

Научная статья

УДК 633.522:631.527

DOI: 10.30901/2658-6266-2023-4-02



Использование метода главных компонент в ранжировании образцов конопли посевной *Cannabis sativa* L. по жирнокислотному составу масла для ускорения селекции

С. В. Григорьев¹, К. В. Илларионова², Л. П. Подольная¹, Т. В. Шеленга¹

¹ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Сергей Владимирович Григорьев, s.grigoryev@vir.nw.ru

Применение современных методов оценки генотипического разнообразия селекционного материала весьма эффективно в селекции сельскохозяйственных растений. Интерпретация результатов изучения биохимического состава масла семян образцов коллекции конопли посевной *Cannabis sativa* L. является одним из важных этапов селекции сортов культуры актуального масличного направления, поскольку конопля обладает уникальным среди масличных культур России набором жирных кислот (ЖК) масла. Исследование закономерностей формирования жирнокислотного состава (ЖКС) масла, факторных нагрузок содержания кислот, в случае сортов масличного направления использования, имеет научную значимость и практическую ценность для решения задач эффективного ускорения современной селекции на повышение качества и биологической активности масла. Применение анализа главных компонент может явиться эффективным инструментом в достижении этой цели. Изучение ЖКС масла семян 25 образцов конопли посевной *Cannabis sativa* L. коллекции ВИР было проведено во Всероссийском институте генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова. Образцы конопли среднерусского экотипа, представленные местными, промышленными сортами и селекционным материалом, были выращены на лугово-черноземных почвах в Пензенской области в зоне Среднего Поволжья России с умеренно-континентальным климатом. ЖКС масла семян изучали с помощью газожидкостной хроматографии с масс-спектрометрией на хроматографе Agilent 6850. Полученные результаты обрабатывали с помощью программного обеспечения UniChrom и AMDIS. Высокое содержание омега-3 стеаридоновой ЖК было обнаружено у образцов: к-205, Украина (1,23%); к-168, Россия (0,87%); α -линоленовой: к-168, Россия (0,82%); к-224, ГДР (0,39%); линолевой: к-154, Россия (67,29%); к-360, Россия (66,24%); к-150, Россия (64, 58%); γ -линоленовой: к-88, Россия (2,43%); к-211, ГДР (1,92%). Установлено, что формирование ЖКС масла семян конопли – многофакторный процесс. Главный фактор определил 27,8% изменчивости. Было выявлено наличие положительных и отрицательных факторных нагрузок. Наибольшую факторную нагрузку в дисперсии комплекса признаков ЖКС масла, определяемой главным фактором, несёт линолевая кислота (+0,73). Отрицательные по отношению к этой кислоте нагрузки выявлены для миристиновой (-0,81), лауриновой (-0,78), пальмитолеиновой (-0,72) и олеиновой (-0,72) кислотам. Содержание биологически активной омега-6 диненасыщенной линолевой кислоты отрицательно связано с содержанием омега-9 мононенасыщенной олеиновой, а также с содержанием полиненасыщенных омега-6 γ -линоленовой, омега-3 стеаридоновой и омега-3 α -линоленовой кислот. Полученная информация может быть использована для подбора образцов с оптимальным ЖКС в селекции сортов конопли посевной масличного направления использования.

Ключевые слова: биологически активные вещества растительных масел, исходный селекционный материал, латентные взаимозависимости переменных, критерий «каменистая осыпь», факторные нагрузки

Благодарности: Работа проводилась в рамках тематического плана ВИР по проекту № FGEM-2022-0005 «Растительные ресурсы масличных и прядильных культур ВИР как основа теоретических исследований и их практического использования».

Для цитирования: Григорьев С.В., Илларионова К.В., Подольная Л.П., Шеленга Т.В. Использование метода главных компонент в ранжировании образцов конопли посевной *Cannabis sativa* L. по жирнокислотному составу масла для ускорения селекции. *Биотехнология и селекция растений*. 2023;6(4):6-13. DOI: 10.30901/2658-6266-2023-4-02

Прозрачность финансовой деятельности. Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их местам работы.

© Григорьев С.В., Илларионова К.В., Подольная Л.П., Шеленга Т.В., 2023

Original article

DOI: 10.30901/2658-6266-2023-4-o2

The use of the principal component analysis in ranking hemp (*Cannabis sativa L.*) accessions according to the seed oil fatty acid composition for crop improvement

Sergei V. Grigoriev¹, Ksenia V. Illarionova², Larisa P. Podolnaya¹, Tatiana V. Shelenga¹

¹N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), St. Petersburg, Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Sergei V. Grigoriev, s.grigoryev@vir.nw.ru

