

Н. В. Пролётова

Федеральный научный центр лубяных культур, Тверь, Россия

✉ science.trk@fncl.ru

Поступила в редакцию:
17.02.2023Одобрена после рецензирования:
11.07.2023Принята к публикации:
25.07.2023

Research article


 creative commons
Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2023-373-8-120-125

Nataliya V. Proletova

Federal Scientific Center of Bast Crops,
Tver, Russia

✉ science.trk@fncl.ru

Received by the editorial office:
17.02.2023Accepted in revised:
11.07.2023Accepted for publication:
25.07.2023

Реакция льна-долгунца (*Linum usitatissimum* L.) на содержание ионов алюминия в культуре *in vitro*

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Влияние неблагоприятных факторов внешней среды является одной из причин низкой реализации биологических возможностей современных сортов льна в производственных условиях. Возделывание льна на почвах с сильноокислой (pH_{KCl} 4,5 и ниже) и нейтральной (pH_{KCl} свыше 6,0) реакцией приводит к существенному снижению продуктивности волокна и семян. Биотехнологические методы являются эффективными при создании новых форм с измененными признаками и свойствами.

Методы. Исследования проводились в условиях *in vitro*. Исходный материал — семена и гипокотильные сегменты сортов льна-долгунца Импульс, Феникс, Лидер, С-108, Союз. Селективным агентом в исследованиях служили соли алюминия в виде AlCl_3 в концентрациях 0 (контроль — H_2O дист. / питательная среда MS без селективного агента), 44 мг/л, 64 мг/л, 84 мг/л.

Результаты. Выявлено токсическое действие AlCl_3 на прорастание семян льна-долгунца, формирование первичных корешков и проростков — гипокотилей используемых сортов. Показатель величины, обозначающей длину первичных корешков у проросших семян льна-долгунца, на седьмые сутки снижался с повышением концентрации раствора AlCl_3 . Наибольшую чувствительность к содержанию ионов алюминия проявили сорта С-108, Лидер и Союз. Это выразилось в уменьшении длины гипокотилей при повышении концентрации ионов алюминия в растворе. У генотипов во всех вариантах исследований на селективной среде, содержащей AlCl_3 , формировался морфогенный каллус. Частота формирования морфогенных каллусов была различной в зависимости от концентрации AlCl_3 в среде культивирования. Тенденция к снижению количества морфогенных клеток с повышением концентрации ионов алюминия наблюдалась у всех сортов. У менее чувствительных сортов (Импульс и Феникс) количество сформированного морфогенного каллуса было выше, чем у более чувствительных (С-108, Союз, Лидер). В селективных условиях получены побеги льна-долгунца исследуемых сортов, устойчивые к AlCl_3 .

Ключевые слова: лен-долгунец, питательная среда, селективная среда, гипокотильные сегменты, морфогенный каллус, селекция *in vitro*

Для цитирования: Пролётова Н.В. Реакция льна-долгунца (*Linum usitatissimum* L.) на содержание ионов алюминия в культуре *in vitro*. *Аграрная наука*. 2023; 373(8): 120–125.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-373-8-120-125>

© Пролётова Н.В.

The reaction of fiber flax (*Linum usitatissimum* L.) to the content of aluminum ions in *in vitro* culture

ABSTRACT

Relevance. The influence of unfavorable environmental factors is one of the reasons for the low realization of the biological capabilities of modern flax varieties in production conditions. Cultivation of flax on soils with strongly acidic (pH_{KCl} 4.5 and below) and neutral (pH_{KCl} over 6.0) reactions leads to a significant decrease in the productivity of fiber and seeds. Biotechnological methods are effective in creating new forms with altered features and properties.

Methods. The studies were conducted *in vitro*. The source material is seeds and hypocotyl segments of flax varieties-dolguntsa Impulse, Phoenix, Leader, S-108, Soyuz. The selective agent in the studies was aluminum salts in the form of AlCl_3 at concentrations of 0 (control — H_2O dist. / nutrient medium (without selective agent), 44 mg/l, 64 mg/l, 84 mg/l.

Results. The toxic effect of AlCl_3 on the germination of fiber flax seeds, the formation of primary roots and seedlings — hypocotyls of the varieties used was revealed. The indicator of the value indicating the length of primary roots in germinated fiber flax seeds decreased on the seventh day with an increase in the concentration of the AlCl_3 solution. The highest sensitivity to the content of aluminum ions was shown by varieties S-108, Leader and Soyuz. This was expressed in a decrease in the length of the hypocotyl with an increase in the concentration of aluminum ions in the solution. In genotypes in all variants of studies on a selective medium containing AlCl_3 , a morphogenic callus was formed. The frequency of formation of morphogenic calli was different depending on the concentration of AlCl_3 in the cultivation medium. A trend towards a decrease in the number of morphogenic cells with an increase in the concentration of aluminum ions was observed in all varieties. In less sensitive varieties (Impulse and Phoenix), the amount of morphogenic callus formed was higher than in more sensitive ones (C-108, Soyuz, Leader). Under selective conditions, shoots of flax of the studied varieties resistant to AlCl_3 were obtained.

