



Приборное и методологическое обеспечение диагностики потребности растений в элементах питания

И. И. Гуреев

Курский ФАНЦ (г. Курск, Российская Федерация)

✉ gureev06@mail.ru

Аннотация

Введение. Минеральные удобрения, без которых невозможны интенсивные технологии производства сельскохозяйственных культур, являются дорогостоящим и экологически небезопасным ресурсом, загрязняющим почву и продукты земледелия при избыточном внесении. Поэтому использовать удобрения необходимо исходя из диагностических данных потребности растений. Цель исследования – приборное и методологическое обеспечение современной функциональной диагностики потребности растений в элементах питания, ориентированной на активизацию процесса фотосинтеза.

Материалы и методы. Предложено в процессе диагностики многочисленные промежуточные пластиковые пробирки со смесью постоянных компонентов (хлористого натрия, суспензии хлоропластов и краски Тильманса) вариантов диагностического раствора заменить эластичной единой светозащитной емкостью. Однородная смесь в единой емкости исключает ошибку концентрации компонентов раствора, сопутствующую многоазовому формированию смесей в промежуточных пробирках. Это позволило уменьшить количество однотипных операций заполнения пипеточными дозаторами промежуточных пробирок, повторяющихся для каждой смеси элементов. Исследования выполнены в 2021–2022 гг. с использованием механических пипеточных дозаторов «Ленпипет» Thermo Fisher Scientific (Финляндия) – 10 мкл, «Ленпипет Колор» – 100 мкл и «Ленпипет Колор» – 200 мкл. Погрешность их определяли на электронных весах ВК-600.

Результаты исследования. С применением инновации возросла достоверность диагностических данных вследствие уменьшения ошибки концентрации компонентов в растворе смеси в среднем на 8,6 %. Кроме того, снизились затраты времени на выполнение диагностики в 1,7 раза, что в условиях ограниченного времени жизни хлоропластов благоприятно сказалось на получении достоверных данных.

Обсуждение и заключение. Достоверные данные диагностики потребности растений в элементах питания позволят экономить удобрительные ресурсы, а также повысить качество производимой сельскохозяйственной продукции, не загрязненной избыточными элементами питания.

Ключевые слова: функциональная диагностика, достоверность, элементы питания, хлоропласты, фотохимическая активность, оптимизационная программа

Финансирование: исследование выполнено на базе ФГБНУ «Курский ФАНЦ» в рамках государственного задания № FGZU-2022-0005.



Благодарности: автор выражает признательность анонимным рецензентам, объективные замечания которых способствовали повышению качества статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гуреев И. И. Приборное и методологическое обеспечение диагностики потребности растений в элементах питания // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 4. С. 504–519. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.504-519>

Original article

Instrumental and Methodological Support for the Diagnostics of Nutritional Requirements of Plants

I. I. Gureev

*Federal Agricultural Kursk Research Center
(Kursk, Russian Federation)*

✉ gureev06@mail.ru

Abstract

Introduction. Mineral fertilizers essential for intensive crop production technologies are an expensive and environmentally unsafe resource polluting the soil and agricultural products when applied in excess. The purpose of the research is instrumental and methodological support for modern functional diagnostics of nutritional requirements of plants, which is aimed at activating the photosynthesis process.

Materials and Methods. It is proposed, for identifying nutritional requirements of plants to replace numerous intermediate plastic test tubes with a mixture of permanent components (sodium chloride, chloroplast suspension and Tillmans' paint) for the diagnostic solution variants by a separate elastic light-protective container. A homogeneous mixture in a separate container eliminates the error in the concentration of solution components, which accompanies the repeated formation of mixtures in intermediate test tubes. This made it possible to reduce a number of repeated operations of filling intermediate test tubes with pipette dispensers for each tested mixture of elements. The studies were carried out in 2021–2022 using mechanical pipette dispensers Lenpipet Thermo Fisher Scientific (Finland) – 10 ml, Lenpipet Color – 100 μ l and Lenpipet Color – 200 μ l. Their error was determined on a VK-600 electronic balance.

Results. The use of innovation increased the reliability of diagnostic data due to a 8.6% average reduction of error in the concentration of components in the mixture solution. In addition, the time spent on performing diagnostics decreased by 1.7 times that, under the conditions of a limited lifetime of chloroplasts, had a favorable effect on obtaining reliable data.

Discussion and Conclusion. Reliable diagnostic data on nutritional requirements of plants will save fertilizer resources and improve the quality of agricultural production free from excessive nutrients.

Keywords: functional diagnostics, reliability, batteries, chloroplasts, photochemical activity, optimization program

Funding: The study was conducted at the Federal Agricultural Kursk Research Center under State Assignment No. FGZU-2022-0005.

Acknowledgements: The author expresses his gratitude to the anonymous reviewers whose objective comments contributed to the quality of the article.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

For citation: Gureev I.I. Instrumental and Methodological Support for the Diagnostics of Nutritional Requirements of Plants. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(4):504–519. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.504-519>

Введение

Урожай культур во многом зависит от продуктивности фитоценоза, который является не только биологической категорией, но и агрономической. В процессе вегетации культур фотосинтезом создается примерно 95 % массы сухого органического вещества урожая. Элементы же минерального питания составляют лишь около 5 % сухой массы. Но они являются средством формирования фотосинтетического аппарата, а также его адаптации к вариабельному радиационному режиму и повышают КПД активной фотосинтетической радиации (ФАР).

Потребность растений в элементах минерального питания удовлетворяют удобрениями – неотъемлемым компонентом современных интенсивных технологий производства сельскохозяйственных культур [1]. С применением удобрений урожайность в XX веке возросла более чем на 50 % [2]. Без удобрений интенсивные технологии абсолютно не конкурентоспособны.