The use of modern methods for assessing the genotypic diversity of breeding material is effective in crop improvement. Interpretation of the results of a study of the fatty acid biochemical composition in seeds of hemp (*Cannabis sativa L.*) accessions is one of important stages in breeding oilseed varieties, since hemp possesses a unique fatty acid composition (FAC) among other oilseed crops in Russia. Studies of regularities in formation of seed oil FAC and the principal component analysis (PCA) of fatty acid contents have scientific significance and practical value for ensuring the acceleration of oilseed variety breeding aimed at improving quality and biological activity of oil. The use of PCA can be an effective in achieving this goal. The fatty acid profile of oil has been evaluated at the N.I. Vavilov Institute of Plant Genetic Resources in 25 hemp accessions from the VIR hemp collection. Local and industrial hemp varieties and breeding material of the Middle Russian ecotype were grown in Penza Province with a temperate continental climate on meadow-black soils of the Middle Volga Region of Russia. The seed oil FAC was studied using gas-liquid chromatography with mass spectrometry on an Agilent 6850 chromatograph. The results were processed using the UniChrom and AMDIS software. High content of omega-3 stearidonic fatty acid was found in accessions k-205 from Ukraine (1.23%) and k-168 from Russia (0.87%); that of α -linolenic acid in k-168 from Russia (0.82%) and k-224 from GDR (0.39%); of linoleic acid in k-154 (67.29%), k-360 (66.24%), and k-150 (64.58%) (all three from Russia); of γ -linolenic acid in k-88 from Russia (2.43%) and k-211 from GDR (1.92%). It has been established that the formation of hemp seed oil FAC is a multifactorial process. The main factor determined 27.8% of the variability. The presence of both positive and negative factor loadings was revealed. The highest factor loading for the variance of a complex of characters of the oil FAC is on the main factor, i.e. linoleic acid (+0.73). In relation to this acid, negative loadings were detected for myristic acid (-0.81), lauric acid (-0.78), palmitoleic acid (-0.72), and oleic acid (-0.72). The content of bioactive omega-6 diunsaturated linoleic acid was negatively associated with the content of omega-9 monounsaturated oleic acid, as well as with the content of polyunsaturated omega-6 γ -linolenic, omega-3 stearidonic, and omega-3 α -linoleic acids. The obtained information can be used for identifying accessions with the optimal FAC for their involvement in breeding oilseed hemp varieties.

Keywords: bioactive substances in vegetable oils, source breeding material, latent interdependent variables, scree plot criteria, factor loadings

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the Thematic Plan of VIR under Project No. FGEM-2022-0005 “Plant resources of oilseed and fiber crops at VIR as the basis for theoretical research and their practical use”.

For citation: Grigoriev S.V., Illarionova K.V., Podolnaya L.P., Shelenga T.V. The use of the principal component analysis in ranking hemp (*Cannabis sativa L.*) accessions according to the seed oil fatty acid composition for crop improvement. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2023;6(4):6-13. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2023-4-o2

Financial transparency. The authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors, and their employer.

© Grigoriev S.V., Illarionova K.V., Podolnaya L.P., Shelenga T.V., 2023

Введение

Промышленное возделывание технической конопли (*Cannabis sativa* L.) имеет социальную и экономическую значимость, поскольку получаемые из этого растения продукты являются источниками ряда биологически активных веществ, используются для питания, производства текстиля, одежды, биоразлагаемого пластика, бумаги, краски, биотоплива и в качестве кормов для животных (Cerino et al., 2021; Farinon et al., 2020; Grigoriev et al., 2020). Семена, растительное масло, волокно входят в перечень товаров, ныне производимых в России. Нормы показателей качества растительного масла семян конопли регламентируются государственным стандартом РФ (State Standard 8989-73, 2011) и Техническим регламентом на масложировую продукцию ТР ТС 024/2011 (Technical Regulations of the Customs Union TR CU 024/2011). Двадцать три сорта и гибрида промышленной конопли допущены к возделыванию в России (State Register, 2023). Проводится скрининг образцов конопли по биохимическому составу соцветий (Grigoryev, Illarionova, 2020) и содержанию функциональных пищевых ингредиентов семян (Grigoriev et al., 2020). Биологически активные омега-6 и омега-3 жирные кислоты (ЖК) растительных масел являются одним из факторов, определяющих качество функциональных продуктов питания (Aslam et al., 2020; Harwood, 2023). Исследование закономерностей формирования жирнокислотного состава (ЖКС) имеет научную значимость и практическую ценность в решении задач эффективного ускорения селекции масличной культуры на повышение качества и биологической активности масла. Анализ главных компонент (Principal Component Analysis, PCA) – эффективный инструмент в достижении этих целей. PCA используют для выявления латентных взаимозависимостей и интерпретации информации о структуре признаков, что позволяет выделить факторы отражающие корреляции переменных и определить те из них, которые могут быть наиболее значимыми для оценки образцов. В ряде работ с различными культурами этот метод анализа был успешно применён для обработки данных, полученных в экспериментах (Brutch, 1989; Podolnaya et al., 1999; Perchuk et al., 2023).

