

Оригинальная научная статья

УДК 633.2:633.28:581.132.1:636.085.3

<https://doi.org/10.26897/2949-4710-2023-4-107-115>



**Содержание структурных углеводов и лигнина
в многолетних злаковых кормовых травах в зависимости от фазы роста
и цифровые инновации в анализе состава корма**

**Хатима Каримовна Худякова¹, Елена Викторовна Худякова²,
Марина Николаевна Степанцевич², Олег Алексеевич Моторин²,
Михаил Владиславович Журавлев², Михаил Сергеевич Никаноров²**

¹ Всероссийский институт кормов им. В.Р. Вильямса, Лобня, Россия;

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Елена Викторовна Худякова, evhudyakova@rgau-mcha.ru

Аннотация

Статья посвящена изучению содержания углеводов клеточных стенок: нейтрально-детергентной клетчатки (НДК), кислотно-детергентной клетчатки (КДК), кислотно-детергентного лигнина (КДЛ) в злаковых травах – в зависимости от фаз вегетации. По мере смены фаз вегетации выявлено увеличение всех фракций клеточных стенок. Содержание кислотно-детергентной клетчатки, нейтрально-детергентной клетчатки и кислотно-детергентного лигнина (% в сухом веществе) в злаковых травах (кострец безостый, овсяница луговая, тимофеевка луговая) составляет до начала колошения 31-32, 50-55, 4-6; в фазу колошения – 32-37 и 55-65, 5-6; в цветение – 40-45, 70-72, 7-9 соответственно. По мере роста трав одновременно с накоплением клеточных стенок происходит изменение их состава. Возрастание доли нейтрально-детергентной клетчатки происходит главным образом за счет увеличения доли целлюлозы и снижения доли гемицеллюлоз, что согласуется с более высокой переваримостью трав в ранние фазы роста. Связь между сырой клетчаткой и кислотно-детергентной клетчаткой по результатам исследования оказалась более тесной ($n = 64$, $s = 2,4\%$, $r = 0,93$), чем между сырой клетчаткой и нейтрально-детергентной клетчаткой ($n = 64$, $s = 4,4\%$, $r = 0,87$). Поскольку состав трав в течение вегетации меняется ежедневно, целесообразно определять их состав как можно более оперативно. Поскольку химические методы занимают много времени, то для решения этой задачи может быть использован экспресс-метод на основе инфракрасного анализатора. Экспресс-метод предполагает после операции размалывания пробы последовательное выполнение таких операций, как калибровка анализатора, помещение пробы в анализатор и анализ проб с помощью анализатора, то есть также является достаточно длительным. Для получения более оперативной информации (2 ч) сегодня все чаще используются цифровые технологии. Метод, основанный на цифровых технологиях, предполагает последовательное выполнение следующих операций: запуск БПЛА; исследование посевов; передача мультиспектральных данных на сервер; обработка информации и расчет содержания сырой клетчатки.

Ключевые слова

многолетние злаковые кормовые травы, фазы роста, сырая клетчатка, кислотно-детергентная клетчатка, нейтрально-детергентная клетчатка, кислотно-детергентный лигнин, цифровые инновации в кормопроизводстве

Для цитирования

Худякова Х.К., Худякова Е.В., Степанцевич М.А., Моторин О.А., Журавлев М.В., Никаноров М.С. Содержание структурных углеводов и лигнина в многолетних злаковых кормовых травах в зависимости от фазы роста и цифровые инновации в анализе состава корма. *Тимирязевский биологический журнал*. 2023. № 1(4). С. 107-115. <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2023-4-107-115>

BIOCHEMISTRY

Original article

<https://doi.org/10.26897/2949-4710-2023-4-107-115>**Structural carbohydrate and lignin content of perennial cereal forage grasses depending on the growth phase and digital innovations in forage composition analysis****Hatima K. Khudyakova¹, Elena V. Khudyakova², Marina N. Stepantsevich²,
Oleg A. Motorin², Mikhail V. Jouravlev², Mikhail S. Nikanorov²**¹ Federal Williams Research Center of Forage Production & Agroecology, Lobnya, Moscow region, Russia,² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia**Corresponding author:** Elena V. Khudyakova evhudyakova@rgau-msha.ru**Abstract**

