

ISSN 1817-7204(Print)

ISSN 1817-7239(Online)

УДК 633.521:631.527.5

<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-4-440-451>

Поступила в редакцию 30.08.2021

Received 30.08.2021

И. А. Голуб, Е. Л. Андроник, Е. В. Иванова

*Институт льна, Национальная академия наук Беларуси, аг. Устье, Оршанский район,
Витебская область, Беларусь*

ОЦЕНКА ВАРИАБЕЛЬНОСТИ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПРИЗНАКОВ ЛЬНА МАСЛИЧНОГО МЕТОДАМИ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА

Аннотация: Применение компьютерных технологий позволяет оперативно анализировать и использовать предметную, технологическую, аналитическую и другую информацию. Биометрическая статистика в селекции растений направлена на оптимизацию (повышение эффективности, надежности, ускорение и удешевление) процесса выведения сортов сельскохозяйственных культур. Поэтому создание и изучение новых сортов льна масличного требует широкого внедрения современных компьютерных информационных технологий, которые обеспечивают информационное сопровождение селекционного процесса на всех его этапах. Методы многокритериальной математической статистики – факторный и кластерный анализы – в исследованиях использованы для комплексной оценки гибридных популяций льна масличного по элементам продуктивности (высота растений, техническая длина, длина соцветия, количество коробочек на растении, количество семян на растении, количество семян в коробочке, масса 100 семян, содержание масла в семенах). Оценена результативность отбора гибридов третьего цикла селекции, а также установлены отличительные особенности гибридных комбинаций в ряду поколений. В результате селекционно-технологического цикла анализа выделен 31 высокопродуктивный гибрид (или 6,9 %) для дальнейшего воспроизводства. Несмотря на высокий уровень селекционного дифференциала, выявленного у гибридных комбинаций в ходе смены поколений F_2 – F_3 , их реакция на отбор по признакам «количество семян в коробочке» и «масса 100 семян» была слабой, а отбор по количеству коробочек и семян с растения оказался малоэффективным. Используемый метод отбора позволяет выбраковывать слабопродуктивные растения, которые попали в худшие группы кластеров. Браковка методом многомерного анализа должна использоваться в более поздних поколениях (четвертого-пятого цикла селекции) по мере установления гомозиготности признаков. **Благодарности.** Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Качество и эффективность агропромышленного производства» на 2016–2020 годы, подпрограмма 6 «Земледелие и селекция».

Ключевые слова: лен масличный, гибриды, продуктивность, морфологический анализ, кластерный анализ, интенсивность отбора, реакция на отбор

Для цитирования: Голуб, И. А. Оценка вариабельности количественных признаков льна масличного методами многомерного анализа / И. И. Голуб, Е. Л. Андроник, Е. В. Иванова // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2021. – Т. 59, № 4. – С. 440–451. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-4-440-451>

Ivan A. Golub, Alena L. Andronik, Alena V. Ivanova

Institute of Flax, the National Academy of Sciences of Belarus, ag. Ustye, Orsha district, Vitebsk region, Belarus

SELECTION OF PRODUCTIVE HYBRID OIL FLAX PLANTS BY METHODS OF MULTIVARIATE ANALYSIS

Abstract: Use of computer technology allows to quickly analyze and use subject, technological, analytical and other information. Biometric statistics in plant breeding is aimed at optimizing (increasing efficiency, reliability, acceleration and cheapening) the process of breeding varieties of agricultural crops. Therefore, creation and study of new varieties of oil flax requires widespread introduction of modern computer information technologies that provide information support of the breeding process at all its stages. Methods of multi-criteria mathematical statistics - factor and cluster analyses - were used in the studies for a comprehensive assessment of hybrid populations of oil flax by productivity elements (plant height, technical length, inflorescence length, number of pods per plant, number of seeds per plant, number of seeds in a box, weight of 100 seeds, and oil content in seeds). Effectiveness of selection of hybrids of the third cycle of breeding has been evaluated, and also the distinctive features of hybrid combinations in a number of generations have been established. As a result of selection and technological cycle of the analysis, 31 highly productive hybrids (or 6.9%) were identified for further reproduction. Despite the high level of the breeding differential determined in hybrid combinations during the F_2 – F_3 generation change, their response to traits based selection according to “number of seeds in a box” and “weight of 100 seeds” was weak, and selection by the number of boxes and seeds from the plant turned out to be ineffective. The selection method used makes it possible to cull low-yielding plants that have fallen into the worst groups of clusters. Culling by the method of multidimensional analysis should be used in later generations (fourth-fifth cycle of selection) as homozygosity of traits is established.

Acknowledgments. The research was carried out as part of the state program of scientific research “Quality and Efficiency of Agro-industrial Production for 2016-2020”, subprogram 6 “Agriculture and breeding”.

Keywords: flax oil, hybrids, productivity, morphological analysis, cluster analysis, intensity of selection, response to selection

For citation: Golub I.A., Andronik A.L., Ivanova A.V. Selection of productive hybrid oil flax plants by methods of multivariate analysis. *Vesti Natsyonal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2021, vol. 59, no 4, pp. 440-451 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-4-440-451>

Введение. Создание и изучение новых сортов сельскохозяйственных культур требует широкого использования современных компьютерных информационных технологий. Они обеспечивают информационное сопровождение селекционного процесса на всех его этапах. Применение компьютерных технологий позволяет оперативно анализировать и использовать предметную, технологическую, аналитическую и другую информацию [1]. Биологические данные являются, как правило, сложными совокупностями, для адекватной оценки которых необходимо проводить статистическую обработку. При этом ставятся цели более достоверного предоставления данных, а также для удобства их интерпретации¹.

В селекции накоплен большой материал по изучению растений, но работа с ним имеет свои особенности. Нередко исследователи проверяют сотни и тысячи сортообразцов, чтобы найти те, которые имеют ценные генетические признаки и будут полезны для селекции [2]. Результаты, даже если они приведены в виде чисел, трудно упорядочить и классифицировать, так как их трактовка может быть неоднозначной. При решении большинства селекционных задач приходится иметь дело с многомерными совокупностями [3, 4]. Анализ многомерных выборок проводится с использованием методов многомерного статистического анализа: анализа главных компонент, факторного, кластерного, таксономического, множественного и пошагового регрессионного, канонического, дискриминантного и др. Довольно широко эти статистические методы используются для анализа признаков у зерновых культур [5], плодовых и ягодных культур² [6, 7], кормовых [8, 9], овощных [13, 14]. Однако сведения литературных источников по применению многомерного анализа в селекции льна не многочисленны [12, 13]. Поэтому благодаря бурному развитию в области вычислительных средств разработка и внедрение в практику селекционных и генетических исследований культуры новых методов анализа информации является на сегодняшний день важной задачей [14].

