

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.3.709-718>

УДК 631.363:535.372



Обоснование использования фотолюминесцентного метода для анализа качества сена

© 2026. М. В. Беляков ✉, Е. А. Никитин, И. Ю. Ефременков

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Российская Федерация

В работе изучали оптические свойства лугового и люцернового сена различных фракций и класса. Цель исследований – выявление класса качества сена по оптическим свойствам при фотолюминесцентной идентификации. Спектральные характеристики возбуждения и люминесценции получены на спектрофлуориметре CM2203. Измеряли спектры возбуждения в диапазоне длин волн 230–600 нм и спектры фотолюминесценции при возбуждении 362 нм, 424 нм, 684 нм. Рассчитаны интегральная поглощательная способность и потоки фотолюминесценции, а также статистические параметры. Все спектры имеют правостороннюю асимметрию, за исключением люцернового сена, и выраженную плосковершинность. Установлено, что при возбуждении 684 нм люцерновое сено люминесцирует сильнее, чем луговое, а при возбуждении 424 нм – наоборот. Различие в интегральных потоках фотолюминесценции для разных видов сена составляет 1,5–3,9 раза, для разных классов качества – 3,7–19,3 раза. В результате проведения исследований выявлены информативные длины волн возбуждения для идентификации сортности сена. Методику определения количества сена 1-го класса в луговом разнотравном сене можно реализовать через анализ отношения потоков Φ_{362}/Φ_{424} , а методику объективной идентификации более высокобелкового люцернового сена – на анализе отношения потоков Φ_{424}/Φ_{684} . Ценность полученных результатов заключается в формировании теоретической основы для производства аналитических приборов, используемых в сельском хозяйстве для диагностики кормов на более дешевой и малоразмерной электронной компонентной базе. Аппаратную реализацию можно осуществить, используя в качестве источников излучения монохромные светодиоды, а в качестве приемников излучения – фотодиоды.

Ключевые слова: компоненты сена, неразрушающие методы контроля, оптическое излучение, люминесцентная спектроскопия

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2025-0013).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Беляков М. В., Никитин Е. А., Ефременков И. Ю. Обоснование использования фотолюминесцентного метода для анализа качества сена. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(3):709–718.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.3.709-718>

Поступила: 08.04.2025

Доработана после рецензирования: 04.12.2025

Принята к публикации: 05.05.2026

Опубликована онлайн: 30.06.2026

The rationale for using the photoluminescent method for hay quality analysis

© 2026. Mikhail V. Belyakov ✉, Evgeny A. Nikitin, Igor Yu. Efremenko

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The optical properties of meadow and alfalfa hay of various fractions and classes were studied. The purpose of the research was to identify the quality hay class by optical properties in photoluminescent identification. The spectral characteristics of excitation and luminescence were obtained using a CM2203 spectrofluorometer. Excitation spectra in the wavelength range of 230–600 nm and photoluminescence spectra at excitation of 362 nm, 424 nm, 684 nm were measured. The integrated absorption capacity and photoluminescence fluxes, as well as statistical parameters were calculated. All spectra had right-sided asymmetry, with the exception of alfalfa hay, and pronounced flatness. It has been established that alfalfa hay vibrates more strongly at 684 nm than meadow hay, and vice versa at 424 nm. The difference in the integral photoluminescence fluxes for different types of hay is 1.5–3.9 times, for different quality classes – 3.7–19.3 times. As a result of the research, informative excitation wavelengths were revealed to identify the grade of hay. A method for determining the amount of 1st class hay in meadow mixed-grass hay can be implemented through the analysis of the flow ratio Φ_{362}/Φ_{424} , and a method for the objective

identification of higher-protein alfalfa hay – by analyzing the flow ratio Φ_{362}/Φ_{424} . The value of the results obtained lies in the formation of a theoretical basis for the production of analytical instruments used in agriculture for the diagnosis of feed on a cheaper and small electronic component base. The hardware implementation can be carried out using monochrome LEDs as radiation sources, and photodiodes as radiation receivers.

Keywords: hay components, non-destructive testing methods, optical radiation, luminescent spectroscopy

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2025-0013). The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Belyakov M. V., Nikitin E. A., Efremenko I. Y. The rationale for using the photoluminescent method for hay quality analysis. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(3):709–718. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.3.709-718>

Received: 08.04.2025

Revised: 04.12.2025

Accepted for publication: 05.05.2026

Published online: 30.06.2026

В кормлении крупного рогатого скота сено является неотъемлемой составляющей при формировании сбалансированного рациона для большинства технологических групп животных. Это основной источник грубого корма для жвачных животных [1].

Сено, независимо от ботанического состава входящих в него трав, является ключевым источником грубой клетчатки в рационе крупного рогатого скота, доля которой в сухом веществе сена составляет от 20 до 35 %. Грубая клетчатка способствует нормальному функционированию желудочно-кишечного тракта животных. В сене бобовых культур содержится сырого протеина от 10 до 16 % [2], в злаковых культурах – от 6 до 8 % [3].

Сено различных культур не только содержит необходимые химические элементы, но и является одним из наиболее эффективных механических стимуляторов развития рубца. У новорожденного теленка рубец существенно отличается от рубца взрослой особи и находится в недоразвитом состоянии, на его долю приходится около 34 % от общего объема желудка, а на долю сычуга – 66 % [4]. У взрослой коровы рубец занимает примерно 83 % от общего объема желудка, что говорит о существенных изменениях желудочно-кишечного тракта новорожденной особи [5].

