

УДК 535.372, 636.085.33

ЛИДАРНЫЙ МОНИТОРИНГ ВЛАЖНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

© 2021 г. М. Я. Гришин^{1,*}, В. Н. Леднёв¹, П. А. Сдвиженский¹, Д. Ю. Павкин²,
Е. А. Никитин², А. Ф. Бункин¹, С. М. Першин¹

Представлено академиком РАН И.А. Щербаковым 07.09.2021 г.

Поступило 09.09.2021 г.

После доработки 09.09.2021 г.

Принято к публикации 15.09.2021 г.

Впервые проведены эксперименты по лазерному дистанционному зондированию влажности биологических объектов, имеющих важное значение для агропромышленности. Зондирование проводили с помощью разработанного в ИОФ РАН флуоресцентного лидара на базе импульсного твердотельного лазера (527 нм, 5 нс, 1 кГц, 200 мкДж/имп) и стробируемой камеры с усилителем яркости. Зарегистрированы спектры лазерной флуоресценции различных биологических объектов растительного происхождения при различном значении влажности. Потеря воды сопровождалась деградацией биологических пигментов, что приводит к неравномерному увеличению интенсивности полос в спектре флуоресценции для разных спектральных диапазонов. Показано, что отношение спектральных полос хлорофилла *a* (680 нм) и протохлорофиллида (630 нм) имеет наилучшую корреляцию с остаточной влажностью, что открывает перспективное направление лидарного измерения и мониторинга влажности/сухого вещества в силосе или многолетних травах.

Ключевые слова: лидар, флуоресценция, дистанционное зондирование, экспресс-контроль, влажность силоса

DOI: 10.31857/S2686740021050102

Разработка новых подходов оптической онлайн-диагностики различных объектов является важной задачей для повышения качества и эффективности современного агропромышленного комплекса. Например, содержание крупного рогатого скота — одно из приоритетных направлений в сельскохозяйственной деятельности большинства стран мира, формирующее продовольственную безопасность государства. Современные животноводческие комплексы по получению молока от крупного рогатого скота являются предприятиями с высоким уровнем автоматизации технологических процессов, так как процесс кормления животных на ферме нацелен на достижение максимальных показателей здоровья поголовья и высокой молочной/мясной продуктивности, что в большинстве случаев зависит от умения фермера правильно использовать кормовое сырье. Данный вопрос особенно важен в случае использования кормов естественного происхождения (силос

многолетних и однолетних трав, сенаж, луговое сено и др.), доля которых в суточном рационе животных может достигать 80%. Ввиду того, что заготовка кормового сырья может производиться из растений различной степени спелости, при различных погодных условиях и с разной степенью подвяливания (сушки), в конечном итоге кормовое сырье может быть заложено в хранилищах силоса (силосных траншеях) с существенно разными показателями питательности, в первую очередь — с различными уровнями сухого вещества. Например, уровень влажности зеленой массы кукурузы может отличаться в зависимости от места, где она была скошена — на возвышенном открытом пространстве, недалеко от водоема, либо в тех местах, куда не попадает солнце и ветер [1–3].

При разработке моделей рациона кормления крупного рогатого скота показатель сухого вещества/влажности в кормах естественного происхождения особенно важен, поскольку именно уровень сухого вещества отражает количество потребляемых животных питательных веществ, что позволяет прогнозировать и управлять показателями молочной продуктивности, здоровья животных и уровнем прироста живой массы [4]. На сегодняшний день существует три наиболее рас-

