

# МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья  
УДК 633.52:57.086.13  
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-9-20



## Влияние криоконсервации в жидком азоте на жизнеспособность семян льна

Ан. В. Павлов, Е. А. Пороховинова, Н. Б. Брач, Ал. В. Павлов, В. Г. Вержук

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

**Автор, ответственный за переписку:** Елизавета Александровна Пороховинова, e.porohovnova@vir.nw.ru

**Актуальность.** Криоконсервация семян в жидком азоте – перспективный метод сохранения генетических ресурсов. Отсутствие методов криоконсервации семян льна делают данную работу актуальной.

**Материалы и методы.** В работе использованы семена льна-долгунца 'Оршанский 2'. Эксперимент проведен в 2-кратной повторности, каждая из которых включала в себя 6 вариантов. В 1 и 2 вариантах семена хранили в бумажных пакетах при комнатной температуре (1 – контроль, семена без обработки; 2 – обработанные биоразрушаемым полимером 3-гидроксимасляной кислоты [П(ЗГБ)]). В вариантах 3–6 семена хранили в жидком азоте без обработки и с обработкой П(ЗГБ) (в 3, 4 – в марлевой упаковке, в 5, 6 – в ламинированных пакетах из фольги). Оценку влияния действия азота и типов хранения проводили в три этапа: (I) сразу после выемки – энергия прорастания и всхожесть, (II) полевая всхожесть, (III) через 6 месяцев хранения при комнатной температуре – энергия прорастания и всхожесть.

**Результаты.** Лабораторная энергия прорастания и всхожесть семян в контроле составили 99%, а полевая всхожесть – 83%. Наименьшая энергия прорастания, лабораторная и полевая всхожесть отмечены после хранения в ламинированных пакетах без обработки П(ЗГБ): вариант 5 этап II (79%), вариант 5 этап III (74%) и с обработкой П(ЗГБ): вариант 6 этап II (78%) вариант 6 этап III (82%). Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что жидкий азот оказал достоверное отрицательное, но не критическое влияние на лабораторную энергию прорастания, полевую всхожесть, а также лабораторную энергию прорастания, всхожесть после выемки и 6 месяцев хранения при комнатной температуре, с долей влияния 42, 11, 31, 24% соответственно. Обработка Р(ЗНВ) не оказала существенного влияния ни на один из вариантов эксперимента с его использованием.

**Заключение.** При хранении в разных видах упаковки, можно использовать любой из опробованных способов заморозки, что значительно облегчает и удешевляет криоконсервацию льна.

**Ключевые слова:** лен-долгунец, энергия прорастания, всхожесть, сверхнизкие температуры, полимер 3-гидроксимасляной кислоты П(ЗГБ)

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту FGEM-2022-0005 «Растительные ресурсы масличных и прядильных культур ВИР как основа теоретических исследований и их практического использования».

Авторы признательны профессору Т. Г. Воловой (Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия) за предоставленные образцы полимера П(ЗГБ).

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

**Для цитирования:** Павлов Ан.В., Пороховинова Е.А., Брач Н.Б., Павлов Ал.В., Вержук В.Г. Влияние криоконсервации в жидком азоте на жизнеспособность семян льна. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(1):9-20. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-9-20

# MOBILIZATION AND CONSERVATION OF THE GENETIC DIVERSITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-9-20

## The effect of cryopreservation in liquid nitrogen on the viability of flax seeds

Andrey V. Pavlov, Elizaveta A. Porokhvinova, Nina B. Brutch, Aleksandr V. Pavlov, Vladimir G. Verzhuk

*N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia*

**Corresponding author:** Elizaveta A. Porokhvinova, [e.porokhvinova@vir.nw.ru](mailto:e.porokhvinova@vir.nw.ru)

**Background.** A promising technique for preserving plant genetic resources is cryopreservation of seeds in liquid nitrogen at  $-196^{\circ}\text{C}$ . The lack of information on cryopreservation of flax seeds and on the effect of liquid nitrogen on their viability makes this work relevant for the conservation of valuable flax germplasm.

**Materials and methods.** Seeds of the fiber flax cultivar 'Orshansky 2' were used in the experiment. The experiment was carried out in 2 replications; each of them included 6 options. In options 1 and 2, the seeds were stored in paper bags at room temperature (1 – control, seeds without treatment; 2 – treated with a biodegradable polymer of 3-hydroxybutyric acid [P(3GB)]). In options 3, 4, 5 and 6, the seeds were stored in liquid nitrogen without treatment and with P(3GB) treatment (in 3 and 4 in gauze packaging, and in 5 and 6 in laminated foil bags).

**Results.** Laboratory-based germination energy and viability of control seeds were the same in all options of the experiment (99%), and field viability averaged 83%. The lowest germination energy, laboratory-based and field germination capacity were observed after storage in laminated bags, without P(3HB) processing: option 5, stage II (79%); option 5, stage III (74%), and with P(3HB): processing: option 6, stage II (78%); option 6, stage III (82%). A two-factor analysis of variance showed that liquid nitrogen had significant effect on laboratory germination energy, field germination capacity, laboratory germination energy and capacity after 6 months of storage at room temperature: the effect size was 42, 11, 31, and 24%, respectively, while treatment with P(3HB) had no significant effect on any of the options of the experiment with its application.

**Conclusion.** Flax seeds tolerated direct immersion in liquid nitrogen ( $t = -196^{\circ}\text{C}$ ) best of all in gauze packaging. The biodegradable polymer P(3HB) did not produce a significant effect on seed viability in any option.

**Keywords:** fiber flax, seed storage, ultralow temperatures, laboratory germination energy and capacity, field germination energy and capacity, biodegradable polymer Hydroxybutyric acid P(3HB)

**Acknowledgements:** The research was performed within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0005 "Plant resources of oil and fiber crops at VIR as the basis for theoretical research and their practical utilization".

The authors are grateful to Prof. T. G. Volova (Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia) for making available samples of the P(3HB) polymer.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

**For citation:** Pavlov An.V., Porokhvinova E.A., Brutch N.B., Pavlov Al.V., Verzhuk V.G. The effect of cryopreservation in liquid nitrogen on the viability of flax seeds. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(1):9-20. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-9-20

## Введение

В последние годы происходит беспрецедентно быстрая утрата биоразнообразия. Многие виды растений и животных находятся на грани полного исчезновения, а это чревато дефицитом продовольствия в будущем, ухудшением здоровья населения планеты (United Nations..., 2019, FAO Commission on Genetic Resources..., 2019). В связи с этим все большую актуальность приобретают задачи сохранения не только редких и исчезающих видов, но и ценных сортов, клонов и гибридов культивируемых лекарственных, декоративных, сельскохозяйственных растений и их диких родичей.

Для сохранения биоразнообразия сельскохозяйственных культур, в числе многих других предпринятых мер, создана коллекция генетических ресурсов растений ВИР (коллекция ГРР ВИР) – систематизированное и документированное собрание образцов семян и гербарных референтов мирового разнообразия культивируемых растений и их диких родичей, с системой хранения при низких (+4°C, -10°C, -18°C) температурах (Filipenko, 2007). Также осуществляется хранение коллекций семян с использованием ресурса холода вечной мерзлоты при -6...-10°C (Zhimulev, 2014).

