

## ФИЗИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ

Оригинальная научная статья  
УДК 633.31:577.114:004.8  
https://doi.org/10.26897/2949-4710-2024-2-3-14-24



### Оценка уровня растворимых углеводов в люцерне и применение технологий искусственного интеллекта

Хатима Каримовна Худякова<sup>1</sup>, Елена Викторовна Худякова<sup>2</sup>, Марина Николаевна Степанцевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное научное учреждение кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса, Московская область, Россия

<sup>2</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

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

#### Аннотация

Целью исследований является оценка уровня растворимых в нейтральном детергенте углеводов люцерны (*Medicago varia* Mart.) при возделывании ее в условиях Центрального Нечерноземья на дерново-подзолистой почве, а также обзор новых методов (искусственные нейронные сети) в решении данного вопроса. Содержание нейтрального детергента углеводов определяли по формуле: 100 – сырой протеин – нейтрально-детергентная клетчатка – сырая зола – сырой жир. Используя данные о содержании компонентов формулы, определяли уровни нейтрального детергента углеводов у четырех сортов люцерны в следующие фазы роста: ветвление, начало бутонизации, бутонизация и цветение. Концентрация нейтрального детергента углеводов уменьшалась по мере созревания растений и составила (% на сухое вещество в среднем для всех сортов): в ветвлении – 39,4; в начале бутонизации – 35,5; в бутонизации – 32,7; в цветении – 26,6 соответственно. В более прохладных и влажных условиях вегетации отмечается меньшее содержание сырого протеина и НДК, в связи с чем уровень нейтрального детергента углеводов был выше и составил 36,1% в фазу бутонизации. Существует тесная отрицательная корреляция между нейтральным детергентом углеводов и содержанием суммы нейтрально-детергентная клетчатка + сырой протеин и одной нейтрально-детергентной клетчатки. Коэффициенты корреляции составили 0,96 и 0,90 соответственно. Из составных частей нейтрального детергента углеводов определяли уровни неструктурных углеводов и их долю. Оба эти показателя снижались по мере вегетации растений. Методы определения протеина, клетчатки и сырой золы могут быть основаны на применении инфракрасных анализаторов. При этом важно построить адекватные калибровочные модели, которые носят нелинейный характер. К передовым методам построения калибровочных моделей можно отнести методы искусственного интеллекта, а именно искусственные нейронные сети. Такая методология может быть использована, например, для рекомендации оптимального периода проведения укоса трав.

#### Ключевые слова

углеводы, растворимые в нейтральном детергенте, сырой протеин, нейтрально-детергентная клетчатка, фазы вегетации, неструктурные углеводы, искусственные нейронные сети

#### Для цитирования:

Худякова Х.К., Худякова Е.В., Степанцевич М.Н. Оценка уровня растворимых углеводов в люцерне и применение технологий искусственного интеллекта // *Тимирязевский биологический журнал*. 2024. Т. 2, № 3. С. 14-24. https://doi.org/10.26897/2949-4710-2024-2-3-14-24

## PLANT PHYSIOLOGY

Original article  
https://doi.org/10.26897/2949-4710-2024-2-3-14-24



### Assessment of soluble carbohydrate levels in alfalfa and application of artificial intelligence technologies

Hatima K. Khudyakova, Elena V. Khudyakova, Marina N. Stepansevich

<sup>1</sup> Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology, Moscow region, Russia

<sup>2</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agriculture Academy, Moscow, Russia

**Corresponding author:** Elena V. Khudyakova; evhudyakova@rgau-msha.ru

#### Abstract

The aim of this study is to assess the level of neutral detergent soluble carbohydrates of alfalfa (*Medicago varia* Mart.) when it is cultivated in the Central Non-Chernozem region on soddy-podzolic soil, as well as to review new methods (artificial

neural networks) in solving this issue. The content of neutral detergent soluble carbohydrates (NDSC) was determined by the formula:  $100 - \text{crude protein (CP)} - \text{neutral detergent fiber (NDF)} - \text{crude ash (CA)} - \text{crude fat (CF)}$ . Data on the content of the components of the formula were used to determine levels of NDSC in four alfalfa varieties at the following growth phases: branching, beginning of budding, budding and flowering. Concentrations of NDSC decreased as the plants matured and were (% per dry matter on average for all varieties): at branching – 39.4, at the beginning of budding – 35.5, at budding – 32.7, and at flowering – 26.6. In cooler and more humid conditions of vegetation, the content of CP and NDF was lower, and therefore the level of NDSC was higher and amounted to 36.1% in the budding phase. There is a strong negative correlation between NDSC and the contents of the sum of NDF + CP and NDF alone. The correlation coefficients were 0.96 and 0.90, respectively. Among the components of neutral detergent carbohydrates, the content of non-structural carbohydrates and their proportion were determined. Both indicators decreased with the growth of the plants. Methods for the determination of protein, fiber and crude ash can be based on the use of infrared analyzers. It is important to build appropriate calibration models that are non-linear in nature. Advanced methods for building calibration models include artificial intelligence methods, namely artificial neural networks. Such a methodology can be used, for example, to recommend the optimal period of grass cutting.