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук, Москва, Россия

² Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
Москва, Россия

*E-mail: mikhail.grishin@kapella.gpi.ru

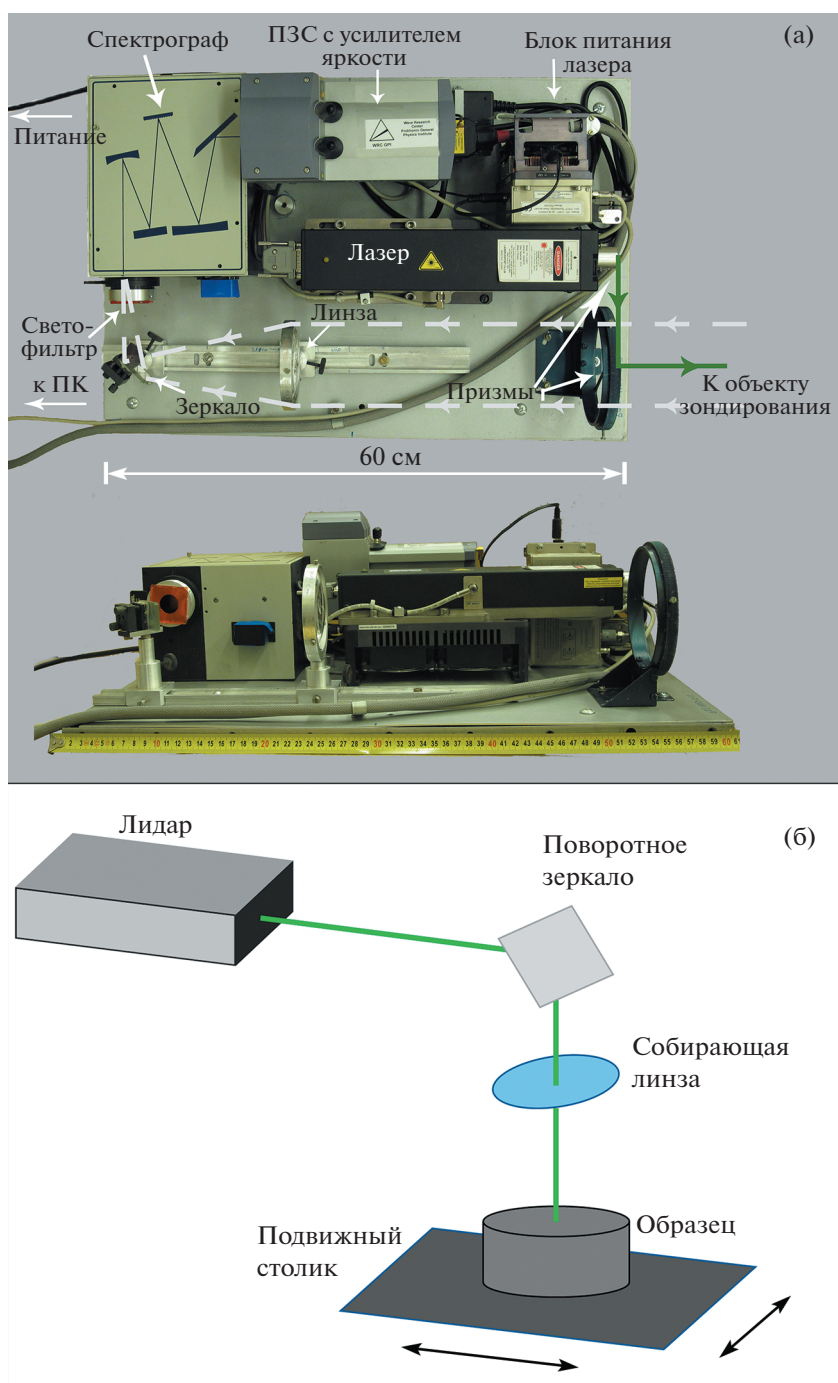


Рис. 1. а – Фотография импульсного флуоресцентного лидара (вид сверху и сбоку), б – схема экспериментальной установки для измерения влажности кукурузного силоса.

