



Низкотемпературное хранение семян. Становление метода и его роль в сохранении генетических ресурсов растений

Г. И. Филипенко

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

Автор, ответственный за переписку: Галина Ивановна Филипенко, g.filipenko@vir.nw.ru

Около 90% генетических ресурсов культурных растений Земли сохраняется в виде коллекций семян. Низкотемпературное хранение образцов семян позволяет уменьшить число пересевов, поддерживать жизнеспособность семян на высоком уровне длительные сроки. В статье обсуждаются исследования влияния различных факторов на долговечность семян, ставшие методической основой при организации низкотемпературного хранения семян в генных банках растений. Рассмотрены случаи чрезвычайного долголетия семян, расширяющие наши представления о возможностях живых организмов. Приведены сведения из стандартов генных банков (Genebank Standards, 1994, Genebank Standards..., 2014) о выделении нескольких типов коллекций (активная, базовая, дублетная), что позволяет рационально организовать хранение и использовать имеющийся материал, а также о современных требованиях к условиям низкотемпературного хранения.

Ключевые слова: генетические ресурсы растений, стандарты генных банков, условия хранения, всхожесть семян, влажность семян

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации Программы развития Национального центра генетических ресурсов растений по соглашению с Минобрнауки России от 15 февраля 2024 года № 075-02-2024-1090.

Для цитирования: Филипенко Г.И. Низкотемпературное хранение семян. Становление метода и его роль в сохранении генетических ресурсов растений. *Бюллетень ВИР*. 2024;(243):50-56.

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Филипенко Г.И., 2024

Review article

Low-temperature storage of seeds. Establishment of the method and its role in plant genetic resources conservation

Galina I. Filipenko

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

Corresponding author: Galina I. Filipenko, g.filipenko@vir.nw.ru

About 90% of the global cultivated plant genetic resources are preserved as seed collections. The low-temperature storage of seed accessions allows for the reduction of the number of regenerations and for long term maintenance of high level seed viability. The article considers studies of the influence of various factors on seed longevity, which became the methodological basis for organizing low-temperature seed storage in plant genebanks. The presented cases of extreme seed longevity expand our knowledge of the capabilities of living organisms. The Genebank Standards (1994) and Genebank Standards for Plant Genetic Resources for Food and Agriculture (2014) provide information on the subdivision of collections into active, basic, and duplicate ones, which allows rational organization of storage and use of available material, as well as describe modern requirements to low-temperature storage conditions.

Keywords: plant genetic resources, genebank standards, storage conditions, seed germination, seed moisture

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the implementation of the Development Program of the National Center for Plant Genetic Resources under the Agreement with the Ministry of Education and Science of Russia dated February 15, 2024 No. 075-02-2024-1090.

For citation: Filipenko G.I. Low-temperature storage of seeds. Establishment of the method and its role in plant genetic resources conservation. *VIR Bulletin*. 2024;(243):50-56. (In Russ.).

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

© Filipenko G.I., 2024

Введение

В настоящее время человечеством осознана важнейшая проблема – многим видам животных и растений грозит исчезновение. Происходит это из-за отрицательного воздействия цивилизации на природу: распашки целинных и залежных земель, вырубки лесов, интенсивных методов ведения сельского хозяйства, развития технологий, нарушающих экологическое равновесие. В противовес этому процессу для сохранения видов животных и растений создаются заповедники, заказники (сохранение *in situ*, т. е. сохранение экосистем и естественных мест обитания), а также поддержание и восстановление жизнеспособных популяций видов в их естественной среде), коллекции животных, семян растений (сохранение *ex situ*, т. е. сохранение компонентов биологического разнообразия вне их естественных мест обитания) (The Convention on Biological..., 1993).

