

## ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ/PLANT PROTECTION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.6.980-988>  
УДК 632.938.1:633.52



## Идентификация генов устойчивости к фузариозному увяданию у образцов льна масличного с различным жирнокислотным составом

© 2023. Т. А. Рожмина✉, А. В. Мясникова

ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», г. Тверь,  
Российская Федерация

Семена масличного льна являются ценным сырьем для разных отраслей промышленности. Цель исследований заключалась в формировании генетической коллекции льна масличного по устойчивости к фузариозному увяданию для создания специализированных сортов различного назначения с высокоэффективными R-генами. На инфекционных фонах с популяций гриба *Fusarium oxysporum* f. *lini* (Bolley) и высоковирулентным моноизолатом № 39 данного возбудителя оценены 28 перспективных генотипов масличного льна. С использованием фитопатологического теста из мирового генофонда вида *Linum usitatissimum* L. выявлено 10 перспективных генотипов масличного льна – № 3829, Уральский (Россия), л. 6 AGT 1538, л. 12 AGT 987 (Чешская Республика), Altess, Eole (Франция), Selectiong 3 (Китай), Arnu, Bison (США) и Linda (Канада), обладающих эффективными генами устойчивости к грибу *F. oxysporum* f. *lini* и различающихся по жирнокислотному составу масла. С использованием метода гибридологического анализа установлено, что устойчивость к фузариозному увяданию у низколиноленовой линии 12 AGT 987 (Чешская Республика) детерминирована геном *Fu 11*, а у высоколиноленовой л. 3 Altess (Франция) – *Fu 4* ( $\chi^2 = 0,02...2,89$ ). У низколиноленовой линии 6 AGT 1538 (Чешская Республика) выявлен ранее неизвестный ген устойчивости к данному заболеванию – *Fu 12* ( $\chi^2 = 0,0001...2,4100$ ). Использование выявленных генетических источников в селекционных программах будет способствовать созданию специализированных сортов для пищевой, химической и других отраслей промышленности с различными R-генами устойчивости, что предотвратит развитие эпифитотий данного заболевания масличного льна.

**Ключевые слова:** *Linum usitatissimum* L., возбудитель *Fusarium oxysporum*, R-ген, устойчивость, сорт, линоленовая кислота

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур» (тема № FGSS-2022-0009).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Рожмина Т. А., Мясникова А. В. Идентификация генов устойчивости к фузариозному увяданию у образцов льна масличного с различным жирнокислотным составом. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(6):980-988. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.6.980-988>

Поступила: 12.08.2023

Принята к публикации: 31.10.2023

Опубликована онлайн: 20.12.2023

## Identification of resistance genes to Fusarium wilt in oil flax samples with different fatty acid composition

© 2023. Tatiana A. Rozhmina✉, Anastasija V. Myasnikova

Federal Research Center for Bast Fiber Crops, Tver, Russian Federation

Oil flax seeds are valuable raw material for various industries. The purpose of the research was to form a genetic collection of oil flax for resistance to *Fusarium* wilt in order to create specialized varieties for various purposes with highly effective R-genes. On infectious backgrounds from populations of the fungus *Fusarium oxysporum* f. *lini* (Bolley) and highly virulent monoisolate No 39 of this pathogens, 28 promising genotypes of oilseed flax were assessed. Using a phytopathological test from the world gene pool of the species *Linum usitatissimum* L. 10 promising oil flax genotypes were identified – No. 3829, Uralsky (Russia), l. 6 AGT 1538, l. 12 AGT 987 (Czech Republic), Altess, Eole (France), Selectiong 3 (China), Arnu, Bison (USA) and Linda (Canada), which have effective resistance genes to the fungus *F. oxysporum* f. *lini*, differing in the fatty acid composition of the oil. Using the method of hybridological analysis, it has been established that resistance to *Fusarium* wilt in the low linolenic line l. 12 AGT 987 (Czech Republic) is determined by the *Fu 11* gene, while in the high linolenic l. 3 Altess (France) it is *Fu 4* ( $\chi^2 = 0.02...2.89$ ). In the low linolenic line l. 6 AGT 1538 (Czech Republic) a previously unknown gene for resistance to this disease – *Fu 12* was identified ( $\chi^2 = 0.0001...2.4100$ ). The use of identified genetic sources in breeding programs will contribute to the creation of specialized varieties for the food, chemical and other industries with various R-genes of resistance, which will prevent the development of epiphytotic of this disease on oil flax.

**Key words:** *Linum usitatissimum* L., fungus *Fusarium oxysporum*, R-gene, resistance, variety, linolenic acid

**Acknowledgments:** the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Research Center for Bast Fiber Crops (theme No. FGSS-2022-0009). The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

**Conflict of interest:** the authors stated no conflict of interest.

**For citations:** Rozhmina T. A., Myasnikova A. V. Identification of resistance genes to Fusarium wilt in oil flax samples with different fatty acid composition. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(6):980-988. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.6.980-988>