пространственных способа оценки уровня сухого вещества/влажности кормов естественного происхождения: весовой метод, диэлькометрический метод и инфракрасная спектроскопия. Весовой метод заключается в сушке силоса при нагреве в микроволновой печи до момента, когда перестает происходить убыль массы. Считая, что потеря массы обусловлена только испаренной водой, можно рассчитать влажность исходного продук-

та. Метод является наиболее распространенным, так как не требует дорогостоящего оборудования и прост в исполнении, но требует существенных затрат времени (до 30 мин на одно измерение), что исключает его применение для онлайн-контроля подготовки корма различным группам животных. Диэлькометрический метод основан на корреляционной зависимости диэлектрической проницаемости материала от содержания в нем

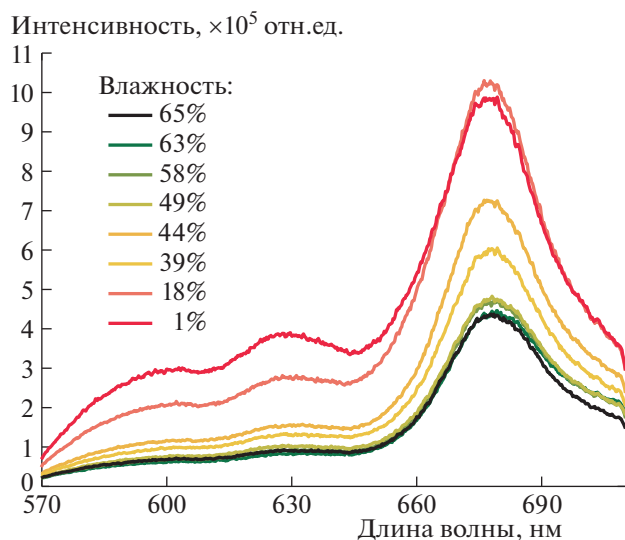


Рис. 2. Спектры флуоресценции образцов кукурузного силоса различной влажности.

влаги [5]. Диэлькометрические измерители могут определить влажность за 10–20 с, но требуют контактных измерений (необходимо погрузить щуп в исследуемый объект). Однако существенным недостатком метода является то, что исследуемый образец должен быть плотно спрессован, в противном случае прибор дает высокую погрешность. Использование спектральных анализаторов, работающих в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне, позволяет оценивать не только влажность, но и другие показатели питательности корма, однако работа ИК-спектрометров невозможна в “полевых” условиях, так как прибор требует полного экранирования от внешней засветки. То есть анализ кормов методом ИК-спектрометрии возможен только в специально подготовленной лаборатории [4, 6].

Разработка новых методов экспрессного измерения влажности силоса важна для контроля качества корма для разных групп животных. Активное оптическое зондирование с помощью непрерывных или импульсных лазеров позволяет измерять оптические отклики удаленного объекта, тем самым получая информацию. Например, по спектрам комбинационного рассеяния можно картировать распределение температуры водных объектов [7], а по спектрам лазерно-индуцированной флуоресценции – определять степень загрязнения водоемов фитопланктоном [8] или нефтепродуктами [9] или же оценивать состояние растений [10]. Основной тип приборов, применяемых для лазерного дистанционного зондирования, – лидары (от LIDAR – Light Detection and Ranging, обнаружение и измерение расстояния с помощью света). Лидары функционируют по радарному принципу с использованием лазеров, ге-

