» и «цветение – созревание» (см. рис. 2).

Таким образом, на рост и развитие маша существенное влияние оказывают сумма активных температур и количество осадков в период вегетации. В условиях Узбекистана наибольшей продуктивностью отличались скороспелые и крупносемянные образцы, в Астраханской области продуктивность была больше связана с высокой скоростью роста растений на стадии «всходы – цветение».

Сравнение коэффициентов детерминации (R^2) и коэффициентов вариаций (CV) признаков, рассчитанных для каждого пункта изучения, выявило определенные различия как во взаимосвязях между признаками, так и в их варьировании, как по годам, так и по регионам исследования (табл. 2).

Изменчивость (CV) большинства признаков находилась в пределах от 18,0 до 40,0%. Наименьшие средние показатели отмечались у массы 1000 семян (18,26%), более высокие – у продолжительности периодов: «всходы – созревание» (24,86), «всходы – цветение» (31,10), «посев – всходы» (31,83), «цветение – созревание» (40,50). CV высоты растения составил 32,92%. Самый высокий коэффициент вариации наблюдался у продуктивности семян – 109,40%. Средние показатели CV большинства признаков были выше на САФ, чем на АОС; исключение составили масса 1000 семян и высота растения.

Средний коэффициент детерминации (R^2) варьировал в пределах от 0,01 до 0,18. Самые высокие показатели R^2 отмечались у признаков «всходы – цветение» (0,14) и «всходы – созревание» (0,18), наиболее низкие – у признаков «посев – всходы» (0,02) и «продуктивность» (0,01). Средние показатели R^2 всех признаков (кроме «всходы – цветение») были выше на АОС, по сравнению с САФ.

Продолжительность периода «всходы – созревание» наиболее зависела от условий среды, имела наибольший размах изменчивости и самые сильные связи с другими показателями (высокие коэффициенты вариации и детерминации). Этот признак в нашем исследовании можно назвать индикатором адаптивной изменчивости образцов, так как его изменчивость (CV) и корреляции (R^2) в большей степени зависят от изменений условий среды. Наименьшие размахи варьирования (CV) и уровень связей (R^2) наблюдались у массы 1000 семян – наиболее стабильного и наименее зависящего от других признака. Продуктивность семян характеризовалась самым сильным варьированием и слабой скоррелированностью с другими признаками. Изменчивость этого признака определялась преимущественно влиянием внешних факторов. Несмотря на это, среди исследованных нами староместных образцов были найдены сорта из Кореи (к-7038), Китая (к-7060), Афганистана (к-2216) и южных регионов России (к-2156, к-6349), отличающиеся стабильно высокими показателями продуктивности и скороспелости во все годы изучения в обоих пунктах.

Таблица 2. Изменчивость среднего коэффициента детерминации (R^2) и коэффициента вариации (CV) фенологических и хозяйственно ценных признаков маша в разных погодных и климатических условиях
Table 2. Variability of the mean coefficient of determination (R^2) and the coefficient of variation (CV) of phenological and agronomic characters in mung bean under different weather and climate conditions