Описанные выше изменения в перспективе определяют уровень раскрытия генетического потенциала взрослой особи, потому как развитие рубца напрямую влияет на усвояемость получаемых питательных веществ, на скорость набора живой массы и устойчивость к различным заболеваниям [6].

Если оценить влияние компонентов корма на уровень развития рубца новорожденного теленка, то существенную роль оказывают два типа корма: стартерный комбикорм, богатый белками, изготовленный на основе сои или её производных, который служит стимулятором развития бактериального фона [7], и качественное сено, выполняющее функцию механического стимулятора, предоставляемое в свободном доступе на протяжении 92 дней с момента рождения теленка [8].

Важно отметить, что качество предоставляемого сена влияет на течение обменных процессов не только телят, но и взрослых особей [9].

Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 55452-2021¹ по физико-химическим показателям регламентирует внешний вид, запах, цвет, содержание вредных и ядовитых растений, наличие посторонних примесей, содержание сырого протеина, сырой клетчатки, сырой золы, содержание сухого вещества, обменной энергии и подразделяет сырье на 3 класса качества по визуальным признакам:

- сено 1-го класса – содержит большое количество листьев, имеет преимущественно зелёную окраску, стебли мягкие и гибкие, растения сохраняют приятный аромат [10];

- сено 2-го класса – содержит меньшее количество листьев, преимущественно стебли трав, имеет различную цветность от зелёного до жёлто-зелёного или зелёно-бурого;

- сено 3-го класса – содержит сорные растения, как правило подвергалось многократной сушке и увлажнению ввиду внешнего воздействия и открытого хранения, имеет преимущественно бурый цвет.

¹ГОСТ Р 55452-2021. Сено и сенаж. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2021. 12 с.
URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/755/75598.pdf>

Чаще всего определение качества сена на животноводческих предприятиях осуществляется визуально, опираясь на субъективное мнение специалиста, избегая использования аналитических приборов [11, 12]. Однако с развитием оптических технологий появился ряд коммерческих и исследовательских приборов, которые определяют химический состав корма, но при этом не учитывают сортность и критические отклонения качества [13].

Например, скармливание животным сена 3-го класса, которое, зачастую, является непригодным для кормления, вызывает нарушение обменных процессов в организме, приводящих к снижению продуктивности и ухудшению здоровья. Как правило, следствием подобных фактов является ненадлежащее хранение сена или человеческий фактор при наличии альтернативной кормовой базы [14].

Для предотвращения попадания сена 3-го класса в рацион кормления животных предлагается исследование, направленное на формирование теоретических основ создания отечественной приборной базы.

Гипотеза настоящего исследования заключается в определении возможности использования люминесцентного метода для идентификации сортов сена и его фракционного состава.

Цель исследований – выявление класса качества сена по оптическим свойствам при фотолюминесцентной идентификации.

Научная новизна – теоретическая основа для производства аналитических приборов, используемых в сельском хозяйстве, включающая зависимость изменения спектров люминесценции сена с учетом его класса качества.

Материал и методы. Для проведения исследований использовали сено двух видов:

- сено люцерны, заготовленное на культурных полях;
- сено луговое в виде разнотравья, преимущественно состоящее из луговой тимopheевки, костреца безостого, овсяницы луговой, мятлика лугового.

Процесс пробоподготовки для проведения оптических измерений включал: измельчение каждого образца сена фракционным составом от 3 до 8 мм; сортировку фракций лугового сена в соответствии с ГОСТ Р 55452-2021² на 1-й, 2-й и 3-й классы; выполнение последующих оптических измерений.

Качественные параметры образцов определяли на инфракрасном анализаторе FOSS NIRS DS2500 (Дания). Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав сена и его фракций /
Table 1 – Chemical composition of hay and its fractions

Вид сена / Type of hay	Белок, % / Protein, %	Влага, % / Moisture, %	Жир, % / Fat, %	Клетчатка, % / Fiber, %	Зола, % / Ash, %	Крахмал, % / Starch, %
Люцерновое / Alfalfa	25,4±0,4	8,9±0,1	3,9±0,1	15,6±0,2	9,8±0,1	2,3±0,1
Луговое / Meadow	12,5±0,2	7,6±0,1	3,3±0,1	22,6±0,1	10,4±0,2	4,0±0,1
Луговое 1-го класса / 1st class meadow	13,3±0,2	6,5±0,1	3,7±0,1	20,3±0,18	9,8±0,2	7,2±0,8
Луговое 2-го класса / 2nd class meadow	6,4±0,2	4,7±0,2	2,7±0,2	22,7±0,3	7,1±0,2	13,3±1,2
Луговое 3-го класса / 3rd class meadow	11,2±0,1	7,1±0,4	4,9±0,1	22,2±0,1	11,6±0,1	12,1±0,3

Из данных таблицы 1 следует, что образец лугового сена 3-го класса демонстрирует более высокое содержание белка (11,2 %) по сравнению со 2-м (6,4 %). Полученный параметр может указывать на различный ботанический состав, а также наличие примесей, таких как сорные растения с иным пигментным составом.