В связи с необходимостью увеличения сроков сохранения генетических ресурсов в ВИР начиная с 1967 года проводились исследования по выяснению возможности хранения семян при сверхнизких температурах (-183...-196°C) в жидком азоте (Fedosenko, 1978; Molodkin, 1986; Safina, Petrova, 2008). Исследования показали, что криоконсервация является перспективным методом сохранения генетических ресурсов растений. При относительно небольших затратах данный метод позволяет сохранять генетические ресурсы растений в жизнеспособном состоянии в течение многих десятилетий, что значительно снижает расходы на регулярный пересев постоянно пополняющихся коллекций, уменьшает вероятность механического и биологического засорения образцов. Установлено, что глубокое замораживание семян в жидком азоте не оказывает отрицательного действия на их жизнеспособность (Walters et al., 2004; Reed, 2008; Pavlov et al., 2019; Verzhuk et al., 2012; Acosta, et al., 2020; Hu et al., 2013). Кроме того, у некоторых видов растений, например уочитка трехлистного (*Hylotelephium triphyllum*), всхожесть семян после замораживания была существенно выше, чем в контрольных образцах (Vorontkova, Kholina, 2011).

Показано, что при хранении семян с высоким содержанием масла при температуре выше -130°C происходят процессы перестройки липидов и только при хранении в жидком азоте останавливаются все процессы, происходящие в клетках (Ogekova, 2010), в связи с чем хранение при таких температурах может обеспечить всхожесть семян неограниченное количество лет.

Успех хранения при сверхнизких температурах определяется влажностью семян и скоростью их охлаждения. (Fedosenko, 1978). По данным Г. Ф. Сафиной (Safina, 2008), криоконсервация семян плодовых и ягодных растений с влажностью 5-6% не влияет на жизнеспособность семян.

«Узкими» местами криоконсервации являются заморозка и оттаивание генетического материала. В эти моменты наиболее велика вероятность повреждения клеток семян из-за образования внутриклеточного льда и дегидратации клеток. Эффективным методом снижения влияния вредных факторов является применение

криопротекторов. В нашей работе в качестве непроницающего криопротектора использован биоразрушаемый полимер 3-гидроксимасляной кислоты – П(ЗГБ) – наиболее распространенный и изученный представитель семейства полимеров микробиологического происхождения, так называемых полигидроксиалканоев (ПГА). Свойства ПГА (биоразрушаемость и высокая биологическая совместимость, устойчивость к УФ-лучам, отсутствие гидролиза в жидких средах и термопластичность) выдвигают эти биополимеры в разряд наиболее перспективных материалов XXI века для применения в различных сферах – от коммунального и сельского хозяйства до фармакологии и биомедицины (Volova et al., 2016; Volova et al., 2017; Volova et al., 2020).

Как было отмечено ранее, несмотря на то что процесс криоконсервации семян изучается продолжительное время, применение данного метода протестировано на небольшом числе культур коллекции ВИР.

Целью нашей работы являлось изучение влияния жидкого азота на жизнеспособность семян льна-долгунца. В задачи исследования входило: определить лабораторную энергию прорастания, лабораторную и полевую всхожесть семян после их хранения в жидком азоте; оценить влияние жидкого азота на лабораторную энергию прорастания и всхожесть после выемки из жидкого азота с последующим хранением при комнатной температуре в течение 6 месяцев; определить влияние упаковки (марлевых мешочков и герметично запаянных в вакууме пакетов из ламинированной алюминиевой фольги) на жизнеспособность семян; установить возможность использования биоразрушаемого полимера П(ЗГБ) в качестве защитного пленочного покрытия.

## Материал и методы

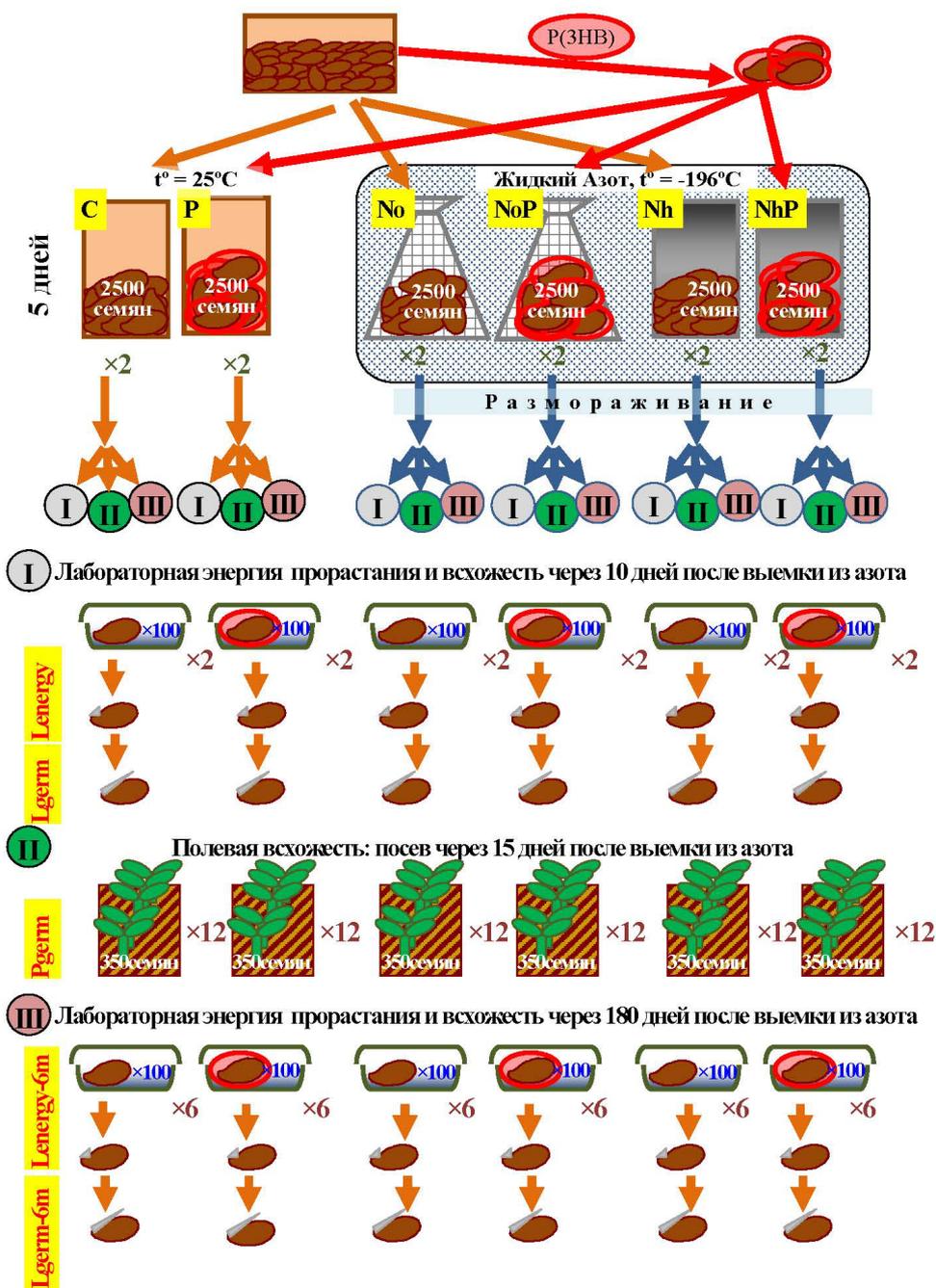
В 2020 г. были проведены исследования по криоконсервации семян льна-долгунца. Определение лабораторной энергии прорастания и всхожести осуществляли в лаборатории длительного хранения генетических ресурсов (ЛДХГР) Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР). Оценку полевой всхожести осуществляли на базе научно-производственной базы (НПБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР». Для работы взяты семена сорта льна-долгунца 'Оршанский 2' (к-6807) урожая 2019 г., хранившиеся до начала эксперимента при комнатной температуре 9 месяцев.