Key words: fiber flax, nutrient medium, selective medium, hypocotyl segments, morphogenic callus, *in vitro* selection

For citation: Proletova N.V. The reaction of fiber flax (*Linum usitatissimum* L.) to the content of aluminum ions *in vitro* culture. *Agrarian science*. 2023; 373(8): 120–125 (In Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-373-8-120-125>

© Proletova N.V.

Введение/Introduction

Лен-долгунец — основной источник отечественного натурального волокнистого сырья. Влияние неблагоприятных факторов внешней среды является одной из причин низкой реализации биологических возможностей современных сортов льна в производственных условиях [1–3]. Возделывание льна на почвах с сильнокислой (pH_{KCl} 4,5 и ниже) и нейтральной (pH_{KCl} выше 6,0) реакцией приводит к существенному снижению продуктивности волокна и семян [4, 5]. Токсичность кислых почв обусловлена рядом факторов. Так, негативное влияние кислотности (высоких концентраций обменного водорода) проявляется на очень кислых торфяных почвах с pH 2,8–3,9 при низком содержании обменного кальция. Очевидно, что под пашню такие почвы используются крайне редко [6–8].

Лен-долгунец в основном выращивают в регионах, где преобладающими являются дерново-подзолистые почвы. На таких почвах важнейшими причинами, обуславливающими угнетающее действие на культурные растения, являются содержание подвижного алюминия и уровень его токсичности [4, 9, 10]. Дерново-подзолистые почвы содержат огромное валовое количество алюминия (в среднем 9%). Растворимость алюминия зависит от pH почвенного раствора. В пределах значений pH от 5 до 9 алюминий не растворим. Содержание ионов алюминия в почве и его негативное действие уменьшаются за счет образования частично диссоциированных форм $\text{Al}(\text{OH})_3$ и комплексов между алюминием и органическим веществом [10–12].

Значительная пестрота почвенного покрова в основных льносеющих регионах РФ по агрохимическим показателям (и прежде всего по уровню кислотности), а также узкий оптимальный интервал (pH_{KCl} 5,2–5,6) для возделывания льна-долгунца требуют решения проблемы в современных условиях не столько агрохимическим, сколько селекционным путем. Биотехнологические методы (как инструмент классической селекции) являются эффективными при создании новых форм с измененными признаками и свойствами. Возможность получения таких генотипов продемонстрирована на многих культурах, в том числе и на льне [13–15], поэтому целью исследований являлась разработка методических подходов при селекции генотипов льна-долгунца *in vitro* на устойчивость к повышенной кислотности почвы для создания новых, устойчивых к этому абиотическому фактору сортов.

Материалы и методы исследований / Materials and methods

Исследования проводились в лаборатории селекционных и биотехнологий ФНЦ ЛК в 2022 году. Селекцию *in vitro* на устойчивость к токсичным ионам алюминия проводили с использованием биотехнологических методов, разработанных Н.В. Пролётовой, Е.Г. Виноградовой, Л.П. Кудрявцевой¹.

Схема проведения исследований в условиях *in vitro* (рис. 1):

- подбор генотипов льна для проведения исследований;
- проращивание семян в чашках Петри на растворе AlCl_3 в различных концентрациях (pH_{KCl} 4,0, контроль — H_2O дистиллированная);

- культивирование семян на 1%-ном растворе сахарозы для получения гипокотильных сегментов;
- культивирование гипокотильных сегментов (ГС) на селективной среде, состоящей из компонентов питательной среды MS (Мурасиге-Скуга) и солей алюминия в виде AlCl_3 в концентрациях 44 мг/л, 64 мг/л, 84 мг/л (pH_{KCl} 4,0, контроль — питательная среда MS без селективного агента);
- культивирование каллусных клеток на селективной среде, состоящей из компонентов питательной среды MS и солей алюминия в виде AlCl_3 в концентрациях 44 мг/л, 64 мг/л, 84 мг/л (pH_{KCl} 4,0, контроль — питательная среда MS без селективного агента);
- отбор клеток льна, устойчивых к токсичным ионам алюминия;
- получение растений-регенерантов, обладающих устойчивостью к токсическому действию алюминия;
- оценка регенерантов в условиях *in vitro* по устойчивости к токсическому действию ионов алюминия.

Исходным материалом при селекции *in vitro* на устойчивость к повышенной кислотности почвы в биотехнологических исследованиях использовали семена и гипокотильные сегменты сортов льна-долгунца Импульс, Феникс, Лидер, С-108, Союз.