Received: 12.08.2023

Accepted for publication: 31.10.2023

Published online: 20.12.2023

В последнее десятилетие отмечается неуклонный рост посевных площадей в Российской Федерации, занятых под масличным льном, которые в настоящее время превышают 2,0 млн га<sup>1</sup>. Основной причиной является высокая ценность льносемян, которые во всем мире все шире используются для пищевых и фармацевтических целей, что обусловлено уникальностью их биохимического состава, куда входят незаменимые аминокислоты омега 3 и омега 6, лигнаны, высококачественный белок, полисахариды, витамины и микроэлементы [1, 2, 3]. В современных условиях успешно ведутся исследования по созданию сортов с измененным жирнокислотным составом различного назначения – для химической, пищевой, фармацевтической промышленности, получения биотоплива и других [4, 5]. Впервые в Государственный реестр селекционных достижений РФ были включены сорта масличного льна пищевого назначения в 1998 году, в настоящее время на долю сортов с измененным жирнокислотным составом приходится 15,4 % от общего их числа<sup>2</sup>. Данная культура отличается также высокой технологичностью и низкой затратностью, что делает ее производство высокорентабельным [6, 7]. Вместе с тем, процесс расширения площадей под масличным льном усугубляется несоблюдением севооборотов, что неизбежно ведет к накоплению инфекции в почве. К наиболее вредоносным заболеваниям культуры относится фузариозное увядание, основной возбудитель – *Fusarium oxysporum f. lini* (Bolley), который сохраняется в почве до 7 лет и при эпифитотийном его развитии снижение урожая льносемян может достигать 100 % [8, 9].

В условиях Российской Федерации у данного патогена идентифицировано 16 физиологических рас [10]. Установлено, что при оптимальном для возбудителя температурном режиме

(26–28 °C) может наблюдаться усиление их агрессивности [11].

Устойчивость льна к фузариозному увяданию может определяться как генами горизонтальной, так и вертикальной устойчивости. Учитывая, что передача инфекции возбудителя происходит через почву, то к фузариозному увяданию применима защита, обусловленная единичными эффективными генами. Ярким примером тому является сорт Л-1120, созданный в середине прошлого века, который входит в родословную многих сортов льна-долгунца, устойчивость его к данному заболеванию детерминируется двумя R-генами [12]. Преимущество этого подхода состоит в сокращении периода выведения моногенных сортов и значительном подавлении болезни.

На сегодняшний день у льна известно о наличии одиннадцати R-генов устойчивости к возбудителю *Fusarium oxysporum f. lini*, девять из которых идентифицировано с нашим участием. Создана генетическая коллекция по устойчивости льна к фузариозному увяданию [12]. Проводятся исследования по изучению генетической природы устойчивости с использованием молекулярных методов [13, 14, 15]. На основе разработанной нами селекционно-генетической технологии выведено и включено в Госреестр РФ три сорта льна-долгунца [12]. Всероссийским НИИ масличных культур создан сорт высокоустойчивый не только к фузариозному увяданию, но и льноутомлению [16]. Вместе с тем, из-за изменения климата и расширения посевов под масличным льном высока опасность потери устойчивости, как это не раз наблюдалось на других культурах.

Поэтому для обеспечения надежной генетической защиты льна масличного от данного заболевания необходимо активизировать исследования по созданию сортов с различными эффективными генами.

<sup>1</sup>Посевные площади сельскохозяйственных культур. Лен-кудряш (масличный). [Электронный ресурс]. URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/posev\\_2022.xlsx](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/posev_2022.xlsx) (дата обращения: 10.08.2023).

<sup>2</sup>Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Том I. «Сорта растений» (официальное издание). М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2023. 631 с. URL: <https://gossortrf.ru/publication/reestry.php>

**Цель исследований** – формирование генетической коллекции льна масличного по устойчивости к фузариозному увяданию для создания специализированных сортов с различными высокоэффективными генами резистентности.

**Научная новизна** – коллекция масличного льна пополнилась новыми генисточниками устойчивости к фузариозному увяданию, в т. ч. у трех генотипов идентифицированы различные R-гены. У льна культурного (*Linum usitatissimum* L.) идентифицирован ранее неизвестный ген *Fu 12*, а у масличного – новый ген *Fu 11*. Впервые у генотипов льна с измененным жирнокислотным составом (л. 12 AGT 987, л. 6 AGT 1538) выявлены эффективные R-гены устойчивости к патогену.

**Материал и методы.** Материалом для проведения исследований служила коллекция мирового генофонда льна, созданная в ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур» (ФГБНУ ФНЦ ЛК). Фитопатологическая оценка на устойчивость к фузариозному увяданию выполнена в условиях вегетационного домика в ящичном посеве. Закладку фузариозного инфекционного питомника и оценку материала проводили в соответствии с методическими указаниями<sup>3</sup>. Инфекционный фон при посеве в ящиках создавали путем внесения чистой культуры возбудителя *Fusarium oxysporum f. lini* из расчета 400 г на ящик размером 50x85x20 см.

Для выявления генотипов масличного льна с высокоэффективными генами резистентности к фузариозному увяданию использовали методы гибридологического анализа и фитопатологического тестирования. На инфекционно-провокационных фонах с популяцией гриба *Fusarium oxysporum f. lini* и сильновирulentным моноизолятом 39 данного возбудителя проведена оценка 28 перспективных генотипов масличного льна, обладающих различным жирнокислотным составом.

В составлении искусственной популяции были задействованы моноизоляты гриба *F. oxysporum*, полученные из «Коллекции микроорганизмов – возбудителей болезней льна» ФГБНУ ФНЦ ЛК. В состав искусственной популяции было включено 16 моноизолятов с различной вирулентностью: 50 % – сильновирulentных и 50 % – средневирulentных.