Семена, отобранные для изучения, были проверены по показателям всхожести (GOST 12038-84..., 2020) и влажности (GOST 12041-82..., 2011), которые составили 99% и 6,5% соответственно.

Эксперимент включал 6 вариантов условий хранения семян (рис. 1):

1. контроль – при комнатной температуре (С);
2. при комнатной температуре с пленочным покрытием из П(ЗГБ), (P);
3. в жидком азоте в марлевой упаковке (No);
4. в жидком азоте с пленочным покрытием из П(ЗГБ) в марлевой упаковке (NoP);
5. в жидком азоте в герметично запаянных в вакууме ламинированных пакетах из фольги (Nh);
6. в жидком азоте с пленочным покрытием из П(ЗГБ) в герметично запаянных в вакууме ламинированных пакетах из фольги (NhP).

Для каждого варианта было подготовлено по 24 г семян: 20 г – для определения полевой всхожести, 4 г – для



**Рис. 1. Схема эксперимента:**

I – лабораторная энергия прорастания и всхожесть через 10 дней после выемки из жидкого азота; II – полевая всхожесть через 15 дней после выемки из азота; III – лабораторная энергия прорастания и всхожесть через 180 дней после выемки из жидкого азота. P(ЗНБ) – протектор; × – число повторностей; C – контроль; P – семена, покрытые протектором; No – семена после хранения в жидком азоте в марлевой упаковке; NoP – семена, покрытые протектором, после хранения в жидком азоте в марлевой упаковке; Nh – семена после хранения в жидком азоте в герметичных пакетах; NhP – семена, покрытые протектором, после хранения в жидком азоте в герметичных пакетах, Lenergy – лабораторная энергия прорастания и Lgerm – лабораторная всхожесть через 10 дней после выемки из азота; Lenergy-6m – лабораторная энергия прорастания и Lgerm-6m – лабораторная всхожесть через 6 месяцев хранения после выемки из жидкого азота; Pgerm – полевая всхожесть

**Fig. 1. Experiment scheme:**

I – laboratory germination energy and capacity after 10 days from the extraction from liquid nitrogen; II – field germination capacity after 15 days from the extraction from liquid nitrogen; III – laboratory germination energy and capacity after 180 days from the extraction from liquid nitrogen. P(ЗНБ) – protector; × – number of replications; C – control; P – seeds covered with the protector; No – seeds after storage in liquid nitrogen in a gauze package; NoP – seeds covered with the protector after storage in liquid nitrogen in a gauze package; Nh – seeds after storage in liquid nitrogen in sealed bags; NhP – seeds covered with the protector, after storage in liquid nitrogen in sealed bags; Lenergy – laboratory germination energy and Lgerm – laboratory germination 10 days after removal from nitrogen; Lenergy-6m – laboratory germination energy and Lgerm-6m – laboratory germination 6 months after storage after removal from liquid nitrogen; Pgerm – field germination

лабораторной энергии прорастания и всхожести. Семена для всех вариантов опыта были отобраны из урожая одной делянки. Масса 1000 семян сорта 'Оршанский 2' (урожая 2019 г) составила 4,8 г.

Закладку опыта проводили 3 июня. Семена укладывали в марлевые мешочки или запаивали в вакууме в ламинированные пакеты. Подготовленные варианты опыта одновременно помещали на хранение в криотанк ХБ – 0,5 м<sup>3</sup> с жидким азотом (-196°C). Продолжительность хранения семян в азоте составила 5 суток. После выемки семян из криотанка размораживание проводили при комнатной температуре +18...+20°C.

Оценку влияния действия азота и типов хранения проводили в три этапа (см. рис. 1):

1. через 10 дней после выемки семян из криотанка определяли лабораторную энергию прорастания и всхожесть, каждый вариант опыта оценивался в двукратной повторности;

2. через 15 дней хранения при комнатной температуре осуществляли посев для проверки полевой всхожести, каждый вариант опыта изучался в 12-кратной повторности;

3. для выявления пролонгированного действия жидкого азота через 6 месяцев хранения при комнатной температуре у экспериментальных семян также устанавливали лабораторную энергию прорастания и всхожесть, каждый вариант опыта исследовался в 6-кратной повторности.

В статью приняты следующие сокращения: **C** – контроль, **P** – семена, покрытые протектором, **No** – семена после хранения в жидком азоте в марлевой упаковке, **NoP** – семена, покрытые протектором, после хранения в жидком азоте в марлевой упаковке, **Nh** – семена после хранения в жидком азоте в герметичных пакетах, **NhP** – семена, покрытые протектором, после хранения в жидком азоте в герметичных пакетах. **Lenergy** – лабораторная энергия прорастания и **Lgerm** – лабораторная всхожесть через 10 дней после выемки из азота; **Lenergy-6m** – лабораторная энергия прорастания и **Lgerm-6m** – лабораторная всхожесть через 6 месяцев хранения после выемки из жидкого азота; **Pgerm** – полевая всхожесть.

Для формирования полимерного покрытия (далее – протектор) на поверхности семян использованы высокоочищенные образцы П(ЗГБ), синтезированные бактериями *Cupriavidus necator* В-10646 по запатентованной технологии (Volova, Shishatskaja, 2010), имеющие следующие характеристики: средневесовая молекулярная масса – 920 кДа; полидисперсность – 2,5; степень кристалличности – 78%; температура плавления и термической дегградации – соответственно 176,3 и 280,2°C. Сухие семена погружали в 2-процентный раствор П(ЗГБ) в хлороформе на 10–20 с и далее высушивали в вытяжном шкафу на фильтровальной бумаге. После испарения растворителя в течение 10–15 мин на поверхности семян формировалось пленочное покрытие.

Определение лабораторной энергии прорастания и всхожести проведено через 10 суток после выемки из азота в двух повторностях.

Для определения всхожести на дно растильни укладывали лист фильтровальной бумаги, который смачивали водой. Брали еще 2 листа, складывали их пополам, на верхней половине каждого делали надпись соответствующей повторности и укладывали их в растильню; таким образом, в растильне помещалось 2 повторности. На ложе растильни на нижнюю половину каждого из сложенных пополам листов раскладывали 100 семян с расстоя-

нием не менее 0,5 см друг от друга и накрывали второй половиной фильтровальной бумаги. Затем растильни с семенами помещали в термостат и проращивали при постоянной температуре 20°C в темноте. Учет энергии прорастания семян проводили через трое суток, определение всхожести – через 7 суток, день закладки и день подсчета считали за 1 сутки. К всхожим относили нормально проросшие семена, имеющие хорошо развитый главный зародышевый корешок и имеющие здоровый вид. Всхожесть и энергию прорастания семян вычисляли в процентах.