Селективным агентом в исследованиях токсического действия алюминия в культуре гипокотильных сегментов и каллуса *in vitro* служили соли алюминия в виде AlCl_3 в концентрациях 0 (контроль — питательная среда MS без селективного агента) 44 мг/л, 64 мг/л, 84 мг/л.

Статистическая обработка данных выполнена с помощью пакета программ Microsoft Excel 2010 (Office 2019) с использованием методов первичной статистической обработки результатов эксперимента — определения выборочной средней величины и стандартного отклонения².

Результаты и обсуждение / Results and discussion

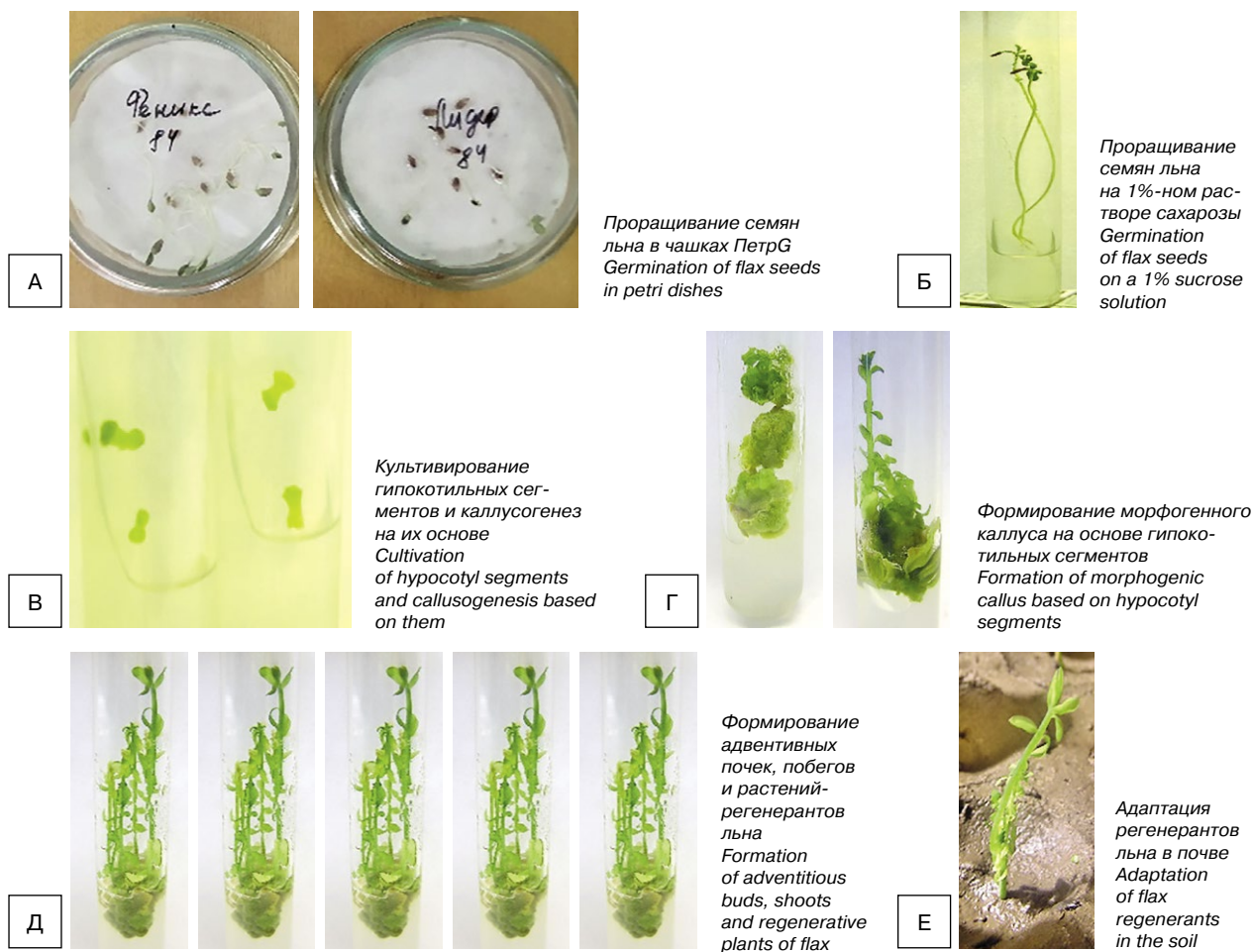
С целью определения концентраций AlCl_3 , при которых отмечается угнетающее действие раствора на лен, для дальнейшего использования выбранных концентраций в культуре *in vitro* семена включенных в исследования сортов льна-долгунца проращивали на растворе AlCl_3 различных концентраций, измеряли длину первичного корешка и величину гипокотилиа на седьмые сутки с момента помещения на фильтровальную бумагу с раствором. Концентрация раствора AlCl_3 (44 мг/л, 64 мг/л, 84 мг/л) выбрана исходя из предложенной в Методических рекомендациях Е.Г. Виноградовой.