Спектральные характеристики возбуждения и люминесценции были получены на лабораторной установке со спектрофлуори-

метром CM2203 и внешней камерой для образцов в соответствии с методикой [15]. В первую очередь измеряли спектры возбуждения при синхронном сканировании $\eta(\lambda)$ в диапазоне длин волн $\lambda = 230-600$ нм. Ширина щели монохроматора возбуждения и монохроматора регистрации для изучения образцов составляла 20 нм. Данный параметр выбран для получения максимальной интенсивности возбуждения и люминесценции. При этом определяли основные

²ГОСТ Р 55452-2021. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/755/75598.pdf>

максимумы возбуждения λ_v , на основании которых проводили измерения спектров люминесценции $\phi(\lambda)$. Было выполнено по 20 измерений каждого образца сена и его фракций. После этого проводили расчёт интегральной поглощательной способности H и потока фотолюминесценции Φ . В программном пакете Microcal Origin произведён расчёт статисти-

ческих параметров – математического ожидания M_λ , дисперсии σ^2 , асимметрии As и эксцесса Ex .

Результаты и их обсуждение. Проведены оптические измерения лугового сена и его фракций: сена 1, 2 и 3 классов, а также люцернового сена. Спектры возбуждения при синхронном сканировании представлены на рисунке 1.

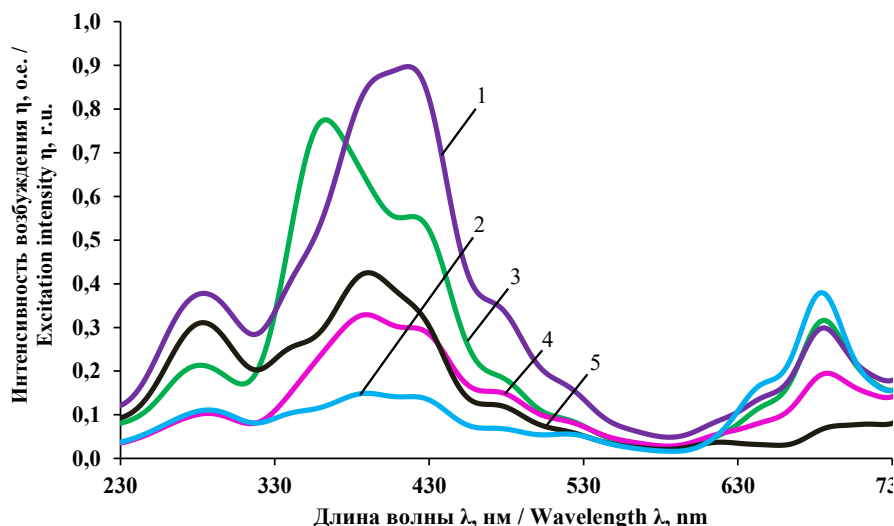


Рис. 1. Спектры возбуждения сена и его фракций разных классов качества при синхронном сканировании: 1 – сено луговое; 2 – сено люцерновое; 3 – сено 1-го класса; 4 – сено 2-го класса; 5 – сено 3-го класса /

Fig. 1. Excitation spectra of hay and its fractions of different classes quality during synchronous scanning: 1 – meadow hay; 2 – alfalfa hay; 3 – 1st class hay; 4 – 2nd class hay; 5 – 3rd class hay

Из данных рисунка 1 видно, что для всех исследованных образцов характерны максимумы на длинах волн 282 нм, 362 нм, 424 нм и 485 нм, известные ранее для других растительных объектов [16]. Вместе с тем отмечены новые максимумы в области 390 нм и в более длинноволновой области 684 нм [17]. Длинноволновый участок спектра ответственен за процессы возбуждения молекул хлорофилла и связанных с ним компонентов. Сравнительный анализ спектральных характеристик сена лугового, люцернового и сена 1-го класса в диапазоне 630–730 нм показывает сопоставимую интенсивность возбуждения. При переходе к образцам более низких классов наблюдается последовательное уменьшение величины поглощения в данном спектральном интервале.

Для лугового разнотравного сена поглощательная способность наибольшая как интегральная H , так и во всем спектральном диапазоне, кроме длинноволнового 630–730 нм, где наибольшее поглощение у люцернового сена. Если сравнивать между собой фракции лугового сена, то для образцов сена 1-го класса доминирующим максимумом является длина волны 362 нм, которая для всех остальных

образцов практически не проявляется. Сравнивая сено 2-го и 3-го классов, следует отметить, что сено 3-го класса поглощает лучше, кроме длинноволнового диапазона.

Интегральные параметры спектров возбуждения во всем исследованном диапазоне и на отдельных участках спектра для вышеупомянутых максимумов представлены в таблице 2.

Наименьшая относительная погрешность определения интегральной поглощательной способности H у сена 1-го класса (не превышает 8 %). Наибольшая погрешность – у сборного лугового сена в длинноволновых диапазонах возбуждения (16,3 % – 463–582 нм, 18,5 % – 600–742 нм) и во всем диапазоне (16,1 %). Данный факт можно объяснить существенно большей оптической неоднородностью лугового сена по сравнению с его фракциями. Для люцернового сена погрешность меньше, чем для лугового разнотравного, но выше, чем для его отдельных фракций.

На основе полученных длин волн максимумов возбуждения λ_v измерены спектральные характеристики фотолюминесценции образцов сена. Примеры для $\lambda_v = 362$ нм, 424 нм и 684 нм приведены на рисунках 2–4.