Факторный анализ – один из методов, позволяющих определить ведущие и второстепенные критерии взаимодействия селекционно-ценных признаков у льна, а также выделить наиболее значимые признаки. В селекционном плане факторный анализ дает возможность определить количество действующих факторов на изучаемые признаки и указать их относительную интенсивность; выявить признаковую структуру факторов, т.е. показать, какими признаками обусловлено действие фактора; долю влияния каждого из факторов на значение того или иного признака. Таким образом, «факторная селекция» расширяет возможности селекционера в отношении создания новых перспективных сортов.

Техника кластеризации применяется в самых разнообразных областях. J. A. Hartigan [15] дал прекрасный обзор многих опубликованных исследований, содержащих результаты, полученные методами кластерного анализа. Кластерный анализ используется при изучении генетического родства [16]; установлении изменчивости хозяйственно полезных признаков сортов растений под воздействием разнообразных условий среды [17]; при изучении связи элементов продуктивности с морозоустойчивостью у озимых зерновых культур [18]; дифференциации, идентификации, создании баз данных сортов сельскохозяйственных культур, на молекулярно-генетическом уровне [19]. Главное назначение кластерного анализа – сортировка множества исследуемых объектов и признаков на однородные в соответствующем понимании группы или кластеры. Это означает, что реша-

¹ Оплеухин А. А., Стрельцова Т. А. Применение дисперсионного и факторного анализа в обработке данных экологического сортоиспытания картофеля // Биоразнообразие, проблемы экологии Горного Алтая и сопредельных регионов: настоящее, прошлое, будущее: материалы II Междунар. конф., Горно-Алтайск, 20–24 сент. 2010 г. Горно-Алтайск, 2010. С. 213–217 ; Погиба С. П., Казанцева Е. В. Методы биометрического анализа в лесной селекции и генетике: учеб.-метод. пособие. М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2014. 45 с.

² Исачкин А. В. Использование компьютерных технологий при подборе родительских форм у плодовых культур // Плодоводство и ягодоводство России. 2005. Т. 14. С. 24–50.

ется задача классификации данных и выявления соответствующей структуры в ней. Достоинство кластерного анализа в том, что он позволяет производить сортировку объектов не по одному параметру, а по целому набору признаков, не накладывая особых ограничений на вид рассматриваемых объектов. Метод позволяет рассматривать множество исходных данных практически произвольной природы, что имеет большое значение, так как различие единиц измерений и масштаб измеряемых признаков в большинстве случаев оказывают влияние на результат анализа.

Цель исследования – провести комплексную оценку морфометрических признаков гибридных растений льна масличного в расщепляющемся поколении F_3 методами многомерного анализа и выделить высокопродуктивные элитные растения для дальнейшего воспроизводства.

Исследования имеют селекционное значение и представляются нам достаточно интересными и многообещающими. Следует отметить, что в схеме селекционного процесса по льну масличному такой метод отбора не является основным. Более важными, предшествующими такому математическому анализу, должны быть визуальная оценка в поле и браковка вегетирующих растений, не представляющих селекционную ценность и не отвечающих требованиям селекционера по архитектонике, устойчивости к вредителям и болезням, фенотипу, скороспелости и т.д., в предшествующем поколении гибридов. Многомерный анализ с последующей браковкой худших растений по группам кластера используется после лабораторного анализа семей по основным фенотипическим признакам.

Материалы и методы исследований. Исследования проводили в 2016–2017 гг. Растения гибридного питомника F_3 высевали на участке специального селекционного севооборота лаборатории селекции льна масличного Института льна Национальной академии наук Беларуси согласно методике закладки полевых опытов³. Во время вегетации проводили необходимые наблюдения за ростом и развитием гибридов и их браковку. После созревания и уборки в лабораторных условиях выполняли морфологический анализ и статистическую обработку полученных данных. Для выполнения поставленной цели были проведены предварительные исследования: в 2014 г. в результате межсортовых скрещиваний образцов льна масличного L-26 (Германия), Leane (Франция), Niagara (Испания) и Салют, Фокус (Беларусь) по диаллельной схеме 5×5 получено гибридное потомство (20 гибридных комбинаций); в 2015 г. изучены корреляционные взаимосвязи и выполнен контроль проявления морфологических признаков гибридных растений F_1 ; в 2016 г. в расщепляющейся популяции гибридов F_2 проведен комплексный анализ нижеприведенным методом (результаты опубликованы ранее [20]), в результате которого от общего количества гибридных форм были отобраны 14,2 % лучших по комплексу морфологических признаков растений, их воспроизводство было продолжено в 2017 г. в питомнике гибридов F_3 .

Факторный и кластерный анализы осуществляли в программе Statistica 10.0. Количество значимых факторов определяли по критерию Кайзера [1, 13]. Поиск значимых (информативных) признаков проводили путем вращения факторов (Varimax). Кластерный анализ для идентификации и отбора высокоурожайных гибридов льна масличного в выполняли в модуле Cluster Analysis методом k -средних по информативным признакам.

Оценку гибридов по морфометрическим показателям вели с одновременным анализом изучаемых показателей у родительских форм. Проводили расчет коэффициента наследуемости в широком смысле, определяли интенсивность отбора и реакцию гибридных популяций на отбор⁴. Для расчетов использовали пакет Microsoft Office Excel 2010.

Для оценки тесноты и направления связи признаков продуктивности использовали коэффициент корреляции (r)⁵. Коэффициент наследуемости в широком смысле рассчитывали путем отношения генотипической вариации к общей фенотипической по формуле (1)⁶:

³ Методические указания по селекции льна-долгунца / Всерос. науч.-исслед. ин-т льна; подгот.: Л. Н. Павлова [и др.]. М.: [б. и.], 2004. 44 с.

⁴ Исачкин А. В. Использование компьютерных технологий при подборе родительских форм у плодовых культур // Плодоводство и ягодоводство России. 2005. Т. 14. С. 24–50.

⁵ Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) : учебник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1973. 336 с.

⁶ Теоретические основы вычисления оценок эффективности отбора [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://studopedia.info/7-98537.html>. Дата доступа : 09.11.2016.

$$H^2w = \frac{V_g}{V_g + V_e} = \frac{V_g}{V_{ph}}, \quad (1)$$

где V_g – генотипическая вариация; V_{ph} – общая фенотипическая вариация; V_e – средовая вариация.

Интенсивность отбора признака определяли путем выражения селекционного дифференциала в единицах среднего квадратического отклонения данного признака (σ) по формуле (2):

$$i = \frac{S_d}{\sigma}, \quad (2)$$

где S_d – селекционный дифференциал; σ – среднее квадратическое отклонение.