Повышение качества производимых в Российской Федерации продуктов – одна из приоритетных задач обеспечения продовольственной безопасности. Создание биофункциональных продуктов, оптимизация содержания биологически активных веществ в растительных маслах, в частности, ненасыщенных и полиненасыщенных ЖК, которые эффективны в снижении сердечно-сосудистых заболеваний, модулировании ключевых биологических функций энергетического метаболизма человека – актуальное инновационное направление в современных исследованиях.

В работе была поставлена задача изучить ЖКС масла образцов конопли среднерусского экотипа коллекции ВИР и методом анализа главных компонент выделить

ЖК, наиболее значимые для характеристики образцов в селекции конопли масличного направления использования.

Материал и методы

Изучение ЖКС масла семян двадцати пяти образцов конопли посевной *Cannabis sativa* L. (табл. 1) коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) было проведено в 2023 году. Образцы конопли среднерусского экотипа, представленные местными, промышленными сортами и селекционным материалом, были выращены в Пензенской области в зоне Среднего Поволжья России с умеренно-континентальным климатом на лугово-черноземных почвах. Агрометеорологические условия в период проведения опытов были близки к средним многолетним: среднемесячная температура с мая по август колебалась в пределах от +13,7 до +22,5°C. Самым теплым месяцем являлся июль (+22,8°C). Среднемесячное количество осадков колебалось в пределах среднемноголетних от 33,8 мм в июне до 63 мм в июне. Семена образцов высевались 20-21 мая на однорядковых делянках длиной пять метров с междуядьями 35 см. Расстояние между растениями на делянке – 10-17 см. В период вегетации минеральные удобрения в почву не вносили. Урожай собирали вручную в момент созревания семян в верхней половине соцветий в третьей декаде августа, высушивали в помещении при температуре +20°C и относительной влажности воздуха 16-18%. ЖКС масла семян изучали с помощью газожидкостной хроматографии с масс-спектрометрией на хроматографе Agilent 6850 (Agilent Technologies, Inc., Wilmington, USA). Подготовку проб проводили по методикам, принятым в ВИР (Ermakov et al., 1972). Метиловые эфиры ЖК разделяли на колонке Omegawax TM 250, 30,0 м, 250,00 мкм, 0,25 мкм (Supelco Solutions Within, Bellefonte, USA), программа нагрева: от +170°C до +220°C, скорость повышения температуры – 3°C/мин, температура детектора +250°C, скорость потока гелия 1,5 мл/мин. При анализе было использовано по три аналитические пробы для каждого образца. Полученные результаты обрабатывали с помощью программ UniChrom (Seachrom Inc., Lynnwood, USA) и AMDIS (NIST Standard Reference Data Program, Gaithersburg, USA). Статистическая обработка данных проведена с применением STATISTICA 10 for Windows (Informer Technologies Inc., USA).

Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведено содержание четырнадцати жирных кислот (ЖК) в масле семян изученных образцов конопли. Представленные образцы различных экотипов различаются по технотипу и включают сорта универсального назначения, масличного направления использования, местные сорта и селекционный материал. Как пока-

зали исследования, образцы различались по содержанию ЖК в масле семян. Так, у ряда образцов было обнаружено высокое содержание биологически активных кислот: тетраненасыщенной омега-3 стеаридониковой ЖК: к-205, Украина (1,23%); к-168, Россия (0,87%); к-360, Россия (0,81%); к-224, ГДР (0,69%); α -линоленовой: к-168, Россия (0,82%); к-224, ГДР (0,39%); к-152, Россия (0,35%); диненасыщенной линолевой: к-154, Россия (67,29%); к-360, Россия (66,24%); к-150, Россия (64,58%), омега-6 триненасыщенной γ -линоленовой: к-88, Россия (2,43%); к-211, ГДР (1,92%); к-205, Украина (1,79%).

В ранее опубликованных работах (Grigoryev et al., 2019; Popov et al., 2019) было показано, что образцы конопли коллекции ВИР, для которых было характерно высокое содержание полиненасыщенных ЖК в отжатом из семян масле, содержали линолевую кислоту в пределах 53,4–64,2%, α -линоленовую (12,6–27,1%), стеаридониковую (0,4–3,0%), γ -линоленовую (0,6–5,1%), олеиновую (5,9–14,0%). В других работах по изучению профиля ЖК в масле из семян возделываемых сортов конопли (Occhiuto et al., 2022) показано, что основной кислотой является линолевая ЖК с содержанием в диапазоне 52,0–54,4%, за которой следовали α -линоленовая (15,36–18,15%), олеиновая (12,31–16,73%), пальмитиновая (6,95–8,67%), стеариновая (2,68–3,76%) и стеаридониковая (0,56–0,93%) кислоты.

