

УДК 681.586.5

**А.Т. Туров<sup>1,2</sup>, Ю.А. Константинов<sup>2</sup>, М.Е. Белокрылов<sup>2</sup>,  
А.Ю. Максимов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский федеральный исследовательский центр  
УрО РАН, Пермь, Россия

## **РАЗРАБОТКА ПРОСТОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ**

В данной работе представлены описание схемы и результаты детального исследования распределенного акустического датчика на основе одномодового оптического волокна для сельскохозяйственных нужд. Исследование его работоспособности было сосредоточено на способности обнаруживать акустические колебания в определенном частотном диапазоне с разрешением во времени и пространстве. Поскольку это были лабораторные испытания, в качестве проводящей среды для акустического сигнала использовался воздух, а не почва. Комплект оборудования, использованный для создания этого устройства, потребовал модификации программного обеспечения системы сбора данных, которое также представлено здесь. Предлагаемый датчик успешно прошел испытания, что позволяет сделать вывод о его пригодности для сельскохозяйственных исследований, что в конечном итоге может привести к более эффективному ведению сельского хозяйства и решению некоторых проблем вибрационной экологии.

**Ключевые слова:** рэлеевское рассеяние, акустические вибрации, распределенный акустический сенсор, сельское хозяйство.

**A.T. Turov<sup>1,2</sup>, Yu.A. Konstantinov<sup>3</sup>, M.E. Belokrylov<sup>2</sup>,  
A.Yu. Maksimov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

<sup>2</sup>Perm Federal Research Center of Ural Branch  
of Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

## **DEVELOPMENT OF A SIMPLE FIBER OPTIC DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSOR FOR CROP APPLICATIONS**

This work presents a schematics description and results of detailed study of single-mode optic fiber based distributed acoustic sensor for agricultural needs. The investigation of its working capacity was concentrated on the ability to detect acoustic vibrations from specific frequency range with temporal and spatial distribution. As it was lab trials, air was used as a conductive media for acoustic signal instead of soil. A set of equipment used to create this device required a modification of data acquisition system software, which is also presented here. The proposed sensor has successfully passed the tests, which allows concluding that it is suitable for agriculture research purposes that finally can lead to more efficient farming and some vibration ecology problems solution.

**Keywords:** Rayleigh backscattering, acoustic vibrations, DAS, agriculture.

## **Введение**

Акустические колебания могут оказывать как отрицательное [1], так и положительное [2] влияние на растения, например, повышая урожайность на 30–40 %. R.H. Hassanien и др. представили обзор большого количества исследований по влиянию вибрации в диапазоне частот от 50 до 5000 Гц на растения, их каллус и семена [3]. Сообщалось о положительном влиянии вибрации на развитие пшеницы [4]. Авторы [2–4] предлагают использовать оптоволоконные датчики вибрации, зарекомендовавшие себя во многих отраслях промышленности [5–8], в качестве малоинвазивного распределенного инструмента для контроля вибрационной среды культурных растений и среды их произрастания, отмечая, что сейчас исследования в этой области, такие как, например, определение диапазонов частот и амплитуд, оказывающих положительное и отрицательное влияние, ограничены отсутствием оптимального инструмента для исследований. Также предполагается, что такой датчик может служить для охраны территории произрастания сельскохозяйственных культур от проникновения вредителей и злоумышленников. Таким образом, главной задачей настоящей работы было создание распределенного волоконно-оптического датчика акустических вибраций для нужд исследователей в области агрономии и виброэкологии.

Согласно специфике отрасли, в которой предполагается использование разрабатываемого распределенного акустического датчика, он должен быть доступным и компактным. В конечном итоге должна быть обеспечена эффективная работа сенсорной системы как в офисном помещении, так и на сельскохозяйственном полигоне. Как следствие, необходимо оптимизировать конструкцию таким образом, чтобы по возможности исключить присутствие некоторых дорогостоящих элементов. К подобным элементам относятся когерентные источники лазерного излучения, эрбиевые усилители оптической мощности, акусто-оптические модуляторы. И если исключить источник лазерного излучения из схемы, без сомнения, не представляется возможным, то вполне разумной является попытка упразднения второго оптического усилителя из «классической» цепи (на обратном ходу из линии). Также уместным будут исключение модулятора и использование импульсного лазерного диода, управляемого током. Известным является факт,

что такой способ модуляции обычно порождает появление частотного чирпа, что может исказить интерференционную картину и, как следствие, неблагоприятно отражаться на метрологических характеристиках распределенного датчика (если данный чирп не используется для восстановления фазы). Несмотря на это, авторы ставят себе задачу проведения исследований именно при таком условии.

