

УДК 550.34.038.4; 551.508.856

ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ ЛИДАР ДЛЯ *in situ* МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР С БОРТА БЕСПИЛОТНОГО АВИАНОСИТЕЛЯ

В. Н. Леднев¹, М. Я. Гришин¹, П. А. Сдвиженский¹, В. А. Завозин¹,
А. Ф. Бункин¹, Р. К. Курбанов², М. А. Литвинов², О. Н. Третинников³,
С. М. Першин¹

Разработан сверхкомпактный (~300 г) флуоресцентный лидар для установки на квадрокоптер с целью дистанционного зондирования сельскохозяйственных культур. Применение диодного лазера (405 нм, 150 мВт) и миниспектрометра позволило снизить размеры и энергопотребление прибора для его размещения на малых беспилотных авианосителях. Для оценки возможностей прибора в полевых условиях лидар был установлен на квадрокоптер для диагностики состояния растений на кукурузном поле. Полевые испытания подтвердили преимущества автономного лидарного мониторинга для раннего выявления и локализации областей поля, где растения испытывают высокий стресс.

Ключевые слова: лазерное дистанционное зондирование, лидар, лазерно-индуцированная флуоресценция, беспилотные авианосители, мониторинг полей сельскохозяйственных культур.

Введение. Метод лазерного дистанционного зондирования является мощным инструментом для исследования ряда параметров разнообразных объектов [1, 2]. С появлением лазеров в 1960-х г.г. были разработаны многочисленные варианты лидаров для зондирования акваторий и подстилающей, в том числе и с борта авианосителей (самолетов,

¹ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38.

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ” (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), 109428 Россия, Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5.

³ Центр “Нанопотоника” Института физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, 220072 Беларусь, Минск, пр. Независимости, 68.

вертолетов) [3–9]. Однако, высокая стоимость эксплуатации пилотируемых авианосителей не позволила широко применять лидары для решения практических задач. Бурный рост беспилотной авиации за последнее десятилетие значительно снизил стоимость эксплуатации авианосителя, что открыло новые перспективы применения лидаров в самых разнообразных приложениях [10–18]. В то же время, лидары, которые могут быть установлены на беспилотные авианосители, должны отвечать особым требованиям: размеры менее $10 \times 10 \times 10$ см³ и масса менее 2 кг [19] с соблюдением условия половинной тяги винтомоторной группы [20]. Также при установке навесного оборудования учитывается размещение сенсоров беспилотного авианосителя, для исключения их перекрытия и нарушения функционала воздушного судна [21]. В данной работе представлены результаты разработки и применения компактного флуоресцентного лидара, установленного на борт квадрокоптера для диагностики полей сельскохозяйственных культур.