В мире около 90% генетических ресурсов культурных растений сохраняется в виде коллекций семян. Долгое время поддержание их в живом виде осуществлялось путем регулярных пересевов. Но во второй половине двадцатого столетия во многих научно-исследовательских учреждениях, занимающихся сбором и изучением растительных ресурсов, назрела серьезная необходимость пересмотра принципов работы с коллекциями семян. На это повлияло в основном два фактора: первый – необходимость ежегодного расходования огромных средств на пересевы, второй – большая вероятность генетической эрозии или биологического засорения образцов семян, возникающая при каждом пересеве. Технология низкотемпературного хранения семян позволяет увеличить продолжительность периода, когда семена имеют высокую жизнеспособность и нет необходимости их пересевать. Именно поэтому были организованы генетические банки, использующие низкотемпературное хранение: в США в 1958 году, Японии в 1966 году (Roberts, 1972), в СССР в 1976 году (Khoroshailov, 1978), Турции и в Скандинавских странах в 1978 году. К 2009 г. в мире насчитывалось более 1750 учреждений, в которых на низкотемпературном хранении находилось в общей сложности 7,4 миллиона образцов семян. Среди ведущих генбанков растений ВИР, коллекция которого в то время составляла 328 727 образцов, занимал четвертое место (FAO, 2010). XXI век ознаменовался осуществлением таких крупных проектов в области сохранения генетических ресурсов растений, как партнерство Банк семян тысячелетия (Millennium Seed Bank Partnership), координируемое Королевским ботаническим садом Кью (Великобритания) и Всемирное хранилище семян на Шпицбергене (Svalbard Global Seed Vault), созданное по инициативе правительства Норвегии. В настоящее время в Банке семян тысячелетия хранится более 2,4 миллиарда семян диких растений со всего мира, представляющих почти 40 000 различных видов (Royal Botanic..., 2024). Во Всемирном хранилище семян на Шпицбергене на депозитарном хранении находится 1 331 458 образцов семян 6297 видов от 123 депозиторов (Svalbard Global..., 2024).

Созданию генных банков растений, использующих низкотемпературное хранение семян, предшествовала большая научно-методическая работа. Надо было представлять, насколько долго семена могут сохранять жизнеспособность, и от каких факторов это зависит. Необходимо было продумать организацию хранения семян так, чтобы гарантировать надежное сохранение генетического материала растений и обеспечение селекционеров исходным материалом для селекции.

Случаи поразительной долговечности семян

Рассмотрим случаи невероятной долговечности семян в порядке увеличения срока сохранения семенами жизнеспособности.

Пьер Беккерель исследовал жизнеспособность семян, полученных им из хранилищ парижского Национального музея. Семена были собраны в период с 1819 по 1853 г., а способность их к прорастанию изучалась в 1906 г. и затем в 1934 г. Для 13 видов П. Беккерель установил длительность жизни, равную 55–158 годам, а для *Mimosa glomerata* Forsk., *Astragalus massiliensis* Lam., *Dioclea pauciflora* Rusby., *Leucaena leucocephala* L., *Cassia bicaularis* L., семена которых сохраняли всхожесть ко второй проверке, он оценил вероятную продолжительность жизни семян соответственно в 221, 100, 121, 155 и 199 лет (Becquerel, 1934). Большинство исследованных семян относилось к семейству Fabaceae, представители которого, как известно, обладают плотной семенной кожурой, с чем, возможно, связана большая продолжительность жизни этих семян.

На дне высохшего озера в Маньчжурии были найдены семена индийского лотоса, пролежавшие там, как предполагалось сначала, 160 лет. Их удалось прорастить (Ohga, 1926). Позже при помощи метода определения распада радиоактивного углерода было показано, что возраст этих семян 1040 ± 210 лет (Libby, 1951). Эти семена обладали прочными покровами, которые надо было разрушить, чтобы началось прорастание, появились нормальные проростки.