Но удобрения – дорогостоящий и экологически небезопасный ресурс, загрязняющий почву и продукты земледелия при избыточном внесении. Дефицит удобрений, так же как и избыток, негативно сказывается на урожайности и качестве растениеводческой продукции. Весьма существенны экономические предпосылки оптимизации питания культур, так как примерно треть от всех затрат на производство продукции земледелия приходится на минеральные удобрения. Наиболее рациональное их использование возможно при научно обоснованном учете биологических особенностей возделываемых

культур и вариабельных почвенно-климатических условий [3].

Поэтому использование удобрений в адаптивном режиме сопряжено с необходимостью систематической диагностики потребности растений в широкой номенклатуре элементов минерального питания¹ [4].

Цель исследований – приборное и методологическое обеспечение современной функциональной диагностики потребности растений в элементах питания.

Обзор литературы

В земледелии систематически в течение длительного времени использовались преимущественно удобрения с макроэлементами питания (NPK). Однако, согласно закону ограничивающего фактора Ю. Либиха, для растений наиболее значим тот элемент питания, который более всего отклоняется от оптимального значения, то есть для продуктивного развития растений одинаково значимы как макро- (NPK), так и микроэлементы (медь, железо, марганец, бор, молибден, кобальт и др.).

Потребность растений в макроэлементах намного больше, чем потребность в микроэлементах. В то же время нехватка даже малого количества микроудобрений может явиться причиной заболевания растений и существенного снижения продуктивности вплоть до гибели.

Основным поставщиком микроэлементов для сельскохозяйственной отрасли являлись их запасы в почве, которые постепенно истощались. Например, в Белгородской области доля пашни с низким содержанием подвижных соединений

¹ Хорошкин А. Б. Способы повышения эффективности минерального питания сельскохозяйственных культур. Краснодар : Агромастер, 2010. 67 с.

цинка возросла до 90,3 %. Для кобальта и марганца данный показатель составил 99,3 и 38,6 % соответственно [5]. Аналогичное состояние с обеспеченностью пашни и другими микроэлементами питания. Таким образом, в условиях интенсификации земледелия актуальность научно обоснованного совместного применения макро- и микроудобрений резко возросла [6].

Сбалансированное использование макро- и микроудобрений обладает синергическими свойствами, так как не только повышает урожайность и качество производимых культур, но и способствует росту эффективности NPK [1; 7; 8]. Установлено позитивное использование микроудобрений в качестве средства против фитопатогенных грибов и бактерий [9; 10].

Практическое применение микроудобрений имеет некоторые особенности. Их крайне не целесообразно автономно заделывать в почву, так как 20–80 % действующего вещества малых доз связывается почвенно-поглощающим комплексом в недоступную растениям форму [10; 11]. Поэтому распространено предпосевное нанесение микроудобрений непосредственно на семена, увеличивающее жизнеспособность проростков, а также листовые подкормки [12]. Листья хорошо поглощают растворенные в воде малые дозы препаратов, и усвояемость микроудобрений может достигать 90 %.

Лучшие агротехнические результаты получены от использования хелатных форм микроудобрений [13]. В отличие от неорганических соединений хелаты в растворах не распадаются на агрессивные ионы и не разрушают структуры действующего вещества пестицидов. Вследствие чего возможно совмещение листовых подкормок микроудобрениями в баковых смесях с пестицидами.

Макроэлементы питания вносят в почву по результатам почвенной

диагностики, используя преимущественно балансовый метод. Последующую же корректировку и оптимизацию питания растений проводят с учетом листовой диагностики. Дефицит элементов по ее результатам устраняют в вегетационный период корневыми и листовыми подкормками, необходимыми для формирования урожая культур высокого качества [14–16].

Листовая диагностика может быть визуальной, химической и функциональной. Визуальная диагностика базируется на анализе потребности растений в элементах питания вследствие изменения цвета листьев, коэффициента отражения света и др. [17; 18]. Но внешние визуальные признаки нарушения питания отражают уже необратимые и не поддающиеся корректировке процессы в растениях, ведущие к снижению урожайности и качества сельскохозяйственной продукции. Кроме того, симптомы проявляются на листьях растений для групп элементов, в которых сложно идентифицировать дефицитный элемент.

При химической диагностике лабораторным анализом оценивают состав тканей растений, но не учитывают изменяющуюся их реакцию на переменные почвенно-погодные условия. В определенные фазы вегетации требуются различные номенклатура и количество элементов питания, что обуславливает необходимость их управляемого поступления в течение всего периода жизнедеятельности растительного организма.

Перспективен метод функциональной листовой диагностики, ориентированный на активизацию процесса продуцирования урожая – фотосинтеза [19; 20]. Учитывая, что удобрения действуют не только на растения, но и на микроорганизмы почвы, оказывающие значимое влияние на развитие растений, результат биохимических

процессов в растениях и почве можно оценить лишь по реакции живых растений конкретных культур на присутствие удобрений [21; 22].

Метод функциональной диагностики отражает свойство хлоропластов растений изменять фотохимическую активность пропорционально их потребности в элементах питания [23]. Но ему присущи серьезные недостатки. Диагностирование каждого из элементов питания проводят обособленно от других компонентов питательной среды. Поэтому невозможно оценить их взаимное влияние и, соответственно, оптимальное соотношение, соблюдение которого оказывает определяющее действие на продуктивность растений и качество урожая. Дефицит или избыток каких-то элементов может нарушить усвоение растениями других элементов, что негативно сказывается на урожайности культур и состоянии почвы [2; 24].

Более того, актуальность учета синергетических последствий дополнительно возрастает при вынужденном ограничении использования элементов питания по экологическим причинам. Так, с 2021 года в Германии вступили в силу правила внесения удобрений, согласно которым в районах чувствительных к нитратам, ограничивают использование азота вопреки потребности растений [25]. Экологические ограничения на использование удобрений, очевидно, будут применяться и другими странами, в том числе и РФ.