Особый интерес представляют данные о содержании биологически активных полиненасыщенных ЖК масла в контрасте с содержанием насыщенных, поскольку последние не обладают выраженной антиоксидантной активностью. Так, наибольшее содержание насыщенной пальмитиновой ЖК обнаружено у образцов: к-85, Россия (24,04%); к-152, Украина (21,9%); к-70, Россия (19,45%); к-81, Латвия (18,65%); к-32, Югославия (17,81%); стеариновой: к-70, Россия (6,08%); к-81, Латвия (5,73%); лауриновой у образцов: к-193, Украина (0,21%); к-85, Россия (0,20%); к-81, Латвия (0,71%); к-78, Россия (0,71%); миристиновой у образцов: к-168, Россия (0,62%); к-88, Рос-

сия (0,13%); пальмитолеиновой у образцов: к-99, Россия (0,41%); к-78, Россия (0,39%); к-70, Россия (0,38%).

Для всесторонней оценки образцов конопли по ЖКС масла семян был проведен анализ главных компонент (PCA). По критерию «каменистой осыпи»¹ были выделены три фактора, которые суммарно объяснили 61,1% дисперсии (табл. 2).

С первым фактором, который определил 27,8% изменчивости было тесно связано содержание насыщенных ЖК: миристиновой, лауриновой, пальмитолеиновой и полиненасыщенной линолевой. Второй фактор (20,1% объясненной дисперсии) указал на содержание пальмитиновой, стеариновой насыщенных и полиненасыщенной α -линоленовой ЖК. Третий фактор с 13,2% объясненной дисперсии не указал какой-либо кислоты. С учетом критерия «каменистой осыпи» были выделены два фактора – первый и второй, как главные, которые суммарно определяли изменчивость и связанные признаки качества масла на 47,9%. В результате исследований установлено, что формирование ЖКС масла семян конопли можно рассматривать как многофакторное явление. Наибольшую положительную факторную нагрузку по фактору 1 несет линолевая кислота (+0,73). Отрицательные нагрузки выявлены для миристиновой (-0,81), лауриновой (-0,78), пальмитолеиновой (-0,73) и олеиновой (-0,72) кислот. Таким образом, содержание биологически активной омега-6 диненасыщенной линолевой ЖК обратно связано с насыщенными кислотами – миристиновой, лауриновой, пальмитолеиновой, которые имели наибольшие отрицательные факторные нагрузки и арахиновой ЖК. Линолевая кислота обратно связана с омега-9 мононенасыщенной олеиновой ЖК, а также с полиненасыщенными омега-6 γ -линоленовой, омега-3 стеаридониковой и омега-3 α -линоленовой ЖК. Наибольшую положительную факторную нагрузку в дисперсии, определяемой фактором 2, несет α -линоленовая кислота (+0,75), тогда как наибольшую отрицательную – пальмитиновая и стеариновая (для каждой величина составила -0,79).

¹ Примечание редактора: критерий «каменистой осыпи» в факторном анализе подразумевает поиск точки, после которой убывание собственных значений стремится к выходу на плато / Editor's note: The scree criterion in factor analysis suggests a search for the point where the eigenvalue decrease tends to reach a plateau.

Таблица 1. Содержание жирных кислот (средние значения, %) в семенах образцов конопли посевной (*Cannabis sativa* L.) коллекции ВИР

Table 1. Fatty acids content (average values, %) in seeds of hemp (*C. sativa* L.) accessions from the VIR collection

