

ХИМИЧЕСКИЙ МУТАГЕНЕЗ В СЕЛЕКЦИИ ЛЬНА МАСЛИЧНОГО

Е. Л. АНДРОНИК, Е. В. ИВАНОВА, Д. А. БАТЮКОВ

РУП «Институт льна»,
аг. Устье, Республика Беларусь, 211003, e-mail: andronik11@rambler.ru

(Поступила в редакцию 15.01.2026)

В статье показана роль химического мутагенеза в получении ценных генотипов с хозяйственно значимыми признаками. Обобщены результаты исследований мутантов льна масличного в поколениях M_1 - M_3 . Показано влияние химических мутагенов (*N*-нитрозоэтилмочевина (НЭМ) и *N*-нитрозометилмочевина (НММ)) на всхожесть растений в поколении M_1 . Дана характеристика спектров и частоты фенотипических мутаций в поколениях M_2 - M_3 . Установлено, что мутантные образцы охватывают широкий спектр изменений: мутации с нарушением синтеза хлорофилла (доля в общем количестве выделенных мутаций 23,1 %); мутации окраски лепестков венчика и пыльников (28,2 %); формы и размера венчика (15,4 %); структуры стебля, листьев и корня (17,9 %); физиологических изменений роста и развития (5,1 %); окраски семян (2,6 %); стерильности (7,7 %). Установлено, что мутабельность сорта обусловлена его генотипом. В результате оценки мутантных линий, полученных из сорта Дар, выделен мутант *M*-44 с хлорофильными изменениями («золотистая верхушка») и зигзагообразным стеблем. Отличия от исходной формы этого мутанта подтверждены методом электрофореза запасных белков. Выделены мутанты, превосходящие исходный сорт по продуктивности и масличности, продолжительности периода вегетации, с изменённым жирнокислотным составом. Показаны результаты молекулярно-генетического анализа мутантных образцов льна масличного. На основе комплексного использования фенологических, морфологических, физиологических, биохимических и генетических методов в результате многоэтапных лабораторных и полевых исследований разработана схема использования мутантных растений в селекции льна масличного.

Ключевые слова: лен масличный, химический мутагенез, всхожесть, спектр мутаций, полезные мутации.

The article shows the role of chemical mutagenesis in obtaining valuable genotypes with economically significant traits. The results of studies of oil flax mutants in generations M_1 - M_3 are summarized. The effect of chemical mutagens (*N*-nitrosoethyl urea (NEU) and *N*-nitrosomethyl urea (NMU)) on plant germination in generation M_1 is shown. The characteristics of the spectra and frequency of phenotypic mutations in generations M_2 - M_3 are given. It was found that mutant samples cover a wide range of changes: mutations with disruption of chlorophyll synthesis (the share in the total number of isolated mutations is 23.1 %); mutations in the color of corolla petals and anthers (28.2 %); corolla shape and size (15.4 %); structure of the stem, leaves and root (17.9 %); physiological changes in growth and development (5.1 %); seed color (2.6 %); sterility (7.7 %). It was established that the mutability of the variety is determined by its genotype. An evaluation of mutant lines obtained from the Dar variety resulted in the isolation of the *M*-44 mutant, which exhibits chlorophyll changes ("golden top") and a zigzag stem. Differences from the original form of this mutant were confirmed by electrophoresis of storage proteins. Mutants with altered fatty acid compositions, superior to the original variety in productivity and oil content, and in the length of the growing season, were isolated. The results of a molecular genetic analysis of mutant oil flax samples are presented. Based on the integrated use of phenological, morphological, physiological, biochemical, and genetic methods, as a result of multi-stage laboratory and field studies, a scheme for the use of mutant plants in oil flax breeding was developed.

Key words: oil flax, chemical mutagenesis, germination, mutation spectrum, beneficial mutations.

Введение

Индукцированный химический мутагенез является одним из ключевых способов расширения генетического разнообразия сельскохозяйственных культур, который позволяет преодолеть узкие места в их развитии и даёт селекционерам необходимый материал для создания современных сортов [1–3]. Сорта, полученные с использованием мутационной селекции, вносят значительный вклад в обеспечение глобальной продовольственной безопасности, а также играют роль в улучшении жизни и здоровья людей [4]. Программы по использованию экспериментального мутагенеза в селекции растений реализуют во многих странах мира. Особую перспективу представляет применение методов воздействия мутагенов на геном, что позволяет вскрыть новые генетические резервы культуры и получить ценные генотипы, отличающиеся хозяйственно-значимыми признаками [5].