Поэтому предложено реализовывать неограниченный резерв экономного расходования удобрительных ресурсов за счет синергии взаимодействия между элементами питания при сбалансированном их внесении. Такой подход предполагает оценку фотохимической

активности хлоропластов растений на присутствие в питательной среде не единичных элементов питания, а различных их неповторяющихся смесей. Варианты смесей заведомо подбирают в соответствии с матрицей планирования эксперимента, ориентированной на построение модели с последующей оптимизацией питательной среды цифровыми методами [26].

Характер изменения фотохимической активности исследуется посредством прибора «Аквадонис», способного в стационарных и полевых условиях оценивать потребность растений в макро- и микроэлементах для проведения корневых или листовых подкормок любых сельскохозяйственных культур². Основой прибора является фотометр (рис. 1).



Р и с. 1. Прибор «Аквадонис» для диагностики потребности растений в элементах питания
F i g. 1. The device Aquadonics for diagnosing nutritional requirements of plants

² Гуреев И. И., Нитченко Л. Б., Прущик И. А. Углубленная адаптация технологий производства зерновых культур в Центрально-Черноземном регионе. Курск : ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр», 2021. 238 с.



Прибор прошел производственную проверку на сельскохозяйственных культурах Центрально-Черноземной машиноиспытательной станции, а также в 10 регионах России, Украине, Белоруссии и Казахстане. В трехлетних опытах установлено, что использование синергии взаимодействия между элементами питания позволило за счет роста урожайности и минимизации расхода удобрений повысить эффективность производства ячменя до 40 %, а озимой пшеницы до 16,4 % [27; 28].

Возможности прибора позволяют в автоматическом режиме оптимизировать обеспеченность растений элементами питания и наглядно демонстрировать уровень потребности по каждому из них.

Количественное значение фотохимической активности хлоропластов получают после засветки на фотометре раствора их суспензии в совокупности со смесями элементов питания. Для поддержания необходимых свойств выделенная суспензия хлоропластов в неизменной концентрации используется при анализах совместно с другими постоянными компонентами раствора: хлористым натрием и краской Тильманса. С фотометра считывают данные фотохимической активности хлоропластов, формализуют модель взаимосвязанного факторного пространства и оптимизируют питательную среду [29]. Избыточные элементы питания в питательной среде посредством математической обработки модели нейтрализуют коррекцией величины дефицитных элементов. Выявленный дефицит питания покрывают листовыми подкормками, компоненты которых устанавливают соотношением стандартных удобрений [24].

По известному способу диагностики каждый из вариантов различных смесей элементов питания готовится индивидуально в промежуточных

пластиковых пробирках совместно с постоянными компонентами раствора. Образцы растворов из промежуточных пробирок поочередно отбирают в кварцевую пробирку, способную пропускать ультрафиолетовое излучение, и засвечивают на фотометре. Аналогичные действия проводят последовательно со всеми неповторяющимися смесями солей в объеме диагностики [23].

Однако одним из факторов достоверности результатов функциональной диагностики является минимизация ошибки опыта. Этому способствуют одинаковые исходные условия для всех обследуемых вариантов, где постоянные компоненты раствора в кварцевой пробирке перед засветкой должны иметь однородную оптическую плотность, что достигается неизменной их концентрацией в растворе.

Но многократный отбор постоянных компонентов в каждую из промежуточных пробирок производится индивидуально пипеточными дозаторами. Они обладают собственными погрешностями, которые увеличивают вариацию исходной оптической плотности растворов в кварцевой пробирке за опыт. В результате возрастает ошибка и понижается достоверность диагностики.

Немаловажно, что фотохимическая активность живых хлоропластов после отбора проб листьев для анализа нестабильна. Она постепенно угасает до нуля в течение примерно 40 минут. Поэтому в меню фотометра предусмотрено 8 контрольных точек, размещенных с одинаковым шагом по времени выполнения диагностики, относительно которых автоматически корректируются данные по ходу анализа. Для повышения достоверности диагностических данных необходимо стремиться ускорить процесс исполнения диагностики, что достигается обоснованным сокращением количества необходимых операций в ее процедуре.

Материалы и методы

Исследования выполнены в 2021 и 2022 гг. в лаборатории севооборотов и адаптивных агротехнологий ФГБНУ «Курский ФАНЦ». Для достижения цели исследований предложен инновационный способ, исключающий необходимость в многочисленных промежуточных пробирках с операциями их заполнения (рис. 2а) [30].

Существенное отличие нового способа состоит в создании однородной концентрации раствора постоянных компонентов в эластичной светозащитной емкости, единой на всю разовую программу испытаний. В качестве светозащитной емкости используется эластичная промывалка, помещенная в светонепроницаемый мешок (рис. 2б). Из нее удобно заполнять раствором постоянных компонентов кварцевые

пробирки, индивидуальные для каждой испытываемой смеси элементов питания. Однородная смесь в единой емкости исключает ошибку концентрации компонентов, сопутствующую многофазовому формированию этой смеси в промежуточных пробирках.

Процедура диагностики по инновационному способу сводится к внесению пипеточным дозатором в кварцевую пробирку лишь неповторяющихся смесей элементов питания. Затем эти же пробирки из светозащитной емкости поочередно заполняют предварительно подготовленным однородным по содержанию постоянных компонентов раствором и засвечивают на фотометре. Для контрольных замеров кварцевую пробирку перед засветкой заполняют раствором из светозащитной емкости без добавления смеси элементов питания.



а)



б)

Р и с. 2. Операции заполнения промежуточных пробирок (а) заменены на заправку единой светозащитной емкости (б), из которой заполняется кварцевая пробирка

F i g. 2. The process of filling intermediate test tubes (a) are replaced by filling a separate light-protective container (b), from which a quartz test tube is filled

Последовательность выполнения анализа по инновационному способу следующая.

В эластичной светозащитной емкости предварительно готовят раствор постоянных компонентов: смеси хлористого натрия 0,2 %, краски Тильманса 1 % и суспензии хлоропластов 2 % (объем должен быть не менее потребности разовой программы испытаний).