При полевой оценке всхожести семена всех вариантов опыта взвешивали на аналитических весах с точностью до сотых долей грамма; таким образом, с учетом массы 1000 семян, количество высеваемых на делянку семян составило ≈2083 шт. Посев осуществляли 23 июня. Семена каждого варианта эксперимента сеяли вручную на двух делянках площадью 1 м<sup>2</sup> (по 6 рядков). После появления полных всходов, при наступлении фенологической фазы «елочка», проводили подсчет количества растений на делянке, а затем расчет полевой всхожести.

Для установления пролонгированного влияния жидкого азота на семена определяли лабораторную энергию прорастания и всхожесть после хранения при комнатной температуре в течение 6 месяцев. Исследовали 6 повторностей.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием дисперсионного анализа, критериев *t* Стьюдента и *U* Манна – Уитни, в программе Statistica 7.0. Равенство дисперсий у выборок критерия *t* Стьюдента оценивали с помощью *F*-критерия Фишера. В дисперсионном анализе выборки, где наблюдался большой разброс значений, были проверены на однородность с помощью критерия Левина (StatSoft..., 1984–2021).

Критерий *t* Стьюдента является наиболее строгим при определении достоверности различия между двумя выборками, однако он предполагает наличие нормального распределения, которое просто невозможно, если данные внутри каждой из выборок практически не отличаются. Считается, что в этом случае различия будут заниженными. Непараметрический критерий *U* Манна – Уитни более слабый, но позволяет сравнивать выборки без учета нормальности распределения. Поэтому, совмещая эти два критерия, можно более полно оценить различия между контрастными группами. *F*-критерий Фишера более близок к критерию *t* Стьюдента, но позволяет оценить одновременно влияние двух факторов – протектора и азота, а также случайное варьирование, не только по достоверности, но и по вкладу в общую изменчивость ( $\eta^2$ ).

Для изучения влияния протектора проводилось сравнение образовавшихся альтернативных классов «без протектора» (**C+No+Nh**) и «с протектором» (**P+NoP+NhP**). Таким образом, для лабораторной энергии и лабораторной всхожести **Lenergy**, **Lgerm** выборка в каждом из классов была равна 6, **Lenergy-6m**, **Lgerm-6m** – 18, а для полевой всхожести **Pgerm** – 36 значений.

При изучении влияния паров жидкого азота, проводили сравнение альтернативных классов «хранение в комнатных условиях» (**C+P**) : «хранение в парах жидкого азота» (**No+NoP+Nh+NhP**). Таким образом, для лабораторной энергии и лабораторной всхожести **Lenergy**, **Lgerm** выборка «комнатные условия» состояла из 4, а «азот» – из 8 значений, **Lenergy-6m**, **Lgerm-6m** – из 12 и 24 соответственно, а для полевой всхожести **Pgerm** – 24 и 48 значений соответственно.

При изучении влияния упаковки при хранении в парах жидкого азота проводили сравнение альтернативных классов «хранение в комнатных условиях» (C+P), «хранение в азоте в марлевой упаковке» (No+NoP), «хранение в герметической упаковке» (Nh+NhP). Таким образом, для лабораторной энергии и лабораторной всхожести **Lenergy**, **Lgerm** выборка в каждом из классов была равна 4, **Lenergy-6m**, **Lgerm-6m** – 12, а для полевой всхожести **Pgerm** – 24 значения.

### Результаты и обсуждение

Через 5 суток после закладки эксперимента все семена были одновременно извлечены из криотанка. При этом у вариантов, хранившихся в азоте в марлевой упаковке, при оттаивании на воздухе при комнатной температуре наблюдали повреждения и отслаивание семенной кожуры. Семена, хранившиеся в ламинированных пакетах, имели ненарушенную спермодерму.

Анализ лабораторной энергии прорастания (**Lenergy**) и всхожести (**Lgerm**) семян через 10 суток после выемки из азота, выявил, что у контроля (C) данные показатели, в среднем по двум повторностям, составили 99% (табл. 1, рис. 2, а; б). В варианте с пленочным покрытием

семян П(ЗГБ) (P) они оказались на уровне 98%. В вариантах упаковки семян в марлю энергия и всхожесть семян, без обработки П(ЗГБ) (No), была соответственно 95 и 97%, а с обработкой (NoP) – 96 и 98%.

Сравнение данных по критериям *t* Стьюдента и U Манна – Уитни показало, что при хранении в жидком азоте достоверное снижение показателей жизнеспособности наблюдалось лишь в вариантах с герметичной вакуумной упаковкой семян в ламинированные алюминиевые пакеты и составила в варианте без обработки П(ЗГБ) (Nh) соответственно 83 и 91%, а с обработкой (NhP) – 81 и 86% (см. табл. 1). Это, возможно, связано с замедлением скорости заморозки. В то время как в марлевой упаковке этот процесс протекает быстрее, что положительно сказывается на сохранности семян льна.

Анализ лабораторной энергии прорастания (**Lenergy-6m**) и всхожести (**Lgerm-6m**) через 6 месяцев хранения при комнатной температуре после замораживания в жидком азоте по критериям *t* Стьюдента и U Манна – Уитни показал, что семена из контроля (C) и с покрытием П(ЗГБ) (P) достоверно не различаются. Они не изменили своих характеристик, **Lenergy-6m** равнялось 99%, а **Lgerm-6m** – 98%. В вариантах, где семена были упакованы в марлю без обработки (No) и с обработкой П(ЗГБ)

**Таблица 1.** Сравнение энергии прорастания и всхожести у семян льна при различных способах хранения по критериям U Манна – Уитни и *t* Стьюдента

**Table 1.** Comparison of germination energy and germination capacity of flax seeds under different storage patterns according to the Mann-Whitney U test and Student's *t*-test