Таблица 2 – Интегральные параметры (поглощательная способность Н, о. е.) спектров возбуждения сена и его фракций разных классов качества /

Table 2 – Integral parameters (Absorption capacity Н, r. u.) of the excitation spectra of hay and its fractions of different classes quality

Вид сена / Type of hay	Спектральный диапазон, нм / Spectral range, nm					
	230–310	312–404	404–462	463–582	600–742	230–750
Люцерновое / Alfalfa	6,7±0,7	10,8±1,1	6,8±0,7	5,6±0,6	26,7±2,8	59,3±3,1
Луговое / Meadow	22,9±1,2	51,7±5,4	41,2±6,8	20,8±3,4	24,9±4,6	165,1±26,6
Луговое 1-го класса / 1st class meadow	12,9±0,7	51,7±0,8	25,8±1,6	11,2±0,9	22,9±1,7	127,3±4,1
Луговое 2-го класса / 2nd class meadow	6,3±0,7	20,1±0,9	14,5±1,6	10,1±0,8	16,9±0,9	70,4±2,7
Луговое 3-го класса / 3rd class meadow	17,9±1,3	28,4±1,8	15,4±1,4	7,6±0,8	7,6±0,9	79,0±2,1

Из анализа рисунка 2 следует, что ярко выраженная люминесценция наблюдается только у сена 1-го класса (на максимуме спектра в 4,5–

8,5 раза выше, чем у сена 2-го и 3-го классов). Эту длину волны возбуждения можно использовать для идентификации сена 1-го класса.

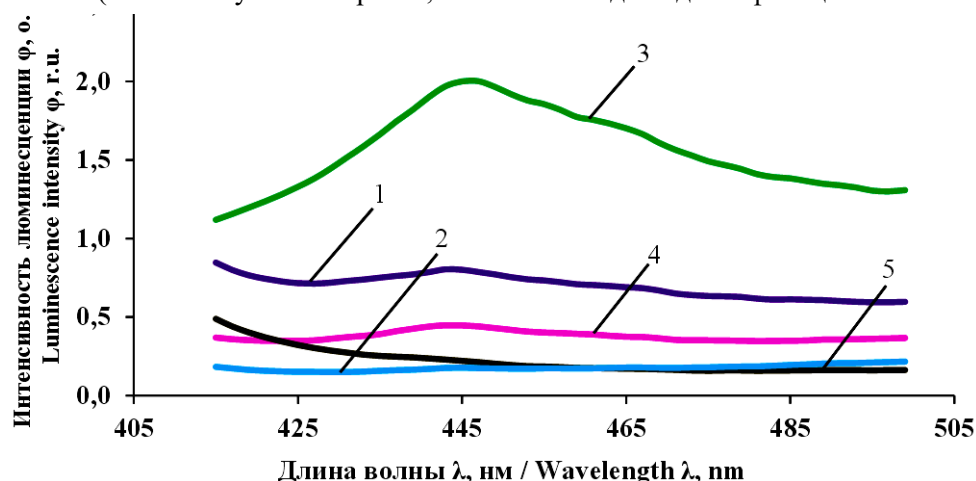


Рис. 2. Спектры люминесценции сена при $\lambda_{\text{в}} = 362$ нм: 1 – сено луговое; 2 – сено люцерновое; 3 – сено 1-го класса; 4 – сено 2-го класса; 5 – сено 3-го класса /

Fig. 2. Luminescence spectra of hay at $\lambda_{\text{e}} = 362$ nm: 1 – meadow hay; 2 – alfalfa hay; 3 – 1st class hay; 4 – 2nd class hay; 5 – 3rd class hay

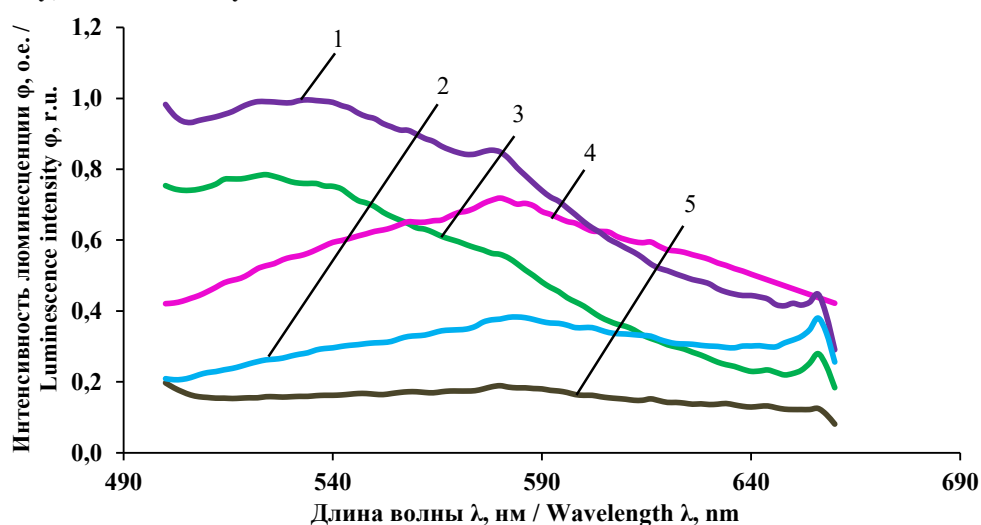


Рис. 3. Спектры люминесценции сена при $\lambda_{\text{в}} = 424$ нм: 1 – сено луговое; 2 – сено люцерновое; 3 – сено 1-го класса; 4 – сено 2-го класса; 5 – сено 3-го класса /

Fig. 3. Luminescence spectra of hay at $\lambda_{\text{e}} = 424$ nm: 1 – meadow hay; 2 – alfalfa hay; 3 – 1st class hay; 4 – 2nd class hay; 5 – 3rd class hay

На рисунке 3 видно, что люминесценция лугового сена выше по сравнению с люцерновым, несмотря на наличие фракции сена 3-го класса, имеющего крайне малую люминесценцию. Также наблюдается небольшой максимум на длине волны 660 нм для некоторых фракций сена. Данный максимум может быть связан с частичной люминесценцией тканей растений, например, самим хлорофиллом или продуктами его распада, что приводит к отно-

сительному усилению длинноволнового крыла спектра.