В кварцевую пробирку пипеточным дозатором вносят 100 мкл раствора неповторяющейся смеси элементов питания. Затем однородным раствором постоянных компонентов из светозащитной емкости объем раствора в кварцевой пробирке доводят до 7 мл и засвечивают на фотометре.

При выполнении одного анализа кварцевую пробирку засвечивают на фотометре 24 раза: 16 засветок с испытываемыми неповторяющимися смесями элементов питания и 8 контрольных замеров, где смеси элементов питания не используют. Суммарный объем пробирок, заполняемых из светозащитной емкости, не менее $7(16 + 8) = 168$ мл.

Показания фотометра отражают фотохимическую активность хлоропластов и являются исходными для диагностики потребности растений в элементах питания.

Результаты исследования

Диагностические действия содержат 5 последовательно выполняемых этапов [24] (рис. 3).

Для известного и инновационного способов диагностики этапы 1–3 и 5 идентичны. Различия заключаются лишь в этапе 4, ориентированном на использовании прибора «Аквадонис».

В процессе реализации данного этапа вариабельность концентрации компонентов в промежуточных пробирках по известному способу оценивали величиной ошибки, с которой компоненты дозируются пипеточными дозаторами. В промежуточных пробирках готовили растворы для засветки на фотометре с целью определения фотохимической активности хлоропластов, для чего в них посредством пипеточных дозаторов вливали растворы:

– 10 мл (10 г) хлористого натрия 0,2-процентной концентрации,



Р и с. 3. Последовательность выполнения функциональной диагностики

F i g. 3. The sequence of performing functional diagnostics

- 100 мкл (0,1 г) краски Тильманса,
- 100 мкл (0,1 г) неповторяющейся смеси солей элементов питания,
- 200 мкл (0,2 г) приготовленной суспензии хлоропластов.

Полученной в каждой из промежуточных пробирок смесью наполняли кварцевую пробирку, которую засвечивали на фотометре с последующим определением значений фотохимической активности хлоропластов.

Причина высокой вариабельности исходной оптической плотности растворов, поступающих в кварцевую пробирку, заключается в накапливающейся ошибке при их разливе по промежуточным пробиркам компонентов. Обусловлена она разнящимся объемом растворов постоянных компонентов вследствие суммарной погрешности дозаторов при заполнении промежуточных пробирок.

Для определения ошибки дозирования произведено тестирование используемых пипеточных дозаторов. Объем однородной жидкости (1 мл) эквивалентен ее весу (1 г). Учитывая, что имеющимся приборным оборудованием малые объемы через вес идентифицируются более точно, вариабельность компонентов раствора оценивали соотношением их весов.

Для тестирования использовали электронные весы ВК-600, у которых при взвешивании в диапазоне 0,5–600 г дискретность отсчета составляет 0,01 г³. Хлористый натрий по 10 мл (10 г) дозировали механическим пипеточным дозатором «Ленпипет» Thermo Fisher Scientific (Финляндия). Для дозировки раствора краски Тильманса и неповторяющихся смесей солей испытываемых элементов питания применяли дозатор «Ленпипет Колор» – 100 мкл (0,1 г). Суспензию

хлоропластов дозировали прибором «Ленпипет Колор» – 200 мкл (0,2 г).

Результаты тестирования дозаторов представлены в таблице 1.

Нижний рабочий диапазон весов ВК-600 составляет 0,5 г, что превышает вес доз 0,1 г (100 мкл) и 0,2 г (200 мкл) приборов «Ленпипет Колор». Чтобы уложиться в рабочий диапазон ВК-600, малые дозируемые веса дополняли выверенным балластным весом G произвольной, но постоянной величины. Вес G превышает нижний предел рабочего диапазона взвешивания (в данном случае $G = 10 > 0,5$ г). После замера суммы весов балластный вес G вычитали.

Например, дозу тестируемого дозатора «Ленпипет Колор» 100 разгружали на платформу ВК-600 в дополнении к весу G . Первое показание весов составило $G + 0,1$ г. При этом величину разгруженной дозы определяли разностью $(G + 0,1) - G = 0,1$ г. Затем балластный вес с первой дозой дополняли второй дозой, величину которой определяли разностью $(G + 0,1 + 0,09) - (G + 0,1) = 0,09$ г и т. д. Компоненты раствора, засвечиваемого на фотометре, распределяются по промежуточным пробиркам пипеточными дозаторами с ошибкой Δ :

$$\Delta = 100 \frac{\sigma}{\bar{x}}, \% \quad (1)$$

где \bar{x} , σ – соответственно среднее арифметическое значение и среднеквадратическое отклонение веса доз компонентов при формировании смеси в растворе, г. Пропорционально весу компонентов изменяется их концентрация в растворе. При выборке доз n показатели x , σ определяли по формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \text{ г,}$$

³ URL: <https://www.medcomp.ru/catalog/product/vesy-laboratornye-massa-k-vk-600/> (дата обращения: 20.07.2022).