The article is devoted to the study of the content of cell wall carbohydrates – neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), acid detergent lignin (ADL) – in cereal forage grasses depending on the growth phases. An increase in all cell wall fractions was revealed as the growth phases changed. The content of acid detergent fiber, neutral-detergent fiber and acid detergent lignin (% in dry matter) in cereal forage grasses (awnless brome, meadow fescue, meadow timothy) is 31-32, 50-55, 4-6 before earing; in the earing phase – 32-37, 55-65, and 5-6; in the flowering phase – 40-45, 70-72, 7-9, respectively. As grasses grow, their composition changes with the accumulation of cell walls. The increase in the proportion of neutral detergent fiber occurs mainly due to an increase in the proportion of cellulose and a decrease in the proportion of hemicellulose, which is consistent with a higher digestibility of grasses in the early growth stages. According to the results of the study, the relationship between crude fiber and acid detergent fiber was closer ($n = 64$, $s = 2.4\%$, $r = 0.93$) than between crude fiber and neutral detergent fiber ($n = 64$, $s = 4.4\%$, $r = 0.87$). As the composition of grass changes daily during the growing season, it is advisable to determine its composition as soon as possible. As chemical methods are time-consuming, an express method based on an infrared analyzer can be used to solve this problem. The express method involves, after the grinding of the sample, sequential operations such as calibrating the analyzer, placing the sample in the analyzer and analyzing the samples with the analyzer. This means that this method is also quite time-consuming. To obtain information more quickly (two hours), digital technologies are now increasingly being used. The method based on digital technologies involves the sequential execution of the following operations: UAV launch, crop survey, transmission of multispectral data to the server, information processing and calculation of crude fiber content.

Keywords

perennial cereal forage grasses, growth phases, crude fiber, acid detergent fiber, neutral detergent fiber, acid detergent lignin, digital innovations in fodder production

For citation

Khudyakova H.K., Khudyakova E.V., Stepantsevich M.N., Motorin O.A., Jouravlev M.V., Nikanorov M.S. Structural carbohydrate and lignin content of perennial cereal forage grasses depending on the growth phase and digital innovations in forage composition analysis. *Timiryazev Biological Journal*. 2023;1(4):107-115. <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2023-4-107-115>

**Введение
Introduction**

Структурные углеводы (СУ) вместе с лигнином составляют клеточные стенки растений. К ним относят пектиновые вещества, гемицеллюлозы (ГЦ) и целлюлозу (Ц) [1]. Они вызывают интерес в связи с их значением в качестве источника энергии для жвачных животных, которые при помощи микрофлоры желудочно-кишечного тракта способны их частично переваривать. Следует отметить также физиологическую роль структурных веществ, заключающуюся в обеспечении нормального функционирования рубца (руминации) и моторной функции желудочно-кишечного тракта.

Структурные углеводы вместе с лигнином объединяют под общими названиями «волокно» (fiber)

или «клетчатка». Для определения содержания структурных углеводов обычно используются эмпирические методы. До середины XX в. уровень структурных веществ оценивался по содержанию сырой клетчатки (СК). Однако СК не представляет сумму непереваримых веществ, так же, как всю сумму структурных углеводов, часть которых, а также часть лигнина удаляются в процессе ее определения. В то же время знание всей суммы СУ и отдельных ее составляющих необходимы для более точного прогнозирования потребления корма и его переваримости. В связи с этим в 60-е гг. прошлого века Ван-Соестом был предложен метод анализа углеводов клеточных стенок кормов с помощью детергентов.

При обработке пробы корма нейтральным детергентом удаляется содержимое клетки,

и получающийся при этом остаток, называемый нейтрально-детергентной клетчаткой (НДК), представляет собой сумму целлюлозы (Ц), гемицеллюлоз (ГЦ) и кислотно-детергентного лигнина (КДЛ), а кислотный детергент растворяет и ГЦ, оставляя Ц и КДЛ – кислотно-детергентную клетчатку.