В 1963 г. при раскопках дворца Ирода Великого на Масаде (Израиль) в старинном кувшине найдено несколько семян финиковой пальмы (хранились в очень сухом и защищенном пространстве). В университете Цюриха радиоуглеродный анализ показал возраст семян в промежутке от 155 года до н. э. до 64 года н. э. Семена переданы на хранение в университет Бар-Илан в Рамат-Гане. В 2005 г. три семени пальмы посадили, и восемь недель спустя одно из древних семян проросло. В 2008 г. дерево стало высотой почти 2 метра, и на нем появилось около десятка листьев. Сегодня это единственное дерево иудейской финиковой пальмы, которая вымерла 1800 лет назад. Плоды этой разновидности пальмы были одним из основных источников питания в Древней Иудее, также эти плоды были основной экспортной культурой (Sallon et al., 2008). Пальму назвали Мафусаил. Растет она в кибуце Кетура, в пустыне Арава. В 2011 г. на пальме появились цветы, таким образом

было установлено, что это дерево мужского пола. Ученые взяли пыльцу, чтобы оплодотворить одну из финиковых пальм, и им удалось получить плоды.

Семя, найденное во время археологических раскопок пещеры в Иудейской пустыне, проросло, и радиоуглеродный анализ показал возраст 993 – 1202 г. н. э. Секвенирование ДНК и филогенетический анализ определили, что этот сеянец принадлежит к роду покрытосеменных растений *Commiphora* Jacq., родственному трем южноафриканским видам *Commiphora*, но уникальному среди всех других видов, изученных на сегодня. Предлагается несколько гипотез, объясняющих происхождение и этноботаническое значение этого неизвестного вида *Commiphora*, одна из которых отождествляет его с деревом, производившим смолу, использовавшуюся для получения иудейского (гилеадского) бальзама, упоминаемого в библейских источниках (Sallon et al., 2024).

В 1954 году в северо-западной части Канады при археологических раскопках на плато Юкон в толще промерзшего ила были обнаружены семена люпина арктического. Их возраст был определен в 14860 ± 840 лет. Семена прорастили в 1966 году, шесть проросли, дали всходы, и из них выросли здоровые растения (Porsild, Harington, 1967).

В 1990–2001 годах при исследовании лессово-ледовых отложений приморских низменностей севера Якутии, относимых к эпохе позднего плейстоцена, неоднократно встречались погребенные норы грызунов, содержащие плоды и семена растений. Их численность в отдельных норах достигала 600–800 тысяч штук. С использованием культуры тканей *in vitro* и клонального микроразмножения из материнских незрелых тканей плодов, возраст которых по данным радиоуглеродного анализа составлял 31800 ± 300 лет, были регенерированы фертильные растения *Silene stenophylla* Ledeb. (Caryophyllaceae) Растения-регенеранты были доведены до цветения и плодоношения и заложили жизнеспособные семена (Yashina et al., 2012).

Эти случаи раздвигают наши представления о возможностях сохранения генетических ресурсов растений. Но в целом следует заметить, что старение семян – процесс неизбежный, идущий даже при самых благоприятных для семян условиях.

Факторы, влияющие на скорость старения семян

Старение семян связано с накоплением структурных и метаболических повреждений, вызывающих нарушение функций и снижение устойчивости к неблагоприятным внешним условиям вплоть до потери жизнеспособности (McDonald, 1999). В основе повреждений, приводящих к старению семян, лежат процессы неферментативного гликозилирования белков, генерация активных форм кислорода и свободных радикалов, перекисное окисление липидов (Walters, 1998; Bailly, 2007; Choudhury, Bordolui, 2023). Интересное направление исследований – поиск биохимических и генетических маркеров старения (или долголетия) у разных видов растений (Shvachko, Khlestkina, 2020).

Долговечность семян определяется взаимодействием биологических факторов, присущих семенам, и условий хранения, среди которых ведущую роль играют температура хранения, контролируемое содержанием влаги в семенах (относительная равновесная влажность) и, в несколько меньшей степени, парциальное давление кислорода. Установлено, что, чем ниже температура хранения и парциальное давление кислорода, тем длиннее период жизнеспособности семян (Roberts, 1972; Justice, Bass, 1978).