Селекционный дифференциал рассчитывали по формуле (3):

$$S = X_e - X_p, \quad (3)$$

где X_e – среднее значение признака у отобранных форм; X_p – среднее значение признака в гибридной популяции.

Реакцию гибридных популяций на отбор (R) определяли по разнице между средним значением признака всей популяции (x_n) и средним его значением у отобранной части потомств в предшествующем поколении.

Результаты и их обсуждение. В результате изучения корреляционных связей у гибридных форм F_3 установлено, что изменчивость признака «количество семян на растении» на 87,6 % объясняется различиями в количестве коробочек на одном растении, а изменчивость признака «техническая длина» – на 73,8 % различиями в высоте растений (табл. 1). Отмечены достоверные положительные корреляции средней степени высоты растений с количеством коробочек на растении ($r = 0,438$) и количеством семян на растении ($r = 0,460$). Увеличение технической длины гибридных растений приводит к незначительному снижению масличности ($r = -0,587$).

Размах варьирования у гибридных форм F_3 по высоте растений составил 38 см, технической длине – 46 см, длине соцветия – 33 см, количеству коробочек на растении – 41 шт., количеству семян на растении – 392 шт., количеству семян в коробочке – 6 шт., массе 100 семян – 0,43 г, содержанию масла по комбинациям скрещиваний варьировало в пределах 38,7–43,9 %.

Т а б л и ц а 1. Корреляционные взаимосвязи (r) количественных признаков у гибридов F_3 льна масличного, 2017 г.

Table 1. Correlation of morphological features in F_3 hybrids of oil flax, 2017

Признак	Высота растений	Техническая длина	Длина соцветия	Количество коробочек на растении	Количество семян на растении	Количество семян в коробочке	Масса 100 семян
Техническая длина	0,859*						
Длина соцветия	-0,195*	-0,670*					
Количество коробочек на растении	0,403*	0,175*	0,249*				
Количество семян на растении	0,434*	0,215*	0,217*	0,936*			
Количество семян в коробочке	0,170*	0,157*	-0,055	-0,012	0,332*		
Масса 100 семян	0,219*	-0,050	0,413*	0,829*	0,892*	0,298*	
Масличность	-0,469*	-0,587*	0,443*	-0,184*	-0,202*	-0,119*	0,240*

*Достоверно на 95%-ном уровне значимости.

Метод факторного анализа использовали для выделения из многих переменных небольшого набора «синтетических», позволяющих более эффективно использовать его при оценке потомства F_3 гибридных комбинаций льна масличного. Название фактора условно и подбиралось по ассоциации с переменными, которые наиболее сильно связаны с фактором, т.е. имеют наибольшие «факторные нагрузки»⁷.

⁷ Факторный анализ [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.statsoft.ru/statportal>. Дата доступа : 10.03.2012 ; Митина О. В., Михайловская И. Б. Факторный анализ для психологов: учеб. пособие. М.: Психология, 2001. 169 с. ; Пахомова Л. Э. Факторный анализ показателей здоровья и поведения детей школьного возраста // Физ. культура: воспитание, образование, тренировка. 2004. № 6. С. 12–15.

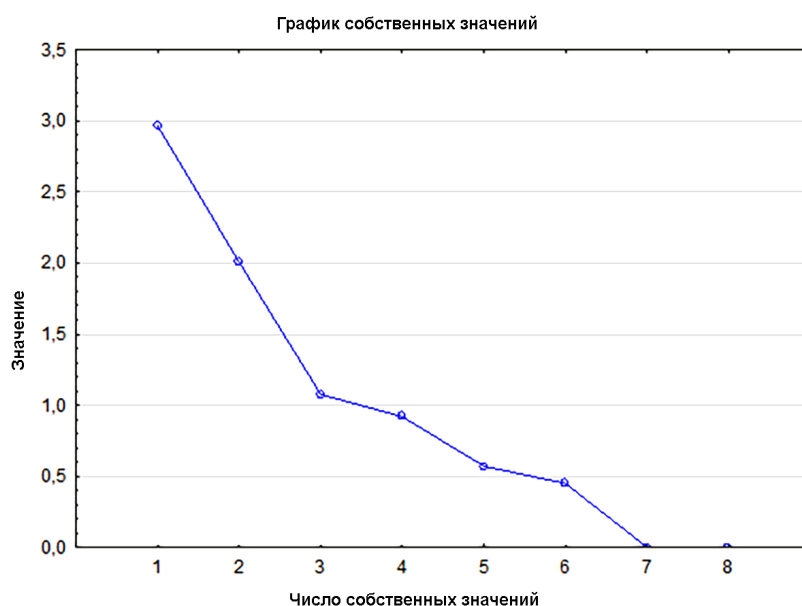


Рис. 1. График собственных значений факторов

Fig. 1. Factor eigenvalues plot

Количество факторов определяли через графическое изображение собственных чисел (рис. 1) (выделены 3 фактора).

В пространстве трех факторов значимые факторные нагрузки имели все изучаемые признаки (табл. 2). Суммарная доля факторов составила 75,65 % общей дисперсии, что свидетельствует об однозначном решении задачи определения правильного количества факторов. Наибольшее собственное значение (2,63) было зафиксировано у фактора 1, который несет в себе долю информации на уровне 32,82 % общей дисперсии. Значимые факторные нагрузки из всех входящих в него признаков получены по признакам «высота растений» (0,74), «техническая длина растений» (0,96) и «длина соцветия» (–0,77), а также массе 100 семян (–0,74). Главный признак фактора с максимальной нагрузкой – техническая длина. Признаки с противоположными нагрузками на один и тот же фактор взаимодействуют с этим фактором супротивным образом. Поэтому можно сказать, что увеличение технической длины растений будет способствовать снижению массы 100 семян и длины соцветия.

Т а б л и ц а 2. Факторные нагрузки количественных признаков в пространстве трех факторов (вращение Varimax), 2017 г.

T a b l e 2. Factor loads of features in the space of three factors (Varimax rotation), 2017

Признак	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Высота растений	0,74	0,47	0,00
Техническая длина	0,96	0,15	–0,02
Длина соцветия	–0,77	0,41	0,04
Количество коробочек на растении	0,07	0,94	0,11
Количество семян на растении	0,09	0,96	–0,14
Количество семян в коробочке	0,10	0,22	–0,72
Масса 100 семян	–0,74	–0,13	0,15
Содержание масла	0,02	–0,14	–0,74
Собственное значение (общая дисперсия)	2,63	2,31	1,12
Доля в общей дисперсии, %	32,82	28,85	13,98

П р и м е ч а н и е. Таблица составлена по результатам факторного анализа в программе Statistica 10.