№ п/п/ No.	№ кат./ Cat. No.	Название/ Name	Примечание/ Remark	Жирные кислоты/ Fatty acids ¹										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	32	Местная	Погословия	0,14	0,05	17,81	0,30	5,39	7,09	0,60	53,95	12,98	0,56	0,60
2	79	Местная	Белоруссия	0,14	0,05	18,13	0,33	4,56	6,36	0,97	53,64	12,90	1,66	0,60
3	70	Среднерусская	Россия	0,16	0,06	19,45	0,38	6,08	5,68	0,63	52,49	12,63	1,22	0,58
4	78	‘Тогучинский 1’	Россия	0,17	0,06	18,10	0,39	4,92	6,18	0,13	53,94	12,98	1,02	0,60
5	81	Местная	Латвия	0,17	0,06	18,65	0,36	5,73	5,78	0,18	53,38	12,84	1,62	0,59
6	85	Местная	Россия	0,20	0,05	24,04	0,33	3,37	5,54	0,23	51,13	12,30	1,02	0,57
7	88	Местная	Россия	0,09	0,13	14,91	0,06	2,63	6,88	0,11	57,59	13,85	2,43	0,77
8	99	‘Кыргызская’	Россия	0,10	0,05	10,79	0,41	2,35	6,90	0,41	62,93	15,14	0,09	0,70
9	148	‘Алтайская’	Россия	0,11	0,09	17,56	0,08	3,91	5,27	0,54	56,82	13,67	0,88	0,63
10	150	‘Кузнецкая’	Украина	0,08	0,02	7,47	0,21	3,18	7,00	1,02	64,58	15,54	0,06	0,72
11	152	‘Марийская’	Украина	0,17	0,12	21,90	0,13	3,31	5,78	0,78	53,40	12,85	0,44	0,59
12	154	‘Н. Займская’	Украина	0,02	0,03	3,98	0,04	1,50	8,44	0,12	67,29	16,19	1,38	0,75
13	168	‘Кавказская’	Россия	0,41	0,62	13,42	0,99	2,04	16,02	0,81	42,89	18,78	1,68	0,87
14	169	‘Сапера 43/17’	Румыния	0,10	0,18	9,31	0,03	2,80	9,24	0,90	54,65	21,69	0,34	0,52
15	171	‘Linia 13/16’	Румыния	0,02	0,04	14,97	0,21	5,35	6,50	0,45	55,12	14,74	1,27	0,68
16	193	‘Ferralonija’	Украина	0,21	0,11	15,53	0,09	3,69	8,78	0,57	51,04	18,03	0,29	0,55
17	196	Местная	Белоруссия	0,05	0,07	15,34	0,08	2,50	8,02	0,12	53,38	18,18	0,55	0,24
18	205	‘Тернопольская’	Украина	0,18	0,10	13,17	0,22	2,27	15,88	0,66	28,14	36,02	1,79	1,23
19	210	‘I.C.A.R. 42/11’	Румыния	0,06	0,02	9,16	0,19	1,44	13,05	0,10	44,06	29,81	0,78	0,59
20	211	‘Бернбург 781’	ГДР	0,13	0,07	11,81	0,22	3,35	6,38	0,13	60,19	14,48	1,92	0,67
21	224	‘Бернбург 159’	ГДР	0,14	0,12	10,00	0,29	3,32	6,54	0,20	62,18	14,96	0,54	0,69
22	226	‘Бернбург 191’	ГДР	0,07	0,04	11,28	0,21	2,37	7,30	0,09	61,85	14,88	0,67	0,80
23	228	‘Бернбург 455’	ГДР	0,03	0,03	4,75	0,09	2,24	7,76	0,17	66,24	17,58	0,16	0,81
24	351	Местная	Чувашия	0,07	0,10	13,09	0,09	3,51	9,04	0,28	51,18	20,49	1,12	0,54
25	360	Местная	Чувашия	0,03	0,03	4,75	0,09	2,24	7,76	0,17	66,24	17,58	0,16	0,81
			HCP _{0,05}	0,03	0,03	1,59	0,08	0,80	1,59	0,08	3,16	1,59	0,08	0,03

¹ – 1 – лауриновая, 2 – миристиновая, 3 – стеариновая, 4 – пальмитиновая, 5 – пальмитолеиновая, 6 – олеиновая, 7 – вакиновая, 8 – линолевая, 9 – α-линоленовая, 10 – γ-линоленовая, 11 – стеаридоновая, 12 – арахиновая, 13 – эйкозеновая, 14 – бетеновая; ² – НСР – наименьшая существенная разность для 5%-ного уровня значимости

¹ – 1 – lauric, 2 – myristic, 3 – palmitic, 4 – palmitoleic, 5 – stearic, 6 – oleic, 7 – vaccenic, 8 – linoleic, 9-α – linolenic, 10 – γ-linolenic, 11 – stearidonic, 12 – arachidic, 13 – eicosenoic, 14 – behenic;

² – Least Significant Difference for 5% significance level

Таблица 2. Факторные нагрузки содержания жирных кислот масла семян у образцов конопли (*Cannabis sativa L.*) по трем основным факторам

Table 2. Factor loadings of seed oil fatty acid content in hemp (*C. sativa L.*) accessions for three main factors

Номер/ Number	Жирные кислоты/ Fatty acids	Фактор 1/ Factor 1 (27,8%)	Фактор 2/ Factor 2 (20,1%)	Фактор 3/ Factor 3 (13,2%)
		Факторные нагрузки/ Factor loadings		
1	Лауриновая	-0,78	-0,37	-0,20
2	Миристиновая	-0,81	-0,06	-0,45
3	Пальмитиновая	-0,18	-0,79	0,28
4	Пальмитолеиновая	-0,73	-0,40	-0,14
5	Стеариновая	0,12	-0,79	0,38
6	Олеиновая	-0,72	0,60	0,14
7	Вакценовая	-0,01	-0,27	0,23
8	Линолевая	0,73	-0,07	-0,53
9	α -Линоленовая	-0,42	0,75	0,38
10	γ -Линоленовая	-0,51	-0,20	0,31
11	Стеаридониковая	-0,44	0,41	0,09
12	Арахиновая	-0,61	-0,17	-0,67
13	Эйкозеновая	-0,37	-0,27	-0,00
14	Бегеновая	-0,05	-0,58	0,28

Факторный анализ позволил наглядно выявить однородные группы образцов семян коллекции конопли по содержанию изученных биологически важных ЖК масла конопли (рисунок).