В Республике Беларусь исследования по использованию мутагенов в создании исходного селекционного материала льна масличного ещё совсем недавно находились на начальном этапе. Реализация задания «Создание нового исходного материала льна масличного с использованием метода химического мутагенеза» ГПНИ «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность» на 2021–2025 годы, подпрограмма «Земледелие и селекция» в РУП «Институт льна» в 2022–2024 гг. позволила установить эффективные дозы и экспозиции воздействия НЭМ и НММ, а также оценить мутабельность сортов и характер изменчивости признаков у мутантных растений льна масличного [6–8].

Цель исследований – обобщить результаты исследований по применению химического мутагенеза в селекции льна масличного для создания исходного материала, разработать методологический

подход к изучению мутантов льна масличного в ряду поколений, выделить перспективные мутантные линии с полезными мутациями для целей селекции.

Основная часть

Объектом исследований служили мутанты поколений M_1 - M_3 , полученные в результате обработки химическими мутагенами (НММ и НЭМ) семян 6 сортов льна масличного [6]. Семена сортов после обработки мутагенами высевали в питомнике мутантов M_1 (однорядные делянки по 100 семян); в 2023 году – в питомнике M_2 (площадь делянки от 0,3 м² до 3,0 м²); в 2024 году – в питомнике M_3 (до 5,0 м²). Подготовка почвы под посев общепринятая [9, с. 400], посев ручной в оптимальные для культуры сроки. Уборку питомников проводили при наступлении физиологической спелости семян (полная спелость) с последующей их сушкой и очисткой.

Тестом чувствительности растений к действию мутагенов служила полевая всхожесть растений M_1 . Чем выше была концентрация и доза мутагенного фактора, тем сильнее снижалась всхожесть. Всходы семян в питомнике M_1 появились позже, чем на контрольных делянках. Установлено, что семена, обработанные сравнительно низкими концентрациями (0,006 %), взошли на 7–8 день, а при высоких концентрациях (0,012–0,025 %) на 8–12 день после посева. В варианте с обработкой НЭМ в концентрации 0,025 % при 12- и 18-часовой экспозиции вызывал полную гибель всходов у всех изучаемых сортов. Отмечали резкое снижение всхожести или полную гибель всходов при обработке семян мутагеном НЭМ в концентрации 0,012 % при 12-часовой и 18-часовой экспозициях (рис. 1). Обработка семян НЭМ оказывала более угнетающее влияние на всхожесть по сравнению с обработкой НММ в концентрациях 0,012–0,025 %.

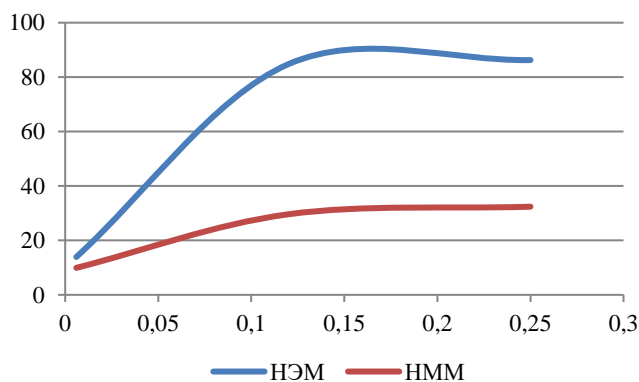


Рис. 1. Всхожесть генотипов M_1 при обработке семян мутагенами, % (2022 г.)

В исследованиях у мутантных растений льна масличного в поколениях M_2 и M_3 выделены мутации различного спектра: мутации с нарушением синтеза хлорофилла (доля в общем количестве выделенных мутаций 23,1 %); окраски лепестков венчика и пыльников (28,2 %); формы и размера венчика (15,4 %); структуры стебля, листьев и корня (17,9 %); физиологических изменений роста и развития (5,1 %); окраски семян (2,6 %); стерильности (7,7 %) (рис. 2а).

У высокомутабельных сортов обнаруживали все типы мутаций. Самой высокой мутабельностью обладали сорта Фокус, Илим и Дар (рис. 2б), в потомстве которых были отобраны перспективные мутантные линии. У сортов Altess и Визирь отсутствовали мутации окраски лепестков венчика и пыльников, а у сорта Бонус – мутации формы и размера венчика.