Еще одной важной негативной особенностью использования классических схем распределенных акустических датчиков на сельскохозяйственных объектах является наличие в конструкциях последних оптических фильтров, часто реализованных в виде волоконных решеток Брэгга (ВБР). При колебаниях суточной температуры в пределах 5–10 °С амплитудно-частотная характеристика фильтров будет сдвигаться на величины, достаточные для ощутимого снижения сенсорных характеристик. Разумеется, подобные инженерные вопросы достаточно эффективно решаются температурным контролем, однако это усложняет и, хотя и незначительно, но все-таки удорожает конечный продукт. Поэтому ставится задача реализовать конструкцию распределенного акустического датчика без использования фильтров, чувствительных к температуре.

### **Устройство установки**

Предлагаемый датчик (рис. 1) содержит в качестве источника излучения импульсный когерентный лазер «DenseLight DL-B12» с шириной полосы 5 кГц. В соответствии с выражением

$$L_{coh} = \frac{c}{\pi \Delta \nu}, \quad (1)$$

где  $L_{coh}$  – длина когерентности,  $c$  – скорость света,  $\Delta \nu$  – ширина полосы, это обеспечивает длину когерентности, необходимую для работы с достаточно протяженными линиями, и позволяет использовать такие преимущества когерентной рефлектометрии, как большой динамический диапазон и высокая скорость отклика при общей простоте и относительной дешевизне конструкции, поскольку исключает необходимость использования модуляторов с системой управления и опорным плечом или линией задержки, так как рассеянное излучение интерферирует с самим собой. Таким образом, регистрируемый сигнал (последовательность рефлектограмм) представляет собой набор интерференционных пиков, устойчивых во времени и пространстве для каждого состояния световода.

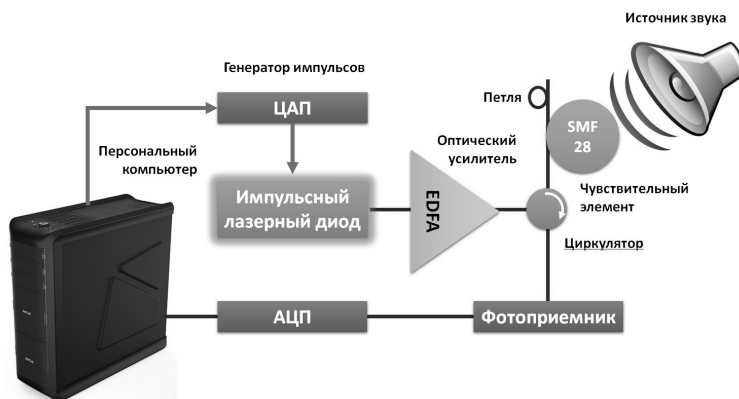


Рис. 1. Схема разработанного датчика

Кроме того, согласно задаче, поставленной во «Введении», простота и стабильность рабочих параметров достигаются также за счет отсутствия фильтра (волоконной брэгговской решетки, ВБР) после оптического усилителя (EDFA). Решить проблему отсутствия ВБР в схеме позволила оптимизация уровня мощности излучения, подаваемого на EDFA. Конец чувствительного элемента датчика, изготовленного из оптического волокна Corning SMF-28, снабжен петлей малого радиуса, предотвращающей высокоинтенсивное обратное отражение сигнала от его конца.

Для формирования электрических импульсов, управляющих лазерным диодом, использовался генератор сигналов произвольной формы ГСПФ053, контролируемый персональным компьютером через порт USB.

В качестве устройства сбора и обработки данных используется ПК с АЦП LA-n1usb, что позволяет записывать сигнал с частотой дискретизации до 2 ГГц при использовании одного канала. Импульсный лазер имеет возможность перестраивания длины волны генерируемого излучения от 1260 до 1670 нм. В данном случае он был настроен на генерацию излучения с длиной волны 1,55 мкм. Эта длина волны была выбрана в качестве рабочей, поскольку она наиболее оптимальна для работы усилителя, оптического циркулятора, чувствительного элемента и фотоприемника. В датчике в качестве фотоприемника используется Femto HCA-S-200M, созданный на основе InGaAs.