Год	Длительность периода «посев – всходы»		Длительность периода «цветение – созревание»		Длительность периода «всходы – созревание»		Масса 1000 семян		Продуктивность		Высота растения		Сумма активных температур, °C	Количество осадков, мм		
	R^2	CV, %	R^2	CV, %	R^2	CV, %	R^2	CV, %	R^2	CV, %	R^2	CV, %				
Среднеазиатский филиал (САФ)																
1949	0,13	20,38	0,21	34,52	0,11	34,93	0,25	29,33	0,24	28,14	0,36	83,59	0,26	28,76	3279,1	334,6
1950	0,15	21,01	0,30	25,81	0,04	27,76	0,29	18,78	0,14	17,17	0,21	97,73	0,18	39,51	3598,6	90,7
1951	0,04	14,81	0,19	29,83	0,06	26,64	0,24	22,79	0,15	19,38	0,12	66,55	0,18	19,15	3752,4	122,6
1952	0,03	2,60	0,23	29,20	0,07	44,59	0,18	20,49	0,08	4,75	0,03	76,04	0,09	36,40	3666,4	238,5
1954	0,20	24,62	0,30	24,07	0,32	36,81	0,42	23,33	0,07	2,22	0,18	68,91	0,14	27,77	3641,9	202,0
1956	0,43	13,23	0,40	20,31	0,35	23,56	0,34	5,55	0,12	9,45	0,50	95,04	0,65	28,80	3978,7	158,4
САФ ¹	0,03	32,91	0,15	32,13	0,06	38,95	0,19	25,07	0,05	17,65	0,04	112,92	0,06	32,07	3652,9	191,1
Астраханская опытная станция (АОС)																
2009	0,02	11,41	0,08	12,83	0,14	25,24	0,20	14,56	0,04	23,86	0,02	100,43	0,04	16,10	3288,4	223,0
2018	0,03	4,79	0,16	29,40	0,34	55,28	0,19	22,80	0,05	19,11	0,25	62,98	0,24	23,11	3619,0	48,9
2019	0,10	3,34	0,24	25,04	0,26	23,28	0,33	21,88	0,13	2,83	0,16	94,59	0,20	27,58	3512,9	111,0
АОС ²	0,06	20,53	0,13	23,38	0,10	36,01	0,19	20,04	0,08	22,15	0,05	92,16	0,09	34,30	3473,4	127,6
Все годы ³	0,02	31,83	0,14	31,10	0,06	40,50	0,18	24,86	0,03	18,26	0,01	109,40	0,03	32,92	3593,0	169,8

Примечание: САФ¹ – показатели R^2 и CV рассчитаны по всем образцам и годам изучения на САФ; АОС² – показатели рассчитаны по всем образцам и годам изучения на АОС; все годы³ – показатели рассчитаны по всему массиву данных (по данным всех лет изучения)

Note: САФ¹ – R^2 and CV are calculated for all accessions and years of study at the Central Asian Branch of VIR; АОС² – R^2 and CV are calculated for all accessions and years of study at Astrakhan Experiment Station of VIR; все годы³ – R^2 and CV are calculated for the entire data set (based on data from all years of study)

Обсуждение

Расширение географических пределов возделывания культур – многовековая тенденция земледелия. В наши дни его обеспечивают не только успехи селекции, но и знание биологии культур, агроклиматических трендов, прогностические исследования. Сопоставление данных оценки коллекции *V. radiata* ВИР в двух разных регионах, различающихся почвенно-климатическими условиями, представляет собой пример эколого-географических исследований, имеющих вековую традицию в ВИР, и позволяет выявить адаптивные возможности образцов коллекции.

В наших исследованиях в обоих пунктах изучения образцов наблюдалась сильная изменчивость фенологических и хозяйственно ценных признаков и их зависимость от условий произрастания. Зависимость урожайности маша от погодных условий и генотипа неоднократно отражена в научной литературе (Ullah et al., 2012; Win et al., 2018; Samyuktha et al., 2020). При эколого-географическом изучении маша в шести климатических зонах Индии получены сопоставимые с нашими результаты о влиянии климатических условий и генотипа на размер семян и продуктивность семян с растения (Thangavel et al., 2011).

Тем не менее только в нашем исследовании выявлены различия по структуре и силе взаимосвязей между признаками маша в разных условиях. В Узбекистане продуктивность семян положительно коррелировала с массой 1000 семян и отрицательно с длительностью периода «цветение – созревание». В Астраханской области такая связь не была обнаружена и продуктивность находилась в отрицательной корреляции с продолжительностью периодов «всходы – цветение» и «всходы – созревание». О различиях взаимосвязей признаков при выращивании культуры в разных районах Индии можно судить, сопоставляя публикации. Так, в одних работах отмечена положительная связь между продуктивностью растения и массой 100 семян (Thangavel et al., 2011), в других описана отрицательная корреляция размера семян с биологической урожайностью и положительная индексом урожая (Biradar et al., 2007; Narasimhulu et al., 2013). Как правило, последняя закономерность проявляется у растений в экстремально засушливых местообитаниях (Taylor et al., 2020).

