



## Метод определения всхожести семян пшеницы на основе мембранных потенциалов

Н. Н. Барышева\*, С. П. Пронин

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (г. Барнаул, Россия)

\*[mnn-t@mail.ru](mailto:mnn-t@mail.ru)

*Введение.* Всхожесть семян пшеницы является важным показателем их качества, используется для расчета и корректировки нормы посева. При определении всхожести необходимо учитывать ее изменения на этапе хранения. Решением данной проблемы станет разработка метода, который позволит определять всхожесть на любой технологической стадии (на этапах уборки, хранения, посева). Целью статьи является исследование зависимости мембранного потенциала от качества семян, разработка метода определения всхожести семян пшеницы на основе мембранных потенциалов.

*Материалы и методы.* Проведенный авторами обзор научных работ, посвященных методам оценки качества семян пшеницы, свидетельствует о необходимости разработки высокочувствительных методов определения количественной характеристики всхожести с целью обеспечения скорости измерения и получения более точных результатов для дальнейшего использования. В результате проведенного обзора был разработан подход, который позволяет решить поставленную задачу посредством использования метода, основанного на исследовании мембранного потенциала зерен пшеницы.

*Результаты исследования.* В данной статье проведено исследование зависимости мембранного потенциала семян пшеницы от их всхожести. Полученные результаты экспериментальных исследований подтвердили, что значение потенциала может быть использовано для оценки качества семян. Определены требования и оптимальные условия проведения экспериментальных исследований.

*Обсуждение и заключение.* В результате исследования была установлена зависимость мембранного потенциала семян пшеницы от их всхожести, разработан метод определения всхожести семян пшеницы. Реализация данного метода позволит сельскохозяйственным предприятиям и фермерским хозяйствам проводить экспресс-оценку всхожести семян пшеницы на любой технологической стадии (на этапах уборки, хранения, посева).

**Ключевые слова:** зерна пшеницы, метод, оценка качества, всхожесть, мембранный потенциал

**Для цитирования:** Барышева Н. Н., Пронин С. П. Метод определения всхожести семян пшеницы на основе мембранных потенциалов // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 443–455. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.443-455>

© Барышева Н. Н., Пронин С. П., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

## Method of Determining Seed Germination by Using Membrane Potential of Wheat Seeds

N. N. Barysheva\*, S. P. Pronin

*Polzunov Altai State Technical University (Barnaul, Russia)*

\**mnn-t@mail.ru*

**Introduction.** The germination of wheat seeds is an important indicator of their quality, used to calculate and adjust the seeding rate. It is necessary to take into account germination changes at the storage stage. The solution of this problem will be development of a method that will allow to determinate germination at any technological stage (at the stage of harvesting, storage, seeding). The aim of the article is to study the dependence of membrane potential on grain quality, to develop a method for determining the germination of wheat seeds based on their membrane potentials.

**Materials and Methods.** The authors' review of research papers about methods of assessing the wheat seeds quality indicates the need for the development of highly sensitive methods of the germination test, which allow one to ensure the speed of measurement and obtain more accurate results for further use. An approach was developed on the basis of the review, which allows for solving the problem using the method based on the study of membrane potentials of wheat seeds.

**Results.** In this article, the study of the dependence of wheat seeds membrane potential from their germination was conducted. The results of experiments confirmed that the value of the potential could be used as quality assessment parameter. The requirements and optimal conditions for conducting the experiment were determined.

**Discussion and Conclusion.** The dependence of the wheat seeds membrane potential on their germination was established and the method for determining wheat seeds germination was developed. The implementation of this method will allow agricultural enterprises and farms to carry out the rapid assessment of wheat seeds germination at any technological stage (at the stage of harvesting, storage, seeding).

**Keywords:** wheat seed, method, quality assessment, germination, membrane potential

**For citation:** Barysheva N.N., Pronin S.P. Method of Determining Seed Germination by Using Membrane Potential of Wheat Seeds. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):443-455. DOI: <http://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.443-455>

### Введение

Зерна пшеницы представляют собой основу сельскохозяйственной промышленности в России и во всем мире. Жизнеспособность семян является основным критерием диагностики качества, тесно связанным с процентом всхожести<sup>1</sup>. Известно, что для оценки качества семян определяют их всхожесть [1].

Этот показатель представляет собой количественную характеристику и выражается в процентах. Общепринятая

градация всхожести варьируется до 100 % с шагом в 1 % [2].

Проблема диагностики всхожести семян пшеницы заключается в том, что она изменяется в процессе хранения [3]. Сельскохозяйственные предприятия, фермерские хозяйства должны в кратчайшие сроки получать достоверный результат для расчета и корректировки объема семян для посева. Мониторинг их состояния во время хранения важен для обеспечения сохранности высококачественных коллекций [4].

<sup>1</sup> Hampton J. G., TeKrony D. M. Handbook of Vigour Test Methods. Zurich: ISTA, 1995. 117 p. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19960707176> (дата обращения: 01.06.2019).

Оценка физиологического потенциала семян является основным компонентом контроля их качества.

Цель работы – исследовать зависимость мембранного потенциала от качества семян и разработать метод определения всхожести семян пшеницы на основе их мембранных потенциалов.

### Обзор литературы

Традиционные методы диагностики качества семян пшеницы в соответствии с правилами Международной ассоциации по контролю качества семян (ISTA) включают лабораторные методы с использованием регуляторов роста [5], методы окрашивания тетразолием<sup>2</sup> [6; 7], тесты жизнеспособности [2; 8]. Однако это трудоемкие, затратные по времени процессы [9].