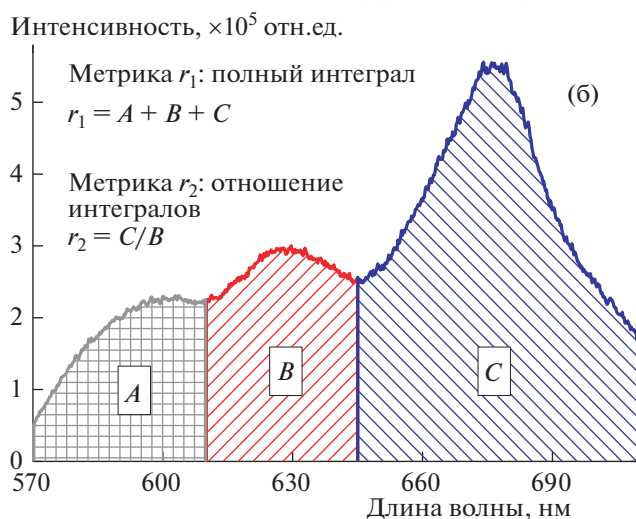
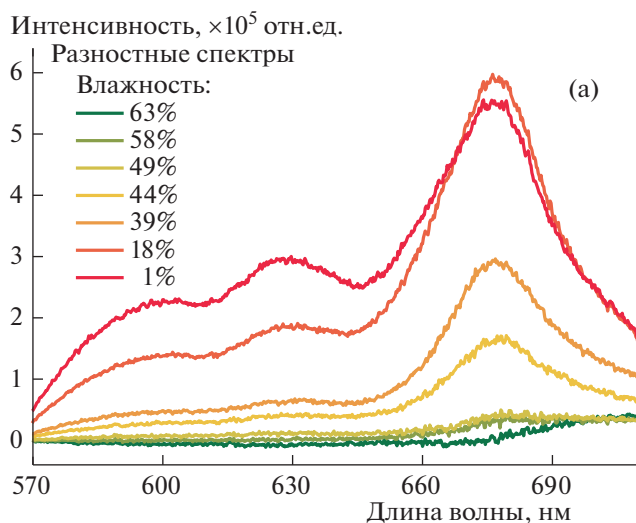


Рис. 3. а – Разностные спектры флуоресценции образцов силоса различной влажности, б – иллюстрация выбора метрик для лидарного измерения влажности силоса.

нерирующих излучение в различных спектральных диапазонах, от ультрафиолета до ближнего ИК [11–13], в качестве источника зондирующих импульсов.

Настоящее исследование направлено на выявление возможности использования лидара как инструмента для определения по спектрам флуоресценции показателей влажности/сухого вещества у кормов естественного происхождения на примере кукурузного силоса.

Для измерения влажности силоса был использован флуоресцентный лидар, разработанный в Институте общей физики им. А.М. Прохорова (рис. 1а). Прибор основан на импульсном твердотельном лазере YLiF₄:Nd с диодной накачкой (Лазер компакт, LCM–DTL–319QT: 527 нм, 5 нс, 23 Гц, 200 мкДж/имп). Лазерный пучок направ-

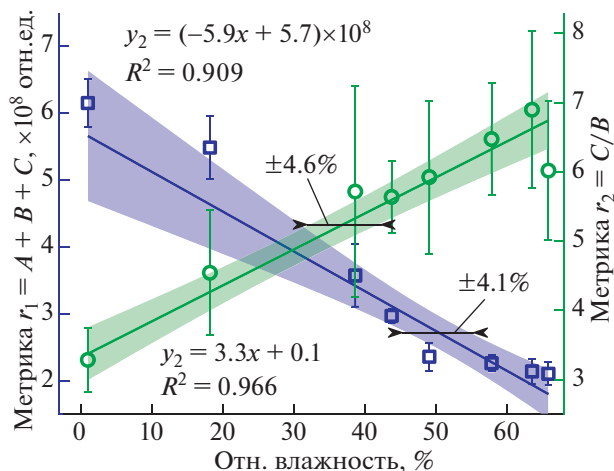


Рис. 4. Градуировка лидара для измерения влажности силоса по спектрам флуоресценции: квадраты – метрика r_1 (полный интеграл), круги – метрика r_2 (отношение интегралов полос 650–710 нм к 610–650 нм). Сплошные линии – линейная аппроксимация зависимости метрик, закрашенные полосы – 95%-е доверительные интервалы аппроксимации.

ляли на образец с помощью двух призм. Регистрируемые сигналы собирали с помощью кварцевой линзы ($F = 21$ см) и алюминиевого зеркала на входную щель спектрографа. Для подавления упруго рассеянного лазерного излучения при регистрации сигналов был использован светофильтр из цветного стекла ОС-14. Система регистрации сигналов состояла из компактного спектрографа (Spectra Physics, MS127i), оборудованного ПЗС-матрицей со стробируемым усилителем яркости (Andor iStar). Спектральное окно регистрации составляло 500–750 нм, экспозиция 10 нс (малая величина строба позволяет проводить измерения в том числе в условиях прямой засветки солнечными лучами). В экспериментах образец силоса помещали в кювету, установленную на моторизованном подвижном столике (см. рис. 1б) для усреднения регистрируемого оптического отклика по площади образца 100 см^2 .