Начиная с конца прошлого века оценка кормов и рационов по содержанию в них детергентных форм клетчатки получила широкое распространение во всем мире. Методы анализа стандартизованы на международном и межгосударственном уровнях. В нашей стране также исследованы некоторые корма и кормовые травы по уровню КДК и НДК [2]. Например, в условиях Московской, Калужской, Оренбургской областей и Татарстана проведены исследования по изучению пищеварения у бычков и коров в зависимости от содержания структурных углеводов в рационе. При этом информации об уровнях КДК и НДК в разных видах кормовых трав в зависимости от фазы вегетации и других условий пока недостаточно. Наличие подобной информации позволило в стандарты на объемистые корма включить требования не только к СК, но и к КДК и НДК.

Цель работы – выявить зависимость содержания структурных углеводов и лигнина от фазы роста многолетних злаковых трав и возможность применения цифровых инноваций в анализе состава корма.

Методика исследований

Research method

Объектом исследований являются образцы кормовых трав, выращенных на дерново-подзолистой почве Центральной экспериментальной базы ВНИИ кормов имени В.Р. Вильямса. Скашивали кострец безостый (сорт Моршанский 760), овсяницу луговую (сорт ВИК 5), тимофеевку луговую (сорт ВИК 7) в фазы выхода в трубку, выметывания соцветий (колошения) и цветения. Почвы – дерново-подзолистые, среднесуглинистого состава с содержанием гумуса до 2%, подвижного фосфора и калия – 100 мг/1 кг почвы. Реакция почвенного раствора на контроле среднекислая pH – 5,0-5,5. Фазы роста трав определяли глазомерно в соответствии с ГОСТ по заготовке кормов (ГОСТ Р 55986-2022. Силос и сенаж. Технические условия; ГОСТ Р 55542-2021. Сено и сенаж. Общие технические условия).

Размер делянок составлял 50 м², повторность четырехкратная, второй год вегетации, первый укос.

Пробы кормов, высушенные при температуре 60-65°C в сушильном шкафу с принудительной вентиляцией, размалывали до прохода через сито с отверстиями 1 мм. Анализы на содержание НДК, КДК и КДЛ проводили с применением бумажных

фильтров вместо стеклянных^{1,2}. По этим показателям определяли гемицеллюлозы (ГЦ) по разнице между НДК и КДК, целлюлозы (Ц) – по разнице между КДК и КДЛ [3].

Статистическую обработку данных производили, применяя программу «Excel», с использованием «Statistica» 6.0.

Результаты и их обсуждение

Results and Discussion

По мере роста трав возрастает доля клеточных стенок во всех видах злаковых трав (табл. 1), хотя они несколько отличаются в зависимости от фазы роста уровнем накопления структурных веществ. Так, тимофеевка луговая уже в фазе выхода в трубку характеризовалась более высоким уровнем НДК, а в костреце безостом в фазы колошения и цветения он остается ниже, чем в двух других злаках. Виды трав также различаются по динамике накопления структурных веществ. Повышение НДК в сравнительно раннеспелой овсянице луговой происходило более высокими темпами, чем в костреце безостом, и в более позднеспелом виде – в тимофеевке луговой.

На основании анализа данных таблицы 1 можно заключить, что содержание КДК и НДК и КДЛ (% в сухом веществе) в злаковых травах составляет до начала колошения 31-32, 50-55, 4-6; в фазу колошения – 32-37 и 55-65, 5-6; в цветение – 40-45, 70-72, 7-9 соответственно.

По мере роста трав одновременно с накоплением клеточных стенок происходит изменение их состава (табл. 2). Возрастание НДК происходит главным образом за счет целлюлозы, и в меньшей степени – за счет лигнина. В связи с этим в составе НДК возрастает доля КДК, включающая в себя Ц и КДЛ. При этом наблюдается существенное снижение доли ГЦ. Так, НДК молодых злаков наполовину состоит из ГЦ. В дальнейшем доля ГЦ снижается, что особенно характерно для овсяницы луговой.

Факт накопления структурных углеводов по мере роста трав отмечается во многих исследованиях. Наиболее полно такие сведения содержатся в таблицах по составу кормов США и Канады [4], более поздние данные относятся к разным по климатическим условиям штатов США: Северной Дакоты, Вермонта, Висконсина, Колорадо. Имеются результаты исследований, проведенных

¹ ГОСТ ISO 13906-2013. Корма для животных. Определение содержания кислотно-детергентной клетчатки (КДК) и кислотно-детергентного лигнина. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105733>.

² ГОСТ ISO 16472-2014. Корма для животных. Определение содержания нейтрально-детергентной клетчатки с применением амилазы. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110768>.