Фактор 2 определяется действием основных признаков продуктивности – «количество коробочек на растении» (0,94) и «количество семян на растении» (0,96). Фактор является вторым по значимости (доля в общей дисперсии 28,85). Вклад фактора 3 в общую дисперсию составил 13,98 %. Он определяется действием также двух признаков с отрицательными нагрузками – количеством семян в коробочке ($-0,72$) и содержанием масла ($-0,74$).

Среди исследуемых селекционных признаков характеристик, относящихся к двум факторам одновременно, не обнаружено. Признаки, имеющие максимальные факторные нагрузки в пределах каждого фактора являются информативными, поэтому на них в первую очередь следует обращать внимание при оценке гибридного материала.

Для анализа гибридных растений льна масличного использовали кластерный анализ по информативным признакам (выявлены на основе факторного анализа). Основная задача в этом случае – распределить гибриды льна масличного по группам (кластерам) так, чтобы средние в них (для всех переменных) максимально возможно отличались друг от друга, и выделить перспективный продуктивный материал для дальнейшей селекции. Кластеризацию гибридного материала проводили в несколько приемов с разбиением всех полученных в результате отбора в полевых условиях гибридных растений на 2, 3 и 4 кластера.

Принимая во внимание результаты дисперсионного анализа при разделении растений гибридов на 2 и 3 кластера, а также амплитуды (и уровни значимости) F-статистики, отмечали, что кластеры гибридов не различались по содержанию масла, а признаки «количество семян на растении» и «количество коробочек на растении» являются главными при решении вопроса о распределении гибридов льна масличного (последнее прослеживалось и при делении на 4 кластера). Как второстепенные, но не менее важные признаки программа выделила «высоту растений» и «техническую длину». При делении на 4 кластера разнообразие гибридов льна масличного обеспечивали все информативные признаки (достоверно на 99%-ном уровне) (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Результаты дисперсионного анализа 4 кластеров, 2017 г.

T a b l e 3. Results of the variance analysis of 4 clusters, 2017

Признак	SS	df для классов	MS	df для растений	F-статистика	Значимость(p)
Высота растений	4689,8	3	16804,4	446	41,4901	0,000
Техническая длина	2168,9	3	35343,1	446	9,1231	0,000
Длина соцветия	539,3	3	9705,2	446	8,2609	0,000
Количество коробочек на растении	10569,0	3	3461,1	446	453,9803	0,000
Количество семян на растении	949030,4	3	156124,0	446	903,6996	0,000
Количество семян в коробочке	33,7	3	210,1	446	23,8250	0,000
Масса 100 семян	0,1	3	2,5	446	6,2144	0,000
Содержание масла	76,8	3	2094,7	446	5,4533	0,001

П р и м е ч а н и е. Таблица составлена по результатам дисперсного анализа кластеров в программе Statistica 10.

В результате выделен кластер из 31 гибрида льна масличного (табл. 4) с высокими признаками продуктивности (средним количеством семян на растении – 311,9 шт., коробочек на растении – 36,1 шт.). По сравнению со средней высотой растений, попавших в лучший по продуктивности кластер при разбивке на три кластера, высота растений в выделившемся кластере увеличилась на (на 4 см), а среднее значение длины соцветия при этом осталось на прежнем уровне (т.е. общая высота растений становилась больше за счет увеличения технической длины стебля).

Проведенный кластерный анализ поколения гибридов F_3 льна масличного позволил выделить 31 высокопродуктивный гибрид, или 6,9 % всех гибридов для воспроизводства очередного поколения (F_4).

Таблица 4. Описательные статистики в разрезе 4 кластеров

Table 4. Descriptive statistics in the context of 4 clusters, 2017

Признак	Средние значения $\pm \sigma$			
	Кластер 1 (167 гибридов)	Кластер 2 (146 гибридов)	Кластер 3 (106 гибридов)	Кластер 4 (31 гибрид)
Высота растений, см	61,77 \pm 5,73	65,16 \pm 6,61	57,16 \pm 6,29	66,9 \pm 5,30
Техническая длина, см	35,22 \pm 8,25	37,99 \pm 9,84	32,34 \pm 8,64	38,03 \pm 8,38
Длина соцветия, см	26,54 \pm 4,47	27,17 \pm 4,98	24,82 \pm 4,46	28,87 \pm 4,80
Количество коробочек на растении, шт.	21,63 \pm 2,33	26,58 \pm 2,83	17,63 \pm 2,04	36,16 \pm 5,63
Количество семян на растении, шт.	181,91 \pm 13,03	229,00 \pm 16,70	139,31 \pm 15,25	311,87 \pm 45,83
Количество семян в коробочке, шт.	8,46 \pm 0,67	8,65 \pm 0,58	7,95 \pm 0,84	8,66 \pm 0,62
Масса 100 семян, г	0,66 \pm 0,07	0,64 \pm 0,08	0,68 \pm 0,08	0,64 \pm 0,07
Содержание масла, %	41,57 \pm 2,26	41,70 \pm 2,13	41,05 \pm 2,14	40,20 \pm 1,85

Примечание. Таблица составлена по результатам факторного анализа в программе Statistica 10.

В табл. 5 приведен процент браковки и результативность отбора гибридов F_3 льна масличного в результате применения кластерного анализа. Изменчивость признаков продуктивности у гибридов льна масличного в разрезе комбинаций скрещиваний была различной, и для отображения степени превосходства гибридов, отобранных для дальнейшего воспроизводства, была рассчитана мера интенсивности отбора путем выражения селекционного дифференциала в единицах среднего квадратического отклонения данного признака. Наиболее продуктивные гибридные формы отобраны в 8 из 20 комбинаций скрещиваний (или у 44,4 % всех комбинаций). Наиболее интенсивно по признаку «количество коробочек на растении» были отобраны гибриды в комбинациях Leane \times Фокус ($i = 3,04$), Салют \times L-26 ($i = 2,87$), L-26 \times Leane ($i = 2,27$), L-26 \times Фокус ($i = 2,17$), Салют \times Leane ($i = 1,96$). Ввиду значимой высокой корреляционной зависимости количества коробочек на растении с количеством семян на растении ($r = 0,94$) интенсивность отбора по последнему признаку у перечисленных комбинаций была также наибольшей ($i = 3,41-2,14$).