В настоящее время существует ряд других методов оценки качества семян пшеницы. Эти методы основаны на обнаружении различных физических свойств, которые хорошо коррелируют с определенными факторами качества. Многие методы основаны на одном из следующих свойств: плотность, твердость, колебательные характеристики, передача рентгеновских лучей и гамма-лучей, оптическое отражение, электрические свойства и ядерный магнитный резонанс [10]. В оптических методах используют оптическое оборудование и компьютеризированную обработку данных, которые способны обеспечить высокоскоростную оценку качества и сортировку нескольких продуктов с высокой степенью точности [2].

Использование различных современных технологий получения изображений, таких как твердотельная телевизионная камера, камера линейного сканирования, рентгеновское сканирование, ультразвуковое сканирование

и визуализация, в сочетании с технологиями обработки изображений открыли новые возможности для исследователей при разработке новых и усовершенствовании существующих методов неразрушающей оценки качества сельскохозяйственной продукции [10]. Однако эти методы требуют дорогостоящего оборудования, высокой квалификации и соответствующей подготовки специалистов.

Многие методы позволяют получить статус прорастания в градации: положительный (семена проросли), отрицательный (семена не проросли) [2; 11].

В приведенной классификации методов оценки качества семян отсутствуют методы, основанные на измерении биоэлектрических сигналов непосредственно с зерен пшеницы. В данном случае исключаются методы электрической диагностики, основанные, например, на измерении тока, пропускаемого через зерно, или измерении его сопротивления.

Известно, что генерация биоэлектрических сигналов играет важную роль в жизни растений, так как характеризует их физиологическое состояние [2; 3; 5; 7]. Все высшие растения могут использовать биоэлектрические сигналы для регулирования различных физиологических функций [3], поэтому анализ природы и закономерностей электрических сигналов [12] у растений представляется весьма актуальным<sup>3</sup>.

Функциональная роль биоэлектрических сигналов [2; 3; 13; 14] в высших растительных организмах привлекает пристальное внимание исследователей [15; 16; 23; 24].

Так, роль мембранных потенциалов была изучена наиболее тщательно для относительно небольшой группы

<sup>2</sup> **Peters J., Lanham B.** Tetrazolium Testing Handbook: Contribution no. 29 to the Handbook on Seed Testing. Lincoln, Neb.: The Association, 2000. URL: <https://www.worldcat.org/title/tetrazolium-testing-handbook-contribution-no-29-to-the-handbook-on-seed-testing/oclc/49853771#relatedsubjects> (дата обращения: 01.06.2019).

<sup>3</sup> **Hlavachova Z.** Electrical Properties of Agricultural Products // Encyclopedia of Agrophysics. 2011. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1\\_47](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_47)

так называемых «подвижных» растений, которые используют потенциал действия для быстрого локомоторного ответа под действием неблагоприятных факторов [3]. В настоящее время установлено, что мембранный потенциал представляет собой сигнал, который вызывает кратковременные переходные изменения во многих жизненно важных процессах (дыхание, фотосинтез, рост и т. д.) на этапе их распространения [13; 14; 16; 24].

Согласно теории Гольдмана – Ходжкина – Катца (ГНК) мембранный потенциал определяется коэффициентами проницаемости для ионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$  и концентрациями ионов на внешней и внутренней сторонах мембраны:

$$E = \frac{RT}{F} \ln \frac{P_K [K^+]_{out} + P_{Na} [Na^+]_{out} + P_{Cl} [Cl^-]_{in}}{P_K [K^+]_{in} + P_{Na} [Na^+]_{in} + P_{Cl} [Cl^-]_{out}}, \quad (1)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К);  $T$  – абсолютная температура;  $F$  – постоянная Фарадея, равная 96485,35 Кл/моль $^{-1}$ ;  $P_K$ ,  $P_{Na}$ ,  $P_{Cl}$  – коэффициенты проницаемости для ионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ;  $[K^+]_{out}$ ,  $[Na^+]_{out}$ ,  $[Cl^-]_{out}$  – концентрации ионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$  на внешней стороне мембраны;  $[K^+]_{in}$ ,  $[Na^+]_{in}$ ,  $[Cl^-]_{in}$  – концентрации ионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$  на внутренней стороне мембраны.

Предположим, что оболочка зерна представляет собой мембрану. Тогда, при условии проращивания семян в воде, на внутренней стороне оболочки образуется определенная концентрация ионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ . Проницаемость мембраны и внутренние ионные процессы обеспечивают выход ионов наружу. Таким образом, на мембране возникает мембранный потенциал  $E$ , который подчиняется уравнению (1). Поскольку качество семян определяется проницаемостью их оболочек и концентрацией ионов, то мембранный потенциал может выступать как параметр, обеспечивающий количественную оценку всхожести семян.

Обзор значимых независимых переменных в уравнении (1) показал, что основными факторами, влияющими на изменение мембранного потенциала семян, являются температура, внутренняя и внешняя концентрация ионов.

Основываясь на уравнении (1), температура напрямую воздействует на значение мембранного потенциала. Поэтому для проведения исследования необходимо стабилизировать температуру. Для исключения влияния внешней концентрации при проращивании семян пшеницы необходимо использовать дистиллированную воду.

Дополнительные факторы воздействия:

- наличие механических повреждений. Механические повреждения оболочки зерна могут вызвать искажение результатов исследования, что снизит достоверность;

- время хранения до определения мембранного потенциала (старение семян). Установлено, что жизнеспособность семян изменяется со временем, а следовательно, изменяется и всхожесть семян. Этот фактор необходимо брать во внимание [17; 18].