Из всех нечувствительных к поляризации оптических циркуляторов, которые могут быть использованы в создаваемом датчике, был выбран тот, который имеет наименьшее обратное отражение в канал 3

(на фотодетектор), чтобы уменьшить помехи, вызванные этим излучением, например, засветку фотоприемника (циркулятор производства Lightcomm).

### **Оптимизация программного и аппаратного обеспечения**

При создании сенсора важную роль сыграл выбор частоты дискретизации используемого АЦП. В первую очередь это связано с тем, что увеличение частоты дискретизации приводит к увеличению размера файла, в котором записан сигнал определенной длительности, по сравнению с размером файла, в котором записан сигнал такой же длительности, но с более низкой частотой дискретизации. Теоретически минимальная частота дискретизации, при которой нет потери пространственного разрешения, должна обеспечивать время отсчета, равное длительности лазерного импульса. Кроме того, было обнаружено, что для используемой конфигурации оборудования наименьшая достижимая длительность импульса (которая в данном случае также определяет его мощность) составляет 40 нс (соответствует пространственному разрешению 4 м). Это немного больше минимальной длительности импульса 15 нс, обеспечиваемой используемым лазером. Таким образом, с теоретической точки зрения минимальная подходящая частота дискретизации составляет 25 МГц. Ближайшее к нему значение частоты дискретизации, которое позволяет настроить используемый АЦП, – 31,25 МГц. В первой серии экспериментов сигнал регистрировался с частотой дискретизации 2 ГГц, 250 и 31,25 МГц. Полученные результаты несколько отличались от ожидаемых, но в очередной раз подчеркнули необходимость тщательного подхода к выбору частоты. Так, сигнал, записанный с частотой 2 ГГц, содержал большое (до нескольких десятков) количество «лишних» отсчетов: записанные рефлектограммы отличались друг от друга количеством отсчетов и, соответственно, длительностью. При пересчете на расстояние оказалось, что колебания длины чувствительного элемента достигают нескольких метров. Это явление нельзя было объяснить колебаниями температуры или случайными колебаниями плотности. Поэтому было решено искать проблему в программе обработки данных или другом используемом оборудовании.

Также было обнаружено, что наибольшее количество «лишних» точек приходится на начальный пик рефлектограммы, который является отражением от оптического циркулятора. Предполагается, что ин-

тенсивность этого пика является критической и периодически приводит к засветке фотоприемника. Это явление трудноустранимо, поскольку, как уже было изложено, из всех имеющихся оптических циркуляторов был уже выбран тот, который имеет наименьшее обратное отражение в этот канал.

Обнаруженная проблема была решена программно: созданный скрипт Matlab автоматически находил «лишние» отсчеты и исключал их из сигнала. Однако это значительно увеличило время обработки.

При частотах дискретизации 31,25 и 250 МГц также наблюдались «лишние» отсчеты, но их количество колебалось в пределах 1–2 штук (рис. 2). В то же время в случае частоты 31,25 МГц в записанном сигнале по причинам, которые еще предстояло объяснить, исчезла стабильность интерференционных пиков, что отрицательно отразилось на последующей обработке и анализе сигнала. По всем этим причинам из трех исследованных было решено выбрать 250 МГц в качестве рабочей частоты дискретизации. Наименьший достигаемый период импульсов составляет 10 мкс. В случае регистрации акустических колебаний (что является основной функцией датчика) это обеспечивает частоту дискретизации (самого датчика, которую также можно рассматривать как количество рефлектограмм, получаемых в секунду) порядка 100 кГц и, соответственно, теоретическую максимальную регистрируемую частоту вибрации 50 кГц. Во второй серии экспериментов были проверены работоспособность созданного датчика и его пригодность для мониторинга вибрационной обстановки в агрономии и виброэкологии. Используемый виброгенератор не позволял создавать акустические сигналы с частотой выше 8 кГц, поэтому в данном исследовании верхний предел частоты был именно таким.