Были зарегистрированы спектры флуоресценции образца силоса до сушки и спектры образца, высушенного на бытовом дегидрататоре (температура горячего воздуха 50°C) в течение различных сроков экспозиции. Влажность образцов определяли весовым методом. На рис. 2 приведены спектры флуоресценции образца разной степени влажности. При высыхании силоса спектр изменяется, но интенсивность флуоресценции увеличивается неравномерно. Так, интенсивность полосы протохлорофиллида (центр полосы 630 нм) [14] возрастает сильнее, чем интенсивность полосы хлорофилла a (центр полосы 680 нм), что свидетельствует об изменении свойств хромофоров при снижении концентрации молекул воды в об-

разце. Для живых растений интенсивность индуцированной лазером флуоресценции мала, так как пигмент-белковые антенны эффективно поглощают излучение [15], после заготовки и созревания силоса начинаются процессы разрушения хлоропластов [14], которые усиливаются при уменьшении влажности.

Для измерения влажности силоса по спектрам флуоресценции необходимо ввести метрику, количественно описывающую изменения спектра при изменении влажности образца. Для оценки изменений спектров и выбора метрики были построены разностные спектры (спектры образца до сушки, из которых вычтен спектр образца после сушки), приведенные на рис. 3а. Как видно из рисунка, при сушке образца силоса возрастает общая интенсивность спектра, быстро возрастает амплитуда полосы в области 650–710 нм, а также проявляются полосы в областях 570–610 нм и 610–650 нм. Были выбраны две метрики спектра для определения влажности: общий интеграл спектра в области 570–710 нм (метрика r_1 на рис. 3б, сумма интегралов A , B , C) и отношение интегралов полос в областях 650–710 нм (хлорофилл a) и 610–650 нм (протохлорофиллид) (метрика r_2 на рис. 3б, отношение интегралов C/B).

Для градуировки лидара были построены зависимости выбранных метрик от влажности образцов силоса. Из рис. 4 видно, что зависимости обеих метрик от влажности силоса разнонаправлены, но обе зависимости могут быть аппроксимированы линейными функциями (коэффициент корреляции $R^2 = 0.909$ и $R^2 = 0.966$ для метрик r_1 и r_2 соответственно). Точность измерения влажности с использованием метрик r_1 и r_2 определили как ширину доверительного интервала аппроксимации метрики, которая составила до $\pm 4.1\%$ и $\pm 4.6\%$ соответственно для метрик r_1 и r_2 . На практике удобнее измерять соотношение полос в спектре флуоресценции (метрика r_2), так как этот способ не требует корректировать интенсивность спектра с учетом расстояния до объекта.