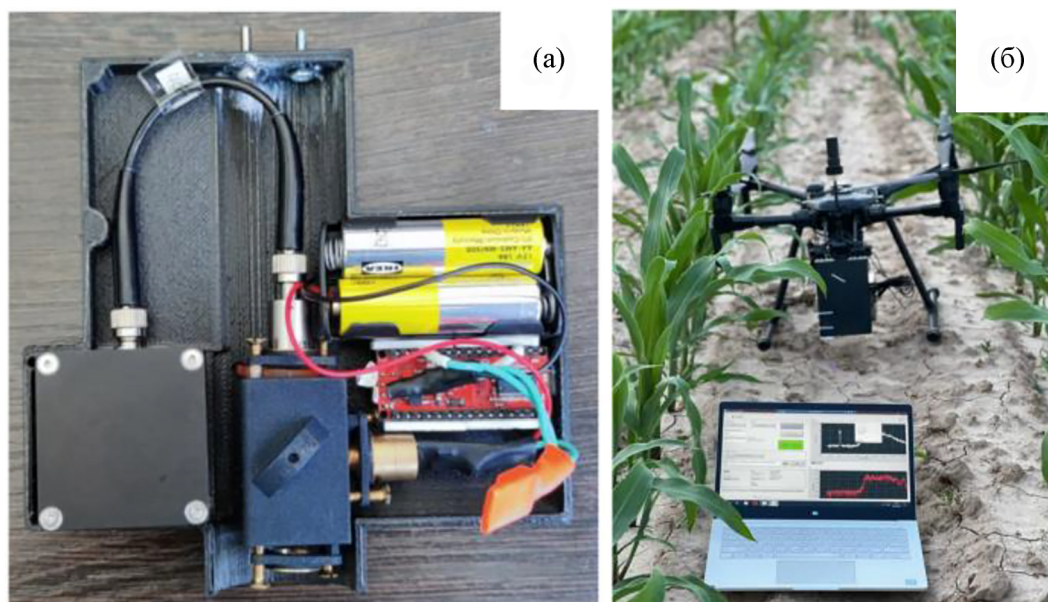


Рис. 1: (а) фотография компактного флуоресцентного лидара со снятой крышкой корпуса; (б) фотография квадрокоптера DJI Matrice 200 v2 (на заднем плане), с установленным лидаром, а также управляющий компьютер (на переднем плане).

Эксперимент. Общий вид компактного флуоресцентного лидара представлен на рис. 1. Прибор основан на полупроводниковом лазере непрерывного действия (405 нм, 150 мВт) и дифракционном мини-спектрометре (STS-VIS, Ocean Optics). Лазерный источник был выбран по двум причинам: наиболее эффективно применять длины волн возбуждения в диапазоне 400–450 нм [22]; диодный лазер обладает высокой эффек-

тивностью и малой массой. Мини-спектрометр должен был обеспечивать регистрацию спектра в диапазоне 350–820 нм, при этом его габариты должны быть минимальными, и он должен быть устойчив к механическим воздействиям. Лазерный пучок направляли к удаленной мишени с помощью дихроического зеркала (DMLP425, Thorlabs Inc), а обратно упруго- и неупруго-рассеянное излучение проходило через дихроическое зеркало, и с помощью конденсора фокусировалось на вход оптического волокна, которое было соединено со входной щелью мини-спектрометра. Спектрометр оборудован диодной линейкой на 1024 ячейки с размерами отдельного пиксела 7.8×125 мкм, что обеспечивало спектральное разрешение 12 нм. Для управления и синхронизации работы лазера и спектрометра была применена плата Arduino Nano на базе микроконтроллера Atmega 328P (Atmel). Общее управление осуществляли с одноплатного компьютера (Intel NUC) по USB интерфейсу, по которому были подключены плата Arduino и мини-спектрометр. Управление работой и сбор данных проводили в программе, созданной в среде LabVIEW (National Instruments). Для уменьшения влияния внешней засветки регистрировали как спектр лазерно-индуцированной флуоресценции, так и спектр диффузного рассеяния света с одним и тем же временем экспозиции детектора, а затем программно вычитали второй спектр из первого и записывали в память компьютера. Для построения карт применяли GPS-модуль, подключенный к компьютеру, что позволяло “осуществлять привязку” спектров лазерно-индуцированной флуоресценции к географическим координатам. Для управления лидаром можно подключиться к компьютеру по Wi-Fi радиоканалу (расстояние до 100 м) через протокол RDP (Remote Desktop Protocol) для оперативного вмешательства в условия измерений. Размеры лидара составили $10 \times 15 \times 5$ см³, а масса прибора 310 г. Управляющий компьютер имел сравнимые габариты ($11 \times 11 \times 3$ см³) и массу (600 г), при этом энергопотребление всей системы составляло менее 30 Вт. Разделение лидара на две части (оптический блок и компьютер) позволяет оптимизировать его размещение на летающей платформе для сохранения положения центра масс. Прибор был установлен на промышленный малогабаритный квадрокоптер DJI Matrice 200 v2, который позволяет переносить полезную нагрузку до 2 кг.