На изменение влажностного режима семена разных видов реагируют по-разному. У большинства сельскохозяйственных культур семена хорошо переносят подсушивание до влажности 2–5% или даже ниже. Такие семена называют ортодоксальными. Но есть растения, семена которых нельзя высушивать ниже характерного для них, обычно высокого, уровня влажности (12–31%) – тропические древесные растения, цитрусовые, кофе, какао, некоторые каучуконосы и др. Их семена называют рекальцитрантными (Roberts, 1973). Долговечность ортодоксальных семян повышается при снижении их влажности в определенных пределах (Roberts, 1972; Roberts, Ellis, 1989; Walters, 1998). Для сохранения рекальцитрантных семян используют технологии *in vitro* и криохранения. Определить, являются семена ортодоксальными, рекальцитрантными, или относятся промежуточной группе, можно используя специальный протокол (Hong, Ellis, 1996).

Важную роль в поддержании низкой влажности семян в процессе хранения играет герметичная упаковка (Zhukova, Khoroshailov, 1981; Ellis, Hong, 2006; Gomez-Campo, 2006).

Положительное влияние снижения температуры, парциального давления кислорода и влажности семян на их долговечность связаны с тем, что в сухих семенах при низкой температуре и низком содержании кислорода в среде хранения снижается интенсивность дыхания, замедляется обмен веществ в целом. Однако он не прекращается полностью: в сухих семенах возможно неферментативное гликозилирование белков. Оптимизируя условия хранения можно замедлить процесс старения семян, но невозможно его остановить (McDonald, 1999).

Среди биологических факторов долголетия семян можно выделить генетические (присущие данному виду, сорту), матрикальные (связанные с условиями формирования и созревания семян) и экологические (связанные с условиями выращивания, заболеваниями) (Strona, 1966).

Виды растений различаются по способности семян к длительному хранению. Альфред Юарт разделил семена по продолжительности их жизни в лабораторных условиях, которые он принимал за оптимальные, на три группы. Микробиотиками он назвал семена, продолжительность жизни которых не превышает 3 лет, мезобиотиками – семена с продолжительностью жизни от 3 до 15 лет и макробиотиками – с продолжительностью от 15 до 100 лет и больше (Ewart, 1908). Разумеется, при изменении условий хранения изменяется продолжительность

жизни семян. Однако различия между видами остаются. Определение принадлежности семян к той или другой группе зависит также от того, что понимают под термином долголетие. Различают биологическое долголетие – период от созревания семян на материнском растении до потери ими жизнеспособности при хранении в естественных или контролируемых условиях, и хозяйственное долголетие – период хранения в естественных или контролируемых условиях, когда семена сохраняют всхожесть в пределах норм, установленных стандартом (Zhukova, Khoroshailov, 1981).

Различия по долговечности семян существуют не только между видами, но и между сортами (Justice, Bass, 1978; Zhukova, Khoroshailov, 1981). Более того, различия по этому показателю могут быть даже между семенами одного растения. Например, темно-коричневые семена люцерны сорта 'Северянка' хранились лучше, чем зеленые, собранные с тех же соцветий (Zhukova, Khoroshailov, 1981), что, вероятно, связано с антиоксидантной ролью каротиноидов (Smolikova, Medvedev, 2015).

Условия формирования семян: почвенно-климатические особенности места их репродукции, погодные условия года выращивания влияют на способность семян к длительному хранению. Так, семена сои ташкентской репродукции при одинаковых исходных показателях с семенами, выращенными на Кубани, дольше сохраняли высокий уровень всхожести (Zhukova, Khoroshailov, 1981). Семена сои разных мест репродукции различались по всхожести до и после низкотемпературного хранения, и, в среднем, наивысшие значения характеризовали семена, полученные на Дальневосточной опытной станции, где температурный режим ближе к оптимальному для этой культуры (Seferova et al., 2024).