Для идентификации генов устойчивости к фузариозному увяданию у исследуемых перспективных линий на фоне с наиболее виру-

лентным моноизолятом 39 проведена оценка гибридов F<sub>2</sub> от скрещивания их с линиями, обладающими известными R-генами, такими как Ленюк, л. 6, г-2101-4-7, № 3896 (Россия), Родник, л. 8 (отб. к-5064, Республика Беларусь), Querandí, л. 1 (отб. к-4241, Аргентина), Roja, л. 8 (отб. к-3510, Канада), Dakota, л. 8 (отб. к-3218, США), Currong, л. 3 (отб. к-3978, Австралия), Linota, л. 12 (Аргентина).

Учет пораженности фузариозным увяданием проводили в фазу полных всходов льна. Окончательный учет пораженности выполнен в период уборки в фазу ранней желтой спелости. При фитопатологическом анализе стеблей льна определяли количество пораженных растений и степень поражения по 4-балльной шкале:

- 0 – отсутствие поражения, здоровое растение;
- 1 – частичное побурение растения, одностороннее побурение стебля;
- 2 – побурение всего растения с коробочками;
- 3 – полностью бурое, погибшее или отмершее растение до образования коробочек.

Ранжирование изучаемых генотипов льна по устойчивости к фузариозному увяданию проводили на основании результатов фитопатологической оценки растений по степени поражения: до 20 % – устойчивые; с 21 до 30 % – слабовосприимчивые; с 31 до 50 % – средневосприимчивые; свыше 50 % – сильновосприимчивые. При анализе расщепления в F<sub>2</sub> по устойчивости к фузариозному увяданию на инфекционном фоне все растения были разделены на два класса – устойчивые (балл 0) и восприимчивые (балл 1, 2, 3).

Статистическая обработка данных выполнена с использованием метода Пирсона по Б. А. Доспехову<sup>4</sup>.

**Результаты и их обсуждение.** За период с 1989 по 2012 год нами было идентифицировано у линий, выделенных из образцов мировой коллекции льна, 9 эффективных в условиях Российской Федерации генов устойчивости к фузариозному увяданию, один из которых был известен ранее – ген *Fu 2* у линии из сорта масличного льна Dakota. Ген устойчивости *Fu 3*, идентифицированный в условиях Индии у линии из сорта масличного льна Punjab, селекционной ценности в условиях нашей страны не представляет, так как в сильной степени поражается популяцией возбудителя [11].

<sup>3</sup>Селекция и первичное семеноводство льна-долгунца: методические указания. Тверь: Тверской ГУ, 2014. 140 с.

<sup>4</sup>Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. [Предисл. Д. В. Васильевой и др.]. 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

На основании исследований, проведенных нами с 2013 по 2017 год, установлено, что у современных сортов льна-долгунца Зарянка, Русич, Дипломат и Ленок устойчивость к фузариозному увяданию детерминирована генами *Fu 2*, *Fu 9*, *Fu 10* и *Fu 11* соответственно [17]. С использованием разработанной нами селекционно-генетической технологии созданы сорта льна-долгунца Цезарь (в Госреестре РФ с 2018 г.),

Девиз (с 2023 г.) и Сурский (с 2016 г.), обладающие высокоэффективными генами устойчивости *Fu 5*, *Fu 6* и *Fu 8* соответственно, которые отсутствуют у современных сортов. Таким образом, из известных эффективных R-генов устойчивости к данному заболеванию не выявлены генотипы льна-долгунца только с геном *Fu 7*, при этом преобладают линии с генами *Fu 5*, *Fu 8* и *Fu 9* (табл. 1).

**Таблица 1 – Эффективные гены устойчивости к фузариозному увяданию, идентифицированные у линий прядильного и масличного льна (ВНИИ льна, 1994–2017 гг.) /**

**Table 1 – Effective Fusarium wilt resistance genes identified in spinning and oil flax (All-Russian Research Institute of Flax, 1994–2017)**

Ген / Gene	Линия льна масличного / Lines of oil flax	Линия льна-долгунца / Lines of fiber flax
<i>Fu 2</i> / <i>Fu 2</i>	Dakota, л. 8 (США / USA), Clark, л. 3 (Голландия / Holland)	Зарянка (Россия) / Zarjanka (Russia)
<i>Fu 4</i> / <i>Fu 4</i>	№ 340, л. 7 (Аргентина / Argentina), Areco, л. 4, Atalante, л. 2 (Голландия / Holland), № 3896 (Россия / Russia)	Г-4729, л. 3 (Россия) / G-4729, l. 3 (Russia)
<i>Fu 5</i> / <i>Fu 5</i>	-	Querandi, л. 1 (Аргентина / Argentina), К-65, л. 1 (Беларусь / Belarus), Восход, Цезарь (Россия) / Voskhod, Caesar (Russia)
<i>Fu 6</i> / <i>Fu 6</i>	-	Currong, л. 3 (Австралия / Australia), Девиз / Devis (Россия / Russia)
<i>Fu 7</i> / <i>Fu 7</i>	Roja, л. 8 (Канада / Canada), Siciliana 285, л. 3 (Италия / Italy)	-
<i>Fu 8</i> / <i>Fu 8</i>	-	г-2101-4-7, Сурский (Россия) / g-2101-4-7, Surskiy (Russia), Родник, л. 8 (Беларусь) / Rodnik, l. 8 (Belarus), Z 95199 (Румыния / Romania), Honkei 21 (Китай / China)
<i>Fu 9</i> / <i>Fu 9</i>	-	Родник, л. 8 (Беларусь) / Rodnik, l. 8 (Belarus), Русич, Смолич (Россия) / Rusich, Smolich (Russia)
<i>Fu 10</i> / <i>Fu 10</i>	Linota, л. 12 (Аргентина / Argentina)	Дипломат (Россия) / Diplomat (Russia)
<i>Fu 11</i> / <i>Fu 11</i>	-	Ленок (Россия) / Lenok (Russia)