Выявленная нами пластичность систем взаимосвязей между признаками выражалась в том, что признаки значительно различались по степени стабильности и уровню (силе) связей. Многие взаимосвязи зависели от погодных условий (от силы воздействия засухи, суммы активных температур). Засуха на разных этапах развития растения сужала размах варьирования межфазных периодов и вегетационного периода в целом, высокая сумма активных температур (выше 3900°C) повышала их средние коэффициенты детерминации. Пониженная сумма активных температур (ниже 3300°C) увеличивала изменчивость массы 1000 семян (в силу того, что часть из них не достигала созревания) и усиливала детерминированность семенной продуктивности. В ряде случаев небольшое количество осадков (ниже 160 мм) также увеличивало детерминированность продуктивности семян и высоты растений.

В зависимости от условий года признаки попадали то в группу со слабой изменчивостью и слабой детерминированностью (низкий CV и низкий R²), то в ряд

с сильно варьирующей и слабо согласованной изменчивостью (высокий CV и низкий R²). В одних условиях признаки повышали свою изменчивость (CV) и детерминированность (R²), в других – наоборот, причем изменчивость по этим характеристикам зависела как от реакции самого признака (его природы), так и от условий культивирования. Совершенно очевидно, что у растений в меняющихся условиях произрастания формируются специфические системы связей, отражающие наличие разных блоков коадаптированных генов и других интегрированных генных комплексов, определяющих адаптацию к определенной среде. Различия в силе связей между признаками, их изменение у одних и тех же генотипов растений, произрастающих в различных эколого-географических условиях, показаны нами ранее для сои (Burlyayeva, Rostova, 2014, 2019).

Наименьшей вариабельностью и силой связей характеризовались признаки: масса 1000 семян, высота растения, длительность периодов «посев – всходы» и «цветение – созревание». Относительно слабая изменчивость и высокая детерминированность наблюдались у длительности периодов: «всходы – цветение» и «всходы – созревание». Сильная изменчивость и слабая детерминация отмечались у продуктивности семян, что свидетельствует об адаптивности этого признака, определяющего способность популяции к размножению в меняющихся условиях среды. Пластичность корреляций этого признака обеспечивает жизнеспособность растений при дефиците ресурсов.

В годы, неблагоприятные для роста культуры (засушливые или сравнительно холодные), повышалась детерминированность большинства признаков, в годы с достаточным количеством осадков и высокой суммой активных температур увеличивалась изменчивость признаков. Наиболее сильная изменчивость большинства признаков наблюдалась на САФ в годы с большим количеством осадков, а детерминированность – на АОС. Поэтому для изучения границ изменчивости и полиморфизма признаков наиболее подходят условия САФ, для исследования адаптивности образцов – АОС.

За два десятилетия поддержания и изучения коллекции маша в Астраханской области выявлен генофонд культуры, способный формировать стабильные урожаи в Нижнем Поволжье. Он включает образцы, которым присуща высокая энергия роста на ранних стадиях развития, быстрый переход к цветению и созреванию. Эти характеристики позволяют им формировать семена до наступления засухи и при сравнительно низких температурах воздуха. Кроме того, успехи современной селекции выразились в создании сортов маша, у которых продолжительность вегетационного периода сократилась от 100–120 дней до 55–65 (Burlyayeva et al., 2019; Pratar et al., 2019). За счет этого растениям удается избежать влияния целого ряда биотических и абиотических стрессоров.

В нашем исследовании староместных сортов маша наиболее толерантными к меняющимся условиям среды оказались скороспелые генотипы, обладающие короткими периодами «всходы – цветение» и «всходы – созревание». Именно эти признаки прежде всего придают сортам при продвижении сельскохозяйственных культур на север. На сегодняшний день Нижнее Поволжье, где расположена АОС, – северная граница современного агрономического ареала маша. Не исключено, что в перспективе этот регион может стать и местом массового производства этой культуры.