Большое значение для сохранности семян имеет степень их спелости. Недозрелые семена содержат больше воды и быстро теряют всхожесть при хранении (Walters-Vertucci et al., 1996). Также они сильнее подвержены влиянию патогенных микроорганизмов. Во время обезвоживания при созревании в семенах происходит клеточная вакуолизация, синтез белков позднего эмбриогенеза и белков теплового шока, накопление олигосахаридов и активация антиоксидантной системы (Corbineau, 2012).

Основной показатель качества семян – их всхожесть. Это интегральный показатель, в котором находит отражение генетический потенциал вида/сорта, влияние условий выращивания, подсушивания, транспортировки, наличие или отсутствие повреждений (механических или вызванных болезнями и вредителями) и т. п. В процессе хранения семян по мере их старения наблюдается снижение, а затем и потеря всхожести. Семена высокого качества обычно хранятся дольше семян низкого качества (Roberts, 1972, Delouche, Baskin, 1973; Zhukova, Khoroshailov, 1981).

О стандартах генных банков

Обнаруженные закономерности в изменениях жизнеспособности семян при хранении в зависимости от раз-

личных факторов были учтены при организации *ex situ* сохранения генетических ресурсов растений в различных странах, нашли отражение в руководствах и стандартах для генных банков (Genebank Standards, 1994, Genebank standards for plant genetic resources for food and agriculture, 2014).

Стандарты генных банков заслуживают отдельного обсуждения. В этой статье остановимся только на терминологии – определениях разных типов коллекций и рекомендуемых условиях хранения.

Типы коллекций. В настоящее время в генетических банках растений для удобства управления коллекции принято подразделять на три типа: базовые, активные, дублетные.

В Стандартах для генбанков 1994 года базовая коллекция определяется как набор образцов, каждый из которых должен быть уникальным и с точки зрения генетической целостности максимально приближенным к первоначально предоставленному образцу, который сохраняется на отдаленное будущее. Базовая коллекция генофонда сельскохозяйственных культур или любого другого вида может быть рассредоточена по нескольким учреждениям – практика, которая, вероятно, увеличится с развитием посевных сетей.

Активные коллекции включают в себя образцы, которые немедленно доступны для размножения и предоставления для использования. Таким образом, роль базовых коллекций не заключается в том, чтобы предоставлять пользователям образцы семян: обычно они предоставляются через активные коллекции (Genebank Standards, 1994).

Как правило, семена из базовых коллекций берут только для восстановления образца, когда жизнеспособность семян снижается ниже допустимого уровня или когда образец не может быть получен ни из какого другого источника. Дублетные коллекции представляют собой дублетные образцы базовой коллекции, которые хранят отдельно от нее, чтобы увеличить надежность хранения.

Термины «базовая» или «активная» коллекция не являются синонимами условий хранения образцов. Однако обычно базовые коллекции хранят в условиях, обеспечивающих их длительное хранение (long-term conservation). Активные коллекции хранят в более мягких условиях, что связано, в основном, с экономическими причинами и, отчасти, с удобством пользования. Такие условия обеспечивают среднесрочное хранение коллекций (medium-term conservation) – обычно не менее 10–20 лет (Genebank Standards, 1994).

В Стандартах генных банков для генетических ресурсов растений для производства продовольствия и ведения сельского хозяйства 2014 года определения базовой коллекции не дано. Активная коллекция характеризуется как образец зародышевой плазмы, который используется для восстановления, размножения, распространения, описания и оценки (Genebank standards for plant genetic resources for food and agriculture, 2014).