В результате проведенных исследований, у образцов мировой коллекции масличного льна нами идентифицировано всего четыре R-гена устойчивости – *Fu 2*, *Fu 4*, *Fu 7* и *Fu 10*, что указывает на необходимость продолжения исследований по формированию генетической коллекции этой культуры по устойчивости к фузариозному увяданию.

Для решения данной задачи в исследовании было включено 28 перспективных линий и сортов масличного льна отечественной и зарубежной селекции, различающихся по жирнокислотному составу масла: высоколиноленовые (55–65 % линоленовой кислоты от общего количества жирных кислот) – Уральский, Северный,

Циан, № 3801, № 3829 (Россия), AGT 981, JDG 4102 (Чешская Республика), л. 7 Altess, Eolle, Dochess, Astral (Франция), Lusatia (Германия), Vitagold (Ирландия), Selectiong 3 (Китай), BS-12 (Индия), Arnun, Bison (США), Flanders, Linda (Канада); среднелиноленовые (35 %) – Raciol (Чешская Республика); низколиноленовые (менее 10 %) – ЛМ 98 (Россия), л. 6 AGT 1538, л. 12 AGT 987, Jantar, Amon (Чешская Республика), Lola (Великобритания), Еуре, Walaga (Австралия).

Проведенное нами фитотестирование данных линий и сортов масличного льна на фонах с популяцией возбудителя *Fusarium oxysporum f. lini* и сильновирulentным моноизолятом данного гриба № 39 позволило выявить 10 гено-

типов с высоким уровнем устойчивости во все годы испытаний (пораженность от 0 до 20 %), что указывает на наличие у них высокоэффективных R-генов к фузариозному увяданию (табл. 2). Высокий уровень устойчивости проявили генотипы № 3829, Уральский (Россия), л. 6 AGT 1538, л. 12 AGT 987 (Чешская Республика), Altess, Eole (Франция), Selectiong 3

(Китай), Arnun, Bison (США) и Linda (Канада). Пораженность восприимчивого стандарта – линии AP 5 во всех вариантах опыта составила свыше 87 %, что свидетельствует о жесткости инфекционных фонов. Более того, следует отметить, что растения с баллом поражения 1 и 2 практически отсутствовали, что также указывает на жесткость инфекционного фона.

**Таблица 2 – Пораженность перспективных линий и сортов масличного льна фузариозным увяданием (инфекционный фон – популяция и моноизolat 39 гриба *Fusarium oxysporum* f. *lini*) /**

**Table 2 – Infection of promising lines and varieties of oil flax with Fusarium wilt (infectious background – population and monoisolate 39 mushroom *Fusarium oxysporum* f. *lini*)**

Название образца / Name of sample	Происхождение / Origin	Пораженность грибом <i>F. oxysporum</i> , % / <i>F. oxysporum</i> fungus infestation, %							
		популяция / population				моноизolat № 39 / monoisolate No 39			
		2020 г.	2021 г.	2022 г.	среднее / average	2020 г.	2021 г.	2022 г.	среднее / average
Уральский / Uralskiy	Россия / Russia	16,7	0	0	5,6	0	0	0	0
№ 3829		0	0	18,8	6,3	0	0	0	0
л. 6 AGT 1538*	Чехия / Czech Republic	0	18,8	12,5	10,4	0	0	6,3	2,1
л. 12 AGT 987**		14,3	6,25	0	6,9	0	0	0	0
л. 7 Altess	Франция / France	12,5	15,3	16,7	14,8	19,4	12,5	14,3	15,4
Eolle		19,4	6,25	0	8,6	8,3	0	0	2,8
Selectiong 3	Китай / China	0	20,4	20	13,5	0	0	16,7	5,6
Arnun	США / USA	0	0	0	0,0	0	0	20,0	6,7
Bison		14,3	0	7,1	7,1	0	0	13,3	4,4
Linda	Канада / Canada	20,0	6,6	0	8,9	16,7	16,5	6,3	13,2
№ 3801	Россия / Russia	12,5	0	31,3	14,6	0	0	0	0,0
JDG 4102	Чехия / Czech Republic	16,7	0	31,3	16,0	11,1	0	6,3	5,8
Raciol **		16,7	12,5	12,5	13,9	0	12,5	33,3	15,3
Dochess	Франция / France	0	0	28,6	9,5	0	0	12,5	4,2
BS-12	Индия / India	0	0	26,7	8,9	0	0	0	0,0
ЛМ 98/ LM 98 *	Россия / Russia	100	87,5	46,7	78,1	75	100	54,5	76,5
Северный/ Severniy		71,4	25	0	32,1	11,1	12,5	46,7	23,4
Циан / Zian		80	68,7	50	66,2	55,6	25,0	21,4	34,0
AGT 981	Чехия / Czech Republic	50,0	84,6	57,1	63,9	66,7	75,0	50,0	63,9
Jantar*		100	71,4	37,5	69,6	50	33,3	25,0	36,1
Amon		100	78,6	78,6	85,7	55,6	57,5	85,7	66,3
Lola*	Великобритания / Great Britain	20	58,1	31,3	36,5	58,3	93,8	12,5	54,9
Vitagold	Ирландия / Ireland	100	100	53,3	84,4	63,9	80,4	87,5	77,3
Astral	Франция / France	100	75	100	91,7	100	100	100	100
Lusatia	Германия / Germany	100	80	86,7	88,9	72,2	100	100	90,7
Flanders	Канада / Canada	66,7	46,7	62,5	58,6	55,6	62,5	68,8	62,3
Eyre*	Австралия / Australia	100	75	93,3	89,4	100	100	87,5	95,8
Walaga*		100	60	68,8	76,3	58,3	43,8	37,5	46,5
AP 5 – стандарт / AR 5 – standard	Россия / Russia	100	93,8	87,5	93,8	93,8	100	92,8	95,5