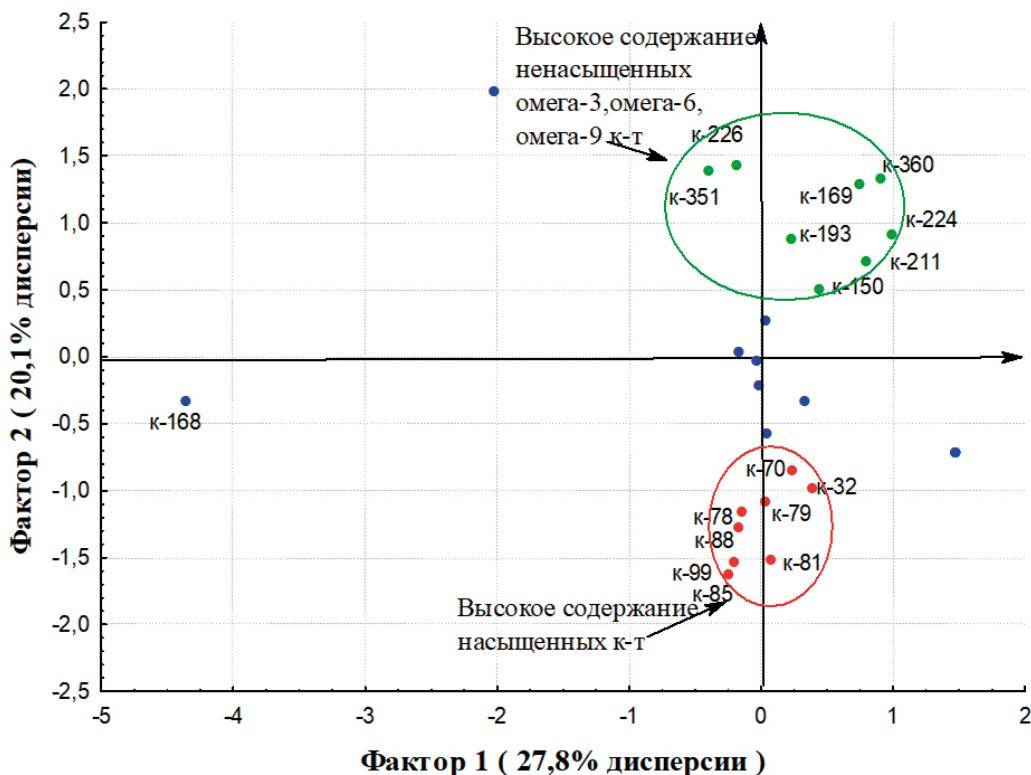


Рисунок. Разделение образцов конопли посевной (*Cannabis sativa L.*) по содержанию жирных кислот в масле семян в системе координат двух первых факторов

Figure. Separation of hemp (*Cannabis sativa L.*) accessions based on the content of fatty acids in seed oil in the coordinate system of the first two factors

Основной фактор 1, который определял 27,8% дисперсии переменных, описывающих ЖКС масла семян, выделил одиночный образец к-168 (сорт ‘Кавказская’), находящийся слева на рисунке, контрастный остальным образцам. Сорт ‘Кавказская’ характеризуется максимальным содержанием лауриновой (0,41%), миристиновой (0,62%), пальмитолеиновой (0,99%), олеиновой (16,02%) и арахиновой (0,82%) кислот.

Фактор 2 (20,1% дисперсии признаков) выделил группу образцов, обладающих высокими значениями содержания ненасыщенных ЖК – омега-6 линоленовой, омега-3 а-линовой, стеаридониковой, омега-9 олеиновой кислот. В этой группе расположились к-360 (Россия), в масле которого содержалось 66,24% линолевой и 0,81% стеаридониковой ЖК; к-224 (ГДР) – 14,96% а-линовой, 6,54% олеиновой и 0,69% стеаридониковой ЖК; к-150 (Украина) – 64,58% линолевой, 15,54% а-линовой и 0,72% стеаридониковой кислот.

В альтернативной группе разместились образцы с высоким и относительно высоким содержанием насыщенных ЖК: к-78 (Россия) – 18,1% пальмитиновой, 0,39% пальмитолеиновой и 0,17% лауриновой ЖК; к-85 (Россия) – 24,04% пальмитиновой и 0,2% лауриновой кислот; к-88 (Россия) – 0,13% миристиновой кислоты; к-99 (Россия) – 0,41% пальмитолеиновой ЖК.