Из уравнения (1) следует, что основные факторы воздействия на мембранный потенциал – это концентрация ионов и проницаемость мембраны (оболочки).

Определив явные факторы влияния на мембранный потенциал, представим вид регрессионной модели:

$$E_i = C_0 \ln(G_i) + C_1, \quad (2)$$

где  $i$  – значение всхожести;  $C_0$  – константа, равная  $\frac{RT}{F}$  (температура не изменяется в процессе исследования);  $G_i$  – всхожесть семян, которая определяется согласно уравнению (1) как:

$$\frac{P_K [K^+]_{out} + P_{Na} [Na^+]_{out} + P_{Cl} [Cl^-]_{in}}{P_K [K^+]_{in} + P_{Na} [Na^+]_{in} + P_{Cl} [Cl^-]_{out}}.$$

### Материалы и методы

Для экспериментальных исследований были предоставлены семена яровой пшеницы сорта «Зимушка» Алтайским отделением Россельхозцентра (Россия, Сибирский Федеральный округ, Барнаул). Было отобрано в общей сложности 7 образцов с разной всхожестью. Всхожесть отмечена в процентах. Для исследования предоставлены семена с процентом всхожести 87 %, 89 %, 90 %, 92 %, 95 %, 97 %, 99 %.

#### *Предварительный контроль прорастания семян по методам ISTA*

Перед проведением измерения мембранного потенциала был проведен контрольный тест всхожести по методам ISTA. Из партии образцов часть семян отправили на прорастание для проверки и установления их всхожести [24] в соответствии с правилами, установленными Международной ассоциацией по контролю качества семян (ISTA) [1]. Семена помещались на двух слоях фильтровальной бумаги в чашках Петри. Бумага предварительно смачивалась водой. Через семь дней при  $20 \pm 1$  °C были проведены подсчеты проросших семян. В соответствии с количеством проросших семян установлен процент всхожести. Были получены идентичные проценты всхожести в лаборатории Россельхозцентра.

#### *Подготовка к измерению мембранного потенциала*

Перед измерением мембранного потенциала отобранные из партии образ-

цы с разным процентом всхожести прошли дополнительную подготовку. Подготовка семян заключается в следующем. Вначале все семена просматривались на наличие поврежденных, пустотелых, которые исключались из дальнейшего процесса исследований.

Затем зерна устанавливали на поролоновую форму внутри пластиковой коробки (300 мм × 120 мм × 50 мм) на расстоянии 5 мм друг от друга. Форма увлажняется дистиллированной водой (100 мл). Были установлены три пластиковые коробки с поролоновыми формами. Использование дистиллированной воды позволяет исключить влияние внешней концентрации ионов на результат измерения мембранного потенциала зерна пшеницы (исключается следующий фактор).

Пластиковые коробки помещаются на 12 часов в термокамеру (рис. 1). Термокамера содержит датчики, которые контролируют изменение температуры, установленной на уровне 20 °C. После стабилизации температуры исключается еще один фактор влияния на мембранный потенциал.

Далее запускаются вентиляторы для конвекции воздуха внутри камеры. Камера плотно закрывается на 12 часов. После извлекается по одной форме и измеряется мембранный потенциал семян.

#### *Калибровка устройства LA 50 USB*

Перед измерением проводилась калибровка АЦП LA-50 USB с помощью магазина сопротивлений (производство



Р и с. 1. Система диагностики, термокамера

F i g. 1. A diagnostic system and a thermal camera



Германия), источника постоянного тока и измерительных электродов. Магазин сопротивлений позволил смоделировать выходное значение в диапазоне от  $-200$  мВ до  $-55$  мВ.

*Процесс измерения*

В процессе измерения каждое семя пшеницы помещалось в электрод и протыкалось вторым электродом. Регистрация сигнала происходила с помощью устройства LA 50 USB. Запись сигнала во времени осуществлялась на протяжении 10 с. На рисунке 2 представлена схема подключения электродов.

При получении данных в лаборатории относительная влажность составляла 30 %, а температура составляла  $19^{\circ}\text{C}$ .

Для измерения мембранного потенциала зерна использовалась измерительная система со следующей структурной схемой (рис. 3).

Узлы измерительного устройства и аналого-цифрового преобразования формируют напряжение для передачи его в ПК с последующей обработкой фиксируемого сигнала. Узел подсистемы обработки информации включает

в себя модели и алгоритмы, на основе которых происходит анализ полученной в результате измерений информации.

Обмен данными аналого-цифрового преобразования между ПК и устройством осуществляется через интерфейс USB. ПК при помощи специальной программы, входящей в комплект поставки, осуществляет обработку поступающих от устройства данных аналого-цифрового преобразования и управление устройством через интерфейс USB.

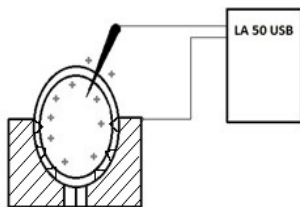
Для измерения биоэлектрических сигналов семян пшеницы применялась система диагностики, представленная на рисунке 1.

Система состояла из платы сбора данных (ЛА-50USB, Россия), электродов, компьютера.