Таблица 5. Результативность отбора высокопродуктивных гибридов F_3 льна масличного путем кластеризации, 2017 г., шт.Table 5. Effectiveness of the selection of highly productive F_3 hybrids of oil flax by clustering method, 2017

Комбинация скрещивания	Количество коробочек на растении			Количество семян на растении		
	$x_{\text{ср. исх. популяции}}$	$x_{\text{ср. отобр растений}}$	i	$x_{\text{ср. исх. популяции}}$	$x_{\text{ср. отобр растений}}$	i
L-26 \times Leane	25,12	31,00	2,27	220,32	311,00	3,41
L-26 \times Салют	26,60	31,75	1,52	236,12	285,50	1,87
L-26 \times Фокус	25,28	35,00	2,17	212,36	284,70	2,14
Leane \times L-26	32,32	42,00	1,16	268,80	358,57	1,29
Leane \times Фокус	21,28	35,00	3,04	184,36	306,00	3,29
Niagara \times L-26	31,56	35,90	0,84	268,40	308,72	0,90
Салют \times L-26	26,24	33,00	2,87	203,96	272,00	2,90
Салют \times Leane	25,32	32,50	1,96	190,40	284,00	2,43

Урожайность семян является комплексным признаком и результатом взаимодействия многих переменных величин из-за различных ассоциаций генов, которые имеются в разных популяциях и могут привести к совершенно различным взаимоотношениям. Для установления возможности улучшения исследуемых селекционных признаков провели расчет их дисперсий, выделяя из общей фенотипической вариации генетическую и внешнесредовую, затем рассчитали коэффициент наследуемости в широком смысле, который служит мерой доли генотипически обусловленной изменчивости в общем фенотипическом варьировании признака.

Полученные данные (табл. 6) свидетельствуют о том, что генетические варианты признаков у гибридов третьего цикла селекции «высота растений» ($H^2 = 0,53$), «техническая длина» ($H^2 = 0,52$), «количество коробочек на растении» ($H^2 = 0,50$) и «количество семян на растении»

($H^2 = 0,54$) делают возможным их улучшение путем индивидуального отбора. Большого успеха в селекции признаков масса 100 семян ($H^2 = 0,48$), длина соцветия ($H^2 = 0,29$) и масличность ($H^2 = 0,36$) можно добиться путем оптимизации условий выращивания.

Т а б л и ц а 6. Коэффициент наследуемости признаков у гибридов F_3 льна масличного, 2017 г.

Table 6. Coefficient of heritability of traits in F_3 hybrids of oil flax, 2017

Показатель	Высота растений	Техническая длина	Длина соцветия	Количество коробочек на растении	Количество семян на растении	Количество семян в коробочке	Масса 100 семян	Масличность
σ_e^2	47,87	83,55	22,82	31,25	2461,37	0,54	0,01	4,84
σ_{ph}^2	22,61	39,96	16,28	15,58	1133,83	0,42	0,00	3,08
H^2	0,53	0,52	0,29	0,50	0,54	0,22	0,48	0,36

«Количество коробочек на одном растении» – один из основных признаков, по которому ведется отбор элитных растений льна масличного. У исследуемых комбинаций скрещиваний льна масличного в ходе смены поколений этот показатель варьировал по годам, причем достоверные отличия получены у гибридов первого поколения как с гибридами поколения F_2 (с вероятностью $p = 0,00060$), так и F_3 (с вероятностью $p = 0,00006$) (табл. 7). Причинами такой связи могут являться как эффект гетерозиса гибридов первого поколения, который существенно снижался в расщепляющемся поколении F_2 , так и значительные средовые различия (некоторая неоднородность густоты посева, внесения удобрений и др.), которые приводят к снижению зависимости морфологических признаков потомства от таковой у родителей. В этом случае прямой отбор для улучшения этих признаков в расщепляющейся популяции может быть неэффективным (потомство от растений со слабо развитым соцветием и обсемененностью коробочки может впоследствии стать продуктивным сортом, и наоборот). Достоверные различия гибридных комбинаций по количеству коробочек на растении в поколениях F_2 и F_3 не установлены.

Несмотря на то, что гибриды, отобранные для воспроизводства поколения F_3 , превосходили по признакам продуктивности средние значения исходной популяции F_2 , в целом отбор по основным признакам оказался отрицательным (рис. 2).

Т а б л и ц а 7. Дисперсионный анализ поколений гибридов льна масличного по количеству коробочек с одного растения, 2015–2017 гг.

Table 7. Variance analysis of generations of oil flax hybrids according to the number of boxes per plant, 2015–2017

Признак	SS Effect	df SS Effect	SS Error	df SS Error	MS Error	F	p
Между F_1 и F_3	2257,0	1	3650,4	34	107,4	21,02	0,000059
Между F_1 и F_2	1614,8	1	3836,6	34	112,8	14,3	0,000600
Между F_2 и F_3	53,6	1	770,2	34	22,6	2,4	0,133133

Количество коробочек на растении в зависимости от комбинации скрещиваний у гибридов третьего поколения снизилось на 7,18–47,06 %, а количество семян с растения – на 39,87–66,85 %. Положительную реакцию на отбор (R) гибридов можно наблюдать в некоторых комбинациях по признакам «количество семян в коробочке» – L-26 × Leane ($R = 0,71$), L-26 × Niagara ($R = 0,51$), L-26 × Фокус ($R = 0,24$), Leane × Фокус ($R = 0,44$), Niagara × L-26 ($R = 0,18$), Niagara × Салют ($R = 0,41$), Салют × Фокус, Фокус × L-26 ($R = 0,19$) и «масса 100 семян» – L-26 × Leane ($R = 0,03$), Niagara × Leane и Niagara × Салют ($R = 0,02$).

В табл. 8 приведены коэффициенты корреляции, показывающие взаимосвязь признаков продуктивности в ряду поколений. Так, между продуктивностью гибридов второго и третьего цикла селекции получена существенная корреляционная связь по всем признакам продуктивности (исключение – количество семян на растении). Первое поколение с каждым последующим обнаруживает все более тесные связи. Однако сила этих связей не велика и не достоверна, поэтому прогноз селекционной ценности комбинаций может быть ненадежным.