Заключение

Обобщая результаты проведенного нами анализа, можно констатировать, что сила корреляций между большинством изученных признаков выше при выращивании в неблагоприятных условиях. Коэффициент детерминации многих признаков усиливается при низкой или очень высокой сумме активных температур, а также при небольшом количестве осадков во время вегетации растений. В наших исследованиях такая изменчивость систем взаимосвязей между признаками отмечалась при выращивании культуры за пределами ее традиционного ареала возделывания – в Астраханской области (АОС), а также при неблагоприятных условиях в регионе ее исторического производства – в Узбекистане (САФ). Поэтому повышение уровня корреляций между признаками можно рассматривать как показатель (индикатор) неблагоприятных условий произрастания. Выявленная пластичность систем взаимосвязей между признаками обеспечивает жизнеспособность растений в меняющихся условиях среды.

При селекции сортов маша для производства в новых для культуры условиях следует учитывать стабильность корреляций между признаками, особенно связанными с продуктивностью растения. Следовательно, выбор наиболее значимых взаимосвязей между хозяйственно ценными признаками необходимо проводить в конкретных условиях, то есть там, где планируется выращивание маша. В нашем исследовании крупносемянные образцы, с коротким периодом «цветение – созревание» отличались наилучшей продуктивностью в Узбекистане. Генотипы с короткими периодами «всходы – созревание» и «всходы – цветение», то есть быстрее развивающиеся на начальных этапах развития растения и быстрее заканчивающие жизненный цикл, были наиболее толерантны к новым для них условиям Астраханской области.

Работа поддержана грантом РФФ № 18-46-08001.

This research was supported by the Russian-Taiwanese grant from the Russian Science Foundation, No. 18-46-08001.

References / Литература

- Biradar S., Kaveri S., Salimath P.M., Ravikumar R.L. Genetic studies in greengram and association analysis. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*. 2007;20(4):843-844.
- Burlyayeva M.O., Gurkina M.V., Chebukin P.A., Kiseleva N.A. The international descriptors for species of the genus *Vigna* Savi. St. Petersburg: VIR; 2016. [in Russian] (Бурляева М.О., Гуркина М.В., Чебукин П.А., Киселева Н.А. Международный классификатор видов рода *Vigna* Savi. Санкт-Петербург: ВИР; 2016).
- Burlyayeva M.O., Gurkina M.V., Tikhonova N.I. Catalogue of the VIR global collection. Issue 818. Mungbean and black gram: The initial material for breeding under irrigation in the Caspian Lowland. St. Petersburg: VIR; 2014. [in Russian] (Бурляева М.О., Гуркина М.В., Тихонова Н.И. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 818. Маш, урд. Исходный материал для селекции при орошении в условиях Прикаспийской низменности. Санкт-Петербург: ВИР; 2014).
- Burlyayeva M.O., Rostova N.S. Variability and determinacy of morphological, phenological, biochemical and agro-

nom characteristics in forage soybeans of various uses under the conditions of Krasnodar region. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2014;175(2):42-52. [in Russian] (Бурляева М.О., Ростова Н.С. Изменчивость и детерминированность морфологических, фенологических, биохимических и хозяйственных признаков кормовой сои разных направлений использования в условиях Краснодарского края. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2014;175(2): 42-52).