### Keywords

neutral detergent soluble carbohydrates, crude protein, neutral detergent fiber, vegetative phases, non-structural carbohydrates, artificial neural networks

### Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

### For citation

Khudyakova H.K., Khudyakova E.V., Stepansevich M.N. Assessment of soluble carbohydrate levels in alfalfa and application of artificial intelligence technologies. *Timiryazev Biological Journal*. 2024;2(3):14-24. <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2024-2-3-14-24>

## Введение Introduction

Люцерна является ценной кормовой культурой в связи не только с высоким содержанием протеина, минеральных веществ, витаминов и др., но и с особенностями углеводных фракций, которые ее выделяют из других кормовых трав. Она характеризуется высоким содержанием углеводов, растворимых в нейтральном детергенте (НДРУ). Эту фракцию стали определять и изучать ее роль в питании животных после внедрения в практику оценки качества кормов схемы анализа по Ван-Соесту, одним из основных элементов которой является нейтрально-детергентная клетчатка. Нейтральный детергент делит корм на две фракции: содержимое клетки и клеточные стенки, состоящие в основном из структурных полисахаридов и лигнина. Неструктурные углеводы (НСУ), к которым относятся сахар и крахмал, входят в содержимое клетки. Количество НСУ для многих кормов не является равным углеводам, удаляемым при обработке пробы раствором нейтрального детергента, так как в нейтральном детергенте, кроме НСУ, растворяются фруктаны и некоторые соединения, содержащиеся в клеточной стенке: пектины, галактаны,  $\beta$ -глюканы. Сумму этих соединений называют клетчаткой, растворимой в нейтральном детергенте (НДРК). Таким образом, фракция углеводов, растворимых в нейтральном детергенте (НДРУ), представляет сумму НСУ, НДРК и органические кислоты ОК (рис.). Эти термины являются взаимозаменяемыми, хотя в литературе НДРУ иногда называют как НСУ [1].

Органические кислоты (ОК) не являются углеводами, но их включают в НДРУ для удобства классификации. К ним относятся кислоты, образующиеся при консервировании трав (уксусная, пропионовая, масляная и молочная). Органические кислоты содержатся также в свежей траве и сене (яблочная, малеиновая, лимонная, куиновая и др.). В траве люцерны, например, их может быть от 4 до 15% в сухом веществе [2]. Эти кислоты обуславливают буферную емкость травы.

Так же, как и БЭВ в схеме оценки кормов по Веенде, НДРУ представляет остаток сухого вещества корма за вычетом суммы сырых питательных веществ, где вместо сырой клетчатки используется нейтрально-детергентная клетчатка. Их можно назвать БЭВ по Ван-Соесту, и они определяются по формуле:

$$\text{НДРУ} = 100 - (\text{СП} + \text{СЖ} + \text{СЗ} + \text{НДК}), \quad (1)$$

где СП, СЖ, СЗ, НДК – содержание сырого протеина, сырого жира, сырой золы и нейтрально-детергентной клетчатки, % в сухом веществе, соответственно. Но более правильным является уравнение (2), в котором устраняется двукратное вычитание СП, содержащегося в НДК:

$$\text{НДРУ} = 100 - [(\text{СП} + \text{СЖ} + \text{СЗ} + (\text{НДК} - \text{НДНП}))]. \quad (2)$$

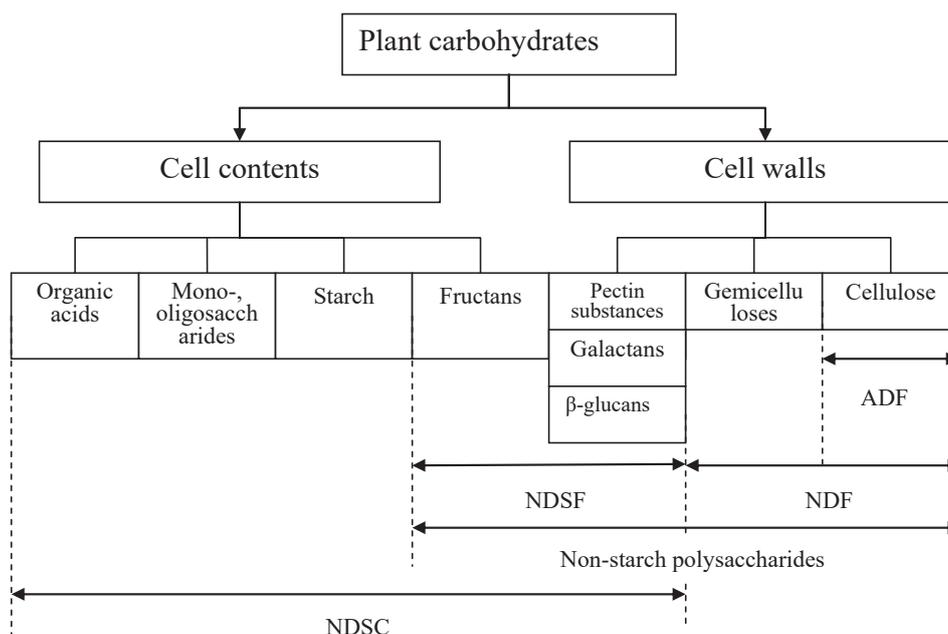
НДРК можно вычислить, соответственно, по формуле:

$$\text{НДРК} = \text{НДРУ} - (\text{НСУ} + \text{ОК}). \quad (3)$$



Примечание. КДК – кислотно-детергентная клетчатка; НДК – нейтрально-детергентная клетчатка; НДРК – клетчатка, растворимая в нейтральном детергенте; НД – углеводы, растворимые в нейтральном детергенте.