Условия хранения ортодоксальных семян. Согласно современным Стандартам генных банков для гене-

тических ресурсов растений для производства продовольствия и ведения сельского хозяйства длительное хранение коллекций семян должно осуществляться при температуре $-18 \pm 3^\circ\text{C}$ и относительной влажности $15 \pm 3\%$. Все образцы семян должны быть высушены до равновесной влажности в контролируемых условиях при $5-20^\circ\text{C}$ и $10-25\%$ относительной влажности и после этого герметично упакованы. Условия среднесрочного хранения образцов таковы: температура $5-10^\circ\text{C}$ и относительная влажность воздуха $15 \pm 3\%$. Высушивание образцов должно проводиться так же, как при подготовке к длительному хранению, должна использоваться герметичная упаковка. В тех случаях, когда к образцам коллекции требуется частый доступ или когда велика вероятность, что запасы семян будут исчерпаны задолго до прогнозируемого времени утраты жизнеспособности, можно хранить семена в негерметичных контейнерах (Genebank standards for plant genetic resources for food and agriculture. Rome, 2014).

Следует сказать, что Стандарты генных банков для генетических ресурсов растений ФАО носят рекомендательный характер. Требование поддерживать низкую влажность воздуха в хранилищах, когда используется герметичная упаковка образцов, – всего лишь дополнительная мера безопасности на тот случай, если герметичность упаковки будет нарушена. Кроме того, хранение активных коллекций при низкой относительной влажности воздуха позволяет выполнять ряд манипуляций с ними, не перенося образцы в сушильную камеру, что весьма удобно. Однако, если влажность в хранилище не поддерживается на низком уровне, это не критично. Главное, тщательно соблюдать технологию упаковки образцов. Температура -18°C рекомендована стандартами генных банков для долгосрочного хранения в связи с тем, что это самая низкая температура, которую обеспечивает обычный одноступенчатый компрессор морозильной камеры. В принципе, может быть использована и более высокая и более низкая температура. Многолетний опыт ВИР свидетельствует о том, что даже хранение при $4,5^\circ\text{C}$ (в Кубанском генетическом банке семян – филиале ВИР) дает хорошие результаты, если семена были высокого качества и прошли правильную подготовку к хранению.

В хранилищах ВИР, построенных в Санкт-Петербурге в 2000 г., в камерах для длительного хранения семян поддерживается температура -10°C . При такой температуре находятся на среднесрочном хранении семена микробиотиков, например, сои, риса. В камерах для среднесрочного хранения семян макро- и мезобиотиков поддерживается температура 4°C . Семена подсушивают в сушилке при температуре 20°C и относительной влажности воздуха 12% . Равновесная влажность семян в этих условиях составляет $3-7\%$ в зависимости от культуры.

В хранилищах образцов Национального каталога, построенных в ВИР в 2023 г., поддерживается температура -18°C . Условия в сушилке такие же, как и при подготовке к закладке на хранение образцов семян коллекции ВИР. В качестве упаковки используются фольговые ламинированные пакеты, которые запаивают при помощи

вакуумного упаковщика.

Заключение

В целом можно заключить, что низкотемпературное хранение коллекций семян играет в мире огромную роль в сохранении генетических ресурсов растений, жизненно необходимых для экономического и социального развития человечества. Организации современных генных банков растений предшествовала большая научно-методическая организационная работа, лишь небольшая часть которой освещена в этом обзоре. В перспективе ученым еще предстоит более глубокое изучение физиолого-биохимических, генетических изменений при хранении семян, что важно не только для совершенствования технологии хранения, но и для понимания общебиологической проблемы старения живых организмов.