Тестирование стандартных пипеточных дозаторов

Testing standard pipettes

Компоненты раствора / Solution components	Хлористый натрий 0,2-процентной концентрации / Sodium chloride 0.2 per cent concentration	Краска Тильманса 1-процентной концентрации, смесь солей испытываемых элементов питания / 1 per cent Tillmans paint, a mixture of salts of the tested nutrients	Суспензия хлоропластов 2-процентной концентрации / 2 per cent suspension of chloroplasts	
Нормируемая доза раствора, г / Normalized dose of solution, g	10	0,1	0,2	
Марка дозатора / Dispenser brand	«Ленпипет» Thermo Fisher Scientific, 10 мл / Lenpipet Thermo Fisher Scientific, 10 ml	«Ленпипет Колор», 100 мкл / Lenpipet Color, 100 µl	«Ленпипет Колор», 200 мкл / Lenpipet Color, 200 µl	
1	9,97	0,10	0,20	
2	9,93	0,09	0,20	
3	9,87	0,09	0,21	
4	9,96	0,10	0,20	
5	9,83	0,08	0,18	
6	9,92	0,09	0,20	
7	9,91	0,11	0,19	
8	9,95	0,08	0,21	
9	9,86	0,09	0,19	
Выборка доз, г / Sample of doses, g	10	9,92	0,10	0,19
11	9,98	0,09	0,19	
12	10,06	0,09	0,18	
13	9,98	0,15	0,20	
14	9,98	0,15	0,19	
15	10,04	0,13	0,19	
16	10,04	0,09	0,19	
17	10,05	0,10	0,21	
18	9,99	0,10	0,19	
19	9,98	0,08	0,19	
20	10,05	0,09	0,19	
Среднее арифметическое значение, г / Arithmetic average, g	9,96	0,10	0,19	
Среднеквадратическое отклонение, ±г / Standard deviation, ±g	0,0661	0,0205	0,0089	
Ошибка, % / Error, %	0,7	20,5	4,6	

$$\sigma = \pm\sqrt{s^2}, \text{ г,}$$

где s^2 – дисперсия отклонения концентрации компонентов в смеси от среднего арифметического, г^2 :

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \text{ г}^2.$$

По инновационному способу кварцевая пробирка заполняется раствором из светозащитной емкости, содержащей однородную для всех испытаний концентрацию постоянных компонентов, то есть вариабельность концентрации данного раствора для всех испытаний стремится к нулю.

Анализ таблицы 1 показывает, что рассчитанная по формуле (1) ошибка тестируемых дозаторов возрастает с уменьшением доз и составляет 0,7; 4,6 и 20,5 %.

При формировании известным способом раствора смеси постоянных

компонентов общая ошибка их концентрации определяется косвенным путем по результатам прямых измерений каждого из компонентов. Точность опыта для суммы компонентов в растворе заключена между наибольшими и наименьшими значениями слагаемых. Практически берут среднюю арифметическую величину ошибки, которая для данного случая составляет 8,6 %⁴. Инновационный способ формирования однородной концентрации компонентов раствора предотвращает эту ошибку и тем самым повышает достоверность диагностики [30].

Кроме того, устранение ряда операций процедуры диагностики по новому способу ускоряет ее, что в условиях ограниченного времени жизни хлоропластов благоприятно сказывается на получении достоверных данных. Для сравнительной оценки затрат времени на исполнение диагностики сравниваемыми способами возникла необходимость их хронометража (табл. 2).

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Хронометраж затрат времени на выполнение этапа диагностики с использованием прибора «Аквадонис», мин
Analyzing the time spent on the implementation of the diagnostic stage using the device Aquadonis, min

№	Наименование приема / Name of reception	Повторности / Repetitions					
		Известный способ / Known method			Инновационный способ / Innovative method		
		1	2	3	1	2	3
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Наполнение пластиковых пробирок хлористым натрием 0,2-процентной концентрации (24 шт. по 10 мл). Используется пипеточный дозатор «Ленпипет» Thermo Fisher Scientific, 10 мл / Filling plastic test tubes with 0.2 per cent sodium chloride (24 pcs of 10 ml). It is used the pipette dispenser Lenpipet Thermo Fisher Scientific, 10 ml	5,11	5,07	5,33	0	0	0

⁴ Веденяпин Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. М. : Колос, 1973. 199 с.

Окончание таблицы 2 / End of table 2

1	2	3	4	5	6	7	8
2	Внесение в пластиковые пробирки раствора краски Тильманса 1-процентной концентрации (24 шт. по 0,1 мл). Используется пипеточный дозатор «Ленпипет Колор», 100 мкл / Adding 1 per cent Tillmans paint solution (24 pcs of 0.1 ml) into plastic test tubes. It is used the pipette dispenser Lenpipet Color, 100 μ l	4,25	4,09	3,90	0	0	0
3	Внесение в пластиковые пробирки раствора смеси солей испытываемых элементов питания (16 штук по 0,1 мл). Используется пипеточный дозатор «Ленпипет Колор», 100 мкл / Adding a solution of a mixture of salts of the tested nutrients (16 pcs of 0.1 ml) into plastic test tubes. It is used the pipette dispenser Lenpipet Color, 100 μ l	3,36	3,50	3,17	0	0	0
4	Промывка дистиллированной водой пипеточного дозатора после каждого внесения смеси испытываемых элементов питания (16 раз) / Rinsing the pipette dispenser with distilled water after each addition of the mixture of tested nutrients (16 times)	4,48	4,21	4,36	0	0	0
5	Внесение в пластиковые пробирки суспензии хлоропластов 2-процентной концентрации (16 шт. по 0,2 мл). Используется пипеточный дозатор «Ленпипет Колор», 200 мкл / Adding 2 per cent suspension of chloroplasts (16 pcs of 0.2 ml) into plastic test tubes. It is used the pipette dispenser Lenpipet Color, 200 μ l	5,32	5,46	5,37	0	0	0
6	Перемешивание раствора в каждой из 16 шт. пластиковых пробирок осторожными вращательными движениями / Mixing the solution in each of the 16 plastic test tubes with gentle rotational movements	3,11	3,03	2,84	0	0	0
7	Наполнение раствором кварцевой пробирки из 16 пластиковых пробирок / Filling a quartz test tube with a solution from 16 plastic test tubes	3,25	3,51	3,40	0	0	0
8	Засвечивание кварцевой пробирки на фотометре, 16 шт. / Illuminating a quartz test tube with a photometer, 16 pcs	0,53	0,51	0,50	0,52	0,52	0,53
9	Опорожнение кварцевой пробирки и промывка ее дистиллированной водой, 16 шт. / Emptying the quartz test tube and washing it with distilled water, 16 pcs	0,32	0,31	0,34	0,33	0,30	0,34
10	Формирование в единой светозащитной емкости раствора постоянных компонентов (смеси хлористого натрия 0,2 %, краски Тильманса 1 % и суспензии хлоропластов 2 %) / Forming a solution of permanent components (a mixture of 0.2 per cent sodium chloride, 1 per cent Tillmans paint and 2 per cent suspension of chloroplasts in a separate light-protective container	0	0	0	9,15	9,37	9,18
11	Внесение в кварцевую пробирку раствора смеси солей испытываемых элементов питания (16 шт. по 0,1 мл). Используется пипеточный дозатор «Ленпипет Колор», 100 мкл / Adding a solution of a mixture of salts of the tested nutrients (16 pcs of 0.1 ml) into a quartz test tube. It is used the pipette dispenser Lenpipet Color, 100 μ l	0	0	0	3,06	2,92	2,96
12	Заполнение кварцевой пробирки раствором постоянных компонентов из единой светозащитной емкости, 16 шт. / Filling a quartz tube with a solution of permanent components from a single light-protective container, 16 pcs	0	0	0	4,12	3,94	3,87
Всего / Total:		29,73	29,69	29,21	17,18	17,05	16,88
Среднее / Average:		29,5 \pm 0,29		17,04 \pm 0,15			