\*Содержание линоленовой кислоты в масле низкое – менее 10 %; \*\*среднее – 35 % /

\*The content of linolenic acid in the oil is low – less than 10%; \*\*average – 35% /

Высокую степень поражения (от 50,1 до 100 %) на обоих фонах по данным трех лет испытаний проявили следующие образцы: AGT 981, Amon (Чешская Республика), Vitagold (Великобритания), Astral (Франция), Lusatia (Германия), Euge (Австралия). Следует отметить высокую изменчивость уровня поражения – от слабой до сильной, в зависимости от года испытаний, у сортов льна масличного Циан, Северный и Lola как на фоне с популяцией патогена, так и на фоне с моноизолятом № 39 гриба *Fusarium oxysporum* f. *lini*. При этом по результатам оценки в среднем за 3 года: сорт Северный – средневосприимчив к популяции возбудителя, но слабовосприимчив к моноизолату 39; сорт Циан – сильновосприимчив к популяции возбудителя и средневосприимчив к моноизолату 39; сорт Lola – средневосприимчив к популяции возбудителя и сильновосприимчив к моноизолату 39.

С целью идентификации эффективных генов устойчивости к фузариозному увяданию у льна масличного на инфекционном фоне с моноизолатом 39 провели анализ гибридов F<sub>2</sub> от скрещиваний линий, обладающих различными высокоэффективными генами устойчивости к фузариозному увяданию, с линиями – 6 AGT 1538, 12 AGT 987 (Чешская Республика)

и 7 Altess (Франция), проявивших высокий уровень фузариозоустойчивости. Более того, линии AGT 1538 и AGT 987 отличались низким содержанием линоленовой кислоты (менее 10 %), что важно для получения ценного пищевого масла с длительным периодом его хранения.

В гибридных комбинациях F<sub>2</sub>, где в качестве материнской формы были использованы линии из образцов Dakota, № 3896, Querandi, Currong, Roja, г-2101-7-4, Linota и Ленок, обладающие моногенной устойчивостью, в частности генами *Fu 2*, *Fu 4*, *Fu 5*, *Fu 6*, *Fu 7*, *Fu 8*, *Fu 10* и *Fu 11* соответственно, а в качестве отцовской – линия масличного льна л. 6 AGT 1538, выявлен дигенный характер расщепления – 15R:1S ( $\chi^2 = 0,0001...2,4100$ ). В гибридной комбинации от скрещивания с линией из сорта Родник, устойчивость которой детерминруется двумя доминантными генами – *Fu 8* и *9*, с линией AGT 1538, расщепление соответствовало соотношению 63R:1S ( $\chi^2 = 0,02$ ) (табл. 3). Полученные результаты гибридологического анализа подтвердили наличие у линии AGT 1538 высокоэффективного R-гена, который отличается от всех ранее известных генов устойчивости к фузариозному увяданию у льна, который был обозначен *Fu 12*.

Таблица 3 – Расщепление по устойчивости к фузариозному увяданию в F<sub>2</sub> от скрещивания генотипов с различными R-генами с линией масличного льна AGT 1538 (инфекционный фон – моноизолат 39 *F. oxysporum*), 2021 г. /

Table 3 – Segregation for resistance to Fusarium wilt in F<sub>2</sub> from crossing genotypes with different R-genes with the oil flax line AGT 1538 (infectious background – monoisolate 39 *F. oxysporum*), 2021

Ген / Gene <i>Fu</i> ♀	Гибридная комбинация / Hybrid combination	Соотношение фенотипов R:S / Phenotype ratio R:S		$\chi^2$ / chi-square	Величина вероятности / Probability value
		фактическое / actual	теоретическое / theoretical		
2	Dakota, л. 8 × AGT 1538, л. 6	161:16	15:1	2,41	0,05-0,2
4	№ 3896 × AGT 1538, л. 6	150:13	15:1	0,83	0,2-0,5
5	Querandi, л. 1 × AGT 1538, л. 6	177:14	15:1	0,38	0,5-0,8
6	Currong, л. 3 × AGT 1538, л. 6	144:11	15:1	0,17	0,5-0,8
7	Roja, л. 8 × AGT 1538, л. 6	104:4	15:1	1,20	0,2-0,5
8	г-2101-4-7 × AGT 1538, л. 6	58:4	15:1	0,0001	< 0,99
8, 9	Родник / Rodnik, л. 8 × AGT 1538, л. 6	174:2	63:1	0,02	0,8-0,95
10	Linota / Linota, л. 12 × AGT 1538, л. 6	185:11	15:1	0,03	0,8-0,95
11	Ленок / Lenok, л. 6 × AGT 1538, л. 6	154:14	15:1	1,25	0,2-0,5