В ходе исследований выявлено, что всхожесть семян у всех сортов была высокой и находилась в пределах 89–94% (проращивание на дистиллированной воде — контрольный вариант). Энергия прорастания сортов была тоже довольно высокой — уже на вторые сутки семена всех генотипов начинали прорастать, а к окончанию вторых суток большинство семян имели длину первичного корешка около 1 мм. В течение семи суток происходили рост первичного корешка и формирование проростков — гипокотилей.

Установлено, что используемые сорта по-разному реагировали на исследуемые концентрации AlCl_3 и кислотность раствора. Снижение длины первичного ко-

¹ Пролётова Н.В., Виноградова Е.Г., Кудрявцева Л.П. Методы создания *in vitro* растений-регенерантов льна-долгунца, устойчивых к антракнозу (*Colletotrichum lini* Manns et Bolley) и токсичным ионам алюминия. Методические рекомендации. Тверь. 2014; 19.

² Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат. 1985; 351.

Рис. 1. Этапы проведения исследований *in vitro*. Фото автораFig. 1. Stages of *in vitro* research. Photo of the author

решка на 2,1–4,8% наблюдали у сортов Феникс, С-108, Союз, Лидер при концентрации раствора AlCl_3 44 мг/л. Сорт Импульс при такой концентрации имел длину первичного корешка на уровне контроля — 1,92 см (табл. 1). Дальнейшее снижение длины первичного корешка происходило у всех сортов: при концентрации 64 мг/л — на 20,8–39,2%, при концентрации 84 мг/л — на 37,0–61,4%. Кончики корешков темнели, на некоторых проявлялись следы загнивания. В результате исследований выявлено, что раствор AlCl_3 в используемых концентрациях при pH_{KCl} 4,0 оказывал угнетающее действие на проращивание семян и формирование первичного корешка. Длина первичных корешков снижалась с повышением концентрации раствора AlCl_3 .

Для оценки формирования гипокотилей льна-долгунца на основе проростков использовали те же

концентрации AlCl_3 , что и для оценки формирования корешков. Гипокотили во всех вариантах формировались, но их длина зависела от генотипа и концентрации раствора AlCl_3 при pH_{KCl} 4,0. На седьмые сутки проращивания семян льна-долгунца гипокотили имели величину длины от 1 до 5 см. Наибольшую чувствительность к содержанию ионов алюминия в растворе проявили сорта С-108, Лидер и Союз. Это выразилось в уменьшении длины гипокотилей с повышением концентрации ионов алюминия в растворе. Длина гипокотилей у этих сортов составляла 2–3,5 см при использовании концентрации 44 мг/л, 1–3,5 см — при концентрации 64 мг/л, 1–1,5 см — при концентрации 84 мг/л (табл. 2). У менее чувствительных сортов — Импульс и Феникс — сформировались гипокотили величиной 4–5 см в варианте использования концентрации 44 мг/л. В варианте,

Таблица 1. Влияние AlCl_3 на длину первичного корешка льна-долгунца
Table 1. Influence of AlCl_3 on the length of the primary root of fiber flax

Генотип / концентрация раствора AlCl_3 , мг/л	Длина первичного корешка (см) $\pm$ Sp (внутри выборки)			
	0 (контроль)	44,0	64,0	84,0
Импульс	1,92 $\pm$ 0,2	1,92 $\pm$ 0,2	1,57 $\pm$ 0,2	1,21 $\pm$ 0,1
Феникс	1,94 $\pm$ 0,1	1,85 $\pm$ 0,2	1,51 $\pm$ 0,1	1,03 $\pm$ 0,1
С-108	1,91 $\pm$ 0,1	1,84 $\pm$ 0,1	1,27 $\pm$ 0,2*	0,83 $\pm$ 0,1*
Союз	1,89 $\pm$ 0,1	1,85 $\pm$ 0,1	1,15 $\pm$ 0,2*	0,73 $\pm$ 0,2*
Лидер	1,91 $\pm$ 0,2	1,82 $\pm$ 0,1*	1,51 $\pm$ 0,1	0,77 $\pm$ 0,2

* Достоверно при $p < 0,01$.