По результатам выполненного хронометража затраты времени на исполнение диагностики по известному способу составили 29,5 мин, а с применением инновации они сократились до 17,04 мин.

Обсуждение и заключение

Изложенное приборное и методологическое обеспечение функциональной диагностики потребности растений в элементах питания обеспечивает в среднем снижение на 8,6 % ошибки в получении диагностических данных. Кроме того, в 1,7 раза сокращаются затраты времени и, соответственно, труда на выполнение диагностических процедур вследствие отсутствия необходимости обособленного распределения по промежуточным пробиркам

постоянных компонентов раствора. Это позволяет ускорить обследование отобранных листьев в наиболее активной жизненной фазе хлоропластов и дополнительно способствует минимизации ошибки в испытаниях. Следствием практического использования инновации является более экономное расходование удобрительных ресурсов, а также улучшение качества производимой сельскохозяйственной продукции, не загрязненной избыточными элементами питания. Учитывая, что некоторые из элементов питания являются тяжелыми металлами, точное дозирование их, в соответствии с потребностями растений, обеспечивает экологический эффект в виде щадящего химического воздействия на окружающую среду.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Revisiting Fertilizers and Fertilization Strategies for Improved Nutrient Uptake by Plants / P. S. Bindraban [et al.] // *Biology and Fertility of Soils*. 2015. Vol. 51, Issue 8. P. 897–911. doi: <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1039-7>
2. Krasilnikov P., Taboada M. A., Amanullah. Fertilizer Use, Soil Health and Agricultural Sustainability [Электронный ресурс] // *Agriculture*. 2022. Vol. 12, Issue 4. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture12040462>
3. Gonova O. V., Malygin A. A. Economic and Mathematical Methods and Their Practical Application in Agrochemical Experiment [Электронный ресурс] // *Journal of Agriculture and Environment*. 2021. Vol. 1, Issue 17. doi: <https://doi.org/10.23649/jae.2021.1.17.6>
4. Nanotechnologies for Increasing the Crop Use Efficiency of Fertilizer-Micronutrients / C. M. Monreal [et al.] // *Biology and Fertility of Soils*. 2016. Vol. 52, Issue 3. P. 423–437. doi: <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1073-5>
5. Lukin S. V., Zhuikov D. V. Content and Balance of Trace Elements (CO, MN, ZN) in Agroecosystems of the Central Chernozemic Region Russia [Электронный ресурс] // *Agriculture*. 2022. Vol. 12, Issue 2. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020154>
6. Assessing the Impact of Soil Degradation on Food Production / P. S. Bindraban [et al.] // *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2012. Vol. 4, Issue 5. P. 478–488. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.09.015>
7. Improving Yield and Nitrogen Use Efficiency through Alternative Fertilization Options for Rice in China: A Meta-Analysis / W. Ding [et al.] // *Field Crops Research*. 2018. Vol. 227. P. 11–18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.08.001>
8. Use of a Colloidal Solution of Metal and Metal Oxide-Containing Nanoparticles as Fertilizer Soybean Productivity / L. Batsmanova [et al.] // *Journal of Central European Agriculture*. 2020. Vol. 21, Issue 2. P. 311–319. doi: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/21.2.2414>
9. Plant-Mediated Synthesis of Nanoparticles and Their Antimicrobial Activity against Phytopathogens / J. A. Hernández-Díaz [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021. Vol. 101, Issue 4. P. 1270–1287. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.10767>
10. Ingle A. P., Gupta I. Role of Metal-Based Nanoparticles in Plant Protection // *Nanotechnology in Plant Growth Promotion and Protection: Recent Advances and Impacts*; Ed. by A. P. Ingle. John Wiley & Sons Ltd., 2021. P. 220–238. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119745884.ch11>