У некоторых линий отличали несколько изменений признаков. Так, линии со светло-светло-голубой и белой окраской венчика оказались самыми раннеспелыми. Наряду с изменениями формы венчика у мутантов получены растения с изменением цвета тычинок (с голубой на кремовую, с голубой на сероватую). В результате оценки фенотипа мутантных линий из сорта Дар выделен мутант № 44 с хлорофильными изменениями («золотистая верхушка») и зигзагообразным стеблем. Отличия от исходной формы этого мутанта подтверждены методом электрофореза запасных белков (рис. 3). Выделено 17 мутантных линий созревающих достоверно раньше исходной формы на 2–10 суток, а также 9 позднеспелых линий, созревающих достоверно позже исходных форм на 4–10 суток. Выделенные мутации отнесены к полезным и будут использованы в практической селекции [10].

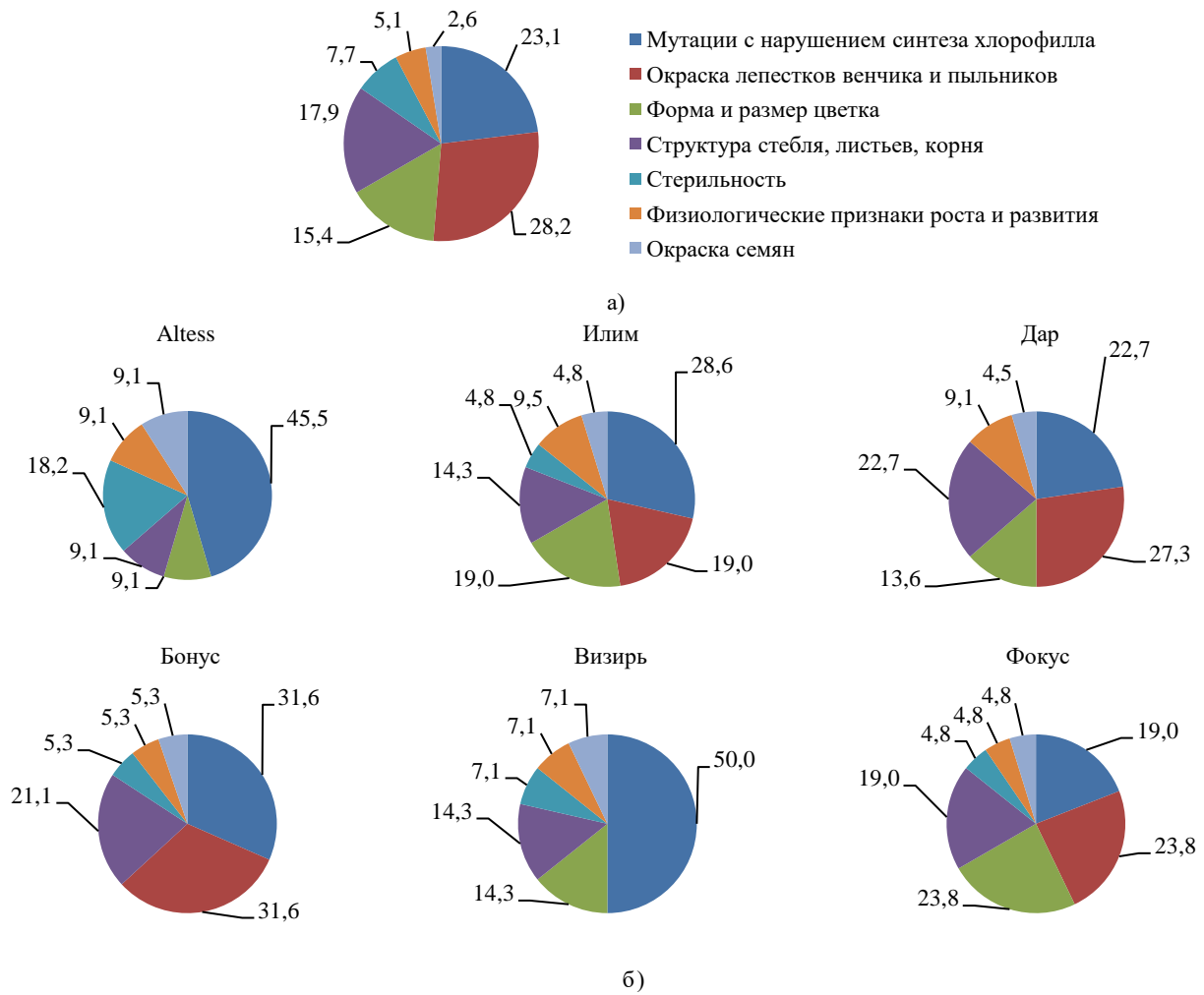


Рис. 2. Спектр индуцированных мутаций льна масличного в М₂-М₃:
 а) доля (%) каждого вида мутаций в общем их количестве; б) доля (%) мутаций в разрезе каждого сорта