Чувствительный элемент датчика состоял из 2 сваренных катушек оптического волокна «SMF-28» длиной примерно 800 и 1200 м соответственно. Первая катушка подвергалась вибрации, а вторая была изолирована от нее, находясь в соседнем помещении. В первом случае чувствительный элемент подвергался вибрациям с частотой 30 Гц, от 100 до 1000 Гц с шагом 100 Гц и от 1500 до 8000 Гц с шагом 500 Гц. Во втором случае воздействие производилось с частотой 1200 Гц, но начиналось и прекращалось во время записи сигнала. При каждой частоте воздействия было записано около 50 тысяч рефлектограмм. Затем для каждого набора значений уровня сигнала, соответствующих оди-

наковому расстоянию вдоль чувствительного элемента, было выполнено быстрое преобразование Фурье (БПФ), и результирующий спектр был очищен от шума. В первом случае длительность оконной функции в БПФ была равна длительности сигнала, а во втором – 0,15 с. Результаты представлены на рис. 3, 4.

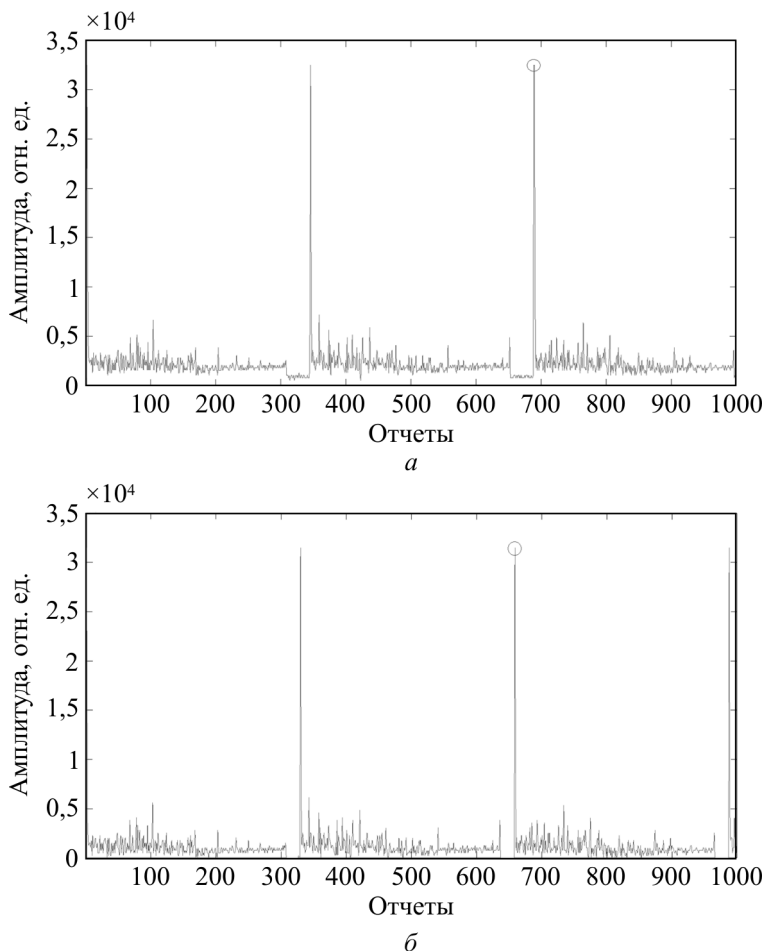


Рис. 2. Сигнал до обработки (а); сигнал после обработки (б)

Прерывистый след, наблюдаемый примерно на 800 м, вероятно, вызван сваркой оптических волокон. Созданное ПО для обработки данных, полученных с представленного датчика, позволяет не только считывать сигнал из файла, отображать его графически, исключать ранее описанные «лишние» отсчеты, выполнять преобразование Фурье в указанном диапазоне длин и частот с заданной точностью и отобра-

жать результат графически в виде псевдотрехмерных изображений (так называемых тепловых карт), но также автоматически определять диапазон амплитуд, отображаемых на тепловой карте, исключая область низкочастотного шума из расчета, что позволяет сделать относительную оценку амплитудной чувствительности датчика, а также очистить спектр принимаемого сигнала от шума. Удаление шума также производилось путем обнуления значений сигнала ниже уровня, определяемого уровнем шума. Несмотря на низкую технологичность этого подхода, он был важен, поскольку приравнивание к нулю значительного количества отсчетов в сигнале значительно сокращало время, затрачиваемое на его обработку, и размер файлов, в которых были записаны результаты.