Таблица 2. Влияние $AlCl_3$ на формирование hypocotyle льна-долгунца
Table 2. Influence of $AlCl_3$ on the Formation of Fiber Flax Hypocotyls

Генотип / концентрация раствора $AlCl_3$, мг/л	Длина hypocotyle (см) $\pm$ Sp (внутри выборки)			
	0 (контроль)	44,0	64,0	84,0
Импульс	5,0 $\pm$ 0,1	4,0 $\pm$ 0,3	3,5 $\pm$ 0,1	3,0 $\pm$ 0,1
Феникс	5,0 $\pm$ 0,2	5,0 $\pm$ 0,1	4,5 $\pm$ 0,1	4,5 $\pm$ 0,1
С-108	4,5 $\pm$ 0,1	2,0 $\pm$ 0,3**	1,0 $\pm$ 0,3**	1,0 $\pm$ 0,3
Союз	5,0 $\pm$ 0,1	3,5 $\pm$ 0,2	3,5 $\pm$ 0,1	1,3 $\pm$ 0,2
Лидер	4,8 $\pm$ 0,2	3,0 $\pm$ 0,3*	3,1 $\pm$ 0,2	1,5 $\pm$ 0,2

* Достоверно при $p < 0,01$, ** достоверно при $p < 0,001$.

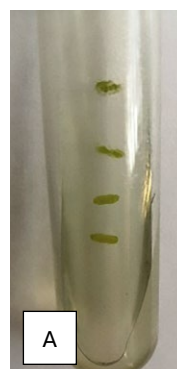
Рис. 2. Культивирование семян льна на 1%-ном растворе сахарозы и получение проростков. Фото автора

Fig. 2. Cultivation of flax seeds on a 1% solution of sucrose and obtaining seedlings. Photo of the author

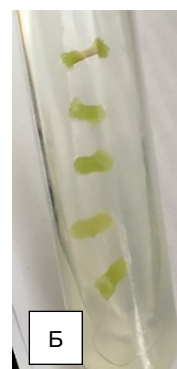


Рис. 3. Формирование каллуса (а, б) и морфогенных очагов (в) на основе hypocotyle льна. Фото автора

Fig. 3. Formation of callus (a, b) and morphogenic foci (c) on hypocotyle segments of flax. Photo of the author



а (а) — каллус
на 7-е сутки
a (a) — callus
on the 7th day



б (б) — каллус,
на 14-е сутки
b (b) — callus
on the 14th day



в (в) — морфогенные
очаги
c (c) — morphogenic
foci

в котором использовали концентрацию 64 мг/л $AlCl_3$, hypocotyle имели длину 3,5–4,5 см, при концентрации 84 мг/л — 3–4,5 см. В контрольном варианте (при проращивании семян льна на дистиллированной воде) длина hypocotyle у всех сортов, взятых для исследований, была на уровне 4,5–5,0 см.

Таким образом, выбранные для исследований концентрации $AlCl_3$ оказались эффективными и были включены в дальнейшую работу по созданию *in vitro* новых форм льна-долгунца, устойчивых к повышенной кислотности почвы.

Следующим этапом исследований являлось получение hypocotyle сегментов льна-долгунца для использования их с целью формирования каллусных культур *in vitro*. Hypocotyle сегменты размером 5–8 мм получали от 14-суточных проростков льна. Для этого семена высеивали в пробирки на фильтровальную бумагу с 1%-ным раствором сахарозы и культивировали их в условиях 16-часового светового дня с освещенностью 4000 люкс (рис. 2). После чего проростки извлекали из пробирки и разрезали на сегменты длиной 5–8 см. Сегменты hypocotyle помещали на селективные среды, содержащие ионы алюминия в концентрациях, используемых ранее при проращивании семян, — 44 мг/л, 64 мг/л, 84 мг/л $AlCl_3$, pH_{KCl} 4,0.

Анализ результатов исследований показал, что на 21-е сутки с момента культивирования hypocotyle сегментов в условиях *in vitro* во всех вариантах на основе сегментов формировались новые каллусные клетки (рис. 3), причем в основном консистенция каллуса была

рыхлой, от светло-зеленого до светло-коричневого цвета. Отмечено, что у исследуемых сортов на данном этапе во всех вариантах формировался морфогенный каллус.

Однако частота формирования морфогенных каллусов была различной в зависимости от концентрации $AlCl_3$ в среде культивирования. В ходе исследований было выявлено, что у всех сортов наблюдалась тенденция снижения количества морфогенных клеток с повышением концентрации ионов алюминия в среде. Вместе с тем у менее чувствительных сортов (Импульс и Феникс) количество сформированного морфогенного каллуса было выше, чем у более чувствительных (С-108, Союз, Лидер).

В варианте использования концентрации $AlCl_3$ 44,0 мг/л количество сформированного морфогенного каллуса у сортов Импульс и Феникс составляло 92,0% и 91,0%, соответственно, у сортов С-108, Союз, Лидер — 85,5–90,1% (табл. 3). При использовании концентрации $AlCl_3$ 64,0 мг/л количество сформированного морфогенного каллуса у сортов Импульс и Феникс составляло 87,1% и 88,0%, соответственно, у сортов С-108, Союз, Лидер — 70,3–79,5%. Количество сформированного морфогенного каллуса при использовании концентрации $AlCl_3$ 84,0 мг/л у сортов Импульс и Феникс составляло 81,2% и 84,8%, соответственно, у сортов С-108, Союз, Лидер — 65,5–71,3%.