- Burlyayeva M.O., Rostova N.S. Variability of the structure of correlations between the morphological and commercial traits of soybeans with different growth habit and branching characters. *Vavilov Journal Genetics and Breeding*. 2019;23(6):708-716. DOI: 10.18699/VJ19.544
- Burlyayeva M.O., Vishnyakova M.A., Gurkina M.V., Kozlov K.N., Lee C.R., Ting C.T. et al. Collections of mungbean [*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek] and urdbean [*V. mungo* (L.) Hepper] in Vavilov Institute (VIR): traits diversity and trends in the breeding process over the last 100 years. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2019;66(4):767-781. DOI: 10.1007/s10722-019-00760-2
- Descriptors for mung bean. Rome: IBPGR Secretariat; 1980.
- Ivanter E.V., Korosov A.V. Introduction to quantitative biology (Vvedeniye v kolichestvennyuyu biologiyu). Petrozavodsk; 2003. [in Russian] (Ивантер Е.В., Коросов А.В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск; 2003).
- Lawn R.J., Ahn C.S. Mung bean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek / *Vigna mungo* (L.) Hepper). In: R.J. Summerfield, E.H. Robert (eds). *Grain Legume Crops*. London: Collins; 1985. p.584-623.
- Nair R.M., Schreinemachers P. Global status and economic importance of mungbean. In: R.M. Nair, R. Schafleitner, S.H. Lee (eds). *The Mungbean Genome*. Springer Nature; 2019. p.1-8.
- Nair R.M., Yang R.Y., Easdown W.J., Thavarajah D., Thavarajah P., Hughes J.D. et al. Biofortification of mung bean (*Vigna radiata*) as a whole food to enhance human health. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2013;93(8):1805-1813. DOI: 10.1002/jsfa.6110
- Narasimhulu R., Naidu N.V., Shanthi Priya M., Rajarajeswari V., Reddy K.H.P. Genetic variability and association studies for yield attributes in mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek). *Indian Journal of Plant Sciences*. 2013;2(3):82-86.
- Pataczek L., Zahir Z.A., Ahmad M., Rani S., Nair R., Schafleitner R. et al. Beans with benefits – the role of mungbean (*Vigna radiata*) in a changing environment. *American Journal of Plant Sciences*. 2018;9(7):1577-1600. DOI: 10.4236/ajps.2018.97115
- Pratar A., Gupta S., Basu P.S., Tomar P., Dubey S., Rathore M. et al. Towards development of climate smart mungbean: challenges and opportunities. In: C. Kole (ed.). *Genomic Designing of Climate-Smart Pulse Crops*. Cham: Springer; 2019. p.235-264. DOI: 10.1007/978-3-319-96932-9_5
- RIHMI-WDC. Technology of Aisori: Site of technology (FGBU “VNIIGMI-MTsD”. Tekhnologii Aisori: sayt tekhnologii). 2014. [in Russian] (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Технологии Аисори: сайт технологии. 2014) URL: <http://meteo.ru/it/178-aisori> [дата обращения: 25.04.2018].
- Rostova N.S. Correlations: structure and variability. In: *Proceedings of the St. Petersburg Society of Naturalists. Ser. 1. Vol. 94*. St. Petersburg: St. Petersburg State University; 2002. p.1-308. [in Russian] (Ростова Н.С. Корреляции: структура и изменчивость. В кн.: *Труды Санкт-*