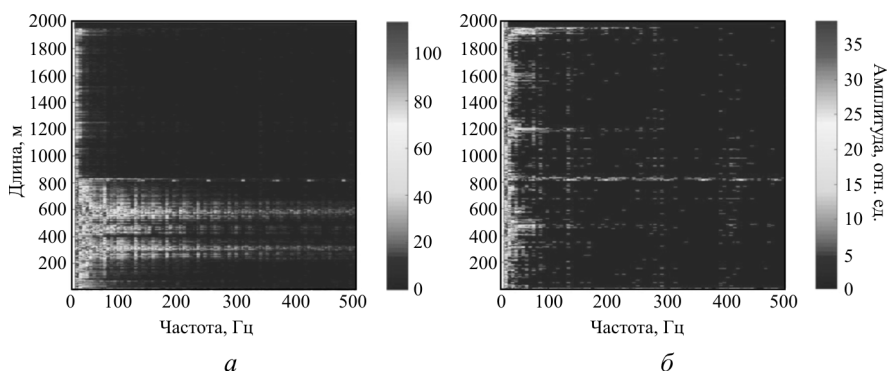


Рис. 3. Частота воздействия 30 Гц (а); «тишина» (б)

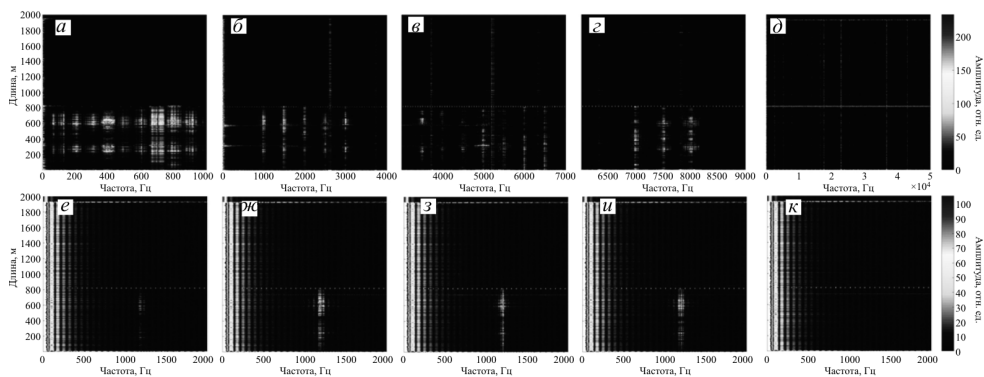


Рис. 4. Результаты проверки пригодности датчика: а–г: сводные графики, показывающие регистрацию датчиком воздействий с частотами из исследуемого диапазона; д – полный частотный спектр, полученный при отсутствии воздействий; е–к: спектры, показывающие локализацию во времени воздействия с частотой 1200 Гц, время от начала регистрации сигнала 0–0,15; 0,15–0,30; 0,30–0,45; 0,45–0,60; 0,60–0,75 с соответственно



## **Заключение**

Полученные результаты наглядно демонстрируют, что датчик и система обработки данных соответствуют требованиям, необходимым для контроля вибрационной обстановки в исследованиях, связанных с агрономией и вибрационной экологией, поскольку они позволяют регистрировать воздействия в интересующем диапазоне частот [3] и локализовать это воздействие во времени. Разработанный распределенный акустический датчик в первичном виде соответствует требованиям, изложенным в настоящей статье. Все его элементы достаточно свободно умещаются на типовом оптическом столе и при необходимости могут быть интегрированы в переносной кейс, подключаемый через порты USB к также переносному компьютеру. Это придает датчику мобильности и позволяет эксплуатировать на сельскохозяйственных полигонах.

Кроме этого необходимо отметить, что суммарная стоимость комплектующих, входящих в экспериментальный стенд, чуть ниже 1 млн рублей, что придает будущей разработке коммерческую привлекательность и свидетельствует о ее потенциальной доступности, в том числе и в сельском хозяйстве.

Также чувствительность датчика была исследована на акустических частотах, представляющих интерес в вибрационной экологии и сельском хозяйстве.

Хотя авторы и исключили из конструкции датчика элементы, вносящие особенную температурную чувствительность, достоверно говорить о возможности эксплуатации разработки при существенных колебаниях внешних температур без соответствующих испытаний пока не приходится. На проведении подобных исследований авторы планируют сосредоточить свои усилия в дальнейшем. Также важным моментом является оптимизация частоты дискретизации аналого-цифрового преобразователя сенсора, поскольку многие вопросы в данной области по-прежнему являются дискуссионными [9].