Таблица 1

**Содержание структурных углеводов и лигнина в злаковых травах
в зависимости от фазы роста, % в сухом веществе**

Культуры и фазы роста	Виды структурных углеводов и лигнина				
	КДК	НДК	ГЦ	Ц	КДЛ
Кострец безостый - выход в трубку - колошение - цветение	26,97 32,09 40,04	45,24 52,50 65,24	18,27 20,41 25,20	21,50 25,77 32,51	5,47 6,32 7,53
Овсяница луговая - выход в трубку - колошение - цветение	26,50 36,01 45,76	42,70 62,54 72,00	16,20 26,53 26,24	22,24 29,69 37,90	4,26 6,32 7,86
Тимофеевка луговая - выход в трубку - колошение - цветение	30,08 36,40 42,70	48,84 59,02 72,20	18,76 22,62 29,50	23,14 28,60 32,08	6,94 7,80 10,62

Table 1

**Structural carbohydrate and lignin content of perennial cereal forage grasses depending
on the growth phase, % in dry matter**

Grasses and growth phases	Types of structural carbohydrates and lignin				
	ADF	NDF	HC	C	ADL
Awnless brome - shooting - earing - flowering	26.97 32.09 40.04	45.24 52.50 65.24	18.27 20.41 25.20	21.50 25.77 32.51	5.47 6.32 7.53
Meadow fescue - shooting - earing - flowering	26.50 36.01 45.76	42.70 62.54 72.00	16.20 26.53 26.24	22.24 29.69 37.90	4.26 6.32 7.86
Meadow timothy - shooting - earing - flowering	30.08 36.40 42.70	48.84 59.02 72.20	18.76 22.62 29.50	23.14 28.60 32.08	6.94 7.80 10.62

в некоторых других странах: например, в Финляндии, Сербии, Чехии и др. Обобщение этих данных в количественном отношении несколько затруднительно в связи с тем, что они получены при разных почвенно-климатических и погодных условиях. Кроме того, фазы вегетации зачастую трактуются и фиксируются по-разному, большей частью глазомерно.

Достижение оптимального для заготовки кормов КДК и НДК в травах не всегда можно установить по фазе роста трав, тем более фазы роста несколько растянуты во времени. Поэтому целесообразно сроки уборки трав определять по фактическим данным анализов, путем ежедневного отбора

проб на протяжении всего периода заготовки кормов, как это предложено в работе [5].

Как отмечалось выше, при анализе кормов по традиционной схеме содержание волокнистых веществ, степень переваримости корма оценивают по уровню СК. К настоящему времени накоплено множество данных по уровню СК. Поэтому представляет интерес изучение взаимосвязи между СК, КДК и НДК, чтобы иметь некоторую возможность судить об уровнях детергентных форм клетчатки, исходя из содержания СК. Корреляционный анализ (в выборку включены результаты анализа проб 5 видов злаковых трав в три фазы роста каждый, а также силоса и сенажа, приготовленных из этих

Таблица 2

Состав клеточных стенок, % от НДК

Культуры	Доля компонентов клеточных стенок, % от НДК			
	КДК	ГЦ	Ц	КДЛ
Кострец безостый				
- выход в трубку	52,6	47,4	41,6	11,1
- колошение	55,8	39,2	44,8	11,0
- цветение	61,4	38,6	49,8	11,5
Овсяница луговая				
- выход в трубку	43,6	56,4	34,5	9,1
- колошение	57,6	42,4	47,5	10,1
- цветение	63,6	36,4	52,6	10,9
Тимофеевка луговая				
- выход в трубку	51,1	48,9	39,3	11,8
- колошение	52,7	47,3	41,4	11,3
- цветение	59,1	40,8	44,4	14,7

Table 2

Cell wall composition in% of NDF

Grass	Proportion of cell wall components in% of NDF			
	ADF	HC	C	ADL
Awnless brome				
- shooting	52.6	47.4	41.6	11.1
- earing	55.8	39.2	44.8	11.0
- flowering	61.4	38.6	49.8	11.5
Meadow fescue				
- shooting	43.6	56.4	34.5	9.1
- earing	57.6	42.4	47.5	10.1
- flowering	63.6	36.4	52.6	10.9
Meadow timothy				
- shooting	51.1	48.9	39.3	11.8
- earing	52.7	47.3	41.4	11.3
- flowering	59.1	40.8	44.4	14.7