Корпус лидара спроектирован с учетом размерно-массовых характеристик компонентов и их расположение выбрано для исключения перекоса относительно вертикальной оси и снижения нагрузок на демпферы подвеса авианосителя. В свою очередь на управляющем компьютере был заменен заводской корпус на облегченный из пластика для снижения взлетной массы и габаритные размеры уменьшены для правильной

компоновки. Расположение компьютера выбрано с учетом нижних оптических сенсоров BBC DJI Matrice 200 v2, которое исключает перекрытие и ограничение функционала воздушного судна.

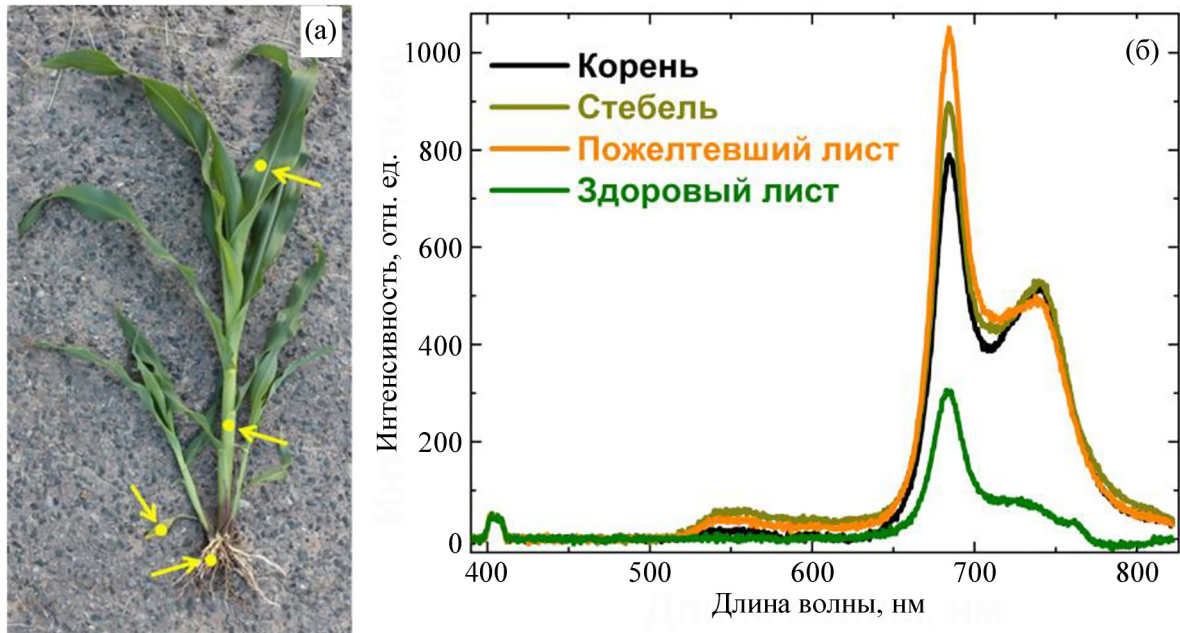


Рис. 2: (а) фотография растения кукурузы *Zea mays* (желтые точки отмечают места измерения спектров лазерной флуоресценции); (б) спектры лазерно-индуцированной флуоресценции разных участков растения кукурузы.

Результаты и обсуждения. Для оценки возможностей разработанного прибора было выбрано растение кукурузы *Zea mays* и зарегистрированы спектры лазерно-индуцированной флуоресценции различных участков растения (рис. 2): корни, стебель, пожелтевший лист, здоровый лист. Наиболее интенсивными в спектре являются полосы 680 и 740 нм, соответствующие флуоресценции хлорофилла-а для фотосистемы II и фотосистемы I, соответственно [23–26]. Отметим, что для здорового листа с максимальной концентрацией хлорофилла интенсивность свечения полосы 680 нм была минимальна, а для стебля интенсивность этой же полосы была в 4 раза выше. Ранее было показано, что отношение интенсивностей полос 680 к 740 нм пропорционально концентрации хлорофилла [27]. Согласно рис. 2(б) отношение интенсивностей полос 680/740 нм для листа в 5 раз выше, чем для стебля, что коррелирует с распределением хлорофилла в поверхностном слое по высоте растения, которое ранее было опубликовано в литературе [27, 28].