Группа I vs Группа II / Group I vs Group II	Энергия прорастания или всхожесть / Germination energy or capacity	Характеристика вариантов (Mean ± Se) / Group characterization (Mean ± Se)		Критерий, <i>p</i> / Criterion, <i>p</i>	
		Группа I / Group 1	Группа II / Group II	Mann-Whitney U test	Student's <i>t</i> -test
		<b>C</b>	<b>NoP</b>		
Контроль (C) vs хранение в марлевой упаковке (NoP)	<b>Lenergy</b>	99,0 ± 0,0	95,5 ± 0,5	невозможно опр-ть	0,02
	<b>Pgerm</b>	82,8 ± 0,7	78,9 ± 1,0	0,001	0,004
	<b>Lenergy-6m</b>	99,7 ± 0,3	84,7 ± 5,5	0,003	0,02
	<b>Lgerm-6m</b>	99,7 ± 0,3	95,0 ± 2,0	0,02	0,04
		<b>C</b>	<b>Nh</b>		
Контроль (C) vs хранение в герметической упаковке (Nh)	<b>Lenergy</b>	99,0 ± 0,0	82,5 ± 1,5	невозможно опр-ть	0,01
	<b>Lgerm</b>	99,0 ± 0,0	90,5 ± 1,5	невозможно опр-ть	0,03
	<b>Pgerm</b>	82,8 ± 0,7	78,6 ± 1,1	0,01	0,004
	<b>Lenergy-6m</b>	99,7 ± 0,3	73,0 ± 6,2	0,003	0,002
	<b>Lgerm-6m</b>	99,7 ± 0,3	87,7 ± 2,9	0,004	0,002
		<b>C</b>	<b>NhP</b>		
Контроль (C) vs хранение в герметической упаковке с протектором (NhP)	<b>Lenergy</b>	99,0 ± 0,0	81,0 ± 0,0	невозможно опр-ть	0,01
	<b>Lgerm</b>	99,0 ± 0,0	86,0 ± 2,0	невозможно опр-ть	0,02
	<b>Pgerm</b>	82,8 ± 0,7	78,2 ± 1,1	0,001	0,002
	<b>Lenergy-6m</b>	99,7 ± 0,3	80,7 ± 2,2	0,003	0,0000
	<b>Lgerm-6m</b>	99,7 ± 0,3	91,3 ± 2,8	0,01	0,014

Таблица 1. Окончание

Table 1. The end

Группа I vs Группа II / Group I vs Group II	Энергия прорастания или всхожесть / Germination energy or capacity	Характеристика вариантов (Mean ± Se) / Group characterization (Mean ± Se)		Критерий, p / Criterion, p	
		Группа I / Group 1	Группа II / Group II	Mann-Whitney U test	Student's t-test
		<b>C+P</b>	<b>No+NoP+Nh+Nh</b>		
Хранение в: комнатных условиях (C+P) vs в азоте (No+NoP+Nh+NhP)	<b>Lenergy</b>	98,5 ± 0,5	88,5 ± 2,6	0,01	0,02
	<b>Lgerm</b>	98,5 ± 0,5	92,0 ± 1,9	0,03	0,06
	<b>Pgerm</b>	81,9 ± 0,9	79,0 ± 0,5	0,001	0,004
	<b>Lenergy-6m</b>	98,8 ± 0,5	81,3 ± 3,2	0,0000	0,0005
	<b>Lgerm-6m</b>	99,2 ± 0,4	92,8 ± 1,4	0,001	0,002
		<b>C+P</b>	<b>No+NoP</b>		
Хранение в: комнатных условиях (C+P) vs в азоте в марлевой упаковке(No+NoP)	<b>Lenergy</b>	98,5 ± 0,5	95,3 ± 0,2	0,02	0,001
	<b>Pgerm</b>	81,9 ± 0,9	79,7 ± 0,7	0,03	0,05
	<b>Lenergy-6m</b>	98,8 ± 0,5	85,7 ± 5,2	0,002	0,02
	<b>Lgerm-6m</b>	99,2 ± 0,4	96,0 ± 1,3	0,04	0,03
		<b>C+P</b>	<b>Nh+NhP</b>		
Хранение в: комнатных условиях (C+P) vs в азоте в герметической упаковке (Nh+NhP)	<b>Lenergy</b>	98,5 ± 0,5	81,8 ± 0,8	0,02	0,0000
	<b>Lgerm</b>	98,5 ± 0,5	88,3 ± 1,7	0,02	0,001
	<b>Pgerm</b>	81,9 ± 0,9	78,4 ± 0,8	0,001	0,004
	<b>Lenergy-6m</b>	98,8 ± 0,5	76,8 ± 3,3	0,0000	0,0000
	<b>Lgerm-6m</b>	99,2 ± 0,4	89,5 ± 2,0	0,0003	0,0001
		<b>No+NoP</b>	<b>Nh+NhP</b>		
Хранение в азоте в: марлевой упаковке (No+NoP) vs в герметической упаковке (Nh+NhP)	<b>Lenergy</b>	95,3 ± 0,2	81,8 ± 0,8	0,02	0,0000
	<b>Lgerm</b>	97,3 ± 0,6	88,3 ± 1,7	0,02	0,002
	<b>Lgerm-6m</b>	96,0 ± 1,3	89,5 ± 2,0	0,02	0,01

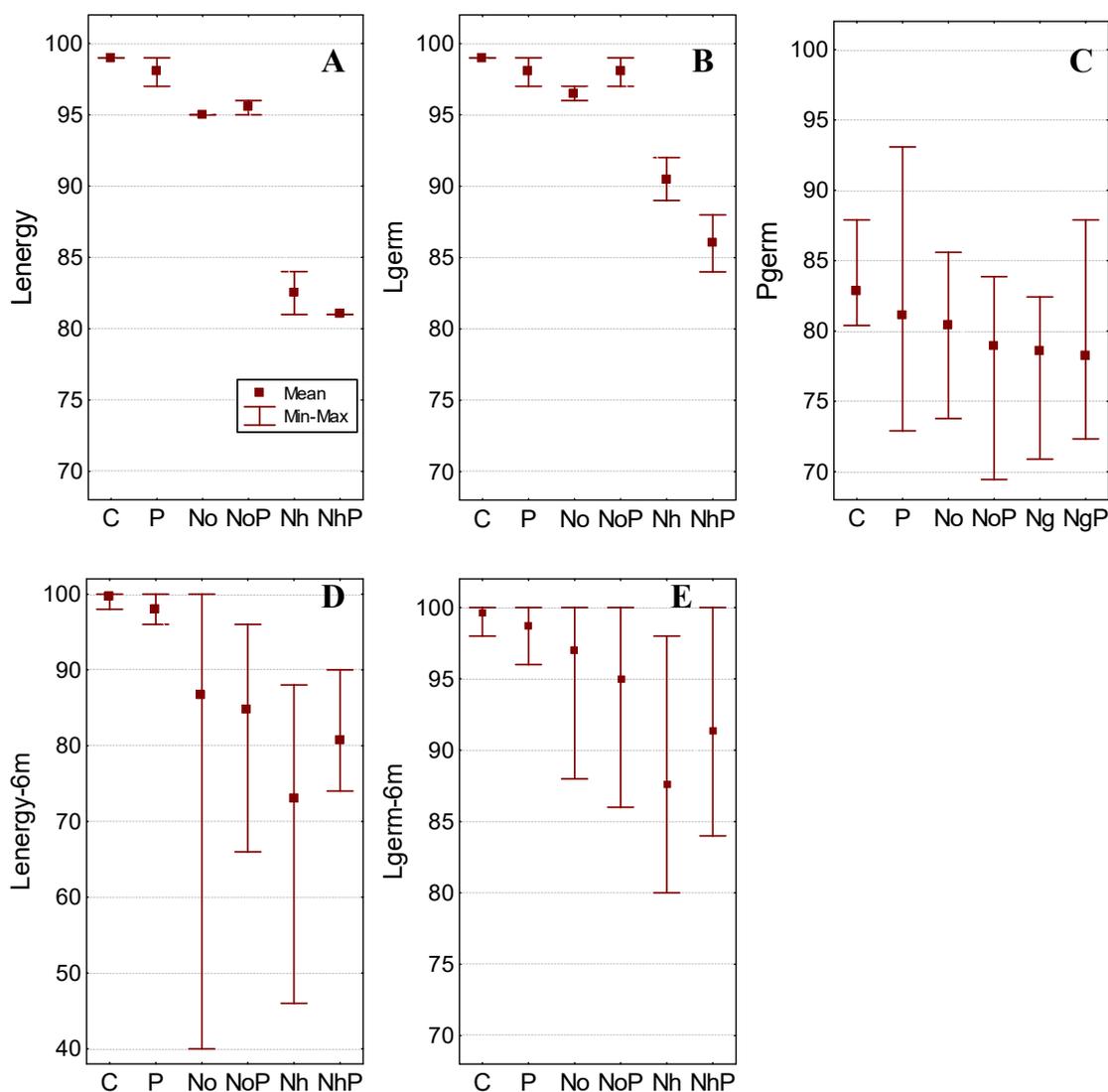
Примечание: – Mean ± Se – среднее с доверительным интервалом (± стандартная ошибка) варианта опыта; p – уровень значимости; невозможно опр-ть – невозможно определить; vs – по сравнению. В таблице приведены только варианты экспериментов, достоверно отличающиеся друг от друга