трав) показал достаточно тесную связь между СК и КДК (уравнение (1), рис. 1), а между СК и НДК она была менее тесной (уравнение (2), рис. 1), что, видимо, связано с составом этих видов клетчатки. СК и КДК состоят из одних и тех же соединений – целлюлозы и лигнина, хотя в количественном отношении различаются между собой, в то время как в НДК, кроме них, входят ГЦ:

$$\text{КДК} = 1,0764\text{СК} + 6,3265 \quad (n = 64, R^2 = 0,865, s = 2,43); \quad (1)$$

$$\text{НДК} = 1,5986\text{СК} + 7,9237 \quad (n = 64, R^2 = 0,757, s = 4,36). \quad (2)$$

Как известно, адекватность регрессионных моделей зависит от объема и состава выборки. Они

достаточно хорошо описывают зависимость для трав одного семейства, хотя и разной фазы роста в пределах одной почвенно-климатической зоны, но для трав разных семейств, выращенных в других условиях. Однако при большом объеме выборки, включающей в себя образцы трав, полученных в широком диапазоне условий их выращивания, появляется возможность разработки более универсальных уравнений. Например, в работе [6] допускается определение концентрации КДК в травах по уравнениям регрессии, полученным на основе большой выборки для злаковых трав (уравнение 3):

$$\text{КДК} = 6,89 + 0,5 \cdot \text{НДК}, \quad (n = 722, R^2 = 0,62, s = 3,1). \quad (3)$$

Определение состава кормов нужно производить чаще (в идеале – через 1-2 дня) для определения

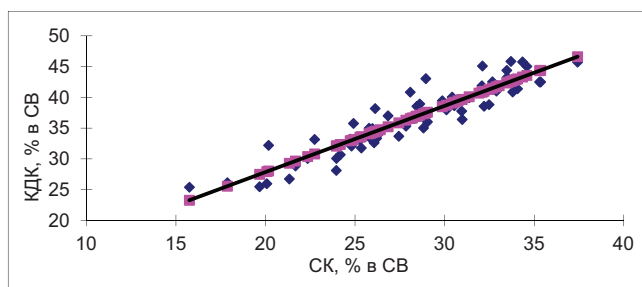


Рис. 1. Взаимосвязь между СК и КДК
Fig. 1. Relationship between CF and ADF

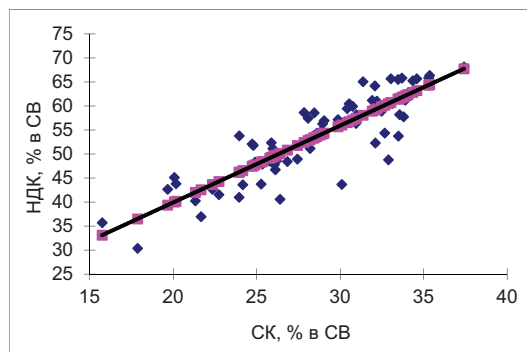


Рис. 2. Взаимосвязь между СК и НДК
(источник – исследования авторов)
Fig. 2. Relationship between CF and NDF
(source – authors' research)

оптимальных сроков заготовки кормов. Однако традиционные химические методы требуют много времени для измерений КДК и НДК. Работа производится в несколько этапов: сбор проб, сушка, измельчение и химический анализ. Технология проведения анализа состава кормов совершенствуется, и передовыми сегодня являются метод инфракрасного анализа [7] и др.

Авторы [8] предлагают определять содержание КДК и НДК с помощью инфракрасного излучения следующим образом: направлять на травостой инфракрасный луч в диапазоне от 40 до 2500 нм и измерять отражательную способность травостоя; одновременно на всех стадиях роста растения измерять содержание КДК и НДК химическим путем; затем составлять калибровочные уравнения, позволяющие впоследствии не проводить химический анализ.