References / Литература

- Bailey C. Active oxygen species and antioxidants in seed biology. *Seed Science Research*. 2007;14 (2):93-107. DOI: 10.1079/SSR2004159
- Becquerel P. La longevité des graines macrobiotiques. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*. 1934;194:2158-2159.
- Choudhury A., Bordolui S.K. Concept of seed deterioration: reason, factors, changes during deterioration and preventive measures to overcome seed degradation. *American International Journal of Agricultural Studies*. 2023;7(1):41-56. DOI: 10.46545/aijas.v7i1.291
- Corbineau F. Markers of seed quality: from present to future. *Seed Science Research*. 2012;22(1):61-68.
- Delouche J.C., Baskin C.C. Accelerated aging techniques for predicting relative storability of seed lots. *Seed Science and Technology*. 1973;1(2):427-452.
- Ellis R.H., Hong T.D. Temperature sensitivity of the low-moisture-content limit to negative seed longevity-moisture content relationships in hermetic storage. *Annals of Botany*. 2006;97(5):785-791.
- Ewart A.J. On the longevity of seeds. *Proceedings of the Royal Society of Victoria*. 1908;21(1):1-210.
- FAO. The Second Report on the State of the World's Plant Genetic Resources for Food and Agriculture. Rome: Commission on genetic resources for food and agriculture FAO; 2010. URL: <http://www.fao.org/4/i1500e/i1500e.pdf> [accessed Dec. 01, 2024].
- Genebank Standards. 1994. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome: International Plant Genetic Resources Institute; 1994. URL: https://cropgenebank.sgrp.cgiar.org/images/file/learning_space/genebank_standards.pdf [accessed Dec. 01, 2024].
- Genebank Standards for Plant Genetic Resources for Food and Agriculture. Rome: FAO; 2014. URL: <https://www.fao.org/4/i3704e/i3704e.pdf> [accessed Dec. 01, 2024].
- Gomez-Campo C. Erosion of genetic resources within seedbanks: the role of seed containers. *Seed Science Research*. 2006;16:291-294.
- Hong T.D., Ellis R.H. A protocol to determine seed storage behaviour. Rome: International Plant Genetic Resources Institute; 1996.
- Justice O.L., Bass L.N. Principles and practices of seed storage. Washington: U.S. Government Printing Office; 1978.
- Khoroshailov N.G. National repository of seeds of world plant resources in Kuban (Natsional'noye khranilishche semyan mirovykh rastitel'nykh resursov na Kubani). *Research Bulletin of the N.I. Vavilov Institute of Plant Industry*. 1978;77:3-9. [in Russian] (Хорошайлов Н.Г. Национальное хранилище семян мировых растительных ресурсов на Кубани. *Бюллетень научно-исследовательского института растениеводства имени Н.И. Вавилова*. 1978;77:3-9).
- Libby W.F. Radiocarbon dates, II. *Science*. 1951;114:291-196.
- McDonald M.B. Seed deterioration: physiology, repair and assessment. *Seed Science and Technology*. 1999;27(1):177-237.
- Ohga I. The germination of century old and recently harvested Indian lotus fruits, with special references to the effect of oxygen