Для длинноволнового возбуждения, наоборот, люцерновое сено люминесцирует сильнее, чем луговое (на 68 % в максимуме спектра) и его отдельные фракции (в 1,32–57 раз).

Для сравнения были проведены измерения спектров отражения и поглощения в видимой и ближней инфракрасной области на спектральном анализаторе FOSS 2500. Результаты приведены на рисунке 5.

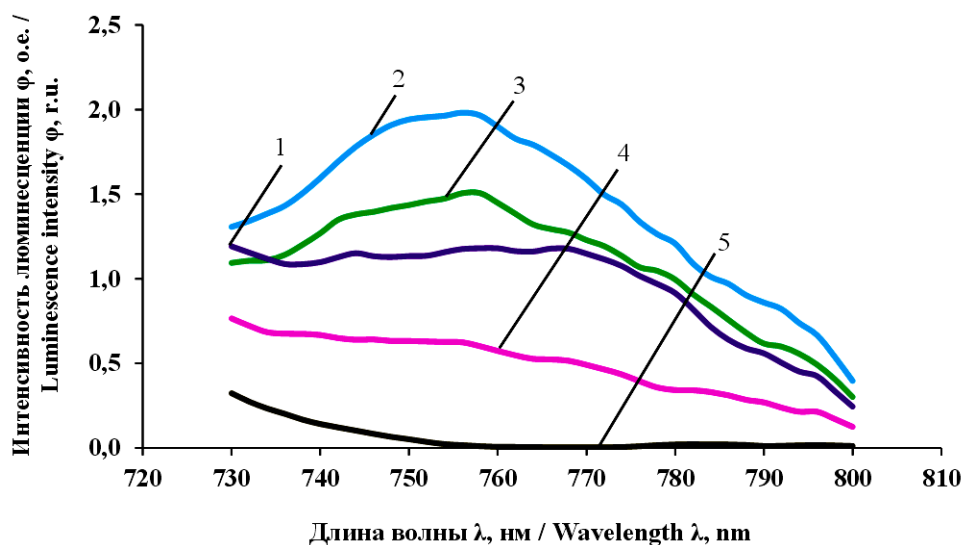


Рис. 4. Спектры люминесценции сена при $\lambda_{\text{в}} = 684$ нм: 1 – сено луговое; 2 – сено люцерновое; 3 – сено 1-го класса; 4 – сено 2-го класса; 5 – сено 3-го класса /

Fig. 4. Luminescence spectra of hay at $\lambda_{\text{e}} = 684$ nm: 1 – meadow hay; 2 – alfalfa hay; 3 – 1st class hay; 4 – 2nd class hay; 5 – 3rd class hay

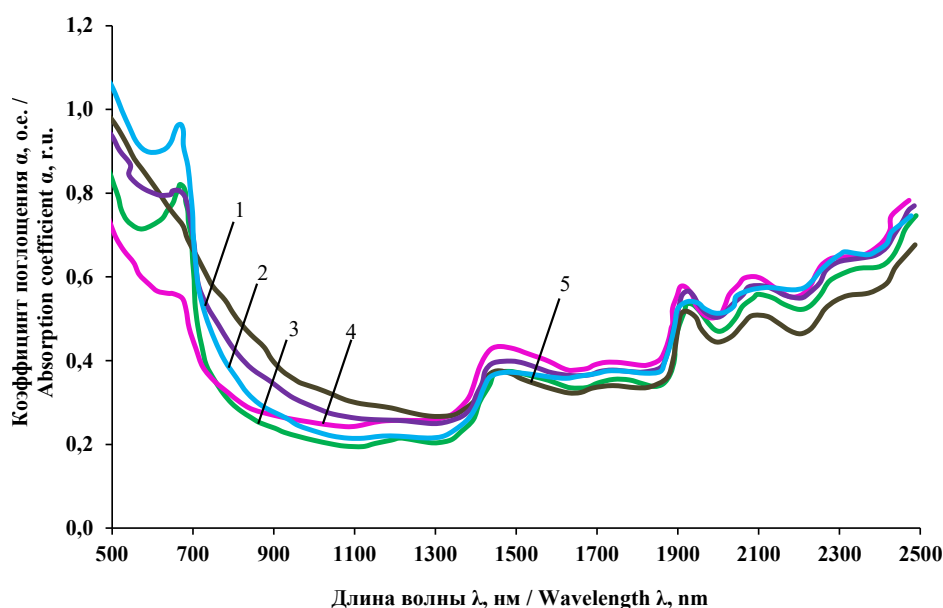


Рис. 5. Спектры поглощения в видимой и инфракрасной области: 1 – сено луговое; 2 – сено люцерновое; 3 – сено 1-го класса; 4 – сено 2-го класса; 5 – сено 3-го класса /

Fig. 5. Absorption spectra in the visible and infrared regions: 1 – meadow hay; 2 – alfalfa hay; 3 – 1st class hay; 4 – 2nd class hay; 5 – 3rd class hay

Различия в поглощении (отражении) не столь значительны по сравнению с люминесценцией и наиболее проявляются в более коротковолновой области менее 1100 нм. Максимальное отличие коэффициента поглощения α_λ для лугового и люцернового сена составляет примерно 15–18 %, для сена 1-го и 2-го классов – примерно 1,5 раза. Кроме того, во всем измеренном диапазоне не наблюдается системности

зависимостей $\alpha(\lambda)$ для разных видов сена, кривые постоянно «переплетаются», пересекаясь друг с другом, поэтому сложно выделить сравнительно большой спектральный диапазон для определения интегральных параметров.