В комбинациях F<sub>2</sub>, где в качестве материнской формы были использованы линии из образцов Dakota, № 3896, Querandi, Currong, Roja, г-2101-7-4, Linota и Ленок, а в качестве отцовской – линии масличного льна л. 12 AGT 987 и л. 3 Altess, практически во всех гибридных

популяциях выявлен дигенный характер расщепления – 15R:1S ( $\chi^2 = 0,02...2,89$ ). Исключения составили популяции F<sub>2</sub> от скрещивания с линией из сорта Родник, устойчивость которой детерминруется двумя доминантными генами ( $\chi^2 = 0,48$  и  $2,13$  соответственно) (табл. 4). При

этом выделились гибридные популяции F<sub>2</sub> Ленок, л. 6 × л. 12 AGT 987 и F<sub>2</sub> № 3896 × л. 3 Altess, где расщепление отсутствовало, что указывает на идентичность генов устойчивости у исходных родительских форм. Полученные результаты

гибридологического анализа F<sub>2</sub> указывают, что устойчивость к фузариозному увяданию у исследуемых линий детерминирована эффективными генами – у л. 12 AGT 987 геном *Fu 11*, л. 3 Altess – *Fu 4*.

Таблица 4 – Расщепление по устойчивости к фузариозному увяданию в F<sub>2</sub> от скрещивания генотипов с различными R-генами с линиями AGT 987 и Altess (инфекционный фон – моноизолят 39 *F. oxysporum*), 2022-2023 гг. /

Table 4 – Segregation for resistance to Fusarium wilt in F<sub>2</sub> from crossing genotypes with different R-genes with lines AGT 987 and Altess (infectious background - monoisolate 39 *F. oxysporum*), 2022-2023

Ген / Gene <i>Fu</i> ♀	Гибридная комбинация / Hybrid combination	Соотношение фенотипов R:S / Phenotype ratio R:S		$\chi^2$ / chi-square	Величина вероятности / Probability value
		фактическое / actual	теоретическое / theoretical		
2	Dakota, л. 8 × AGT 987, л. 12	158:5	15:1	1,17	0,2-0,5
5	Querandi, л. 1 × AGT 987, л. 12	179:9	15:1	0,7	0,2-0,5
6	Currong, л. 3 × AGT 987, л. 12	170:11	15:1	0,08	0,5-0,8
7	Roja, л. 8 × AGT 987, л. 12	170:11	15:1	0,08	0,5-0,8
8, 9	Родник / Rodnik, л. 8 × AGT 987, л. 12	188:2	63:1	0,48	0,2-0,5
10	Linota, л. 12 × AGT 987, л. 12	179:7	15:1	1,92	0,05-0,2
11	Ленок / Lenok, л. 6 × AGT 987, л. 12	185:0	-	-	-
2	Dakota, л. 8 × Altess, л. 3	173:16	15:1	1,59	0,2-0,5
4	№ 3896 × Altess, л. 3	163:0	-	-	-
5	Querandi, л. 1 × Altess, л. 3	162:9	15:1	2,89	0,05-0,20
6	Currong, л. 3 × Altess, л. 3	198:14	15:1	0,02	0,8-0,95
7	Roja, л. 8 × Altess, л. 3	144:8	15:1	0,25	0,5-0,8
8	г-2101-4 × Altess, л. 3	149:13	15:1	0,89	0,2-0,5
8, 9	Родник / Rodnik, л. 8 × Altess, л. 3	82:3	63:1	2,13	0,05-0,20
10	Linota, л. 12 × Altess, л. 3	190:7	15:1	2,43	0,05-0,20
11	Ленок / Lenok, л. 6 × Altess, л. 3	136:3	15:1	1,75	0,05-0,20

**Заключение.** В результате проведенных исследований выявлено 10 селекционных линий и сортов отечественной и зарубежной селекции, проявивших высокий уровень устойчивости как к популяции возбудителя *Fusarium oxysporum f. lini*, так и высоковирулентному моноизоляту 39, что указывает на наличие у них высокоэффективных R-генов устойчивости к фузариозному увяданию. С использованием метода гибридологического анализа идентифицированы эффективные гены устойчивости к патогену у линий масличного льна л. 12 AGT 987 – ген *Fu 11* и л. 3 Altess – *Fu 4*. У линии 6 AGT 1538

выявлен ранее неизвестный ген устойчивости – *Fu 12*. При этом линии 6 AGT 1538 и 12 AGT 987 отличаются низким содержанием линоленовой кислоты в масле, что важно для обеспечения его длительной сохранности от прогоркания при хранении. Таким образом, генетическая коллекция масличного льна по устойчивости к фузариозному увяданию расширилась за счет включения в нее трех новых генетических источников, в том числе обладающих генами *Fu 11* и *Fu 12*, которые ранее не были идентифицированными у данной культуры.