Следует предположить, что максимальное значение показателя наблюдаемой изменчивости по признакам качества масла (27,8%) у изученных образцов коллекции конопли было связано с разделением образцов с высоким содержанием полиненасыщенной линолевой ЖК с одной стороны, и с высоким содержанием насыщенных ЖК – миристиновой, лауриновой и пальмитолеиновой ЖК – с другой (рисунок).

Очевидно, что омега-6 линолевая кислота является одной из основных и значимых в ЖКС масла семян конопли. Сделанный нами вывод о важности этой кислоты совпадает с мнением других авторов (Alonso-Esteban et al., 2023). Как и эти исследователи, мы указываем на значимость а-линовой и олеиновой ЖК. Кроме того, в нашей работе также показана роль других полиненасыщенных ЖК, стеаридониковой и г-линовой, и насыщенных – миристиновой, лауриновой и пальмитолеиновой жирных кислот.

Выводы

Исследование показало, что изученные образцы конопли коллекции ВИР контрастны по содержанию биологически активных ЖК масла. Содержание линолевой кислоты в масле семян варьировало в пределах 28,14–67,29% с максимальными значениями у образцов, представляющих собой местные сорта из России, Украины и селекционный материал из ГДР (к-154, к-228, к-360). Содержание а-линовой кислоты варьировало в пределах 12,30–36,02% при наибольших значениях у сорта из Украины (к-205). Содержание олеиновой ЖК колебалось

от 5,27% (к-148, Россия) до 16,02% (к-168, Россия). Эти образцы могут быть рекомендованы для использования в селекции промышленной конопли масличного направления использования. Содержание насыщенной миристиновой ЖК колебалось от минимальных значений 0,02% у к-150 (Украина) и к-210 (Румыния) до максимального в исследовании 0,62% (к-168, Россия). Содержание лауриновой ЖК варьировало от 0,02% (к-210, Румыния) до 0,2% (к-85, Россия), пальмитолеиновой – от 0,03% (к-169, Румыния) до 0,99% (к-169, Россия).

Установлено, что формирование жирнокислотного состава масла семян конопли – многофакторный процесс. Главные ЖК, дифференцирующие выборку изученных образцов коллекции конопли – содержание омега-6 диненасыщенной линолевой ЖК с максимальной в опыте положительной факторной нагрузкой 0,73, с одной стороны, и содержание насыщенной миристиновой ЖК с факторной нагрузкой –0,81 – с другой.

Очевидно, что данные, полученные в результате исследования набора ЖК масла с выраженной полярностью факторных нагрузок для признаков, следует интерпретировать, опираясь на анализ метаболических путей биосинтеза кислот. Однако, полученная с помощью факторного анализа информация может быть несомненно полезна для подбора образцов коллекций с оптимальным ЖКС для селекции сортов конопли посевной масличного направления использования.

Литература/References

- Alonso-Esteban J.I., González-Fernández M.J., Fabrikov D., de Cortes Sánchez-Mata M., Torija-Isasa E., Guil-Guerrero J.L. Fatty acids and minor functional compounds of hemp (*Cannabis sativa L.*) seeds and other Cannabaceae species. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2023;115:104962. DOI: 10.1016/j.jfca.2022.104962
Aslam H., Green J., Jacka F.N., Collier F., Berk M., Pasco J., Dawson S.L. Fermented foods, the gut and mental health: a mechanistic overview with implications for depression and anxiety. *Nutritional Neuroscience*. 2020;23(9):659-671. DOI: 10.1080/1028415X.2018.1544332
Brutch N.B. Correlation and factor analysis of some traits of fiber flax. *Scientific and Technical Bulletin of the N.I. Vavilov All-Union Research Institute of Plant Industry*. 1989;188:45-46. [in Russian] (Брач Н.Б. Корреляционный и факторный анализ некоторых признаков льна-долгунца. *Научно-технический бюллетень Всесоюзного научно-исследовательского института растениеводства им. Н.И. Вавилова*. 1989;188:45-46).
Ermakov A.I., Arasimovich V.V., Smirnova-Ikonnikova M.I., Yarosh N.P., Lukovnikova G.A. Methods of biochemical research of plants (Metody biokhimicheskikh issledovanii rastenii). Leningrad: Kolos Publishers; 1972. [in Russian] (Ермаков А.И., Арасимович В.В., Смирнова-Иконникова М.И., Ярош Н.П. Луковникова Г.А. Методы биохимических исследований растений. Ленинград: Колос; 1972).
Perchuk I.N., Shelenga T.V., Burlaeva M.O. The effect of illumination patterns during mung bean seed germination on the metabolite composition of the sprouts. *Plants*. 2023;12(21):3772. DOI: 10.3390/plants12213772
Cerino P., Buonerba C., Cannazza G., D'Auria J., Ottoni E., Fulgione A., Di Stasio A., Pierri B., Gallo A. A review of hemp as food and nutritional supplement. *Cannabis and Cannabinoid Research*. 2021;6(1):19-27. DOI: 10.1089/can.2020.0001
Farinon B., Molinari R., Costantini L., Merendino N. The seed of