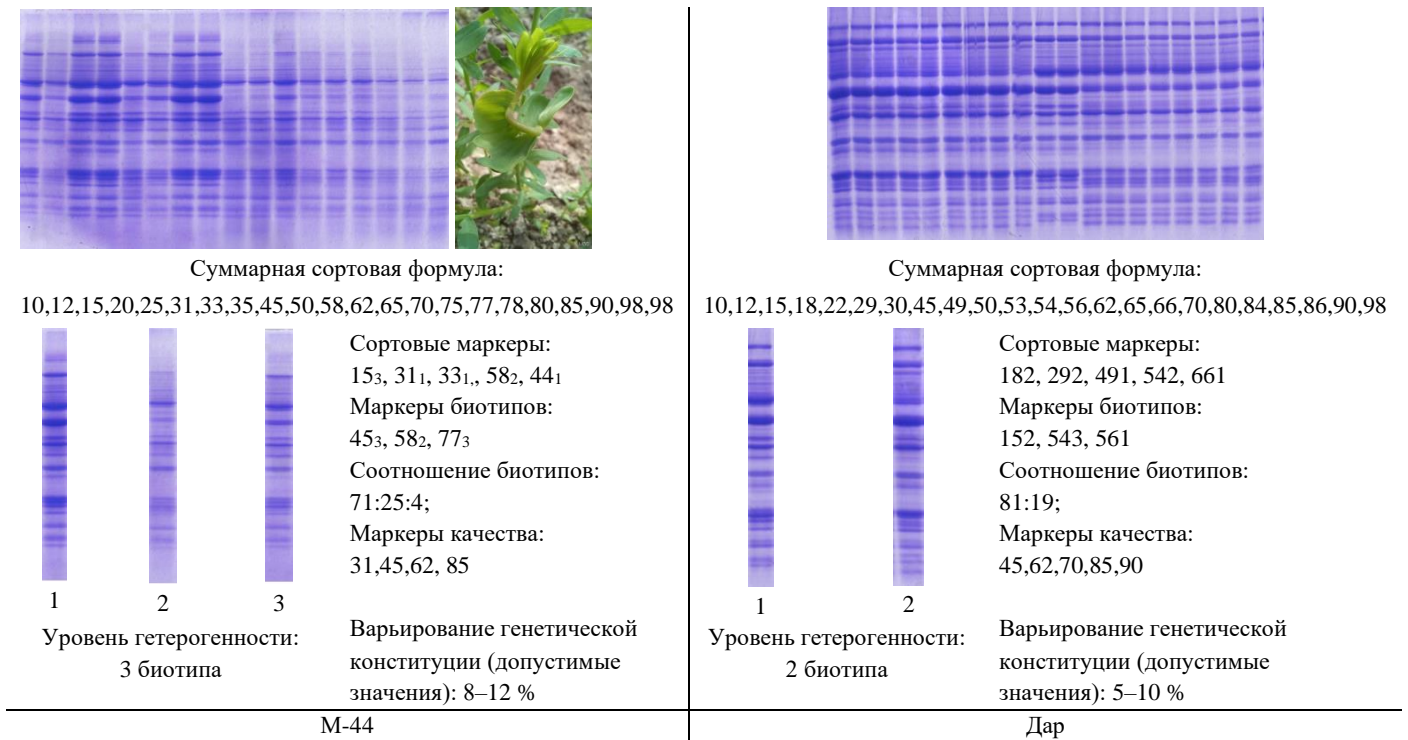


Рис. 3. Биохимические паспорта мутантной линии М-44 и исходного сорта Дар

В исследованиях выделен ряд мутантных линий, превосходящих исходные сорта по продуктивности семян: у линии М-8 из сорта Altess получена прибавка по продуктивности 12,5 % к исходному сорту; у 7 линий из сорта Илим (+19,1 %....47,8 % к исх. сорту); у 3 линии из сорта Дар (+16,3 %....31,8 % к исх. сорту); у 5 линий из сорта Визирь (+13,7 %....35,7 % к исх. сорту), у линии М-69 из сорта Бонус (+20,5 % к исх. сорту) и 4 линий из сорта Фокус (+15,5 %....49,3 % к исх. сорту) (таблица). Кроме этого, мутанты М-17, М-27, М-37, М-67, М-68, М-69, М-84, М-86, М-87 и М-90 превышали по содержанию масла исходные формы.