Интегральные и статистические параметры полученных спектров фотолюминесценции представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Интегральные и статистические параметры спектров люминесценции различных образцов сена при различных длинах волн возбуждения /

Table 3 – Integral and statistical parameters of luminescence spectra of various hay samples at different excitation wavelengths

Вид сена / Type of hay	Поток Φ_λ , о. е. / Flow Φ_λ , r. u.	Математическое ожидание M_λ , нм / Mathematical expectation M_λ , nm	Дисперсия σ^2 / Variance σ^2	Асимметрия As / Asymmetry As	Экссесс Ex / Excess Ex
$\lambda_{\text{в}} = 362 \text{ нм} / \lambda_{\text{с}} = 362 \text{ нм}$					
Люцерновое / Alfalfa	15±1	460,0±0,2	613±2	-0,107±0,010	-1,193±0,003
Луговое / Meadow	59±11	455,0±2,0	584±25	0,113±0,053	-1,136±0,037
Луговое 1-го класса / 1st class meadow	132±1	457,0±0,1	527±1	0,082±0,001	-1,039±0,001
Луговое 2-го класса / 2nd class meadow	32±1	457,0±0,1	577±2	0,064±0,007	-1,137±0,006
Луговое 3-го класса / 3rd class meadow	19±1	450,0±0,1	638±4	0,366±0,013	-1,127±0,013
$\lambda_{\text{в}} = 424 \text{ нм} / \lambda_{\text{с}} = 424 \text{ нм}$					
Люцерновое / Alfalfa	49±1	584,0±0,2	1927±9	-0,062±0,001	-1,062±0,008
Луговое / Meadow	119±25	567,0±3,0	1860±103	0,335±0,12	-0,912±0,146
Луговое 1-го класса / 1st class meadow	83±1	562,0±0,2	1762±14	0,499±0,005	-0,718±0,015
Луговое 2-го класса / 2nd class meadow	92±1	580,0±0,1	1872±6	0,006±0,001	-1,052±0,004
Луговое 3-го класса / 3rd class meadow	25±1	576,0±0,4	1977±16	0,067±0,013	-1,091±0,012
$\lambda_{\text{в}} = 684 \text{ нм} / \lambda_{\text{с}} = 684 \text{ нм}$					
Люцерновое / Alfalfa	100±1	761,0±0,2	316±5	0,261±0,017	-0,858 ±0,034
Луговое / Meadow	67±10	760,0±2,0	329±14	0,182±0,152	-0,956±0,095
Луговое 1-го класса / 1st class meadow	77±1	760,0±0,4	319±9	0,240±0,025	-0,892±0,047
Луговое 2-го класса / 2nd class meadow	34±1	758,0±0,3	338±8	0,376±0,021	-0,866±0,041
Луговое 3-го класса / 3rd class meadow	4±1	744,0±0,2	273±48	1,924±0,279	-2,793±0,546

Данные таблицы 3 показывают, что луговое сено имеет существенно более высокую погрешность определения большинства параметров (до 21 % для потока фотолюминесценции, до 0,5 % для математического ожидания, до 83 % для асимметрии), что вызвано оптической неоднородностью. Также видно, что луговое сено имеет сильную люминесценцию

при $\lambda_{\text{в}} = 424 \text{ нм}$, а люцерновое – при $\lambda_{\text{в}} = 684 \text{ нм}$, и наоборот. Данное обстоятельство может быть применено для объективной идентификации люцернового сена, содержащего вдвое большее количество белка (см. табл. 1). Математическое ожидание M_λ и дисперсия σ^2 спектров фотолюминесценции для различных видов сена незначительно отличаются при каждой длине волны

возбуждения, что говорит о сходстве полученных графиков. Все спектры имеют правостороннюю асимметрию ($As > 0$), за исключением люцернового сена, у которого при $\lambda_v = 362$ нм и $\lambda_b = 424$ нм наблюдается небольшая правосторонняя асимметрия. Все графики имеют выраженную плосковершинность ($Ex < 0$). Достаточно сильное отличие эксцесса (в 2,92–3,25 раза) имеется у сена 3-го класса при возбуждении $\lambda_v = 684$ нм. Таким образом, статистические параметры сложно использовать для диагностики сена, и главным информативным параметром являются потоки фотолюминесценции Φ_λ при определенных значениях длины волны возбуждения λ_v .

Для улучшения чувствительности методики целесообразно использовать отношение потоков $\Phi_{\lambda 1} / \Phi_{\lambda 2}$, что позволит работать с относительными величинами, не зависящими от состояния конкретного образца и некоторых внешних факторов. Методику определения количества сена 1-го класса в луговом разнотравном сене можно реализовать через анализ отношения потоков Φ_{362} / Φ_{424} , которое для сена 1-го класса составляет 1,59, для сена 2-го класса – 0,35, для 3-го класса – 0,76.

Методику объективной идентификации более высокобелкового люцернового сена возможно создать на анализе отношения потоков Φ_{424} / Φ_{684} . Для лугового сена это отношение составляет 1,78, для люцернового – 0,49. Аппаратную реализацию обеих методик можно осуществить, используя в качестве источников излучения монохромные светодиоды, а в качестве приемников излучения – фотодиоды.