В настоящее время в определении состава и качества кормов используются цифровые технологии [9-11], в том числе технологии дистанционного плана, основанные на использовании беспроводных сетей. Они являются составляющей технологии интернета вещей, все активнее применяемых сегодня в сельском хозяйстве, что во многом является следствием развития и удешевления в несколько раз технологий беспроводной связи. Авторы того же источника [8] предлагают для определения КДК и НДК БПЛА применять мультиспектральную камеру и использовать вегетационный индекс NDVI. Вегетативные индексы

растений – такие, как нормализованный разностный вегетативный индекс (NDVI), рассчитанный на основе данных спектральной отражательной способности листьев растений, использовались при оценке надземной вегетативной биомассы и качества. Это согласуется с нашими исследованиями, проведенными ранее, где предлагалось с помощью технологий дистанционного зондирования посевов определять содержание в растениях переваримого протеина через фиксацию содержания в них азота [2]. В этом случае скорость анализа существенно повышается, составляется на большой территории карта неоднородности полей.

Методика основана на применении БПЛА и мульти- или гиперспектральной камеры, фиксирующей отражение от поверхности листа растения солнечного света. Метод предполагает: формирование определенной эталонной площадки однородной поверхности рядом с проверяемым полем; установление границ нескольких контрольных площадок в поле с различной степенью густоты растений; осуществление аэрофотосъемки поля с БПЛА с получением мультиспектральных снимков. Далее измеряют на контрольных площадках содержание КДК и НДК в растениях с помощью химического или спектрального методов. Далее полученные результаты передаются в компьютер, где с помощью специальной обработки формируется мультиспектральный ортофотоплан диагностируемого поля. По сравнению со статическими полевыми станциями БПЛА обладают рядом таких преимуществ, как высокое качество собранных данных, высокое качество разрешения снимков, относительно низкая цена, возможность выбора и интеграции различных датчиков. Беспилотники оснащены различными современными технологиями – такими, как инфракрасные камеры, GPS и лазер.

Тем не менее применение цифровых технологий при повышенных затратах на покупку БПЛА и мультиспектральной камеры существенно экономит время, затраты труда и химических реактивов, позволяя оптимизировать время заготовки кормов, тем самым получать более высокие показатели кормоотдачи. Так, традиционный метод требует выполнения 12 трудовых операций и длится около 3 дней. Экспресс-метод требует выполнения 11 операций, и работа длится около дня. Цифровой метод предполагает выполнение 5 операций, которые выполняются в течение 2 ч. Кроме того, цифровой метод охватывает значительные площади (площадь 10 га анализируется за 30 мин).

Экспериментальные данные по цифровому методу пока не получены, эксперименты планируется провести в ближайшем будущем. Однако авторы уверены в высокой результативности предлагаемого метода, так как он использовался различными исследователями для решения схожих задач, что было отражено ими в научных статьях [12-15].

Таким образом, цифровые новации в кормопроизводстве, имеющиеся сегодня в арсенале исследователей, играют важную роль в науке и практике. Они позволяют существенно сократить время анализа кормов, оперативно принимать управленческие решения относительно технологий выращивания кормовых трав и технологий заготовки кормов.

Выводы Conclusions

Изучен состав структурных углеводов злаковых трав умеренно-холодного климата в зависимости от фазы роста. Приводятся уравнения связи между разными формами структурных углеводов.

Список источников

1. Bailey R.W. Structural carbohydrates. *Chemistry and biochemistry of herbage*. New York, «Academic Press»; 1973. Pp. 157-211.
2. Khudyakova E.V., Khudyakova H.K., Shitikova A.V., Savoskina O.A., Konstantinovich A.V. Information technologies for determination the optimal period of preparing fodder from perennial grasses. *Periodico Tche Quimica*. 2020;17(35):1044-1056. https://doi.org/10.52571/PTQ.v17.n35.2020.86_KHODYAKOVA_pgs_1044_1056.pdf
3. Van-Soest P.J., Robertson J.B. and Lewis B.A. Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *J. Dairy Sci.* 1991;74:3583-3597.
4. National Research Council. 1982. *United States-Canadian Tables of Feed Composition: Nutritional Data for United States and Canadian Feeds, Third Revision*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/1713>
5. Организационно-технологические требования при производстве молока на молочных комплексах промышленного типа: Постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 4 июня 2018 г. № 16. – Режим доступа: <https://brestplem.by/informatsiya/instruktsii/ooot.pdf>
6. National Research Council. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Seventh Revised Edition*, 2001. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9825>
7. Walelegne M., Meheret F., Derseh M.B., Dejene M., Asmare Y.T., Prasad K.V.S.V., Jones C.S., Dixon R.M. and Duncan A.J. Near-infrared reflectance spectroscopy using a portable instrument to measure the nutritive value of oilseed meals as livestock feed. *Front. Anim. Sci.* 2023;4:1203449. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1203449>
8. Lingjie Zeng, Chengci Chen. Using remote sensing to estimate forage biomass and nutrient contents at different growth stages. *Biomass and Bioenergy*. 2018;115:74-81. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.016>
9. Khudyakova E.V., Gorbachev M.S., Nifontova E.A. Improving the efficiency of agro-industrial complex