Характеристика мутантных линий по продуктивности и масличности

Генотип	Продуктивность семян		Содержание масла, %	Генотип	Продуктивность семян		Содержание масла, %
	г/м ²	± к исходной форме, %			г/м ²	± к исходной форме, %	
Altess	301,0	–	38,3	Визирь	385,0	–	42,9
М-8	338,7*	12,5	38,7	М-48	494,6*	28,5	42,3
М-10	322,0	7,0	38,7	М-50	437,7*	13,7	42,4
Илим	306,8	–	43,6	М-56	427,6	11,1	42,9
М-17	307,0	0,1	44,1*	М-57	516,6*	34,2	41,6
М-18	365,5*	19,1	42,9	М-58	522,6*	35,7	42,6
М-20	338,2	10,2	43,4	М-59	511,0*	32,7	43,1
М-21	422,5*	37,7	41,7	Бонус	422,0	–	40,8
М-22	412,0*	34,3	43,1	М-67	464,7	10,1	43,9*
М-25	418,2*	36,3	43,1	М-68	417,5	-1,1	44,1*
М-26	425,0*	38,5	42,3	М-69	508,3*	20,5	43,8*
М-27	386,0*	25,8	47,1*	Фокус	307,0	–	42,0
М-28	453,5*	47,8	43,8	М-80	315,8	2,9	42,4
Дар	284,5	–	42,0	М-84	458,3*	49,3	44,4*
М-30	331,0*	16,3	41,0	М-86	354,7*	15,5	43,6*
М-34	375,0*	31,8	40,9	М-87	404,0*	31,6	43,0*
М-37	361,2*	27,0	42,6*	М-90	449,0*	46,3	43,1*

* – достоверно на 95 % уровне значимости.

Биохимический анализ масла мутантов выявил формы с изменённым содержанием олеиновой кислоты от 15,4 % до 25,46 %, линоленовой кислоты от 43,43 % до 61,69 %. Соотношение $\omega 6/\omega 3$ в масле в значительной степени варьировало (от 0,19 до 0,67). Для показателей содержания масла и уровня пальмитиновой кислоты коэффициент вариации составил менее 10 %, что свидетельствует о слабой вариабельности данных признаков, а для линолевой кислоты коэффициент вариации превышал 30 %, что демонстрирует значительную изменчивость ее уровня у мутантных линий и говорит о возможности отбора по этому признаку.

Для установления изменений в геноме и определения степени гетерогенности генетического материала мутантных растений был использован метод анализа полиморфизма микросателлитных локусов, который позволил получить воспроизводимые, информативные профили фрагментов генома. Наибольший полиморфизм отмечали для М-20, полученного на основе сорта Илим, у которого полиморфными являлось пять микросателлитных локусов. Наименьший полиморфизм – по одному SSR-локусу – отмечен для образцов М-25, М-81.

На основе комплексного изучения фенотипических, морфологических, физиологических, биохимических и др. показателей у мутантных растений льна масличного разработана последовательность их изучения и использования в селекции: 1) определение оптимальной концентрации мутагена (определение всхожести, выживаемости, сохранности к уборке); 2) зависимость мутагенного эффекта от концентрации мутагена (определение частоты и спектра мутаций); 3) оценка критериев чувствительности растений к мутагену (определение летально-стимуляционного эффекта); 4) оценка фенотипической и генотипической изменчивости растений (описание фенотипа растений, определение морфологических параметров); 5) изучение генетической природы мутантов (установление характера наследования изменённых признаков в результате гибридизации (анализирующее и реципрокные скрещивания). Выявления изменений в геномах с использованием SSR-анализа); 6) изучение биохимических показателей мутантных линий (определение содержания масла, содержания белка, жирнокислотного состава масла, электрофоретический анализ спектра запасных белков); 7) оценка мутантных линий на устойчивость к абиотическим стрессорам (засухоустойчивость, холодоустойчивость, иммунитет к болезням; определение содержания хлорофиллов а и b, каротиноидов; оценка биомассы надземной и корневой частей растений, площади и индекса листовой поверхности, чистой продуктивности фотосинтеза; определение высоты растений, продолжительности периода вегетации, длины корневой системы при прорастании семян); 8) использование мутантных

линий в селекции льна масличного (в качестве нового сорта; в качестве донора при гибридизации; в качестве исходного материала для практической селекции).