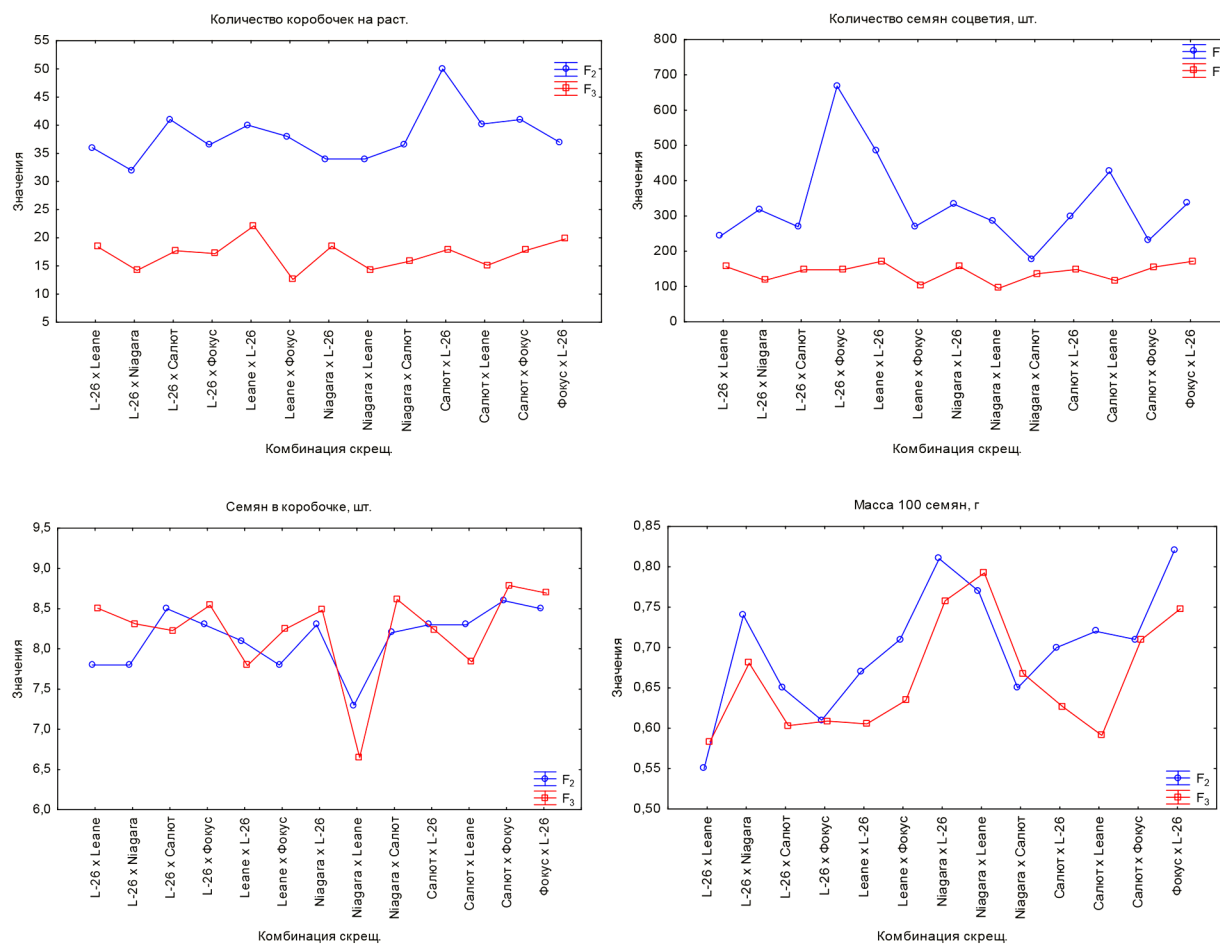


Рис. 2. Реакция на отбор гибридов льна масличного по признакам продуктивности:
 F₂ – средние значения признаков отобранных элитных растений в расщепляющей исходной популяции;
 F₃ – средние значения продуктивности потомства, 2016–2017 гг.

Fig. 2. Response to selection of oil flax hybrids based on productivity characteristics:
 F₂ – average values of characteristics of selected elite plants in the splitting initial population;
 F₃ – average values of offspring productivity, 2016-2017

Неэффективность отбора по количеству коробочек и семян с растения в поколении F₂ связано с индивидуальными генетическими особенностями родительских форм, ведь ранее нами установлено преобладание в наследовании этих признаков доминирования и сверхдоминирования родительских компонентов скрещивания. В случае доминирования отбор будет не эффективен по фенотипу, так как практически невозможно различить растения в гомо- и гетерозиготном состоянии, а при сверхдоминировании отбор лучших генотипов предпочтительно осуществлять в более поздних поколениях (F₄–F₆) с обязательным испытанием по потомству.

Таблица 8. Корреляционная связь продуктивности гибридов в ряду поколений, 2015–2017 гг.
 Table 8. Correlation between the productivity of hybrids in a number of generations, 2015-2017

Корреляционная пара	Признак продуктивности			
	количество коробочек на растении	количество семян на растении	количество семян в коробочке	масса 100 семян
Гибриды F ₁ – F ₂	0,153	0,165	–0,044	0,159
Гибриды F ₁ – F ₃	0,338	0,197	0,249	0,353
Гибриды F ₂ – F ₃	0,562*	0,420	0,552*	0,478*

*Достоверно на 95%-ном уровне значимости.

Выводы

Использованный в исследованиях многомерный анализ позволяет эффективно выбраковать слабопродуктивные растения. В результате селекционно-технологического цикла анализа расщепляющейся популяции F_3 многомерными методами (факторным и кластерным) отобраны лучшие по признакам продуктивности гибридные растения льна масличного (6,9 %).

Исследованиями установлено, что генетические варианты признаков «высота растений» ($H^2 = 0,53$), «техническая длина» ($H^2 = 0,52$), «количество коробочек на растении» ($H^2 = 0,50$) и «количество семян на растении» ($H^2 = 0,54$) гибридов льна масличного третьего цикла селекции делают возможным их улучшение путем индивидуального отбора. Наиболее интенсивно по признаку «количество коробочек на растении» были отобраны гибриды в следующих комбинациях: *Leane* × *Фокус* ($i = 3,04$), *Салют* × *L-26* ($i = 2,87$), *L-26* × *Leane* ($i = 2,27$), *L-26* × *Фокус* ($i = 2,17$), *Салют* × *Leane* ($i = 1,96$).

У гибридных комбинаций льна масличного в ходе смены поколений F_2 – F_3 был выявлен высокий уровень селекционного дифференциала. Однако реакция гибридных комбинаций на отбор по основным признакам продуктивности (количество семян в коробочке и масса 100 семян) была слабой, а отбор по количеству коробочек и семян с растения оказался неэффективным. Это связано с индивидуальными генетическими особенностями родительских форм и преобладанием в наследовании вышеперечисленных признаков доминирования и сверхдоминирования родительских компонентов.

Таким образом, отбор из ранних поколений гибридов льна масличного будет успешнее при более значительных различиях исходных родительских форм по продуктивности, а браковка методами многомерного анализа должна использоваться в более поздних поколениях (четвертого-пятого цикла селекции) по мере установления гомозиготности признаков.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Качество и эффективность агропромышленного производства» на 2016–2020 годы, подпрограмма 6 «Земледелие и селекция».