#### Список литературы

1. Косых Л. А. Лен масличный – культура пищевого использования (обзор). Аграрная наука. 2021;(10):56-59. DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-353-10-56-59> EDN: ZQRRJV
2. Цыганова Т. Б., Миневиц И. Э., Зубцов В. А. К вопросу о пищевой безопасности семян льна и продуктов их переработки. Хлебопечение России. 2017;(2):23-26.
3. Султаева Н. Л., Перминова В. С. Исследование свойств семян льна и разработка на их основе технологии хлебобулочных изделий. Интернет-журнал «Науковедение». 2015;7(1). Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/145TVN115.pdf>

4. Пороховинова Е. А., Павлов А. В., Брач Н. Б., Морван К. Углеводный состав слизи из семян льна и его связь с морфологическими признаками. Сельскохозяйственная биология. 2017;52(1):161-171. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.1.161rus> EDN: YFQFGX
5. Голуб И. А., Андроник Е. Л., Иванова Е. В. Лен масличный: тенденции производства и использования. Земледелие и защита растений. 2017;(4):32-35.
6. Fila G., Bagatta M., Maestrini C., Potenza E., Matteo R. Linseed as a dual-purpose crop: evaluation of cultivar suitability and analysis of yield determinants. The Journal of Agricultural Science. 2018;156(2):162-176. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859618000114>
7. Калиакпарова Г. Ш., Гриднева Е. Е. Лен как глобальный сырьевой ресурс Казахстана. Вестник университета Туран. 2019;81(1):74-78. Режим доступа: [https://vestnik.turan-edu.kz/jour/article/view/643?locale=ru\\_RU](https://vestnik.turan-edu.kz/jour/article/view/643?locale=ru_RU) EDN: DPDBTM
8. Зеленцов С. В., Рябенко Л. Г., Мошненко Е. В., Зеленцов В. С. Селекция масличного льна на устойчивость к льноутомлению для короткороотационных севооборотов засушливых регионов юга России. Достижения науки и техники АПК. 2016;30(6):9-11. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26591632> EDN: WJXNIT
9. Курилова Д. А., Семеренко С. А. Защита посевов масличного льна от фузариоза в условиях Центральной зоны Краснодарского края. Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2018;(4):167-171. DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2018-4-176-167-171> EDN: VSNOGC
10. Лошакова Н. И. Идентификация рас возбудителя фузариоза льна и определения их вирулентности для целей селекции. Селекция, семеноводство, агротехника, экономика и первичная обработка льна-долгунца: сб. тр. ВНИИЛ. Торжок: ООО «Вариант», 2002. С. 44-47.
11. Рожмина Т. А., Лошакова Н. И. Образцы прядильного и масличного льна (*Linum usitatissimum* L.) – источники эффективных генов устойчивости к фузариозному увяданию и ее зависимость от температуры. Сельскохозяйственная биология. 2016;51(3):310-317. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.3.310rus> EDN: WJCSBR
12. Рожмина Т. А. Селекционно-ценные гены устойчивости к фузариозному увяданию у льна. Достижения науки и техники АПК. 2015;29(12):47-49. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25279745> EDN: VHFCSV
13. Sánchez-Martín J., Keller B. Contribution of recent technological advances to future resistance breeding. Theoretical and Applied Genetics. 2019;132:713-732. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00122-019-03297-1>
14. Kourelis J., Van der Hooft R. A. L. Defended to the Nines: 25 Years of Resistance Gene Cloning Identifies Nine Mechanisms for R Protein Function. Plant Cell. 2018;30(2):285-299. DOI: <https://doi.org/10.1105/tpc.17.00579>
15. Krasnov G. S., Pushkova E. N., Novakovskiy R. O., Kudryavtseva L. P., Rozhmina T. A., Dvorianina E. M., Povkhova L. V., Kudryavtseva A. V., Dmitriev A. A., Melnikova N. V. High-quality genome assembly of *Fusarium oxysporum* f. sp. lini. Frontiers in Genetics. 2020;11:959. DOI: <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00959>
16. Зеленцов В. С., Рябенко Л. Г., Зеленцов С. В., Мошненко Е. В., Овчарова Л. Р., Сляров С. В. Сорт масличного льна БИ 117. Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2018;(4):181-184. DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2018-4-176-181-184> EDN: FCGLPG
17. Рожмина Т. А., Голубева Л. М. Эффективные гены устойчивости к фузариозному увяданию у современных сортов льна-долгунца. Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2018;(4):37-41. DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2018-4-176-37-41> EDN: YVEINF

### References

1. Kosykh L. A. Oil flax – food culture (review). *Agrarnaya nauka* = Agrarian science. 2021;(10):56-59. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-353-10-56-59>
2. Tsyganova T. B., Minevich I. E., Zubtsov V. A. To the question of food safety of flax seeds and products of their processing. *Khlebopechenie Rossii* = Baking in Russia. 2017;(2):23-26. (In Russ.).
3. Sultaeva N. L., Perminova V. S. Study of the properties of flax seeds and development of the technology of bakery products on their basis to service catering. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*. 2015;7(1). (In Russ.). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/145TVN115.pdf>
4. Porokhovinova E. A., Pavlov A. V., Brach N. B., Morvan K. Carbohydrate composition of flax mucilage and its relation to morphological characters. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2017;52(1):161-171. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.1.161rus>
5. Golub I. A., Andronik E. L., Ivanova E. V. Oilseed flax: production and use trends. *Zemledelie i zashchita rasteniy*. 2017;(4):32-35. (In Belarus).
6. Fila G., Bagatta M., Maestrini C., Potenza E., Matteo R. Linseed as a dual-purpose crop: evaluation of cultivar suitability and analysis of yield determinants. The Journal of Agricultural Science. 2018;156(2):162-176. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859618000114>