Разработанные методики формируют теоретическую основу для производства аналитических приборов, используемых в сельском

хозяйстве. Один из наиболее близких вариантов применения – это создание бортовых оптических систем диагностики сельскохозяйственных кормов по типу Dinamica – Generale Evo Nir (Италия), используемых в миксерах-кормораздатчиках с системой погрузки фрез-барабаном, которые позволяют оценивать качество корма в процессе приготовления. Также возможно использование в кормоуборочных комбайнах для диагностики качества собираемого урожая для силосования.

Выводы. 1. Основные максимумы возбуждения исследованных образцов расположены примерно на длинах волн 362 нм, 424 нм и 684 нм. Для лугового разнотравного сена поглощательная способность наибольшая. Для образцов сена 1-го класса доминирующим максимумом является длина волны 362 нм, которая у всех остальных образцов практически не проявляется.

2. Для длины волны возбуждения 684 нм люцерновое сено люминесцирует сильнее, чем луговое, а для возбуждения 424 нм – наоборот. Различие в интегральных потоках фотолюминесценции для разных видов сена составляет 1,5–3,9 раза, для разных классов качества – 3,7–19,3 раза. В то же время при отражательной инфракрасной спектроскопии максимальное отличие коэффициента поглощения для лугового и люцернового сена составляет не более 15–18 %, для сена 1-го и 2-го классов – не более 50 %.

3. По результатам исследований определены информативные спектральные диапазоны и соотношения потоков фотолюминесценции, которые будут использованы для последующей разработки аналитической приборной базы для объективного определения сена различных видов и классов.

Список литературы

1. Косолапова В., Степанова Г., Соломон М. Корма из люцерны для дойных коров. Животноводство России. 2022;(9):45–48. DOI: <https://doi.org/10.25701/ZZR.2022.09.09.001> EDN: EVQPGE
2. Райхман А. Я. Эффективность использования объемных кормов разных классов качества в рационах лактирующих коров. Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. 2017;(20-1):247–255. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32351365> EDN: YNDXLK
3. Райхман А. Я. Эффективность использования злаково-бобового сена и сенажа в рационах лактирующих коров. Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. 2017;(20-1):238–246. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32351364> EDN: YNDXLB
4. Kang R., Song J., Park J. K., Yun S., Lee J. H., Ahn J. S. et al. Impact of Forage Sources on Ruminal Bacteriome and Carcass Traits in Hanwoo Steers During the Late Fattening Stages. Microorganisms. 2024;12(10):2082. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms12102082>
5. Шпыгова В. М. Динамика морфометрических параметров эпителия рубца крупного рогатого скота в постнатальном онтогенезе. Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020;(4(52)):134–139. DOI: <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2020-4-134-139> EDN: YNOJCL

6. Боголюбова Н. В., Зайцев В. В., Шаламова С. А., Гизатуллин О. Ш., Сеитов М. С. Регуляция рубцового пищеварения у молочных коров. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019;(6(80)):214–216. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41675304> EDN: DZPXNM
7. Харитонов Е. Л., Галочкина В. П. Становление рубцового пищеварения у бычков в послемолочный период при скормливании комбикормов-стартеров разного состава. Проблемы биологии продуктивных животных. 2020;(2):99–109. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43835566> EDN: RXTFQS
8. Радчиков В., Цай В., Бесараб Г. Включаем сапропель в рационы для телят. Животноводство России. 2024;(7):33–34. DOI: <https://doi.org/10.25701/ZZR.2024.06.012> EDN: XUHSGB
9. Сидоров Ю. Н., Рогачёв Б. Г., Докина Н. Н., Павлов Л. Н. Влияние технологий заготовки сена на продуктивность мясного скота. Вестник мясного скотоводства. 2014;(3(86)):105–108. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22251803> EDN: SSYIRT
10. Тебердиев Д. М., Родионова А. В., Запывалов С. А. Изменение качества корма по укосам на долголетнем сенокосе. Адаптивное кормопроизводство. 2023;(1):30–38. DOI: <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2023-1-30-38> EDN: BIJRSA
11. Попов В. В. Насущные проблемы стандартизации и оценки качества и питательности кормов. Адаптивное кормопроизводство. 2021;(4):77–89. DOI: <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2021-4-77-89> EDN: RVTQMV
12. Попов В. В. Переосмысление парадигмы оценки качества кормов. Адаптивное кормопроизводство. 2020;(1):79–90. DOI: <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2020-1-79-90> EDN: PGPWHA
13. Burmistrov D. E., Ignatenko D. N., Lednev V. N., Gudkov S. V., Pavkin D. Y., Khakimov A. R. et al. Application of optical quality control technologies in the dairy industry: an overview. Photonics. 2021;8(12):551. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics8120551>
14. Федорова З. Л., Романенко Л. В. Требования к качеству основных кормов для коров с высокой продуктивностью (обзор). Генетика и разведение животных. 2016;(3):3–14. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28114152> EDN: XRFTVJ
15. Беляков М. В., Павкин Д. Ю., Никитин Е. А., Ефременков И. Ю. Обоснование выбора спектральных диапазонов фотолуминесцентного контроля состава и питательной ценности кормов. Техника и оборудование для села. 2023;(2(308)):31–36. DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-2-31-36> EDN: ZMQMNG
16. Matveeva T. A., Sarimov R. M., Persidskaya O. K., Andreevskaya V. M., Semenova N. A., Gudkov S. V. Application of fluorescence spectroscopy for early detection of fungal infection of winter wheat grains. AgriEngineering. 2024;6(3):3137–3158. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030179>
17. Беляков М. В., Никитин Е. А., Ефременков И. Ю. Эффективность фотолуминесцентного метода контроля гомогенности кормовых смесей в животноводстве. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022;16(3):55–61. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-3-55-61> EDN: LIWODN