11. Feed the Crop Not the Soil: Rethinking Phosphorus Management in the Food Chain / P. J. A. Withers [et al.] // *Environmental Science & Technology*. 2014. Vol. 28, Issue 12. P. 6523–6530. doi: <https://doi.org/10.1021/es501670j>
12. Iodine Bio Fortification of Wheat, Rice and Maize through Fertilizer Strategy / I. Cakmak [et al.] // *Plant and Soil*. 2017. Vol. 418, Issue 1–2. P. 319–335. doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3295-9>
13. Spraying High Concentrations of Chelated Zinc Enhances Zinc Biofortification in Wheat Grain / M. Xu [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021. Vol. 102, Issue 9. P. 3590–3598. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11705>
14. Беляев Н. Н., Дубинкина Е. А. Продуктивность сортов озимой пшеницы в зависимости от применения микроудобрения Аквадон-Микро // *Земледелие*. 2013. № 6. С. 45–47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20446189> (дата обращения: 20.07.2022).
15. Цыганков В. И. Влияние удобрения Акварин 5 на урожайность и качество озимой пшеницы // *Земледелие*. 2007. № 6. С. 21. URL: <http://jurzemledelie.ru/arkhiv-nomerov/6-2007> (дата обращения: 20.07.2022).
16. Лазарев В. И., Золотарева И. А., Шершнева О. М. Способы применения микробиологических препаратов Гуапсин и Трихофит на озимой пшенице // *Земледелие*. 2014. № 2. С. 23–24. URL: <https://clck.ru/32VFav> (дата обращения: 20.07.2022).
17. Sharifi A. Remotely Sensed Vegetation Indices for Crop Nutrition Mapping // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020. Vol. 100, Issue 14. P. 5191–5196. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.10568>
18. Modern Imaging Techniques in Plant Nutrition Analysis: a Review [Электронный ресурс] / D. Li [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105459>
19. Photosynthesis of Winter Effectively Reflected Multiple Physiological Responses under Short-Term Drought-Rewatering Conditions / Q. Mu [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021. Vol. 102, Issue 6. P. 2472–2483. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11587>
20. Effects of Potassium Deficiency on Photosynthesis, Chloroplast Ultrastructure, ROS, and Antioxidant Activities in Maize (*Zea Mays* L.) / Q. Du [et al.] // *Journal of Integrative Agriculture*. 2019. Vol. 18, Issue 2. P. 395–406. doi: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61953-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61953-7)
21. Федотов Г. Н., Шалаев В. С., Батырев Ю. П. Микроорганизмы почв и стимуляторы прорастания семян // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2019. Т. 11, № 1. С. 47–64. doi: <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2019-11-1-47-64>
22. Meta-Analysis Approach to Assess the Effects of Soil Tillage and Fertilization Source under Different Cropping Systems / M. Allam [et al.] // *Agriculture*. 2021. Vol. 11, Issue 9. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture11090823>
23. Способ обеспечения растений минеральными элементами : патент 952168 СССР / Плешков А. С., Ягодин Б. А. № 2970658/30-15 ; заявл. 31.07.1980 ; опубл. 23.08.1982. 4 с.
24. Абдуазимов А. М., Вафоева М. Б. Влияние суспензии различного компонента на биохимический состав листа озимой пшеницы // *Life Sciences and Agriculture*. 2020. Т. 2, № 2. С. 82–85. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43790945> (дата обращения: 20.07.2022).
25. Pahlmeyer C., Kuhn T., Britz W. ‘Fruchtfolge’: a Crop Rotation Decision Support System for Optimizing Cropping Choices with Big Data and Spatially Explicit Modeling [Электронный ресурс] // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105948>
26. Способ диагностики потребности растений в минеральных элементах питания : патент 2541310 Российская Федерация / Гуреев И. И. Опубл. 10.02.2015.
27. Гуреев И. И., Жердев М. Н., Брежнев А. Л. Технологии выращивания ячменя с использованием микроэлементных удобрений и регуляторов роста // *Земледелие*. 2015. № 3. С. 34–36. URL: <https://clck.ru/32VHA3> (дата обращения: 20.07.2022).
28. Гуреев И. И., Жердев М. Н., Брежнев А. Л. Совершенствование агротехнологии выращивания озимой пшеницы с использованием удобрений, содержащих микроэлементы // *Земледелие*. 2016. № 8. С. 25–28. URL: <https://clck.ru/32VHCP> (дата обращения: 20.07.2022).
29. Программа для оптимизации питания растений по данным функциональной листовой диагностики : свидетельство о регистрации программы № 2021617738 / Гуреев И. И. Опубл. 19.05.2021.

30. Способ листовой диагностики потребности растений в минеральных элементах питания : патент 2780843 Российская Федерация / Гуреев И. И. Опубл. 04.10.2022.

Поступила 27.07.2022; одобрена после рецензирования 10.10.2022; принята к публикации 17.10.2022

Об авторе:

Гуреев Иван Иванович, заведующий лабораторией Курского ФАНЦ (305021, Российская Федерация, г. Курск, ул. Карла Маркса, д. 706), доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5995-3322>, gureev06@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Bindraban P.S., Dimkra C., Nagarajan L., et al. Revisiting Fertilizers and Fertilization Strategies for Improved Nutrient Uptake by Plants. *Biology and Fertility of Soils*. 2015;51(8):897–911. doi: <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1039-7>
2. Krasilnikov P., Taboada M.A., Amanullah. Fertilizer Use, Soil Health and Agricultural Sustainability. *Agriculture*. 2022;12(4). doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture12040462>
3. Gonova O.V., Malygin A.A. Economic and Mathematical Methods and Their Practical Application in Agrochemical Experiment. *Journal of Agriculture and Environment*. 2021;1(17). doi: <https://doi.org/10.23649/jae.2021.1.17.6>
4. Monreal C.M., DeRosa M., Mallubhotla S.C., et al. Nanotechnologies for Increasing the Crop Use Efficiency of Fertilizer-Micronutrients. *Biology and Fertility of Soils*. 2016;52(3):423–437. doi: <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1073-5>
5. Lukin S.V., Zhuikov D.V. Content and Balance of Trace Elements (CO, MN, ZN) in Agroecosystems of the Central Chernozemic Region Russia. *Agriculture*. 2022;12(2). doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020154>
6. Bindraban P.S., der Velde M., Ye L., et al. Assessing the Impact of Soil Degradation on Food Production. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2012;4(5):478–488. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.09.015>
7. Ding W., Xu X., He P., et al. Improving Yield and Nitrogen Use Efficiency through Alternative Fertilization Options for Rice in China: A Meta-Analysis. *Field Crops Research*. 2018;227:11–18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.08.001>
8. Batsmanova L., Taran N., Konotop Ye., et al. Use of a Colloidal Solution of Metal and Metal Oxide-Containing Nanoparticles as Fertilizer Soybean Productivity. *Journal of Central European Agriculture*. 2020;21(2):311–319. doi: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/21.2.2414>
9. Hernández-Díaz J.A., Garza-García J.J., Zamudio-Ojeda A., et al. Plant-Mediated Synthesis of Nanoparticles and Their Antimicrobial Activity against Phytopathogens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021;101(4):1270–1287. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.10767>
10. Ingle A.P., Gupta I. Role of Metal-Based Nanoparticles in Plant Protection. In: A.P. Ingle (ed.). *Nanotechnology in Plant Growth Promotion and Protection: Recent Advances and Impacts*. John Wiley & Sons Ltd.; 2021. p. 220–238. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119745884.ch11>
11. Withers P.J.A., Sylvester-Bradley R., Jones D.L., et al. Feed the Crop Not the Soil: Rethinking Phosphorus Management in the Food Chain. *Environmental Science & Technology*. 2014;28(12):6523–6530. doi: <https://doi.org/10.1021/es501670j>
12. Cakmak I., Prom-u-thai C., Guilherme L.R.G., et al. Iodine Bio Fortification of Wheat, Rice and Maize through Fertilizer Strategy. *Plant and Soil*. 2017;418(1–2):319–335. doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3295-9>
13. Xu M., Liu M., Si L., et al. Spraying High Concentrations of Chelated Zinc Enhances Zinc Biofortification in Wheat Grain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021;102(9):3590–3598. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11705>