7. Kaliakparova G. S., Gridneva Y. Y. Flax as a global raw material resource of Kazakhstan. *Vestnik universiteta «Turan»* = Bulletin of «Turan» University. 2019;(1):74-78. (In Russ.).  
URL: [https://vestnik.turan-edu.kz/jour/article/view/643?locale=ru\\_RU](https://vestnik.turan-edu.kz/jour/article/view/643?locale=ru_RU)
8. Zelentsov S. V., Ryabenko L. G., Moshnenko E. V., Zelentsov V. S. Breeding of oil flax for resistance to flax sickness of soil for brief-crop rotation of the arid regions of the southern Russia areas. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2016;30(6):9-11. (In Russ.).  
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26591632>
9. Kurilova D. A., Semerenko S. A. Protection of oil flax sowings of fusarirose in the central zone of the Krasnodar region. *Maslichnye kul'tury. Nauchno-tekhnicheskii byulleten' Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnykh kul'tur* = Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK. 2018;(4):167-171. (In Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2018-4-176-167-171>
10. Loshakova N. I. Identification of races of the causative agent of flax fusarium and determination of their virulence for breeding purposes. Selection, seed production, agricultural technology, economics and primary processing of fiber flax: collection. tr. Torzhok: OOO «Variant», 2002. pp. 44-47.
11. Rozhmina T. A., Loshakova N. I. New sources of effective resistance genes to fusarium wilt in flax (*Linum usitatissimum* L.) depending on temperature. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2016;51(3):310-317. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.3.310rus>
12. Rozhmina T. A. Valuable for breeding genes of resistance to fusarium wilt of flax. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2015;29(12):47-49. (In Russ.).  
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25279745>
13. Sánchez-Martín J., Keller B. Contribution of recent technological advances to future resistance breeding. *Theoretical and Applied Genetics*. 2019;132:713-732. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00122-019-03297-1>
14. Kourelis J., Van der Hoorn R. A. L. Defended to the Nines: 25 Years of Resistance Gene Cloning Identifies Nine Mechanisms for R Protein Function. *Plant Cell*. 2018;30(2):285-299. DOI: <https://doi.org/10.1105/tpc.17.00579>
15. Krasnov G. S., Pushkova E. N., Novakovskiy R. O., Kudryavtseva L. P., Rozhmina T. A., Dvorianinova E. M., Povkhova L. V., Kudryavtseva A. V., Dmitriev A. A., Melnikova N. V. High-quality genome assembly of fusarium oxysporum f. sp. lini. *Frontiers in Genetics*. 2020;11:959. DOI: <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00959>
16. Zelentsov V. S., Ryabenko L. G., Zelentsov S. V., Moshnenko E. V., Ovcharova L. R., Slyarov S. V. The oil flax variety Y 117. *Maslichnye kul'tury. Nauchno-tekhnicheskii byulleten' Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnykh kul'tur* = Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK. 2018;(4):181-184. (In Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2018-4-176-181-184>
17. Rozhmina T. A., Golubeva L. M. Effective genes of resistance to fusarium wilt in modern fiber flax varieties. *Maslichnye kul'tury. Nauchno-tekhnicheskii byulleten' Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnykh kul'tur* = Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK. 2018;(4):37-41. (In Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2018-4-176-37-41>

#### **Сведения об авторах**

✉ **Рожмина Татьяна Александровна**, доктор биол. наук, зав. лабораторией селекционных технологий, Научно-исследовательский институт льна – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», ул. Луначарского, д. 35, г. Торжок, Российская Федерация, 172002, e-mail: [vniiil.sekretar@mail.ru](mailto:vniiil.sekretar@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8204-7341>, e-mail: [len\\_rozhmina@mail.ru](mailto:len_rozhmina@mail.ru)

**Мясникова Анастасия Владимировна**, инженер-исследователь, Научно-исследовательский институт льна – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур», ул. Луначарского, д. 35, г. Торжок, Российская Федерация, 172002, e-mail: [vniiil.sekretar@mail.ru](mailto:vniiil.sekretar@mail.ru)

#### **Information about the authors**

✉ **Tatiana A. Rozhmina**, DSc in Biology, Head of the Laboratory of Breeding Technologies, Flax Research Institute – Separate division of Federal Research Center for Bast Fiber Crops, Lunacharsky St., 35, Torzhok, Russian Federation, 172002, e-mail: [vniiil.sekretar@mail.ru](mailto:vniiil.sekretar@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8204-7341>, e-mail: [len\\_rozhmina@mail.ru](mailto:len_rozhmina@mail.ru)

**Anastasija V. Myasnikova**, research engineer, Flax Research Institute – Separate division of Federal Research Center for Bast Fiber Crops, Lunacharsky St., 35, Torzhok, Russian Federation, 172002, e-mail: [vniiil.sekretar@mail.ru](mailto:vniiil.sekretar@mail.ru)

✉ – Для контактов / Corresponding author