Список использованных источников

1. Структура комплекса информационного обеспечения селекционного процесса тритикале / И. Г. Гребенникова [и др.] // Новейшие направления развития аграрной науки в работах молодых ученых : тр. IV Междунар. науч. конф. молодых ученых, посвящ. 40-летию СО Россельхозакадемии, 22–23 апр. 2010 г., пос. Краснообск : в 2 ч. / Рос. акад. с.-х. наук, Сиб. регион. отд.-ние ; под ред. В. К. Каличкина. – Новосибирск, 2010. – Ч. 1. – С. 247–249.
2. *Мартынов, С. П.* Биометрические подходы к оптимизации селекционного процесса / С. П. Мартынов // Молекулярная и прикладная генетика : сб. науч. тр. / Ин-т генетики и цитологии НАН Беларуси. – Минск, 2009. – Т. 9. – С. 49–60.
3. *Андроник, Е. Л.* Создание базы данных «Коллекция льна» / Е. Л. Андроник, Е. В. Иванова // Молодежь в науке – 2007 : прил. к журн. «Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі» : в 4 ч. / Нац. акад. наук Беларусі, Совет молодых ученых НАН Беларусі. – Минск, 2008. – Ч. 4 : Серия аграрных наук. – С. 166–169.
4. О необходимости создании компьютерной базы данных генеалогии сортов льна белорусской селекции / Д. Е. Портянкин [и др.] // Защита растений : сб. науч. тр. / Белорус. науч.-исслед. ин-т защиты растений. – Минск, 1998. – Вып. 22. – С. 150–158.
5. *Yau, S. K.* Cluster analysis of bread wheat lines grown in diverse rain fed environment / S. K. Yau, G. Ortis-Ferrara, J. P. Srivastava // Barley a. Wheat Newsletter. – 1992. – Vol. 8, N2. – P. 31–35.
6. *Коваленко, Н. Н.* Химический состав плода вишен как классификационный признак при изучении исходного материала для селекции / Н. Н. Коваленко, Ю. А. Волчков // Плодоводство и виноградарство Юга России. – 2011. – № 12 (6). – С. 30–42.
7. *Щеглов, С. Н.* Межсортовая изменчивость признаков корневой системы земляники / С. Н. Щеглов // Науч. журн. КубГАУ. – 2005. – № 11. – С. 186–192.
8. *Власов, М. В.* Внутренняя гетерогенность образцов коллекции амаранта как предпосылка его селекции : дис. ... канд. биол. наук : 06.01.05 / М. В. Власов. – Краснодар, 2002. – 136 л.
9. *Мельничук, А. Д.* Определение генетической разнородности сортов картофеля и подбор родительских пар для гибридизации по результатам факторного анализа / А. Д. Мельничук // Картофельководство : сб. науч. тр. / Белорус. науч.-исслед. ин-т картофелеводства. – Минск, 2000. – Вып. 10. – С. 63–73.
10. *Кильчевский, А. В.* Дискриминантный анализ накопления 137Cs овощными растениями / А. В. Кильчевский, А. Д. Мельничук, А. В. Крук // Агрэкологія : сб. науч. тр. / Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2005. – Вып. 2 : Экологические основы плодовоовощеводства. – С. 124–129.

11. Ротару, Л. И. Применение факторного и кластерного анализов для создания генотипов томата со стабильной продуктивностью / Л. И. Ротару, Г. А. Лупашку // Современные тенденции в селекции и семеноводстве овощных культур. Традиции и перспективы : II Междунар. науч.-практ. конф., 2–4 авг. 2010 г. / Всерос. науч.-исслед. ин-т селекции и семеноводства овощ. культур ; под ред. В. Ф. Пивоварова. – М., 2010. – Т. 1. – С. 462–470.
12. Брач, Н. Б. Факторный анализ доноров хозяйственно ценных признаков из коллекции льна ВИР / Н. Б. Брач, Е. А. Пороховинова, И. Я. Шаров // Современные проблемы льноводства на Северо-Западе РФ : сб. материалов науч.-практ. конф., Псков, 4–6 июля 2000 г. / Псков. науч.-исслед. ин-т сел. хоз-ва. – Псков, 2000. – С. 29–30.
13. Иванова, Е. В. Информативность показателей количественных признаков у льна-долгунца и минимизация их оценки / Е. В. Иванова, Е. Л. Андроник // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2012. – № 2. – С. 40–45.
14. Руанет, В. В. Использование искусственных нейронных сетей для решения частных задач генетики и селекции : дис. ... канд. биол. наук : 03.00.15 / В. В. Руанет. – М., 2003. – 108 л.
15. Hartigan, J. A. Clustering algorithms / J. A. Hartigan. – New York : Wiley, 1975. – 351 p.
16. Мартынов, С. П. Кластерный анализ саратовских сортов яровой пшеницы по коэффициентам родства / С. П. Мартынов // Цитология и генетика. – 1989. – Т. 23, № 4. – С. 37–43.
17. Griffing, B. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems / B. Griffing // Austral. J. of Biol. Sciences. – 1956. – Vol. 9, N 4. – P. 463–493. <https://doi.org/10.1071/bi9560463>
18. Перуанский, Ю. В. Кластеризация по элементам продуктивности перспективных форм озимой пшеницы различной морозостойкости / Ю. В. Перуанский, Т. Л. Тажибаева // Селекция и урожай : сб. науч. тр. / Каз. науч.-исслед. ин-т земледелия. – Алма-Ата, 1988. – С. 143–153.
19. Чеботарь, С. В. Дифференциация, идентификация и создание базы данных сортов *T. aestivum* L. украинской селекции на основе STMS-анализа / С. В. Чеботарь, Ю. М. Сиволап // Цитология и генетика. – 2001. – Т. 35, № 6. – С. 18–27.
20. Андроник, Е. Л. Отбор индивидуальных высокопродуктивных растений льна масличного в гибридной популяции F_2 / Е. Л. Андроник, Е. В. Иванова // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2017. – № 4. – С. 114–117.