После отборов на селективной среде с ионами алюминия в течение двух пассажей на каллусных культурах у сортов Феникс и Импульс в морфогенных очагах нача-

Таблица 3. Влияние $AlCl_3$ на каллусогенез льна-долгунца в культуре *in vitro*
Table 3. Effect of $AlCl_3$ on fiber flax callusogenesis *in vitro* culture

Генотип / концентрация раствора $AlCl_3$, мг/л	Сформировано морфогенных каллусов (%) $\pm$ Sp* (внутри выборки)			
	0 (контроль)	44,0	64,0	84,0
Импульс	97,8 $\pm$ 2,2	92,0 $\pm$ 3,0	87,1 $\pm$ 2,1	81,2 $\pm$ 2,8
Феникс	96,9 $\pm$ 3,1	91,0 $\pm$ 4,0	88,0 $\pm$ 3,1	84,8 $\pm$ 1,9
С-108	97,3 $\pm$ 2,0	90,1 $\pm$ 1,2	70,3 $\pm$ 3,2	65,5 $\pm$ 1,4
Союз	97,8 $\pm$ 1,2	85,5 $\pm$ 2,4	73,4 $\pm$ 2,8	70,5 $\pm$ 2,8
Лидер	96,6 $\pm$ 2,6	88,3 $\pm$ 2,6	79,5 $\pm$ 2,6	71,3 $\pm$ 2,9

* Достоверно при $p < 0,01$.

Таблица 4. Формирование адвентивных почек и побегов льна в селективных условиях *in vitro*
Table 4. Formation of adventitious buds and shoots of flax under selective conditions *in vitro*

Генотип / концентрация раствора $AlCl_3$, мг/л	Количество почек и побегов, сформированных в меристематических очагах (шт/каллус) $\pm$ Sp			
	0 (контроль)	44,0	64,0	84,0
Феникс	0,7 $\pm$ 0,1*	2,0 $\pm$ 0,6	2,0 $\pm$ 0,6	1,5 $\pm$ 0,1
Импульс	0,8 $\pm$ 0,05	1,3 $\pm$ 0,1	1,7 $\pm$ 0,3	1,0 $\pm$ 0,05
Лидер	0,5 $\pm$ 0,1	0,5 $\pm$ 0,1	0,4 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,1
С-108	0,4 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,1	0
Союз	0,5 $\pm$ 0,1	0,6 $\pm$ 0,1	0,5 $\pm$ 0,1	0,1 $\pm$ 0,1

* Достоверно при $p < 0,001$.

ли формироваться новообразования в виде адвентивных почек и побегов. У сортов Лидер, С-108, Союз единичные почки и побеги сформировались после отборов на селективной среде с ионами алюминия в течение трех-четырех пассажей.

В результате исследований выявлено, что почки и побеги с более высокой частотой у этих сортов формировались в вариантах добавления в среду $AlCl_3$ в концентрациях 44 мг/л и 64 мг/л. Так, у сорта Феникс (в контрольном варианте) на среде без $AlCl_3$ на 21-е сутки сформировались шесть почек и один побег. Частота формирования — 0,7 шт/каллус (табл. 4). В вариантах с добавлением 44 мг/л и 64 мг/л $AlCl_3$ частота формирования новообразований составила 2 шт/каллус, а в варианте добавления 84 мг/л $AlCl_3$ — 1,5 шт/каллус. У сорта Импульс (в контрольном варианте) на среде без $AlCl_3$ на 21-е сутки сформировались три почки. Частота их формирования составила 0,8 шт/каллус. В вариантах с добавлением 44 мг/л, 64 мг/л и 84 мг/л $AlCl_3$ было сформировано почек и побегов в среднем по 1 шт/каллус.

В результате исследований выявлено, что ионы алюминия, содержащиеся в селективной среде, оказывали стимулирующий эффект на образование в морфогенных очагах почек и побегов льна-долгунца. В контрольном варианте образовывалось меньшее количество новообразований, чем в селективных условиях.

Побеги льна-долгунца используемых в исследованиях сортов, полученные в результате трех-пяти этапов отбора морфогенных очагов на селективных средах,

переносили на среду MS, содержащую 64,0 мг/л $AlCl_3$. и оценивали на устойчивость к токсичному действию ионов алюминия. Побеги, проявившие устойчивость, продолжали развиваться — образовывали корешки (или в месте среза — каллусную ткань с морфогенными очагами). Восприимчивые побеги составили 84%, на селективной среде темнели и погибали.