14. Belyaev N.N., Dubinkina Ye.A. Productivity of Varieties of Winter Wheat Depending on Application of Microfertilizer Akvadon-Mikro. *Zemledelie*. 2013;(6):45–47. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20446189> (accessed 20.07.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
15. Tsygankov V.I. [Effect of Aquarine 5 Fertilizer on Yield and Quality of Winter Wheat]. *Zemledelie*. 2007;(6):21. Available at: <http://jurzemledelie.ru/arkhiv-nomerov/6-2007> (accessed 20.07.2022). (In Russ.)
16. Lazarev V.I., Zolotareva I.A., Shershneva O.M. Methods of Application of Microbiological Guapsin and Trikhofit Preparations on Winter Wheat. *Zemledelie*. 2014;(2):23–24. Available at: <https://clck.ru/32VFav> (accessed 20.07.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
17. Sharifi A. Remotely Sensed Vegetation Indices for Crop Nutrition Mapping. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020;100(14):5191–5196. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.10568>
18. Li D., Li C., Yao Y., et al. Modern Imaging Techniques in Plant Nutrition Analysis: a Review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020;174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105459>
19. Mu Q., Mengqi D., Xu J., et al. Photosynthesis of Winter Effectively Reflected Multiple Physiological Responses under Short-Term Drought-Rewatering Conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021;102(6):2472–2483. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11587>
20. Du Q., Zhao X., Xia L., et al. Effects of Potassium Deficiency on Photosynthesis, Chloroplast Ultrastructure, ROS, and Antioxidant Activities in Maize (*Zea Mays* L.). *Journal of Integrative Agriculture*. 2019;18(2):395–406. doi: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61953-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61953-7)
21. Fedotov G.N., Shalaev V.S., Batyrev Y.P. Soil Microorganisms and Stimulants of Seed Germination. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2019;11(1):47–64. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2019-11-1-47-64>
22. Allam M., Radicetti E., Petroselli V., Mancinelli R. Meta-Analysis Approach to Assess the Effects of Soil Tillage and Fertilization Source under Different Cropping Systems. *Agriculture*. 2021;11(9). doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture11090823>
23. Pleshkov A.S., Yagodin B.A. [The Way of Providing Plants with Mineral Elements]. Patent 952,168 USSR. 1982 August 23. 4 p. (In Russ.)
24. Abduazimov A.M., Vafoeva M.B. Influence of North Root Feeding on the Content of Chlorophyll in the Composition of Winter Wheat Leaves. *Life Sciences and Agriculture*. 2020;2(2):82–85. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43790945> (accessed 20.07.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
25. Pahmeyer C., Kuhn T., Britz W. ‘Fruchtfolge’: a Crop Rotation Decision Support System for Optimizing Cropping Choices with Big Data and Spatially Explicit Modeling. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021;181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105948>
26. Gureev I.I. [A Way to Diagnose the Plants’ Need for Mineral Nutrients]. Patent 2,541,310 Russian Federation. 2015 February 10. (In Russ.)
27. Gureev I.I., Zherdev M.N., Brezhnev A.L. Barley Cultivation Technologies by Application of Micronutrient Fertilizers and Phytihormones. *Zemledelie*. 2015;(3):34–36. Available at: <https://clck.ru/32VHA3> (accessed 20.07.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
28. Gureev I.I., Zherdev M.N., Brezhnev A.L. Improvement of Agrotechologies of Winter Wheat Cultivation with the Use of Fertilizers, Containing Minor-Nutrient Elements. *Zemledelie*. 2016;(8):25–28. Available at: <https://clck.ru/32VHCP> (accessed 20.07.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
29. Gureev I.I. [Program for Optimizing Plant Nutrition Based on Functional Leaf Diagnostics Data]. Registration Certificate No. 2021617738. 2021 May 19. (In Russ.)
30. Gureev I.I. [A Method of Leaf Diagnostics of Plant Needs for Mineral Nutrients]. Patent 2,780,843 Russian Federation. 2022 October 4. (In Russ.)

Submitted 27.07.2022; approved after reviewing 10.10.2022; accepted for publication 17.10.2022

About the author:

Ivan I. Gureev, Laboratory Manager, Federal Agricultural Kursk Research Center (70b Karl Marks St., 305021 Kursk, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, Honored Inventor of the Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5995-3322>, gureev06@mail.ru

The author has read and approved the final manuscript.