Note: – Mean ± Se – the mean with a confidence interval (± standard error) of the experiment group; p – the significance level; невозможно опр-ть – impossible to determine; vs – versus. The table shows only the experiment options that differ significantly from each other

(NoP), а также в варианте хранения семян в ламинированных пакетах без обработки П(ЗГБ) (Nh) произошло снижение лабораторной энергии прорастания, которая составила 87, 85 и 73% соответственно. Лишь в варианте размещения семян в ламинированных алюминиевых пакетах с обработкой П(ЗГБ) (NhP) энергия прорастания не изменилась (81%). Четкой зависимости между сроком хранения семян на воздухе при комнатной температуре после замораживания в жидком азоте и лабораторной всхожестью выявить не удалось (см. табл. 1, рис. 2, d; e).

Оценка полевой всхожести (Pgerm) показала следующие результаты: в контроле число взошедших растений составило в среднем 287 шт. на рядок (всхожесть 83%)

(см. табл. 1, рис. 2, c). После обработки П(ЗГБ) без замораживания на рядке взошло в среднем 281 растение, что соответствовало 81% всхожести. В вариантах с марлевой упаковкой семян, в случае без обработки П(ЗГБ), количество растений на рядке оказалось в среднем 279 (80%), а с обработкой – 274 (79%). В варианте хранения семян в ламинированных пакетах были получены следующие показатели: без обработки – 273 на рядок (79%), а с обработкой – 271 (78%) растений. Анализ по критериям t Стьюдента и U Манна – Уитни показал, что в менее благоприятных полевых условиях различия между процентом всхожих семян в марлевой упаковке и ламинированных пакетах из фольги оказались несущественными.



**Рис. 2.** Энергия прорастания и всхожесть семян льна в различных вариантах эксперимента:

**A** – лабораторная энергия прорастания через 10 дней после выемки из жидкого азота; **B** – лабораторная всхожесть через 10 дней после выемки из азота; **C** – полевая всхожесть через 15 дней после выемки из жидкого азота; **D** – лабораторная энергия прорастания после 6 месяцев хранения семян, извлеченных из жидкого азота; **E** – лабораторная всхожесть после 6 месяцев хранения семян, извлеченных из жидкого азота.

Min, max, mean – минимальное, максимальное и среднее значения энергии прорастания или всхожести.

Остальные сокращения см. на рисунке 1

**Fig. 2.** Germination energy and germination capacity of flax seeds in different options of the experiment:

**A** – laboratory germination energy; **B** – laboratory germination capacity; **C** – field germination capacity; **D** – laboratory germination energy after 6 months of storage; **E** – laboratory germination capacity after 6 months of storage.

Min, max, mean – minimum, maximum and mean values of germination energy or germination capacity.

For the remaining abbreviations, see Figure 1

Таким образом, сравнение контроля с каждым вариантом опыта по критериям *t* Стьюдента и *U* Манна – Уитни (см. табл. 1) показало, что энергия прорастания через 10 дней после выемки из азота, энергия прорастания и всхожесть через 6 месяцев хранения при комнатной температуре и полевая всхожесть достоверно отличались от контроля. Всхожесть семян при хранении в жидком азоте в марле, ламинированных пакетах с протектором или без него также достоверно отличалась от контроля.

Сравнение других вариантов эксперимента [контроль (C) vs хранение в марлевой упаковке (NoP) – **Lgerm**; хранение в комнатных условиях (C+P) vs хранение в азоте в марлевой упаковке (No+NoP) – **Lgerm**; хранение в азоте

в марлевой упаковке (No+NoP) vs хранение в азоте в герметической упаковке (Nh+NhP) – **Lgerm**, **Pgerm**, **Lenergy-6m**, а также всех вариантов проверки всхожести у контроль (C) vs хранение в комнатных условиях семян покрытых протектором (P), контроль (C) vs хранение в азоте в марлевой упаковке (No), хранение без протектора (C+No+Nh) vs хранение с протектором (P+NoP+NhP)] не выявило достоверных различий по показателям всхожести и энергии прорастания.

Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что применение для криоконсервации П(ЗГБ) (P) в виде пленочного покрытия не оказало достоверного влияния на результат ни в одном из вариантов опыта с его использованием (табл. 2).

**Таблица 2.** Влияние хранения в жидком азоте и протектора на энергию прорастания и всхожесть семян льна  
**Table 2.** The effect of a protectant and exposure to liquid nitrogen on the germination energy and germination capacity of flax seeds

Параметр / Parameter	ANOVA: Влияние протектора (Pr) и жидкого азота (N) / Effect of a protectant (Pr) and liquid nitrogen (N)			
	протектор / protectant (Pr)	жидкий азот / liquid nitrogen (N)	Pr × N	Случайное варьирование / Error
<b>Лабораторная энергия прорастания / Laboratory germination energy (Lenergy)</b>				
df	1	1	1	8
MS	1,5	267	0,2	47
F	0,03	5,71	0,004	
p	0,86	0,04*	0,95	
$\eta^2$ , %	0	42	0	58
<b>Лабораторная всхожесть / Laboratory germination capacity (Lgerm)</b>				
df	1	1	1	8
MS	4,2	88	0,2	25
F	0,17	3,58	0,01	
p	0,69	0,10	0,94	
$\eta^2$ , %	1	30	0	68
<b>Полевая всхожесть / Field germination capacity (Pgerm)</b>				
df	1	1	1	68
MS	28	135	3	15
F	1,84	8,73	0,16	
p	0,18	0,004*	0,69	
$\eta^2$ , %	2	11	0	87
<b>Лабораторная энергия прорастания после 6 месяцев хранения / Laboratory germination energy after 6 months of storage (Lenergy-6m)</b>				
df	1	1	1	32
MS	3	2473	40	173
F	0,02	14,31	0,23	
p	0,90	0,001*	0,63	
$\eta^2$ , %	0	31	1	69
<b>Лабораторная всхожесть после 6 месяцев хранения / Laboratory germination capacity after 6 months of storage (Lgerm-6m)</b>				
df	1	1	1	32
MS	0,1	329	7	32
F	0,002	10,26	0,21	
p	0,97	0,003*	0,65	
$\eta^2$ , %	0	24	0	75

Примечание: df – число степеней свободы; MS – дисперсия; F – показатель достоверности влияния по Фишеру;  
p – вероятность случайности наблюдаемых различий;  $\eta^2$ , % – доля влияния по Фишеру;

\* – жирным шрифтом отмечены достоверные различия

Note: df – the number of degrees of freedom; MS – the variance; F – the confidence index of the Fischer influence;

p – the probability of randomness of the observed differences;  $\eta^2$ , % – the effect size of the Fischer influence;

\* – significant differences are boldfaced

Экспозиция семян в жидком азоте (N) оказала достоверное негативное влияние на лабораторную энергию прорастания (42%, снижение), полевую всхожесть (11%), лабораторную энергию прорастания (31%), и всхожесть после 6 месяцев хранения в условиях комнатной температуры (24%) (см. табл. 2).