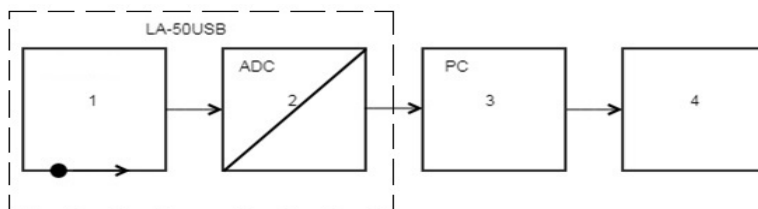
**Результаты исследования**

*Обработка результатов. Метод скользящей средней*

После сбора данных все сигналы представляют аддитивную смесь «сигнал + шум». Информация о помехах уменьшает отношение сигнал/шум и снижает полезность данных.



Р и с. 2. Схема подключения электродов  
F i g. 2. Electrodes connection diagram



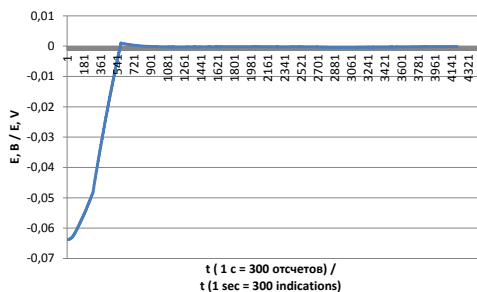
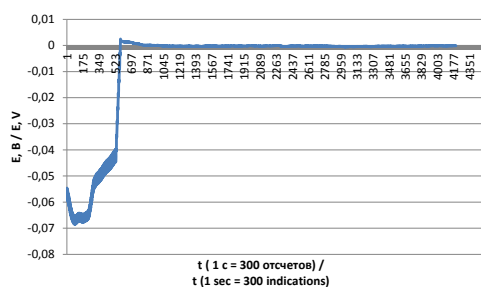
Р и с. 3. Обобщенная структурная схема: 1 – измерительное устройство; 2 – аналого-цифровой преобразователь; 3 – подсистема обработки информации; 4 – потребитель информации  
F i g. 3. Generalized structural diagram: 1 – measuring device; 2 – analog-to-digital converter; 3 – information processing subsystem; 4 – consumer information

Повысить достоверность информации возможно путем применения методов предварительной обработки [19; 20]. В настоящее время существуют различные методы предварительной обработки [21]. Как показал анализ полученной смеси, на полезный сигнал накладывается высокочастотный шум. Следовательно, целесообразно применить метод низкочастотной фильтрации, или метод скользящей средней [22]. Для примера на рисунке 4 показан результат усреднения. Информативным параметром является значение напряжения  $E$  в точке  $t = 0$  с. В данной точке мембранный потенциал удовлетворяет уравнению (1). Дальнейшие изменения мембранного потенциала – это уже потенциал действия.

При статистической обработке группы результатов прямых многократных независимых измерений проводилась оценка измеряемой величины, за которую принималось среднее арифметическое значение исправленных результатов измерений.

Далее вычисляли среднее квадратическое отклонение результатов измерений (табл. 1).

После осуществлялась проверка на грубые погрешности. Для исключения грубых погрешностей из результатов исследований был применен критерий Граббса. Согласно данному критерию группа результатов измерений должна принадлежать нормальному распределению, что и подтверждено результатами статистической обработки данных.



Р и с. 4. Результаты исследования до сглаживания и после (окно в 50 значений)

F i g. 4. Results of the study before and after smoothing (a window of 50 values)

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

**Результаты статистической обработки данных**  
**Results of statistical processing**

Температура, К / Temperature, K	Всхожесть, % / Germination, %	$E_1$ , mV	$E_2$ , mV	$E_3$ , mV	...	$E_n$ , mV	Среднее значение, мВ / Average value, mV	Среднее квадратическое отклонение (S) / Average square deviation (S)
293	87 %	-185,69	-190,27	-186,70	...	-186,05	-186,99	8,53
293	89 %	-139,37	-139,21	-140,02	...	-134,50	-142,05	5,24
293	90 %	-123,17	-125,05	-125,85	...	-127,48	-125,92	6,46
293	92 %	-106,45	-105,02	-105,9	...	-102,41	-104,94	6,51
293	95 %	-74,86	-75,60	-75,31	...	-77,08	-76,41	4,06
293	97 %	-63,21	-64,04	-63,1	...	-64,74	-64,17	3,51
293	99 %	-52,63	-55,30	-56,47	...	-55,1	-54,97	5,01

Наблюдаемые значения статистики Пирсона не попадают в критическую область ( $K_{\text{набл}} < K_{\text{кр}}$ ), поэтому нет оснований отвергать основную гипотезу, выборки имеют нормальное распределение.

Для исключения погрешностей были определены  $G_1$  и  $G_2$ , предполагая, что наибольший  $x_{\text{max}}$  или наименьший  $x_{\text{min}}$  результат измерений вызван грубыми погрешностями:

$$G_1 = \frac{|x_{\text{max}} - \bar{x}|}{S}, G_2 = \frac{|\bar{x} - x_{\text{min}}|}{S}, \quad (3)$$

где  $x_{\text{max}}$  – наибольший результата измерения;  $x_{\text{min}}$  – наименьший результат измерений;  $\bar{x}$  – среднее значение;  $S$  – среднее квадратическое отклонение.

Сравнивались  $G_1$  и  $G_2$  с теоретическим значением  $G_T$  критерия Граббса при выбранном уровне значимости  $q$ . Если  $G_1 > G_T$ , то  $x_{\text{max}}$  исключается как маловероятное значение. Если  $G_2 > G_T$ , то  $x_{\text{min}}$  исключается как маловероятное значение.