- supply. *American Journal of Botany*. 1926;13:754-759.
- Porsild A.E., Harrington C.R., Mulligan G. *Lupinus arcticus* Wats. grown from seeds of Pleistocene age. *Science*. 1967;158:113-114.
- Roberts E.H. Viability of seeds. London: Chapman and Hall Ltd.; 1972. 448 p.
- Roberts E.H. Predicting the storage life of seeds. *Seed Science and Technology*. 1973;1:499-514.
- Roberts E.H., Ellis R.H. Water and seed survival. *Annals of Botany*. 1989;63:39-52. DOI: [10.1093/oxfordjournals.aob.a087727](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087727)
- Royal Botanic Gardens. Seed Collection. URL: <https://www.kew.org/science/collections-and-resources/collections/seed-collection> [accessed Dec. 01, 2024].
- Sallon S., Solowey E., Cohen Y., Korchinsky R., Egli M., Woodhatch I., Simchoni O., Kislev M.E. Germination, Genetics, and Growth of an Ancient Date Seed. *Science*. 2008;320(5882):1464. DOI: [10.1126/science.1153600](https://doi.org/10.1126/science.1153600)
- Sallon S., Solowey E., Gostel M.R., Egli M., Flematti G.R. Bohman B., Schaeffer P., Adam P., Weeks A. Characterization and analysis of a *Commiphora* species germinated from an ancient seed suggests a possible connection to a species mentioned in the Bible. *Communications Biology*. 2024;7(1):1-13. DOI: [10.1038/s42003-024-06721-5](https://doi.org/10.1038/s42003-024-06721-5)
- Seferova I.V., Filipenko G.I., Zabegaeva O.N., Boyko A.P., Nekrasov A. Yu., Novikova L.Yu. Germination of soybean seeds after low-temperature storage and its dependence on weather and climate conditions in the places of reproduction of accessions. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2024;7(3):42-52. [in Russian] (Сеферова И.В., Филипенко Г.И., Забегаева О.Н., Бойко А.П., Некрасов А.Ю., Новикова Л.Ю. Всхожесть семян сои после низкотемпературного хранения и ее зависимость от погодноклиматических условий в местах репродукции образцов. *Биотехнология и селекция растений*. 2024;7(3): 42-52). DOI: [10.30901/2658-6266-2024-3-06](https://doi.org/10.30901/2658-6266-2024-3-06)
- Smolikova G.N., Medvedev S.S. Seed carotenoids: synthesis, diversity, and functions. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2015;62(1):1-13. [in Russian] (Смоликова Г.Н., Медведев С.С. Каротиноиды семян: синтез, разнообразие и функции. *Физиология растений*. 2015;62(1):1-13). DOI: [10.7868/S0015330315010133](https://doi.org/10.7868/S0015330315010133)
- Strona I.G. General seed science of field crops. Moscow.: Kolos; 1966. 464 p. [in Russian] (Строна И.Г. Общее семеноведение полевых культур. Москва: Колос; 1966).
- Shvachko N.A., Khlestkina E.K. Molecular genetic bases of seed resistance to oxidative stress during storage. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;24(5):451-458. DOI: [10.18699/VJ20.47-0](https://doi.org/10.18699/VJ20.47-0)
- Svalbard Global Seed Vault. URL: <https://www.seedvault.no/> [accessed Dec. 01, 2024].
- The Convention on Biological Diversity. Article 2. Use of Terms. 1993. URL: <https://www.cbd.int/convention/articles/default.shtml?a=cbd-02> [accessed Dec. 01, 2024].
- Walters C. Understanding the mechanisms and kinetics of seed aging. *Seed Science Research*. 1998;8:223-244.
- Walters-Vertucci C., Crane J., Vance N.C. Physiological aspects of *Taxus brevifolia* seeds in relation to seed storage characteristics. *Physiologia Plantarum*. 1996;98(1):1-12.
- Yashina S., Gubin S., Maksimovich S., Yashina A., Gakhova E., Gilichinsky D. Regeneration of whole fertile plants from 30,000-y-old fruit tissue buried in Siberian permafrost. *PNAS*. 2012;109(10):4008-4013. DOI: [10.1073/pnas.1118386109](https://doi.org/10.1073/pnas.1118386109)
- Zhukova N.V., Khoroshailov N.G. Guidelines for long-term storage of seeds (Metodicheskiye ukazaniya po dlitel'nomu khraneniyyu semyan). N.G. Khoroshailov (ed.). Leningrad: VIR; 1981. [in Russian] (Жукова Н.В., Хорошайлов Н.Г. Методические указания по длительному хранению семян / под ред. Н.Г. Хорошайлова. Ленинград: ВИР; 1981).

Информация об авторе

Галина Ивановна Филипенко, кандидат сельскохозяйственных 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, g.filipenko@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8419-1518>

Information about the author

Galina I. Filipenko, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, g.filipenko@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8419-1518>

Вклад автора: автор сделал самостоятельный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the author: the author contributed solely to this article.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the author declares no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 04.12.2024; одобрена после рецензирования 11.12.2024; принята к публикации 20.12.2024.

The article was submitted on 04.12.2024; approved after reviewing on 11.12.2024; accepted for publication on 20.12.2024.