References

1. Kosolapova V., Stepanova G., Solomon M. Feed from lucerne for milk cows. *Zhivotnovodstvo Rossii*. 2022;(9):45–48. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25701/ZZR.2022.09.09.001>
2. Raykhman A. Ya. The effectiveness of using bulk feed of different quality classes in the diets of lactating cows. *Aktualnie problemi intensivnogo razvitiya zhivotnovodstva*. 2017;(20-1):247–255. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32351365>
3. Raykhman A. Ya. The effectiveness of using cereal-legume hay and haylage in the diets of lactating cows. *Aktualnie problemi intensivnogo razvitiya zhivotnovodstva*. 2017;(20-1):238–246. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32351364>
4. Kang R., Song J., Park J. K., Yun S., Lee J. H., Ahn J. S. et al. Impact of Forage Sources on Ruminant Bacteriome and Carcass Traits in Hanwoo Steers During the Late Fattening Stages. *Microorganisms*. 2024;12(10):2082. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms12102082>
5. Shpigova V. M. Dynamics of morphometric parameters of cicatricial epithelium in cattle in postnatal ontogenesis. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2020;(4(52)):134–139. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2020-4-134-139>
6. Bogolyubova N. V., Zaytsev V. V., Shalamova S. A., Gizatullin O. Sh., Seitov M. S. Regulation of rumen digestion in dairy cows. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2019;(6(80)):214–216. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41675304>
7. Kharitonov E. L., Galochkina V. P. Formation of ruminal digestion in growing and fattening bulls at different levels of non-degradable and metabolizable protein in the diet. *Problemi biologii produktivnykh zhivotnykh* = Problems of Productive Animal Biology. 2020;(2):99–109. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43835566>
8. Radchikov V., Tsay V., Besarab G. Including sapropel in calves' diets. *Zhivotnovodstvo Rossii*. 2024;(7):33–34. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25701/ZZR.2024.06.012>

9. Sidorov Yu. N., Rogachyov B. G., Dokina N. N., Pavlov L. N. The impact of hay harvesting technologies on the productivity of beef cattle. *Vestnik myasnogo skotovodstva* = The Herald of Beef Cattle Breeding. 2014;(3(86)):105–108. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22251803>
10. Teberdiev D. M., Rodionova A. V., Zapivalov S. A. Change in the feed quality by mowing on a long-term hayfield. *Adaptivnoe kormoproizvodstvo* = Adaptive fodder production. 2023;(1):30–38. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2023-1-30-38>
11. Popov V. V. Essential problems of fodder quality evaluation and standardization. *Adaptivnoe kormoproizvodstvo* = Adaptive fodder production. 2021;(4):77–89. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2021-4-77-89>
12. Popov V. V. Rethinking of fodder quality evaluation paradigm. *Adaptivnoe kormoproizvodstvo* = Adaptive fodder production. 2020;(1):79–90. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2020-1-79-90>
13. Burmistrov D. E., Ignatenko D. N., Lednev V. N., Gudkov S. V., Pavkin D. Y., Khakimov A. R. et al. Application of optical quality control technologies in the dairy industry: an overview. *Photonics*. 2021;8(12):551. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics8120551>
14. Fedorova Z. L., Romanenko L. V. Fodder requirements for cows with high milk productivity (overview). *Genetika i razvedenie zhivotnikh* = Genetics and breeding of animals. 2016;(3):3–14. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28114152>
15. Belyakov M. V., Pavkin D. Yu., Nikitin E. A., Efremenkova I. Yu. Substantiation of the choice of special ranges for photoluminescent control of the composition and nutritional value of forages. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2023;(2(308)):31–36. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-2-31-36>
16. Matveeva T. A., Sarimov R. M., Persidskaya O. K., Andreevskaya V. M., Semenova N. A., Gudkov S. V. Application of fluorescence spectroscopy for early detection of fungal infection of winter wheat grains. *AgriEngineering*. 2024;6(3):3137–3158. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030179>
17. Belyakov M. V., Nikitin E. A., Efremenkova I. Yu. Efficiency of the photoluminescent method for monitoring the homogeneity of feed mixtures in animal husbandry. *Selskokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2022;16(3):55–61. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-3-55-61>

Вклад авторов: все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Сведения об авторах

✉ **Беляков Михаил Владимирович**, доктор техн. наук, главный научный сотрудник отдела механизации и автоматизации процессов в животноводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, e-mail: bmw20100@mail.ru

Никитин Евгений Александрович, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник отдела механизации и автоматизации процессов в животноводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

Ефременков Игорь Юрьевич, младший научный сотрудник отдела механизации и автоматизации процессов в животноводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>

Author contributions: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Information about the authors

✉ **Mikhail V. Belyakov**, DSc in Engineering, chief researcher, the Department of Mechanization and Automation of Processes in Animal Husbandry, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-8042>, e-mail: bmw20100@mail.ru

Evgeny A. Nikitin, PhD in Engineering, senior researcher, the Department of Mechanization and Automation of Processes in Animal Husbandry, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutsky proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

Igor Yu. Efremenkova, junior researcher, the Department of Mechanization and Automation of Processes in Animal Husbandry, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutsky proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2302-9773>

✉ – Для контактов / Corresponding author