По мере роста кормовых трав в составе клеточных стенок повышается доля кислотно-детергентной клетчатки (целлюлозы и лигнина) и снижается содержание гемицеллюлозы.

Корреляционный анализ, проведенный с экспериментальными данными, показал, что между СК и НДК, а также между СК и КДК существует тесная связь: R^2 составляет соответственно 0,86 и 0,75.

Поскольку состав кормов из трав в период их заготовки нужно определять с периодичностью в 2-3 дня, в этих целях сегодня могут быть использованы цифровые технологии, основанные на применении БПЛА, дистанционном зондировании посевов. Это позволит сократить время проведения анализа с 3 дней до 2 ч, что обеспечит более высокую оперативность в принятии управленческих решений при заготовке кормов.

References

1. Bailey R.W. Structural carbohydrates. *Chemistry and biochemistry of herbage*. New York: "Academic Press", 1973:157-211.
2. Khudyakova E.V., Khudyakova H.K., Shitikova A.V., Savoskina O.A., Konstantinovich A.V. Information technologies for determination the optimal period of preparing fodder from perennial grasses. *Periodico Tche Quimica*. 2020;17(35):1044-1056. https://doi.org/10.52571/PTQ.v17.n35.2020.86_KHODYAKOVA_pgs_1044_1056.pdf
3. Van-Soest P.J., Robertson J.B., Lewis B.A. Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *J. Dairy Sci.* 1991;74:3583-3597.
4. National Research Council. 1982. *United States-Canadian Tables of Feed Composition: Nutritional Data for United States and Canadian Feeds, Third Revision*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/1713>
5. Organizational and technological requirements for milk production at industrial-type dairy complexes: Resolution of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus No. 16 of 4 June 2018. (In Russ.) URL: <https://brestplem.by/informatsiya/instruktsii/ooot.pdf>
6. National Research Council. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Seventh Revised Edition*. Washington, DC: The National Academies Press, 2001. <https://doi.org/10.17226/9825>
7. Walelegne M., Meheret F., Derseh M.B., Dejene M., Asmare Y.T., Prasad K.V.S.V., Jones C.S., Dixon R.M., Duncan A.J. Near-infrared reflectance spectroscopy using a portable instrument to measure the nutritive value of oilseed meals as livestock feed. *Front. Anim. Sci.* 2023;4:1203449. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1203449>
8. Lingjie Zeng, Chengci Chen. Using remote sensing to estimate forage biomass and nutrient contents at different growth stages. *Biomass and Bioenergy*. 2018;115:74-81. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.016>
9. Khudyakova E.V., Gorbachev M.S., Nifontova E.A. Improving the efficiency of agro-industrial complex

management based on digitalization and system approach. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2018;274:012079. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/274/1/012079>

10. Khudyakova E., Nikanorov M., Bystrenina I., Cherevatova T., Sycheva I. Forecasting the production of gross output in agricultural sector of the ryazan oblast. *Estudios de Economía Aplicada*. 2021. T. 39, № 6. <https://doi.org/10.25115/eea.v39i6.5171>

11. Slasya I., Khudyakova E., Vasenev I., Nikanorov M., Fomina T. Improvement of the Integral Indicator of the Ecological and Toxicological Assessment of the Danger of the Use of Pesticides in Agriculture and the Creation of an Information System for Their Monitoring. *Agriculture (Switzerland)*. 2023;13(9):1797. <https://doi.org/10.3390/agricultural13091797>

12. Худякова Е.В., Кушнарёва М.Н., Горбачёв М.И. Определение оптимальных сроков заготовки кормов на основе использования технологий «Интернета вещей» (IoT). *Главный агроном*. 2022;2.