Большинство лабораторных опытов дают завышенную оценку всхожести по сравнению с полевыми данными. Поэтому необходимо прямое сравнение полученных результатов. По критериям *t* Стьюдента и U Манна – Уитни были показаны достоверные отличия полевой всхожести от лабораторной энергии прорастания и всхожести во всех вариантах опыта (табл. 3), что говорит о более жестких условиях при полевом эксперименте. Также было выявлено значительное снижение показателей энергии прорастания семян по сравнению со всхожестью спустя 6 месяцев хранения при комнатной температуре после выемки семян из жидкого азота.

- Хранение в жидком азоте семян, помещенных в герметично запаянные в вакууме ламинированные пакеты из алюминиевой фольги, привело к достоверному снижению энергии прорастания и всхожести семян.

- Криопротекторные свойства полимера 3-гидроксимасляной кислоты (ПГА) не проявились потому, что семена льна устойчивы к воздействию сверхнизких температур, вследствие чего ПГА не мог показать криопротекторные свойства. Изучение ПГА в качестве криопротектора будет продолжено на других объектах.

- Проведенный пилотный эксперимент показал, что из-за небольших различий всхожести семян после хранения в разных видах упаковки можно использовать любой из опробованных способов заморозки, что значительно облегчает и удешевляет криоконсервацию льна. При этом нет необходимости поиска более сложных вариантов заморозки и оттаивания семян у данной культуры.

**Таблица 3. Сравнение энергии прорастания и всхожести семян льна в полевых и лабораторных условиях по критериям U Манна – Уитни и *t* Стьюдента**

**Table 3. Comparison of germination energy and germination capacity of flax seeds under field and laboratory conditions according to the Mann-Whitney U test and Student's *t* test**

Группа I vs Группа II / Group I vs Group II	Характеристика вариантов (Mean ± Se) / Group characterization (Mean ± Se)		Критерий, <i>p</i> / Criterion, <i>p</i>	
	Группа I / Group 1	Группа II / Group II	Mann-Whitney U test	Student's <i>t</i> -test
<b>Pgerm vs Lenergy</b>	80,0 ± 0,5	91,8 ± 2,2	0,0000	0,0000
<b>Pgerm s Lgerm</b>	80,0 ± 0,5	94,7 ± 1,5	0,0000	0,0000
<b>Pgerm vs Lenergy-6m</b>	80,0 ± 0,5	87,1 ± 2,5	0,0001	0,0003
<b>Pgerm vs Lgerm-6m</b>	80,0 ± 0,5	94,9 ± 1,0	0,0000	0,0000
<b>Lenergy-6m vs Lgerm-6m</b>	87,1 ± 2,5	94,9 ± 1,0	0,0300	0,0100

Примечание: Mean ± Se – среднее с доверительным интервалом (± стандартная ошибка) варианта опыта; *p* – уровень значимости; vs – по сравнению. В таблице приведены только варианты экспериментов, достоверно отличающиеся друг от друга

Note: Mean ± Se – the mean with a confidence interval (± standard error) of the experiment group; *p* – significance level; vs – versus. The table shows only the experiment options that differ significantly from each other

### Заключение

По результатам хранения семян льна в жидком азоте можно сделать следующие выводы:

- Семена льна хорошо переносят понижение температуры до –196°C при их прямом погружении в азот с последующим отогревом на воздухе при комнатной температуре.

- При непосредственном контакте жидкого азота с семенами льна (в марлевой упаковке) участи семян наблюдали повреждение семенной кожуры, однако это достоверно не повлияло на лабораторную и полевую всхожесть семян данного варианта опыта.

### References / Литература

- Acosta Y., Pérez L., Linares C., Hernández L., Escalante D., Pérez A. et al. Effects of *Teramnus labialis* (L.f.) Spreng seed cryopreservation on subsequent seed and seedling growth and biochemistry. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2020;42:7. DOI: 10.1007/s11738-020-3012-9
- FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture. The state of the world's biodiversity for food and agriculture in brief. Rome: FAO; 2019. Available from: <https://www.fao.org/3/CA3229EN/CA3229EN.pdf> [accessed Dec, 23, 2021].