- Петербургского общества естествоиспытателей. Сер. 1. Т. 94.* Санкт-Петербург: СПбГУ; 2002. С.1-308).
- Samyuktha S.M., Malarvizhi D., Karthikeyan A., Dhasarathan M., Hemavathy A.T., Vanniarajan C. et al. Delineation of genotype × environment interaction for identification of stable genotypes to grain yield in mungbean. *Frontiers in Agronomy*. 2020;2:577911. DOI: 10.3389/fagro.2020.577911
- StatSoft, Inc. Electronic Statistics Textbook. Tulsa, OK: StatSoft; 2013. Available from: <http://www.statsoft.com/textbook> [accessed 03.05.2020].
- Taylor C.M., Kamphuis L.G., Cowling W.A., Nelson M.N., Berger J.D. Ecophysiology and phenology: genetic resources for genetic/genomic improvement of narrow-leaved lupin. In: K. Singh, L.G Kamphuis, M. Nelson (eds). *The Lupin Genome. Compendium of Plant Genomes*. Cham: Springer; 2020. p.19-30. DOI: 10.1007/978-3-030-21270-4_2
- Thangavel P., Anandan A., Eswaran R. AMMI analysis to comprehend genotype-by-environment (GE) interactions in rainfed grown mungbean (*Vigna radiata* L.). *Australian Journal of Crop Science*. 2011;5(13):1767-1775.
- ThermoKarelia.ru. Geoinformation system "Meteo measurements online". Weather forecasts (Geoinformatsionnaya Sistema "Meteo izmereniya onlayn"). Prognozy pogody). 2000-2020. [in Russian] (ThermoKarelia.ru. Геоинформационная система «Метео измерения онлайн». Прогнозы погоды. 2000-2020. URL: http://thermo.karelia.ru/weather/w_precips.shtml [дата обращения: 12.05.2020]).
- Ullah H., Khalil I.H., Khalil I.A., Fayaz M., Yan J., Ali F. Selecting high yielding and stable mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] genotypes using GGE biplot techniques. *Canadian Journal of Plant Science*. 2012;92,951-960. DOI: 10.4141/cjps2011-162
- Vishnyakova M.A., Burlyaeva M.O., Samsonova M.G. Green gram and black gram: prospects of cultivation and breeding in Russian Federation. *Vavilov Journal Genetics and Breeding*. 2018;22(80): 957-966. [in Russian] (Вишнякова М.А., Бурляева М.О., Самсонова М.Г. Маш и урд: перспективы возделывания и селекции в Российской Федерации. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(8):957-966). DOI: 10.18699/VJ18.438
- Vishnyakova M.A., Seferova I.V., Buravtseva T.V., Burlyaeva M.O., Semenova E.V., Filipenko G.I., Aleksandrova T.G., Egorova G.P., Yankov I.I., Bulyntsev S.V., Gerasimova T.V., Drugova E.V. VIR global collection of grain legume crop genetic resources: replenishment, conservation and studying: (methodological guidelines). 2nd ed. M.A. Vishnyakova (ed.). St. Petersburg: VIR; 2018. [in Russian] (Вишнякова М.А., Сеферова И.В., Буравцева Т.В., Бурляева М.О., Семенова Е.В., Филипенко Г.И., Александрова Т.Г., Егорова Г.П., Янков И.И., Булынец С.В., Герасимова Т.В., Другова Е.В. Коллекция мировых генетических ресурсов зерновых бобовых ВИР: пополнение, сохранение и изучение: (методические указания). 2-е изд. / под ред. М.А. Вишняковой. Санкт-Петербург: ВИР; 2018). DOI: 10.30901/978-5-905954-79-5
- Win K.S., Win K., Min T.D., Htwe N.M., Shwe T. Genotype by environment interaction and stability analysis of seed yield, agronomic characters in mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek) genotypes. *International Journal of Advanced Research*. 2018;6(3):926-934. DOI: 10.21474/IJAR01/6750

Прозрачность финансовой деятельности / The transparency of financial activities

Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

The authors declare the absence of any financial interest in the materials or methods presented.

Для цитирования / How to cite this article

Бурляева М.О., Гуркина М.В., Самсонова М.Г., Вишнякова М.А. Эколого-географическое изучение маша (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) из коллекции ВИР. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2021;182(1):131-141. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-131-141

Burlyaeva M.O., Gurkina M.V., Samsonova M.G., Vishnyakova M.A. Ecogeographic assessment of mung bean (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) from the collection of the Vavilov Institute (VIR). Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding. 2021;182(1):131-141. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-131-141

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы / The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work

Дополнительная информация / Additional information

Полные данные этой статьи доступны / Extended data is available for this paper at <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2021-1-131-141>

Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы / The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors, and their employer

Авторы одобрили рукопись / The authors approved the manuscript

Конфликт интересов отсутствует / No conflict of interest

ORCID

Burlyaeva M.O. <https://orcid.org/0000-0002-3708-2594>
 Gurkina M.V. <https://orcid.org/0000-0001-6169-6089>
 Samsonova M.G. <https://orcid.org/0000-0001-8170-1260>
 Vishnyakova M.A. <https://orcid.org/0000-0003-2808-7745>