Если  $G_1 \leq G_T$ , то  $x_{\text{max}}$  не считается промахом и показатель сохраняется в ряду результатов измерений. Если  $G_2 \leq G_T$ , то  $x_{\text{min}}$  не считается промахом и показатель сохраняется в ряду результатов измерений. В таблице 2 представлены результаты статистической обработки.

После статистической обработки данных был проведен дисперсионный анализ с целью поиска зависимостей в экспериментальных данных. В качестве типа дисперсионного анализа выбран одномерный однофакторный анализ для двух независимых групп данных. В данном случае группы объединены по одному признаку.

В процессе проведения анализа осуществлена проверка нулевой гипотезы о равенстве средних. Поскольку анализируются две группы, применялся двухвыборочный  $t$ -критерий Стьюдента для независимых выборок.

По результатам анализа, если средние значения двух выборок исследуемой величины одинаковы, то оценки факторной и остаточной дисперсий представляют собой несмещенную оценку генеральной дисперсии и различаются несущественно.

Таким образом, сопоставление оценок этих дисперсий по критерию Фишера демонстрирует, что нулевую гипотезу о равенстве факторной и остаточной дисперсий нельзя отклонять. В таблице 3 представлены результаты проверки нулевой гипотезы.

Для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  был определен  $f_{\text{кр}}$  из таблицы распределения Фишера – Снедекора. В связи с тем, что  $f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$ , нулевая гипотеза о существ-

Таблица 2

Table 2

**Погрешность экспериментального исследования  
Experimental error**

Всхожесть, % / Germination, %	Среднее значение, мВ / Average value, mV	Доверительный интервал / Confidence interval		$\varepsilon_{\alpha=0,95}$ , мВ / $\varepsilon_{\alpha=0,95}$ , mV	$\varepsilon$ , %
87 %	-186,99	-190,23	-183,76	-3,23	1,73 %
89 %	-142,05	-144,04	-140,06	-1,99	1,40 %
90 %	-125,92	-128,37	-123,48	-2,45	1,94 %
92 %	-104,94	-107,41	-102,47	-2,47	2,35 %
95 %	-76,41	-77,95	-74,87	-1,54	2,01 %
97 %	-64,17	-65,51	-62,84	-1,33	2,08 %
99 %	-54,97	-56,88	-53,08	-1,89	3,45 %



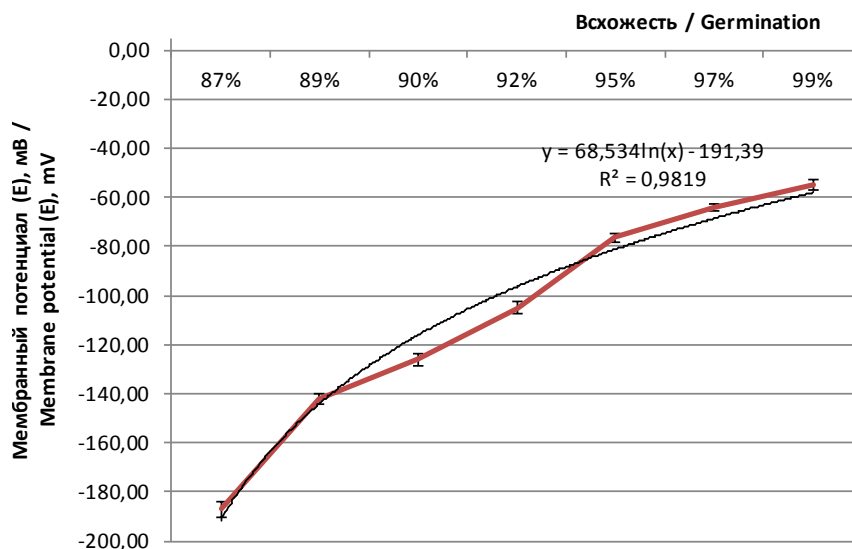
**Результаты проверки нулевой гипотезы**  
**Results of testing the null hypothesis**

Всхожесть, % / Germination, %	Эксперимент № 1. Среднее значение, мВ / Experiment No. 1. The average value, mV	Эксперимент № 2. Среднее значение, мВ / Experiment No. 2. The average value, mV	$f_{\text{набл}} /$ $f_{\text{observable}}$	$f_{\text{кр}} /$ $f_{\text{critical}}$	Комментарий / Comment
87 %	-186,99	-187,2	0,01	3,92	$f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$
89 %	-142,05	-143,53	2,40	3,92	$f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$
90 %	-125,92	-126,49	0,28	3,92	$f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$
92 %	-104,94	-105,20	0,05	3,92	$f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$
95 %	-76,41	-77,29	1,14	3,92	$f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$
97 %	-64,17	-65,63	3,90	3,92	$f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$
99 %	-54,97	-53,4	2,81	3,92	$f_{\text{набл}} < f_{\text{кр}}$

венном влиянии фактора на результаты экспериментов отклоняется (нулевая гипотеза о равенстве групповых средних принимается). Другими словами, средние значения двух групп в целом различаются несущественно.

На рисунке 5 представлены результаты измерения семян пшеницы разной всхожести. Очевидные различия значений наблюдались между семенами с высокой всхожестью и низкой.

Результаты исследований показали, что разность потенциалов между внутренней и внешней оболочкой семян пшеницы зависит от их всхожести, а следовательно, значение может быть использовано в качестве параметра оценки качества. Так, начальное значение потенциала (в нулевой отрезок времени) составило для семян со всхожестью 99 % – 55 мВ, для семян низкой всхожести (87 %) – 187 мВ при усло-



Р и с. 5. Среднее значение потенциала в начальный отрезок времени ( $t = 0$  с) для семян разного процента всхожести.