Натурные измерения были проведены на кукурузном поле животноводческого хозяйства “Зеленоградское” возле села Семеновское (Пушкинский район Московской области). Во время полета квадрокоптера управляющий компьютер, установленный на нем, не только сохранял данные, но и позволял оперативно отслеживать качество спектров и управлять параметрами измерений. Каждое измерение включало в себя регистрацию фонового спектра (спектр диффузно-рассеянного излучения от солнечной заливки, лазер выключен), после чего измеряли спектр лазерной флуоресценции (лазер включен). В обоих случаях время экспозиции ПЗС-линейки спектрометра составляло 500 мс, поэтому регистрировали результирующий спектр флуоресценции один раз в секунду. Сохраняемые данные включали в себя спектр диффузно-рассеянного излучения и разностный спектр (из спектра флуоресценции был вычтен спектр с диффузно-рассеянным излучением – выключен лазер). Солнечное излучение сильно влияло на отношение сигнал-шум в спектре флуоресценции, поэтому измерения проводили вечером, за 1–2 часа до захода Солнца. При движении квадрокоптера старались удерживать постоянное расстояние в 2 м от верхних макушек растений.

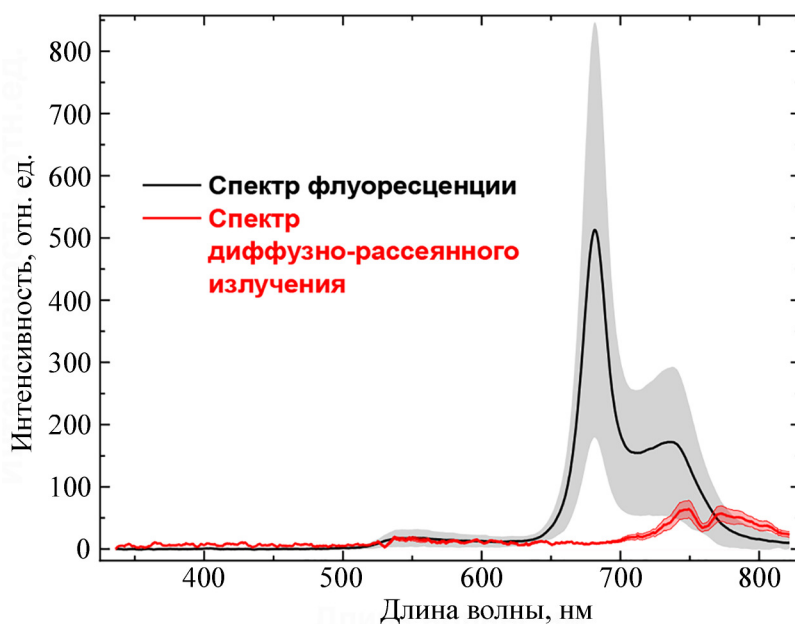


Рис. 3: Спектры флуоресценции (серый) и диффузно-рассеянного излучения (красный). Заливкой показан разброс значений при усреднении по 5 измерениям.

Зарегистрированный массив данных спектров флуоресценции был обработан для построения карты сигналов. Как видно из рис. 2(б), можно выделить две полосы с центрами на длинах волн 680 нм и 740 нм. Были выбраны три сигнала: 1) интеграл