Таким образом, в работе был продемонстрирован новый подход для реализации дистанционного измерения показателя содержания сухого вещества/влажности силоса различной стадии готовности по спектрам лазерно-индуцированной флуоресценции. Проведенные измерения показывают, что точность измерения относительной влажности кукурузного силоса составила $\pm 5\%$. Несомненно, что высокая скорость регистрации спектров (менее 1 с), отсутствие необходимости в пробоподготовке и независимость получаемых результатов от солнечной засветки открывают широкие перспективы для контроля качества корма животных.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта в форме субсидии, ориентированного на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития (соглашение 075-15-2020-774).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Driehuis F.* Silage and the safety and quality of dairy foods: A review // *Agric. Food Sci.* 2013. V. 22. № 1. P. 16–34.
2. *Никитин Е.А.* Техничко-технологический анализ систем приготовления кормовой смеси для КРС // *Инновации в сельском хозяйстве.* 2019. № 2. С. 53–61.
3. *Курсанов В.В. и др.* Методика оптимизации параметров машинного кормления крупного рогатого скота // *Агроинженерия.* 2021. Т. 1. № 1. С. 10–14.
4. *Kaňski J., Pyš J.B., Gôrka P.* Prediction of the nutritive value of wet whole-crop sorghum silage according to the INRA feeding system by near-infrared spectroscopy // *J. Anim. Feed Sci.* 2013. V. 22. № 4. P. 360–365.
5. *Блохин Ю.И.* Оперативное измерение влажности кормовых трав в полевых условиях // *Кормопроизводство.* 2018. № 6. С. 39–48.
6. *Rego G. et al.* A portable IoT NIR spectroscopic system to analyze the quality of dairy farm forage // *Comput. Electron. Agric.* 2020. V. 175. June. P. 105578.
7. *Lednev V.N. et al.* Quantifying Raman OH-band spectra for remote water temperature measurements // *Opt. Lett.* 2016. V. 41. № 20. P. 4625–4628.
8. *Churnside J.H.* Review of profiling oceanographic lidar // *Opt. Eng. International Society for Optics and Photonics.* 2013. V. 53. № 5. P. 51405.
9. *Pershin S.M.* Oil Spill Detection by Portable Micro-pulse Eye-Safe Backscattering Diode Lidar // *Phys. Vib.* 2001. V. 9. № 3. P. 192–196.
10. *Misra A.N., Misra M., Singh R.* Chlorophyll fluorescence in plant biology // *Biophysics / ed. Misra A.N. Rijeka: InTech Open Access Publisher,* 2012. P. 171–192.
11. *Гришин М.Я. и др.* Ультракомпактный флуоресцентный лидар на базе диодного лазера (405 нм, 150 мВт) для зондирования акваторий и подстилающей с квадрокоптера // *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки.* 2021. Т. 498. С. 3–6.
12. *Bunkin A.F. et al.* LIDAR Observation of the Bubble Trace in the Sea Surface Layer // *Phys. Wave Phenom.* 2010. V. 18. P. 230–235.
13. *Pershin S.M. et al.* Remote sensing of Arctic Fjords by Raman lidar: heat transfer screening by layer of glacier's relict water // *Phys. Wave Phenom.* 2012. V. 20. № 3. P. 212–222.
14. *Mysliwa-Kurczel B. et al.* Fluorescence Lifetimes of Protochlorophyllide in Plants with Different Proportions of Short-wavelength and Long-wavelength Protochlorophyllide Spectral Forms // *Photochem. Photobiol. Wiley Online Library.* 2003. V. 78. № 2. P. 205–212.
15. *Pedrós R. et al.* Chlorophyll fluorescence emission spectrum inside a leaf // *Photochem. Photobiol. Sci.* 2008. V. 7. № 4. P. 498–502.

LIDAR MONITORING OF MOISTURE IN BIOLOGICAL OBJECTS

M. Ya. Grishin^a, V. N. Lednev^a, P. A. Sdvizhenskii^a, D. Yu. Pavkin^b, E. A. Nikitin^b, A. F. Bunkin^a, and S. M. Pershin^a

^a*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS I.A. Shcherbakov

We demonstrate for the first time laser remote sensing of moisture in biological objects important in agriculture. The sensing was performed by a fluorescence lidar developed in Prokhorov General Physics Institute. The lidar was based on a pulsed solid state laser (527 nm, 5 ns, 1 kHz, 200 uJ) and a spectrometer equipped with a gated intensified CCD camera. Laser induced fluorescence spectra were acquired for plant biological objects of different moisture level. Sample drying was accompanied by a degradation of biological pigments which led to non-uniform growth of different spectral bands intensity in the fluorescence spectrum. We demonstrate that chlorophyll a (680 nm) and protochlorophyllide (630 nm) spectral bands ratio correlates well with the moisture of maize silage so it can be used as a metric of silage moisture for online measurements during cattle food production.

Keywords: lidar, fluorescence, remote sensing, express control, silage moisture