Выводы/Conclusion

В результате исследований определена реакция *in vitro* пяти сортов льна-долгунца на содержание ионов алюминия в растворах для проращивания семян и на среде для культивирования клеток льна. Установлено, что сорта Феникс, Импульс, С-108, Смолич, Лидер проявили способность прорасти и формировать проростки на растворе $AlCl_3$ с pH_{KCl} 4,0. Сорта Феникс и Импульс были менее чувствительными (слабовосприимчивыми) к используемым концентрациям $AlCl_3$, тогда как у сортов С-108, Смолич, Лидер отмечена чувствительность к селективному агенту, которая выражалась в уменьшении длины корешка и гипокотилей при проращивании семян, снижении морфогенетической активности (формировании морфогенного каллуса) в культуре *in vitro*. Выявлено максимальное негативное влияние ионов алюминия в растворе и питательной среде в концентрации 84,0 мг/л $AlCl_3$ при pH_{KCl} 4,0 на сорта льна-долгунца Феникс, Импульс, С-108, Союз, Лидер. Получены побеги этих сортов, невосприимчивые к содержанию ионов алюминия в среде культивирования.

Автор несет ответственность за работу и представленные данные.

All author bear responsibility for the work and presented data.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Федеральному научному центру лубяных культур по теме № FGSS 2019-0016.

FUNDING

The research was carried out within the framework of the State task of the Ministry of Science and Higher Education of the Federal Scientific Center of Bast Crops on the topic No. FGSS 2019-0016.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Великанова И.В., Попов Р.А. Региональные особенности развития льняного подкомплекса в условиях нарастающих кризисных явлений. *Вестник АПК Верхневолжья*. 2020; (2): 66–71. <https://doi.org/10.35694/YARX.2020.50.2.0012>
2. Ушаповский И.В., Васильев А.С., Шеголихина Т.А., Федоренко В.Ф., Мишуров Н.П., Голубев И.Г. Анализ состояния и перспективные направления развития селекции и семеноводства технических культур. Научный аналитический обзор. Москва: *Росинформагротех*. 2019; 72. ISBN 978-5-7367-1533-6 <https://www.elibrary.ru/hynopb>
3. Кишлян Н.В., Рожмина Т.А. Оценка генофонда льна культурного (*Linum usitatissimum* L.) по кислотоустойчивости. *Сельскохозяйственная биология*. 2010; 45(1): 96–103. <https://www.elibrary.ru/lastnd>
4. Кишлян Н.В., Мельникова Н.В., Рожмина Т.А. Механизмы адаптации льна-долгунца к повышенной кислотности почвы (обзор). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2020; 181(4): 205–212. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2020-4-205-212>
5. Карамулина И.А. (сост.). Региональная система земледелия Смоленской области. Смоленск: «Агронаучсервис». 2013; 277. ISBN 978-5-85941-491-8 <https://www.elibrary.ru/yrmkdz>
6. *Современные проблемы использования почв и повышения их плодородия. Сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию кафедры почвоведения БГСХА. Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия*. 2022; 1: 314. <https://www.elibrary.ru/tnkwnpt>
7. Слюсарь И.А., Силаева О.П., Бабурченкова З.П. Динамика показателей почвенного плодородия и использование средств химизации в Смоленской области. *Достижения науки и техники АПК*. 2018; 32(4): 10–15. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10402>
8. Суховеркова В.Е. Изменения гумусового горизонта черноземов при длительной распашке в Западной Сибири. *Достижения науки и техники АПК*. 2015; 29(6): 5–7. <https://www.elibrary.ru/ucraap>
9. Четверикова Н.С., Лукин С.В., Марциневская Л.В. Мониторинг плодородия черноземов лесостепной зоны. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2011; (9): 184–190. <https://www.elibrary.ru/ofepbp>
10. Пономарева Л.В., Дричко В.Ф., Цветкова Н.П., Кудрявцев Д.В. Содержание подвижного алюминия и кислотность почвы на фоне бактериализации алюминотолерантными штаммами как приема повышения устойчивости растений. *Сельскохозяйственная биология*. 2010; 45(1): 104–109. <https://www.elibrary.ru/gqawcx>
11. Кедрова Л.И., Уткина Е.И. Влияние почвенной кислотности на урожайность озимой ржи и возможности эдафической селекции. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2018; 67(6): 17–25. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.67.6.17-25>
12. Яковлева О.В. Фитотоксичность ионов алюминия. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2018; 179(3): 315–331. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2018-3-315-331>
13. Черкасова Н.Н., Жужжалова Т.П. Разработка оптимальных условий *in vitro* для повышения устойчивости регенерантов сахарной свеклы к засухе. *Сахар*. 2020; (9): 50–52.
14. Пролётова Н.В. Использование биотехнологических методов для создания новых генотипов льна, устойчивых к антракнозу. *Достижения науки и техники АПК*. 2019; (8): 24–28. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10805>
15. Шуплетцова О.Н., Огородникова С.Ю., Назарова Я.И. Эффекты неспецифической устойчивости генотипов ячменя, полученных путем клеточной селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2020; 181(4): 192–199. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2020-4-192-199>