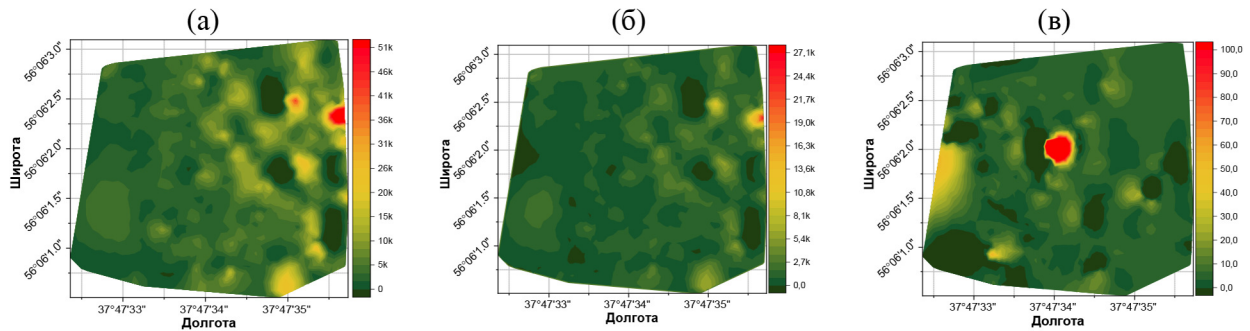


Рис. 4: Карты сигналов флуоресценции 680 нм (а), 740 нм (б) и отношения интегралов полос флуоресценции 680/740 нм (в) для поля кукурузы.

полосы с центром на 680 нм (диапазон 660–700 нм), 2) интеграл полосы с центром 740 нм (диапазон 720–760 нм) и 3) отношение интегралов полос 680 и 740 нм. Введение сигнала отношение 680/740 нм связано с тем, что оно пропорционально концентрации хлорофилла [27, 28], что позволяет отказаться от учета расстояния между лидаром и объектом измерений. Результаты картирования представлены на рис. 4. Для отдельных полос (680 и 740 нм) видно неравномерное распределение сигналов с тенденцией увеличения среднего значения на восток. Это связано с тем, что высота растений также возрастала и расстояние от объекта измерения до прибора немного сокращалось. Отношение же сигналов более информативно демонстрирует картину, и можно выделить области с высокой концентрацией хлорофилла в растении (в центре рис. 4(в)), а также области, где растения испытывают стресс, который может быть вызван нехваткой микроэлементов в почве или развитием патогенной флоры.

Выводы. В работе представлен сверхкомпактный (~ 300 г) флуоресцентный лидар, который был разработан для установки на квадрокоптер с целью дистанционного зондирования сельскохозяйственных культур. Прибор основан на диодном лазере (405 нм, 150 мВт) и мини-спектрометре, что позволило значительно уменьшить габариты и энергопотребление, что отвечает возможностям транспортировки на малых беспилотных авианосителях. Были проведены полевые испытания на кукурузном поле. По результатам обработки данных спектров флуоресценции было продемонстрировано, что по соотношению полос 680 и 740 нм хлорофилла-а можно оперативно определять участки поля, где растения испытывают высокий стресс.

Работа была поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на создание и развитие научных центров мирового уровня “Центр фотоники” № 075-15-2022-315.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] R. M. Measures, *Laser remote sensing: fundamentals and applications* (John Wiley & Sons, Ltd, New York, 1984).
- [2] A. Bunkin, K. Voliak, *Laser remote sensing of the ocean: methods and applications* (Wiley NY, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 2001).
- [3] A. F. Bunkin, A. L. Surovegin, *Okeanologiya* **26**, 532 (1986).
- [4] A. F. Bunkin, A. V. Rezov, D. Y. Tsipenyuk, *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiz.* **64**, 195 (1994).
- [5] A. F. Bunkin, D. V. Vlasov, D. M. Mirkamilov, et al., *Dokl. Akad. Nauk SSSR* **279**, 335 (1984).
- [6] E. W. Chappelle, F. M. Wood, J. E. McMurtrey, W. W. Newcomb, *Appl. Opt.* **23**, 134 (1984). DOI: 10.1364/AO.23.000134.
- [7] S. Jin, X. Sun, F. Wu, et al., *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **171**, 202 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.11.006>.
- [8] V. V. Fadeev, *Kvantovaya Elektron.* **3**, 2392 (1976).
- [9] V. V. Bezotosnyi, M. V. Gorbunkov, A. L. Koromyslov, et al., *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **44**(10), 1 (2017). DOI: 10.3103/S1068335617010018.
- [10] U. S. Panday, A. K. Pratihast, J. Aryal, R. B. Kayastha, *Drones.* **4**, (2020). DOI: 10.3390/drones4030041.
- [11] M. P. Christiansen, M. S. Laursen, R. N. Jørgensen, et al., *Sensors.* **17**, (2017). DOI: 10.3390/s17122703.
- [12] M. Y. Grishin, V. N. Lednev, P. A. Sdvizhenskii, et al., *Lidar Monitoring of Moisture in Biological Objects*, in: *Dokl. Phys.*, Springer, 2021: pp. 273–276. DOI: 10.1134/S1028335821100050.
- [13] S. M. Pershin, A. F. Bunkin, V. K. Klinkov, et al., *Phys. Wave Phenom.* **20**, 212 (2012). DOI: 10.3103/S1541308x12030090.
- [14] A. V. Myasnikov, S. M. Pershin, M. Y. Grishin, et al., *Phys. Wave Phenom.* **30**, 119 (2022). DOI: 10.3103/S1541308X22020054.