*Авторы выражают благодарность Д. Клоду, инженеру лаборатории фотоники ПФИЦ УрО РАН.*

*Работа выполнена в рамках государственного задания с номером государственной регистрации темы АААА-А19-119051390040-5.*

### Список литературы

1. Acoustical properties of living plants / К. Horoshenkov [и др.] // *Proceedings of the Institute of Acoustics*. – 2013. – № 34. – С. 68–75.
2. Пат. 2603589 Рос. Федерация. Способ управления развитием корневой системы растений воздействием вибрации / В.И. Шапин, Ф.Б. Огурцов; заявл. и опублик. 2016.
3. Advances in effects of sound waves on plants / R.H. Hassanien, T.Z. Hou, Y.F. Li, B.M. Li // *Journal of Integrative Agriculture*. – 2014. – № 13, Т. 2. – Р. 335–348.
4. Стимуляция роста у пшеницы под воздействием вибрации / Ю.А. Беркович, Л.С. Большакова, Н.В. Давыдова, Н.Л. Делоне, Н.В. Зимина, С.О. Смолянина, А.А. Соловьев // *Доклады Академии наук*. – 2010.
5. Optical fiber distributed acoustic sensing based on the self-interference of Rayleigh backscattering / Y. Shang, Y. Yang, C. Wang, X. Liu, C. Wang, G. Peng // *Measurement*. – 2016. – № 79. – С. 222–227.
6. Пат. 5194847 США. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing / H.F. Taylor, C.E. Lee; заявл. и опублик. 1993.
7. Pipeline corrosion and leakage monitoring based on the distributed optical fiber sensing technology / L. Ren, T. Jiang, Z.G. Jia, D.S. Li, C.L. Yuan, H.N. Li // *Measurement*. – 2018. – № 122. – Р. 57–65.
8. Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR / F. Peng, N. Duan, Y.J. Rao, J. Li // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2014. – № 26, Т. 20. – Р. 2055–2057.
9. Distributed optical fiber sensing: Review and perspective / P. Lu, N. Lalam, M. Badar, B. Liu, B.T. Chorpening, M.P. Buric, P.R. Ohodnicki // *Applied Physics Reviews*. – № 6, Т. 4. – Р. 041302.

### References

1. Horoshenkov K. et al. Acoustical properties of living plants. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 2013, no. 34, pp. 68-75.
2. Shapin V.I., Ogurtsov F.B. Sposob upravleniia razvitiem kornevoi sistemy rastenii vozdeistviem vibratsii [The method of controlling the development of the root system of plants by the impact of vibration]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2603589 (2016).
3. Hassanien R.H., Hou T.Z., Li Y.F., Li B.M. Advances in effects of sound waves on plants. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, vol. 2, no. 13, pp. 335-348.

4. Berkovich Iu.A., Bol'shakova L.S., Davydova N.V., Delone N.L., Zimina N.V., Smolianina S.O., Solov'ev A.A. Stimuliatsiia rosta u pshenitsy pod vozdeistviem vibratsii [Stimulation of growth in wheat under the influence of vibration]. *Doklady Akademii nauk*, 2010.

5. Shang Y., Yang Y., Wang C., Liu X., Wang C., Peng G. Optical fiber distributed acoustic sensing based on the self-interference of Rayleigh backscattering. *Measurement*, 2016, no. 79, pp. 222-227.

6. Taylor H.F., Lee C.E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing. Patent USA no. 5194847 (1993).

7. Ren L., Jiang T., Jia Z.G., Li D.S., Yuan C.L., Li H.N. Pipeline corrosion and leakage monitoring based on the distributed optical fiber sensing technology. *Measurement*, 2018, no. 122, pp. 57-65.

8. Peng F., Duan N., Rao Y.J., Li J. Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, vol. 20, no. 26, pp. 2055-2057.

9. Lu P., Lalam N., Badar M., Liu B., Chorpening B.T., Buric M.P., Ohodnicki P.R. Distributed optical fiber sensing: Review and perspective. *Applied Physics Reviews*, 2019, vol. 6, no. 4, 041302 p.

Получено 07.09.2021