ОБ АВТОРЕ

Наталья Викторовна Пролётова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный центр лубяных культур, Комсомольский пр-т, д. 17/56, Тверь, 172002, Россия science.trk@fncl.ru <https://orcid.org/0000-0002-4137-9622> AuthorID: 415465

REFERENCES

1. Velikanova I.V., Popov R.A. Regional features of the development of the flax sub-complex in the context of growing crisis phenomena. *Herald of Agroindustrial complex of Upper Volga region*. 2020; (2): 66–71 (In Russian). <https://doi.org/10.35694/YARX.2020.50.2.0012>
2. Ushchapovskiy I.V., Vasil'ev A.S., Shchegolikhina T.A., Fedorenko V.F., Mishurov N.P., Golubev I.G. Analysis of the state and promising directions of development of breeding and seed production of industrial crops. Scientific analytical review. Moscow: *Rosinformagrotech*. 2019; 72 (In Russian). ISBN 978-5-7367-1533-6 <https://www.elibrary.ru/hynopb>
3. Kishlyan N.V., Rozhmina T.A. Investigation of flax (*Linum usitatissimum* L.) gene pool on resistance to soil acidity. *Agricultural biology*. 2010; 45(1): 96–103 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/lastnd>
4. Kishlyan N.V., Melnikova N.V., Rozhmina T.A. The mechanisms of fiber flax adaptation to high soil acidity (a review). *Proceedings on applied botany, genetics and breeding*. 2020; 181(4): 205–212 (In Russian). <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2020-4-205-212>
5. Karamulina I.A. (comp.). Regional system of agriculture of the Smolensk region. Smolensk: *Agronauchservis*. 2013; 277 (In Russian). ISBN 978-5-85941-491-8 <https://www.elibrary.ru/yrmkdz>
6. *Modern problems of soil use and increasing their fertility. Collection of articles based on the materials of the International scientific and Practical conference dedicated to the 100th anniversary of the Department of Soil Science of the BSAA. Gorki: Belarusian State Agricultural Academy*. 2022; 1: 314 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/tnkwnpt>
7. Slysar' I.A., Silaeva O.P., Baburchenkova Z.P. Dynamics of Indicators of Soil Fertility and Use of Chemical Means in Smolensk Region. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2018. 32(4): 10–15 (In Russian). <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10402>
8. Sukhoverkova V.Ye. Changes in humus horizon of black soils in case of long-term plowing in Western Siberia. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2015; 29(6): 5–7 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/ucraap>
9. Chetverikova N.S., Lukin S.V., Martsinevskaya L.V. Monitoring of the fertility of chernozems in forest-steppe zone. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences*. 2011; (9): 184–190 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/ofepbp>
10. Ponomareva L.V., Drichko V.F., Tsvetkova N.P., Kudryavtsev D.V. Content of mobile aluminium and soil acidity on the background of cultivation of aluminium-tolerant bacteria for the purpose of rising of plant's resistance. *Agricultural biology*. 2010; 45(1): 104–109 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/gqawcx>
11. Kedrova L.I., Utkina E.I. The influence of soil acidity on the yield of winter rye and the possibility of edaphic selection. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2018; 67(6): 17–25 (In Russian). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.67.6.17-25>
12. Yakovleva O.V. Phytotoxicity of aluminum ions. *Proceedings on applied botany, genetics and breeding*. 2018; 179(3): 315–331 (In Russian). <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2018-3-315-331>
13. Cherkasova N.N., Zhuzhzhlova T.P. Development of optimal *in vitro* conditions to increase the resistance of sugar beet regenerants to drought. *Sakhar*. 2020; (9): 50–52 (In Russian).
14. Proletova N.V. Use of Biotechnological Methods for the Development of New Flax Genotypes Resistant to Anthracnose. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2019; (8): 24–28 (In Russian). <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10805>
15. Shupletsova O.N., Ogorodnikova S.Yu., Nazarova Y.I. Effects of nonspecific resistance in barley genotypes obtained by cell selection. *Proceedings on applied botany, genetics and breeding*. 2020; 181(4): 192–199 (In Russian). <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2020-4-192-199>

ABOUT THE AUTHOR

Natalia Viktorovna Proletova, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Federal Scientific Center of Bast Crops, 17/56 Komsomolsky prospect, Tver, 172002, Russia science.trk@fncl.ru <https://orcid.org/0000-0002-4137-9622> AuthorID: 415465