F i g. 5. Average value of the potential in the initial period of time ( $t = 0$  sec) for seeds of different germination percentages

вии, что температура в период набухания зерен составляла 20 °С.

В процессе экспериментального исследования выявлена оптимальная температура для проведения эксперимента: 20–22 °С.

На основе уравнения ГНК и экспериментальных исследований научно доказано, что проращивание семян пшеницы при температуре 20 °С обеспечивает достоверную всхожесть семян. Полученный результат не противоречит диапазону температур, рекомендованному стандартом [1].

### Обсуждение и заключение

Разработана методология определения всхожести семян пшеницы на основе мембранных потенциалов, которая существенно отличается от известных методик. Разработана экспериментальная установка, способная

обеспечить все необходимые условия для исследований. Определены требования и оптимальные условия проведения экспериментов. На основе экспериментальных исследований установлена зависимость мембранного потенциала семян пшеницы от их всхожести.

Задачи, решенные в данной статье, могут быть использованы для экспресс-оценки качества семян пшеницы на любой технологической стадии (на этапе уборки, хранения, посева).

Планируется проведение практической проверки полученных результатов в сельскохозяйственном производстве. Предполагается продолжить исследования в данном направлении для семян пшеницы разных сортов, имеющих различный химический состав, учитывая влияющие внешние факторы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Bewley J. D., Black M.** Physiology and Biochemistry of Seeds in Relation to Germination // Springer. 1982. Vol. 2. Pp. 3–9. DOI: <http://doi.org/10.1007/978-3-642-68643-6>
2. A Reliable Methodology for Determining Seed Viability by Using Hyperspectral Data from Two Sides of Wheat Seeds / T. Zhang [et al.] // Sensors. 2018. Vol. 18, Issue 3. 813 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/s18030813>
3. **Yang L., Wen B.** Seed Quality. In: Encyclopedia of Applied Plant Sciences. 2<sup>nd</sup> ed. Amsterdam: Elsevier, 2017. Vol. 1. Pp. 553–563. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00205-7>
4. **Colville L.** Seed Storage. In: Encyclopedia of Applied Plant Sciences. 2<sup>nd</sup> ed. Amsterdam: Elsevier, 2017. Vol. 1. Pp. 335–339. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00080-0>
5. **Okon E., Etta H. E., Zuba V.** Influence of Furolan-Treated Seeds on Sowing Characteristics of Winter Wheat Cultivars // Russian Agricultural Sciences. 2016. Vol. 42, Issue 1. Pp. 1–4. DOI: <http://doi.org/10.3103/S1068367416010250>
6. Improved Assessment of Viability and Germination of Cattleya (Orchidaceae) Seeds Following Storage / S. T. Hosomi [et al.] // In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant. 2012. Vol. 48. Pp. 127–136. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11627-011-9404-1>
7. **Santos M. A. O., Novembre A. D. L. C., Marcos-Filho J.** Tetrazolium Test to Assess Viability and Vigour of Tomato Seeds // Seed Science and Technology. 2007. Vol. 35, no. 1. Pp. 213–223. DOI: <http://doi.org/10.15258/sst.2007.35.1.19>
8. A Continental-Scale Study of Seed Lifespan in Experimental Storage Examining Seed, Plant, and Environmental Traits Associated with Longevity / D. J. Merritt [et al.] // Biodiversity and Conservation. 2014. Vol. 23, Issue 5. Pp. 1081–1104. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10531-014-0641-6>
9. **Downes K. S.** Plant Germplasm Conservation in Australia: Strategies and Guidelines for Developing, Managing and Utilising Ex Situ Collections // Austral Ecology. 2011. Vol. 36, Issue 7. Pp. 42–43. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2011.02274.x>
10. **Anisur R., Byoung-Kwan Ch.** Assessment of Seed Quality Using Non-Destructive Measurement Techniques: A Review // Seed Science Research. 2016. Vol. 26, Issue 4. Pp. 285–305. DOI: <http://doi.org/10.1017/S0960258516000234>