- Fedosenko V.A. Use of ultralow temperatures for long-term storage of seeds (methods and techniques) (Ispol'zovaniye sverkh nizkikh temperatur dlya dlitel'nogo khraneniya semyan [metody i tekhnika]). *Scientific and Technical Bulletin of the N.I. Vavilov All-Union Research Institute of Plant Industry*. 1978;77:53-57. [in Russian] (Федосенко В.А. Использование сверхнизких температур для длительного хранения семян (методы и техника). *Научно-технический бюллетень Всесоюзного научно-исследовательского института растениеводства имени Н.И. Вавилова*. 1978;77:53-57).
- Filipenko G.I. Development of the system of low-temperature storage and cryopreservation of plant genetic resources at VIR. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2007;164:263-272. [in Russian] (Филипенко Г.И. Развитие системы низкотемпературного хранения и криоконсервации генофонда растений в ВИР им. Н.И. Вавилова. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2007;164:263-272).
- GOST 12038-84. Interstate standard. Agricultural seeds. Methods for determination of germination. Moscow; 2020. [in Russian] (ГОСТ 12038-84. Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Москва; 2020). URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-12038-84> [дата обращения: 19.02.2021].
- GOST 12041-82. Interstate standard. Seed of farm crops. Method for determination of moisture content. Moscow; 2011. [in Russian] (ГОСТ 12041-82. Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Метод определения влажности. Москва; 2011). URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-12041-82> [дата обращения: 19.02.2021].
- Hu W.H., Yang Y.H., Liaw S.I., Chang C. Cryopreservation the seeds of a Taiwanese terrestrial orchid, *Bletilla formosana* (Hayata) Schltr. by vitrification. *Botanical Studies*. 2013;54(1):33. DOI: 10.1186/1999-3110-54-33
- Molodkin V.Yu. Significance of seed moisture content in some cereal and leguminous crops during cryopreservation in liquid nitrogen (Znachenie vlazhnosti semyan nekotorykh zernovykh i zernovykh bobovykh kultur pri kriokonservatsii v zhidkom azote). *Scientific and Technical Bulletin of the N.I. Vavilov All-Union Research Institute of Plant Industry*. 1986;165:22-24. [in Russian] (Молодкин В.Ю. Значение влажности семян некоторых зерновых и зерновых бобовых культур при криоконсервации в жидком азоте. *Научно-технический бюллетень Всесоюзного научно-исследовательского института растениеводства имени Н.И. Вавилова*. 1986;165:22-24).
- Orekhova T.P. Creation of long-term seed bank of woody species – the real way of preservation of their genofund. *Conifers of the Boreal Area*. 2010;27(1-2):25-31. [in Russian] (Орехова Т.П., Создание долговременного банка семян древесных видов – реальный способ сохранения их генофонда. *Хвойные бореальной зоны*. 2010;27(1-2):25-31).
- Pavlov A.V., Verzhuk V.G., Orlova S.Yu., Radchenko O.E., Yerashtenkova M.V., Dodonova A.Sh. et al. Cryopreservation as a method to preserve some fruit and berry crops and wild medicinal plants. *Problems of Cryobiology and Cryomedicine*. 2019;29(1):44-57. DOI: 10.15407/cryo29.01.044
- Reed B.M. (ed.). Plant cryopreservation: A practical guide. New York, NY: Springer Verlag; 2008. DOI: 10.1007/978-0-387-72276-4
- Safina G.F. The influence of low and ultralow temperature on viability of fruit and berry seeds. *Informatsionnyy vestnik VOGiS = Bulletin of the Vavilov Society of Geneticists and Plant Breeders*. 2008;12(4):541-547. [in Russian] (Сафина Г.Ф. Влияние низких и сверхнизких температур на жизнеспособность семян плодовых и ягодных растений. *Информационный вестник ВОГиС*. 2008;12(4):541-547).
- Safina G.F., Petrova M.N. Viability and dynamics of germinating capacity in apple seed during cryopreservation. *Agricultural Biology*. 2008;43(5):78-81. [in Russian] (Сафина Г.Ф., Петрова М.Н. Жизнеспособность и динамика всхожести семян яблони при криоконсервации. *Сельскохозяйственная биология*. 2008;43(5):78-81).
- StatSoft. Electronic manual on statistics (Elektronnyy uchebnik po statistike). 1984-2021. [in Russian] (StatSoft. Электронный учебник по статистике. 1984-2021). URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm> [дата обращения: 06.05.2021].
- United Nations. UN News. Rapid disappearance of animal and plant species is fraught with food shortages in the future (Stremitelnoye ischeznoveniye vidov zhivotnykh i rasteniy chrevato defitsitom prodovol'stviya v budushchem). 2019. [in Russian] (Организация Объединенных Наций. Новости ООН. Стремительное исчезновение видов животных и растений чревато дефицитом продовольствия в будущем. 2019). URL: <https://news.un.org/ru/story/2019/02/1349661> [дата обращения: 10.03.2021].
- Verzhuk V.G., Filipenko G.I., Safina G.F., Pavlov A.V., Zhestkov A.S. Cryopreservation is an effective method of fruit crops genetic resources conservation. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2012;169:270-279. [in Russian] (Вержук В.Г., Филипенко Г.И., Сафина Г.Ф., Павлов А.В., Жестков А.С. Криоконсервация – эффективный метод сохранения генетических ресурсов плодовых и ягодных культур. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2012;169:270-279).
- Volova T.G., Shishatskaja E.I. *Cupriavidus eutrophus* VKPM B-10646 – producer of polyhydroxy alkanooates and production method thereof. Russian Federation; patent number: RU 2439143 C1; 2010. [in Russian] (Волова Т.Г., Шишацкая Е.И. Штамм бактерий *Cupriavidus eutrophus* VKPM B-10646 – продуцент полигидроксиалканоеатов и способ их получения Российская Федерация; патент № RU 2439143 C1; 2010).
- Volova T.G., Shishatskaya E.I., Prudnikova S.V., Zhila N.O., Boyandin A.N. New generation formulations of agrochemicals: Current trends and future priorities. Boca Raton, FL: Apple Academic Press; 2020. DOI: 10.1201/9780429433610
- Volova T.G., Vinnik Yu.S., Shishatskaya, E.I., Markelova N.M., Zaikov G.E. (eds). Natural-based polymers for biomedical applications. New York, NY: Apple Academic Press; 2017. DOI: 10.1201/9781315366036
- Volova T.G., Zhila N.O., Prudnikova S.V., Boyandin A.N., Shishatskaya E.I. Fundamentals of the design and use of new-generation agricultural products (Fundamentalnye osnovy konstruirovaniya i primeneniya selskokhozyaystvennykh preparatov novogo pokoleniya). Krasnoyarsk; 2016. [in Russian] (Волова Т.Г., Жила Н.О., Прудникова С.В., Бояндин А.Н., Шишацкая Е.И. Фундаментальные основы конструирования и применения сельскохозяйственных препаратов нового поколения. Красноярск; 2016).
- Voronkova N.M., Kholina A.B. Germination biology and cryostorage of seeds of some food and medicinal plant species in Russian Far East. *The Bulletin of KrasGAU*. 2011;9(60):55-59. [in Russian] (Воронкова Н.М., Холина А.Б. Биология прорастания и криохранение семян некоторых пище-

вых и лекарственных видов растений Дальнего Востока России. *Вестник КрасГАУ*. 2011;9(60):55-59.  
Walters C., Wheeler L., Stanwood P.C. Longevity of cryogenically stored seeds, *Cryobiology*. 2004;48(3):229-244.  
DOI: 10.1016/j.cryobiol.2004.01.007

Zhimulev I.F., Solomonov N.G., Sokolov V.A. Cryostorage of seeds: results and prospects (Kriokhraneniye semyan: itogi i perspektivy). Novosibirsk; 2014. [in Russian] (Жимулев И.Ф., Соломонов Н.Г., Соколов В.А. Криохранение семян: итоги и перспективы. Новосибирск; 2014).

### Информация об авторах

**Андрей Валерьевич Павлов**, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, avpavlov77@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5098-4904>

**Елизавета Александровна Пороховинова**, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, e.porohovinova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8328-9684>

**Нина Борисовна Брач**, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующая отделом, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, n.brutch@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2253-6263>

**Александр Васильевич Павлов**, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, pavlov.cryolab@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4319-0353>

**Владимир Григорьевич Вержук**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, v.verzhuk@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6891-6272>

### Information about the authors

**Andrey V. Pavlov**, Cand. Sci (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, avpavlov77@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5098-4904>

**Elizaveta A. Porokhovinova**, Dr. Sci (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, e.porohovinova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8328-9684>

**Nina B. Brutch**, Dr. Sci (Biology), Chief Researcher, Head of a Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, n.brutch@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2253-6263>

**Aleksandr V. Pavlov**, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, pavlov.cryolab@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4319-0353>

**Vladimir G. Verzhuk**, Cand. Sci (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia, v.verzhuk@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6891-6272>

**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 11.06.2021; одобрена после рецензирования 23.11.2022; принята к публикации 02.03.2023. The article was submitted on 11.06.2022; approved after reviewing on 23.11.2022; accepted for publication on 02.03.2023.