- [15] S. M. Pershin, A. L. Sobisevich, V. A. Zavozin, et al., *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **49**(2), 36 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622020063.
- [16] S. M. Pershin, A. L. Sobisevich, M. Y. Grishin, et al., *Laser Phys. Lett.* **17**, 115607 (2020). DOI: 10.1088/1612-202x/abbedc.
- [17] S. M. Pershin, M. Y. Grishin, V. A. Zavozin, et al., *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **46**(10), 328 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619100075.
- [18] D. C. Tsouros, S. Bibi, P. G. Sarigiannidis, *Information*. **10**, 349 (2019).
- [19] M. Y. Grishin, V. N. Lednev, S. M. Pershin, P. O. Kapralov, *Ultracompact Fluorescence Lidar Based on a Diode Laser (405 nm, 150 mW) for Remote Sensing of Waterbodies and the Underlying Surface from Unmanned Aerial Vehicles*, in: *Dokl. Phys.*, Springer, 2021: pp. 153–155. DOI: 10.1134/S1028335821060057.
- [20] R. Kurbanov, M. Litvinov, *Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro*, in: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, IOP Publishing, 2020: p. 12062.
- [21] A. A. Polukhin, M. A. Litvinov, R. K. Kurbanov, S. P. Klimova, *Development of the Parrot Sequoia Multispectral Camera Mount for the DJI Inspire 1 UAV*, in: *Smart Innov. Agric.*, Springer, 2022: pp. 217–225.
- [22] Z. G. Cerovic, G. Samson, F. Morales, et al., *Agronomie*. **19**, 543 (1999).
- [23] В. А. Караваев, О. А. Калмацкая, Б. В. Трубицин, *Биофизика* **67**, 524 (2022). DOI: 10.31857/S0006302922030103.
- [24] O. A. Kalmatskaya, V. A. Karavaev, A. A. Cherenkov, L. E. Gunar, *Luminescent and physiological indices of potato after the treatment of tubers with growth regulators*, in: *Saratov Fall Meet. 2020 Opt. Nanotechnologies Biol. Med.*, SPIE, 2021: pp. 115–120.
- [25] O. A. Kalmatskaya, B. V. Trubitsin, I. S. Suslichenko, et al., *Photosynth. Res.* **146**, 123 (2020).
- [26] O. A. Kalmatskaya, V. A. Karavaev, A. N. Tikhonov, *Photosynth. Res.* **142**, 265 (2019).
- [27] H. K. Lichtenthaler, U. Rinderle, *C R C Crit. Rev. Anal. Chem.* **19**, S29 (1988). DOI: 10.1080/15476510.1988.10401466.
- [28] V. Ciganda, A. Gitelson, J. Schepers, *J. Plant Physiol.* **166**, 157 (2009).

Поступила в редакцию 23 ноября 2023 г.

После доработки 1 февраля 2023 г.

Принята к публикации 3 февраля 2023 г.