13. Yao X., Zhu Y., Tian Y. et al. Exploring hyperspectral bands and estimation indices for leaf nitrogen accumulation in wheat. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2010;12:89-100. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.11.008>

14. Zhang X., Liu F., He Y., Gong X. Detecting macronutrients content and distribution in oilseed rape leaves based on hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering*. 2013;115:56-65. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.02.007>

15. Трухачев В.И., Сычёва О.В., Стародубцева Г.П. и др. Технология молочного фиточая «Стевилакт». *Пищевая индустрия*. 2012;2:18-20.

Сведения об авторах

Хатима Каримовна Худякова, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»; 141055, Россия, Московская область, г. Лобня, Научный городок, корпус 1; e-mail: hatima40@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2738-3438>

Елена Викторовна Худякова, д-р экон. наук, профессор кафедры прикладной информатики, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: evhudyakova@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7875-074X>

Марина Николаевна Степанцевич, канд. экон. наук, доцент кафедры прикладной информатики, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: stepmn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7125-3027>

Олег Алексеевич Моторин, канд. полит. наук, доцент кафедры прикладной информатики, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: o.motorin@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0123-2068>

management based on digitalization and system approach. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2018;274:012079. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/274/1/012079>

10. Khudyakova E., Nikanorov M., Bystrenina I., Cherevatova T., Sycheva I. Forecasting the production of gross output in agricultural sector of the ryazan oblast. *Estudios de Economía Aplicada*. 2021;39;6. <https://doi.org/10.25115/eea.v39i6.5171>

11. Slasya I., Khudyakova E., Vasenev I., Nikanorov M., Fomina T. Improvement of the Integral Indicator of the Ecological and Toxicological Assessment of the Danger of the Use of Pesticides in Agriculture and the Creation of an Information System for Their Monitoring. *Agriculture (Switzerland)*. 2023;13(9):1797. <https://doi.org/10.3390/agricultural13091797>

12. Khudyakova E.V., Kushnareva M.N., Gorbachev M.I. Determining the optimal timing of feed procurement based on the use of Internet of Things (IoT) technologies. *Glavniy agronom*. 2022;2. (In Russ.)

13. Yao X., Zhu Y., Tian Y. et al. Exploring hyperspectral bands and estimation indices for leaf nitrogen accumulation in wheat. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2010;12:89-100. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.11.008>

14. Zhang X., Liu F., He Y., Gong X. Detecting macronutrients content and distribution in oilseed rape leaves based on hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering*. 2013;115:56-65. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.02.007>

15. Trukhachev V.I., Sycheva O.V., Starodubtseva G.P., Veselova M.V. Technology of milk herbal tea “Stevilakt”. *Pishchevaya industriya*. 2012;2:18-20. (In Russ.)

Information about the authors

Hatima K. Khudyakova, CSc (Agr), Leading Research Associate, Federal Williams Research Center of Forage Production & Agroecology (Building 1, Scientific town, Lobnya, Moscow region, 141055, Russian Federation); e-mail: hatima40@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2738-3438>

Elena V. Khudyakova, DSc (Econ), Professor, Professor at the Department of Applied Information Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation); e-mail: evhudyakova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7875-074X>

Marina N. Stepantsevich, CSc (Econ), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Information Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation); e-mail: stepancevich@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7125-3027>

Oleg A. Motorin, CSc (Polit), Associate Professor at the Department of Applied Information Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation); e-mail: o.motorin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0123-2068>

Михаил Владиславович Журавлев, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной информатики, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: jouravl@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0226-980X>

Михаил Сергеевич Никаноров, старший преподаватель кафедры прикладной информатики, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: nikanorov@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7487-6273>

Статья поступила в редакцию 07.11.2023
Одобрена после рецензирования 03.12.2023
Принята к публикации 13.12.2023

Mikhail V. Jouravlev, CSc (Phys-math), Associate Professor at the Department of Applied Information Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation); e-mail: jouravl@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0226-980X>

Mikhail S. Nikanorov, Senior Lecturer at the Department of Applied Information Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation); e-mail: nikanorov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7487-6273>

The article was submitted to the editorial office 07 Nov 2023
Approved after reviewing 03 Dec 2023
Accepted for publication 13 Dec 2023