Закключение

Результаты исследований показали, что обработка семян НЭМ и НММ перспективны для индуцирования полезных мутаций и расширения генетического разнообразия у льна масличного. Вследствие обработки семян получены мутации с нарушением синтеза хлорофилла, мутации окраски лепестков венчика и пыльников; формы и размера венчика; структуры стебля, листьев и корня; физиологических изменений роста и развития; окраски семян; стерильности. Выделены мутантные линии с одним или комплексом хозяйственно ценных признаков. Полученные мутантные линии являются перспективным селекционным и исходным материалом.

На основе комплексного изучения фенотипических, морфологических, физиологических, биохимических и др. показателей мутантных растений льна масличного разработана последовательность их изучения и использования в селекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кротова, Л. А. Химический мутагенез как метод создания исходного материала для селекции мягкой пшеницы [Электронный ресурс] / Л. А. Кротова // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. – 2015. – №2(2) июль-сентябрь. – URL: <http://ejournal.omgau.ru/index.php/2015-god/2/19-statya-2015-2/145-00034> (дата обращения: 29.12.2025).

2. Тагиев, А. А. Химический мутагенез и создание исходного материала в селекции хлопчатника / А. А. Тагиев // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2014. – № (2). – С. 70–75.

3. Хазиева, Ф. М. Влияние химических мутагенов на биоморфологические и цитогенетические изменения *Calendula officinalis* L. / Ф. М. Хазиева, Н. Ю. Свистунова, Т. Е. Саматадзе // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии, сер. Защита и биотехнология растений. – 2016. – № 8. – С. 37–43.

4. Raina, A. Legume breeding in transition: innovation and outlook [Electronic resource] / A. Raina [et al.] // *Sec. Genomics of Plants and the Phytoecosystem*. 2023, Vol. 14, 3 p. – Mode of access: <https://www.frontiersin.org/journals/genetics/articles/10.3389/fgene.2023.1221551/full>. – Date of access: 26.12.2025.

5. Щербань, А. Б. Модификация геномов растений: от индуцированного мутагенеза до геномного редактирования / А. Б. Щербань // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2022. – №26(7). – С. 684–696.

6. Батюков, Д. А. Спектр и частота индуцированных мутаций льна масличного в поколении M₂ / Д. А. Батюков, Е. Л. Андроник, Е. В. Иванова // Вестник БГСХА. – 2024. – № 2. – С. 38–42.

7. Батюков, Д. А. Содержание масла и жирнокислотный состав индуцированных мутантов льна масличного в питомнике M₃ / Д. А. Батюков // Технологическое обеспечение и экономическая целесообразность использования новых сортов сельскохозяйственных культур: материалы Междунар. Науч.-практ. конф., посвящ. 300-летию РАН, г. Орел, 12 дек. 2024 г. / ФГБНУ ФНЦ ЗБК; редкол. В. А. Стебаков [и др.]. – Орел, 2025. – С. 9–11.

8. Андроник, Е. Л. Использование индуцированных мутантов в гибридизации как способ повышения результативности мутационной селекции льна масличного / Е. Л. Андроник, Е. В. Иванова, Д. А. Батюков // Достижения ученых в реализации научных исследований в агропромышленном комплексе : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. г. Новочеркасск, 22-23 окт. 2025 г. / ф-л ФГБНУ ФРАНЦ ; редкол.: Новочеркасск, 2025. – С. 12–21.

9. Возделывание льна масличного: отраслевой регламент / В. А. Прудников [и др.] // Организационно-технологические нормативы возделывания зерновых, зернобобовых, крупяных культур, технических и кормовых растений: сб. отрасл. регл. / РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию»; рук. разработ.: Ф. И. Привалов [и др.]. – Минск: ИВЦ Минфина, 2022. – 530 с.

10. Батюков, Д. А. Изменение вегетационного периода под действием химических мутагенов у льна масличного / Д. А. Батюков // Актуальные вопросы биологии, селекции, технологии возделывания и переработки сельскохозяйственных культур: материалы 13 Междунар. конф. молодых учёных и специалистов, г. Краснодар, 4-6 марта 2025 г. / ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК. – Краснодар, 2025. – С. 17–21.