11. Using Hyperspectral Imaging to Determine Germination of Native Australian Plant Seeds / Sh. R. Turner [et al.] // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 2015. Vol. 145. Pp. 19–24. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jphotoobiol.2015.02.015>
12. Measurement Techniques and Application of Electrical Properties for Nondestructive Quality Evaluation of Foods – A Review / Sh. N. Jha [et al.] // Journal of Food Science and Technology. 2011. Vol. 48, Issue 4. Pp. 387–411. DOI: <http://doi.org/10.1007/s13197-011-0263-x>
13. **Sibaoka T.** Physiology of Rapid Movements in Higher Plants // Annual Review of Plant Physiology. 1969. Vol. 20. Pp. 165–184. URL: <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.pp.20.060169.001121> (дата обращения: 01.06.2019).
14. **Pickard B. G.** Action Potentials in Higher Plants // Botanical Review. 1973. Vol. 39, no. 2. Pp. 172–201. URL: [http://www.jstor.org/stable/4353850?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](http://www.jstor.org/stable/4353850?seq=1#page_scan_tab_contents) (дата обращения: 01.06.2019).
15. **Fromm J., Lautner S.** Electrical Signals and Their Physiological Significance in Plants // Plant Cell Environ. 2007. Vol. 30, Issue 3. Pp. 249–257. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01614.x>
16. **Pyatygin S. S., Opritov V. A., Vodeneev V. A.** Signaling Role of Action Potential in Higher Plants // Russian Journal of Plant Physiology. 2008. Vol. 55, Issue 2. Pp. 285–291. DOI: <http://doi.org/10.1134/S1021443708020179>
17. **Egli D. B.** Species Differences in Seed Growth Characteristics // Field Crops Research. 1981. Vol. 4. Pp. 1–12. DOI: [http://doi.org/10.1016/0378-4290\(81\)90049-6](http://doi.org/10.1016/0378-4290(81)90049-6)
18. **Baskin C. C., Baskin J. M.** Seeds: Ecology, Biogeography and Evolution of Dormancy and Germination. Elsevier, 2001. 666 p. URL: [http://books.google.ru/books/about/Seeds.html?id=uGJL\\_Ys6wlQC&redir\\_esc=y](http://books.google.ru/books/about/Seeds.html?id=uGJL_Ys6wlQC&redir_esc=y) (дата обращения: 01.06.2019).
19. **Baranowski P., Mazurek W., Pastuszka-Wozniak J.** Supervised Classification of Bruised Apples with Respect to the Time after Bruising on the Basis of Hyperspectral Imaging Data // Postharvest Biology and Technology. 2013. Vol. 86. Pp. 249–258. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.07.005>
20. **Kamruzzaman M., ElMasry G., Sun D.-W., Allen P.** Non-Destructive Assessment of Instrumental and Sensory Tenderness of Lamb Meat Using NIR Hyperspectral Imaging // Food Chemistry. 2013. Vol. 141, Issue 1. Pp. 389–396. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.094>
21. **Liu D., Sun D.-W., Zeng X.-A.** Recent Advances in Wavelength Selection Techniques for Hyperspectral Image Processing in the Food Industry // Food and Bioprocess Technology. 2014. Vol. 7, Issue 2. Pp. 307–323. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11947-013-1193-6>
22. **Chen P., Sun Z.** A Review of Non-Destructive Methods for Quality Evaluation and Sorting of Agricultural Products // Journal of Agricultural Engineering Research. 1991. Vol. 49. Pp. 85–98. DOI: [http://doi.org/10.1016/0021-8634\(91\)80030-I](http://doi.org/10.1016/0021-8634(91)80030-I)
23. **Воденеев В. А., Катичева Л. А., Сухов В. С.** Электрические сигналы у высших растений: механизмы генерации и распространения // Биофизика. 2016. Том 61. С. 598–606. URL: <https://www.eposlink.com/ru/catalog/library/elibrary/book/biofizika-2260/publication/113936/> (дата обращения: 01.06.2019).
24. **Пятыгин С. С., Оприлов В. А., Воденеев В. А.** Сигнальная роль потенциала действия у высших растений // Физиология растений. 2008. Т. 55, № 2. С. 312–319. URL: <http://www.rusplant.ru/index.php?page=Posts.ListPost&number=2&year=2008&cat=4&PHPSESSID=lcowsvifjo> (дата обращения: 01.06.2019).

*Поступила 25.02.2019; принята к публикации 02.04.2019; опубликована онлайн 30.09.2019*

*Об авторах:*

**Барышева Надежда Николаевна**, доцент кафедры информационных систем в экономике, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (656038, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, пр-т. Ленина, д. 46), кандидат технических наук, ResearcherID: C-9650-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1338-9740>, mnn-t@mail.ru

**Пронин Сергей Петрович**, заведующий кафедрой информационных технологий, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (656038, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, пр-т. Ленина, д. 46), профессор, доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0202-9232>, [sppronin@mail.ru](mailto:sppronin@mail.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

Н. Н. Барышева – обзор и анализ литературы, разработка методики, формулировка выводов, проведение экспериментов, подготовка первоначального варианта рукописи; С. П. Пронин – проведение теоретических исследований, формулирование основной концепции исследования, доработка текста.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Bewley J.D., Black M. Physiology and Biochemistry of Seeds in Relation to Germination. *Springer*. 1982; 2:3-9. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1007/978-3-642-68643-6>
2. Zhang T., Wei W., Zhao B., et al. A Reliable Methodology for Determining Seed Viability by Using Hyperspectral Data from Two Sides of Wheat Seeds. *Sensors*. 2018; 18(3):813. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.3390/s18030813>
3. Yang L., Wen B. Seed Quality. In: Encyclopedia of Applied Plant Sciences. 2<sup>nd</sup> ed. Vol 1. Amsterdam: Elsevier; 2017. p. 553-563. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00205-7>
4. Colville L. Seed Storage. In: Encyclopedia of Applied Plant Sciences. 2<sup>nd</sup> ed. Vol 1. Amsterdam: Elsevier; 2017. p. 335-339. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00080-0>
5. Okon E., Etta H.E., Zuba V. Influence of Furoalan-Treated Seeds on Sowing Characteristics of Winter Wheat Cultivars. *Russian Agricultural Sciences*. 2016; 42(1):1-4. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.3103/S1068367416010250>
6. Hosomi S.T., Custodio C.C., Seaton P.T., et al. Improved Assessment of Viability and Germination of Cattleya (Orchidaceae) Seeds Following Storage. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*. 2012; 48:127-136. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1007/s11627-011-9404-1>
7. Santos M.A.O., Novembre A.D.L.C., Marcos-Filho J. Tetrazolium Test to Assess Viability and Vigour of Tomato Seeds. *Seed Science and Technology*. 2007; 35(1):213-223. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.15258/sst.2007.35.1.19>
8. Merritt D.J., Martyn A.J., Ainsley P., et al. A Continental-Scale Study of Seed Lifespan in Experimental Storage Examining Seed, Plant, and Environmental Traits Associated with Longevity. *Biodiversity and Conservation*. 2014; 23(5):1081-1104. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1007/s10531-014-0641-6>
9. Downes K.S. Plant Germplasm Conservation in Australia: Strategies and Guidelines for Developing, Managing and Utilizing Ex Situ Collections. *Austral Ecology*. 2011; 36(7):42-43. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2011.02274.x>
10. Anisur R., Byoung-Kwan Ch. Assessment of Seed Quality Using Non-Destructive Measurement Techniques: A Review. *Seed Science Research*. 2016; 26(4):285-305. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1017/S0960258516000234>
11. Turner Sh.R., Nansen Ch., Zhao G., et al. Using Hyperspectral Imaging to Determine Germination of Native Australian Plant Seeds. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2015; 145:19-24. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2015.02.015>
12. Jha Sh.N., Narsaiah K., Basediya A.L., et al. Measurement Techniques and Application of Electrical Properties for Nondestructive Quality Evaluation of Foods – a Review. *Journal of Food Science and Technology*. 2011; 48(4):387-411. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1007/s13197-011-0263-x>