- industrial hemp (*Cannabis sativa* L.): nutritional quality and potential functionality for human health and nutrition. *Nutrients*. 2020;12(7):1935. DOI: 10.3390/nu12071935
- Grigoryev S.V., Illarionova K.V. Evaluation of factors having an effect on cannabinoid amount in *Cannabis sativa* L. *Agricultural Biology*. 2020;55(1):107-117. DOI: 10.15389/agrobiology.2020.1.107eng
- Grigoriev S., Illarionova K., Shelenga T. Hempseeds (*Cannabis* spp.) as a source of functional food ingredients, prebiotics and phytosterols. *Agricultural and Food Science*. 2020;29(5):460-470. DOI: 10.23986/afsci.95620
- Grigoryev S.V., Shelenga T.V. Illarionova K.V. Hempseed and cottonseed oils in the accessions from the VIR collection as sources of functional food ingredients. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2019;180(2):38-43. [in Russian] (Григорьев С.В., Шеленга Т.В., Илларионова К.В. Масла конопли и хлопчатника образцов коллекции ВИР как источник функциональных пищевых ингредиентов. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2019;180(2):38-43). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-2-38-43)
- Harwood J.L. Polyunsaturated fatty acids: conversion to lipid mediators, roles in inflammatory diseases and dietary sources. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(10):8838. DOI: 10.3390/ijms24108838
- Occhiuto C., Alberto G., Ingegneri M., Trombetta D., Circosta C., Smeriglio A. Comparative evaluation of the nutrients, phytochemicals, and antioxidant activity of two hempseed oils and their byproducts after cold pressing. *Molecules*. 2022;27(11):3431. DOI: 10.3390/molecules27113431
- Podolnaya L.P., Asfandiyarova M.Sh. Correlation and factor analysis of morphological characters in the diploid species of Mexican cotton. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1999;156:70-77. [in Russian] (Подольная Л.П., Асфандиярова М.Ш. Корреляционный и факторный анализ морфологических признаков диплоидных видов хлопчатника Мексики. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1999;156:70-77).
- Popov V.S., Grigoryev S.V., Illarionova K.V., Shelenga T.V. Fatty acid composition of hemp and cotton oils and prospects of their use in the food industries and in functional food. *Agrarnaya Rossiya =Agrarian Russia*. 2019;8:9-15. [in Russian] (Попов В.С., Григорьев С.В., Илларионова К.В., Шеленга Т.В. Жирнокислотный состав масел конопли и хлопчатника и перспективы их использования в пищевой промышленности и функциональном питании. *Аграрная Россия*. 2019;8:9-15). DOI: 10.30906/1999-5636-2019-8-9-15
- State Register for Selection Achievements Admitted for Usage (National List). Vol. 1. "Plant varieties" (official publication). Moscow: Ministry of Agriculture of Russia; Gossortkomissiya; 2023. [in Russian] (Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений» (официальное издание). Москва: Министерство сельского хозяйства России; Госсорткомиссия; 2023).
- State Standard GOST 8989-73. Hempseed oil. Specifications. Moscow: Standartinform; 2011. [in Russian] (ГОСТ 8989-73. Масло конопляное. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2011).
- Technical Regulations of the Customs Union TR CU 024/2011. Technical regulations for fat and oil products (as amended on April 23, 2015). [in Russian] (Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 024/2011. Технический регламент на масложировую продукцию (с изменениями на 23 апреля 2015 года). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902320571> [дата обращения: 24.09.2023].

Информация об авторах

Сергей Владимирович Григорьев, Ph.D., кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, отдел генетических ресурсов масличных и прядильных культур, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, s.grigoryev@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7670-4360>

Ксения Викторовна Илларионова, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, elkv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2563-6094>

Лариса Петровна Подольная, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, отдел генетических ресурсов масличных и прядильных культур, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, l.podolnaya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4962-1989>

Татьяна Васильевна Шеленга, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, отдел биохимии и молекулярной биологии, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, tatinashelenga@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3992-5353>

Information about the authors

Sergei V. Grigoriev, Ph.D., Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Department of Oil and Fiber Crop Genetic Resources, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, s.grigoryev@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7670-4360>

Ksenia V. Illarionova, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Peter the Great Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya Street, St. Petersburg, 195251 Russia, elkv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2563-6094>

Larisa P. Podolnaya, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Department of Genetic Resources of Oil and Fiber Crop Genetic Resources, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, l.podolnaya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4962-1989>

Tatyana V. Shelenga, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Department of Biochemistry and Molecular Biology, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, tatinashelenga@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3992-5353>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 02.10.2023; одобрена после рецензирования 24.11.2023; принятая к публикации 07.12.2023.

The article was submitted on 02.10.2023; approved after reviewing on 24.11.2023; accepted for publication on 07.12.2023.