References

1. Grebennikova I. G., Aleinikov A. F., Stepochkin P. I., Chanyshev D. I. Structure of the complex of information support of the selection process of triticale. *Noveishie napravleniya razvitiya agrarnoi nauki v rabotakh molodykh uchennykh: trudy IV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchennykh, posvyashchennoi 40-letiyu SO Rossel'khozakademii (22–23 aprelya 2010 g., pos. Krasnoobsk)* [The latest directions for the development of agrarian science in the works of young scientists: proceedings of the IV International scientific conference of young scientists dedicated to the 40th anniversary of the Siberian Branch of the Russian Agricultural Academy (April 22-23, 2010, Krasnoobsk village)]. Novosibirsk, 2010, pt. 1, pp. 247-249 (in Russian).
2. Martynov S. P. Biometric approaches to optimizing the selection process. *Molekulyarnaya i prikladnaya genetika: sbornik nauchnykh trudov* [Molecular and applied genetics: a collection of scientific works]. Minsk, 2009, vol. 9, pp. 49-60 (in Russian).
3. Andronik E. L., Ivanova E. V. Creation of the «Flax Collection» database. *Molodezh' v nauke - 2007. Ch. 4. Seriya agrarnykh nauk* [Youth in science - 2007. Part 4: Series of agrarian sciences]. Minsk, 2008, pp. 166-169 (in Russian).
4. Portyankin D. E., Khomutovskii P. R., Karochan V. N., Ivashko L. V. On the need to create a computer database of genealogy of flax varieties of Belarusian breeding. *Zashchita rastenii: sbornik nauchnykh trudov* [Plant protection: a collection of scientific works]. Minsk, 1998, iss. 22, pp. 150-158 (in Russian).
5. Yau S. K., Ortis-Ferrara G., Srivastava J. P. Cluster analysis of bread wheat lines grown in diverse rain fed environment. *Barley and Wheat Newsletter*, 1992, vol. 8, no. 2, pp. 31-35.
6. Kovalenko N. N., Volchkov Yu. A. Chemical composition of fruits of species far eastern cherries as a classification criterion at the study of source material for breeding. *Plodovodstvo i vinogradarstvo Yuga Rossii = Fruit Growing and Viticulture of South Russia*, 2011, no. 12 (6), pp. 30-42 (in Russian).
7. Shcheglov S. N. Intervarietal variability of features of the root system of strawberries. *Nauchnyi zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*, 2005, no. 11, pp. 186-192 (in Russian).
8. Vlasov M. V. *Internal heterogeneity of samples of the amaranth collection as a prerequisite for its selection*. Ph.D. Thesis. Krasnodar, 2002. 136 p. (in Russian).
9. Mel'nichuk A. D. Determination of genetic heterogeneity of potato varieties and selection of parent pairs for hybridization based on the results of factor analysis. *Kartofelevodstvo: sbornik nauchnykh trudov* [Potato growing: collection of scientific papers]. Minsk, 2000, iss. 10, pp. 63-73 (in Russian).
10. Kilchevsky A. V., Mel'nichuk A. D., Kruk A. V. Discriminant analysis of accumulation ^{137}Cs by vegetable plants. *Agroekologiya: sbornik nauchnykh trudov. Vyp. 2. Ekologicheskie osnovy plodoovoshchevodstva* [Agroecology: collection of scientific papers. Iss. 2. The ecological foundations of horticulture]. Gorki, 2005, pp. 124-129 (in Russian).
11. Rotaru L. I., Lupashku G. A. The use of factor and cluster analyses to create genotypes of tomato with stable productivity. *Sovremennye tendentsii v selektsii i semenovodstve ovoshchnykh kul'tur. Traditsii i perspektivy: II Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, 2–4 avgusta 2010 g.* [Current trends in vegetable breeding and seed production. Traditions and perspectives: II International scientific-practical conference, August 2–4, 2010]. Moscow, 2010, vol. 1, pp. 462-470 (in Russian).

12. Brach N. B., Porokhovinova E. A., Sharov I. Ya. Factor analysis of donors of economically valuable features from the collection of flax of VIR. *Sovremennye problemy l'novodstva na Severo-Zapade RF : sbornik materialov nauchno-prakticheskoi konferentsii, Pskov, 4-6 iyulya 2000 g.* [Modern problems of flax growing in the North-West of the Russian Federation: collection of materials of the scientific-practical conference, Pskov, July 4-6, 2000]. Pskov, 2000, pp. 29-30 (in Russian).

13. Ivanova E. V., Andronik E. L. Informational content of indicators of quantitative signs in long-fiber flax and minimization of their estimation. *Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*, 2012, no. 2, pp. 40-45 (in Russian).

14. Ruanet V. V. *Using artificial neural networks to solve private problems of genetics and selection*. Ph.D. Thesis. Moscow, 2003. 108 p. (in Russian).

15. Hartigan J. A. *Clustering algorithms*. New York, Wiley, 1975. 351 p.

16. Martynov S. P. Clyster analysis of the Saratov spring wheat cultivars by the parentage coefficients. *Tsitologiya i genetika = Cytology and Genetics*, 1989, vol. 23, no. 4, pp. 37-43 (in Russian).

17. Griffing B. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences*, 1956, vol. 9, no. 4, pp. 463-493. <https://doi.org/10.1071/bi9560463>

18. Peruanskii Yu. V., Tazhibaeva T. L. Clustering by productivity elements of promising forms of winter wheat of various frost resistance. *Selektsiya i urozhai: sbornik nauchnykh trudov* [Selection and harvest: collection of scientific papers]. Alma-Ata, 1988, pp. 143-153 (in Russian).

19. Chebotar' S. V., Sivolap Yu. M. Differentiation, identification and development of database of *T. aestivum* L. varieties of Ukrainian selection on the basis of STMS-analysis. *Tsitologiya i genetika = Cytology and Genetics*, 2001, vol. 35, no. 6, pp. 18-27 (in Russian).

20. Andronik E. L., Ivanova E. V. Selection of individual highly-productive plants of oil flax in hybrid population F₂. *Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*, 2017, no. 4, pp. 114-117 (in Russian).

Информация об авторах

Голуб Иван Антонович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, директор Института льна Национальной академии наук Беларуси (ул. Центральная, 27, 211003 аг. Устье, Оршанский район, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: institut_len@tut.by

Андроник Елена Леонидовна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующая лаборатории селекции льна масличного, Институт льна Национальной академии наук Беларуси (ул. Центральная, 27, 211003 аг. Устье, Оршанский район, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: andronik11@rambler.ru

Иванова Елена Владимировна – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории селекции льна масличного, Институт льна Национальной академии наук Беларуси (ул. Центральная, 27, 211003 аг. Устье, Оршанский район, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: iva271079ivanova@yandex.ru

Informational about the author

Ivan A. Golub - Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Agricultural), Professor. Institute of Flax of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Central Str., ag. Ustye 211003, Orsha district, Vitebsk region, Republik of Belarus). E-mail: institut_len@tut.by

Alena L. Andronik - Ph.D. (Agricultural), Associate professor. Institute of Flax of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Central Str., ag. Ustye 211003, Orsha district, Vitebsk region, Republik of Belarus). E-mail: andronik11@rambler.ru

Alena V. Ivanova - Ph.D (Agricultural). Institute of Flax of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Central Str., ag. Ustye 211003, Orsha district, Vitebsk region, Republik of Belarus). E-mail: iva271079ivanova@yandex.ru