13. Sibaoka T. Physiology of Rapid Movements in Higher Plants. *Annual Review of Plant Physiology*. 1969; 20:165-184. Available at: <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.pp.20.060169.001121> (accessed 01.06.2019). (In Eng.)
14. Pickard B.G. Action Potentials in Higher Plants. *Botanical Review*. 1973; 39(2):172-201. Available at: [http://www.jstor.org/stable/4353850?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](http://www.jstor.org/stable/4353850?seq=1#page_scan_tab_contents) (accessed 01.06.2019). (In Eng.)
15. Fromm J., Lautner S. Electrical Signals and Their Physiological Significance in Plants. *Plant Cell Environ*. 2007; 30(3):249-257. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01614.x>
16. Pyatygin S.S., Opritov V.A., Vodeneev V.A. Signaling Role of Action Potential in Higher Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2008; 55(2):285-291. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1134/S1021443708020179>
17. Egli D.B. Species Differences in Seed Growth Characteristics. *Field Crops Research*. 1981; 4:1-12. (In Eng.) DOI: [http://doi.org/10.1016/0378-4290\(81\)90049-6](http://doi.org/10.1016/0378-4290(81)90049-6)
18. Baskin C.C., Baskin J.M. Seeds: Ecology, Biogeography and Evolution of Dormancy and Germination. Amsterdam: Elsevier; 2001. 666 p. Available at: [http://books.google.ru/books/about/Seeds.html?id=uGJL\\_Ys6wIQC&redir\\_esc=y](http://books.google.ru/books/about/Seeds.html?id=uGJL_Ys6wIQC&redir_esc=y) (accessed 01.06.2019). (In Eng.)
19. Baranowski P., Mazurek W., Pastuszka-Wozniak J. Supervised Classification of Bruised Apples with Respect to the Time after Bruising on the Basis of Hyperspectral Imaging Data. *Postharvest Biology and Technology*. 2013; 86:249-258. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.07.005>
20. Kamruzzaman M., ElMasry G., Sun D.-W., Allen P. Non-Destructive Assessment of Instrumental and Sensory Tenderness of Lamb Meat Using Nir Hyperspectral Imaging. *Food Chemistry*. 2013; 141(1):389-396. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.094>
21. Liu D., Sun D.-W., Zeng X.-A. Recent Advances in Wavelength Selection Techniques for Hyperspectral Image Processing in the Food Industry. *Food and Bioprocess Technology*. 2014; 7(2):307-323. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1007/s11947-013-1193-6>
22. Chen P., Sun Z. A Review of Non-Destructive Methods for Quality Evaluation and Sorting of Agricultural Products. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1991; 49:85-98. (In Eng.) DOI: [http://doi.org/10.1016/0021-8634\(91\)80030-I](http://doi.org/10.1016/0021-8634(91)80030-I)
23. Vodenev V.A., Katicheva L.A., Sukhov V.C. Electrical Signals in Higher Plants: The Mechanisms of Generation and Propagation. *Biofizika = Biophysics*. 2016; (61):598-606. Available at: <https://www.eposlink.com/ru/catalog/library/elibrary/book/biofizika-2260/publication/113936/> (accessed 01.06.2019). (In Russ.)
24. Pyatygin S.S., Opritov V.A., Vodeneev V.A. Signaling Role of Action Potential in Higher Plants. *Fiziologiya rasteniy = Plant Physiology*. 2008; 55(2):312-319. Available at: <http://www.rusplant.ru/index.php?page=Posts.ListPost&number=2&year=2008&cat=4&PHPSESSID=lcowrsvifjo> (accessed 01.06.2019). (In Russ.)

*Received 25.02.2019; revised 02.04.2019; published online 30.09.2019*

*About authors:*

**Nadezhda N. Barysheva**, Associate Professor of Chair of Information Systems in Economy, Polzunov Altai State Technical University (46 Lenina, Barnaul 656038, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: C-9650-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1338-9740>, [mnn-t@mail.ru](mailto:mnn-t@mail.ru)

**Sergey P. Pronin**, Head of Chair of Information Technology, Polzunov Altai State Technical University, (46 Lenina, Barnaul 656038, Russia), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0202-9232>, [sppronin@mail.ru](mailto:sppronin@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

N. N. Barysheva – reviewing and analyzing the literature, development of method, formulation of conclusions, experiments, writing the draft; S. P. Pronin – conducting theoretical research, formulation of the basic research concepts, final editing.

*All authors have read and approved the final manuscript.*