**Рис.** Фракции углеводов растений по М.В. Халл [3]



Note. ADF – acid detergent fibre; NDF – neutral detergent fibre; NDSF – neutral detergent soluble fibre; NDSC – neutral detergent soluble carbohydrates.

**Fig.** Fractions of plant carbohydrates by M.B. Hall [3]

Ошибки определения каждого из компонентов уравнения аккумулируются в получаемом по разнице результате, однако принят такой способ определения НДРУ при их нормировании в рационах кормления скота.

НДРУ являются ценной фракцией в кормлении коров, так как легкопереваримы, играют важную составляющую в энергетическом балансе животных и могут составлять до 45% сухого вещества в рационе коров. НДРУ нормируют в рационах, и их уровень связывают с содержанием НДК.

Среди кормовых трав люцерна характеризуется высоким содержанием НДРУ в пределах 30-40% в сухом веществе в зависимости от фазы роста и других факторов [4]. Часто корма из люцерны оценивают по содержанию составной части НДРУ-НДРК, которую называют растворимой клетчаткой. Высокий уровень НДРК люцерны связан с содержанием в ней пектиновых веществ в пределах 5-10%, ценность которых заключается в том, что при их ферментации в рубце образуется более слабая по сравнению с молочной уксусная

кислота. Возможно, этим объясняется благоприятное действие добавления в рацион с высоким содержанием крахмала кормов, богатых пектиновыми веществами, в связи с их противодействием возникновению ацидоза у животных [5].

С целью определения составных частей НДРУ, различающихся по их значению в кормовом отношении, разработан метод их фракционирования. Метод позволяет выделить следующие фракции: 1) моно-, олигосахариды; 2) органические кислоты; 3) крахмал; 4) НДРК. Метод был упрощен для определения наиболее ценной фракции – НДРК [6], поскольку анализ по определению сахара и крахмала является общепринятым, при определении качества кормов. Однако метод определения НДРК сложен для применения при проведении рутинных анализов. Но при необходимости оценить большое количество образцов для селекционных целей предлагается использование метода ближней инфракрасной спектроскопии с применением соответствующих приборов. В этом случае калибровочные уравнения разрабатываются для определения НДРК.

Калибровочные уравнения могут разрабатываться с помощью различных методов. Это могут быть множественная линейная регрессия (MLR), метод частных наименьших квадратов (PLS), локальный метод, метод искусственных нейронных сетей (ANN) и метод регрессии Хонигса (HR).

**Цель исследований:** поскольку в данное время отсутствует характеристика сортов люцерны отечественной селекции по уровню НДРУ в условиях Нечерноземной зоны, с учетом значимости этой фракции углеводов в кормлении скота, целью исследований является оценка травы люцерны районированных сортов по уровню углеводов, растворимых в нейтральном детергенте, в зависимости от фазы вегетации растений и содержания в них сырого протеина и НДК.

## Методика исследований Research methods

Объектом исследований являются образцы травы люцерны изменчивой пестрогибридного сортотипа селекции ВНИИ кормов имени В.Р. Вильямса следующих сортов: Луговая 67, Селена, Вега 87, Пастбищная 88. Пробы с первого укоса отбирали на делянках селекционного севооборота лаборатории селекции люцерны ВНИИ кормов: в 2015 г. – в фазу бутонизации, в 2021 г. – в фазу ветвления, начала бутонизации, бутонизации и цветения. Пробы всех сортов отбирались одновременно. На выбранной делянке по диагонали выделяли несколько площадок, с которых отбирали точечные пробы, которые затем перемешивали для получения объединенной пробы. Чтобы определить соотношение между листьями и стеблями, часть объединенной пробы разделяли на листья и стебли.

Годы исследований отличались между собой по температуре воздуха и количеству осадков в течение вегетации растений в первом укосе. Растения, отобранные в фазу бутонизации, формировались в основном в мае и в первой декаде июня, который в 2021 г. отличался от 2015 г. более высокой температурой воздуха при недостатке осадков.

Отобранные образцы листьев и стеблей сушили при температуре 60-65 °С в сушильном шкафу с принудительной вентиляцией. Определяли их массу и вычисляли соотношение листьев и стеблей. Высушенные пробы размалывали до прохода через сито с отверстиями 1 мм и использовали их для анализов. Нейтрально-детергентную клетчатку определяли кипячением навески пробы в течение 1 ч в растворе нейтрального детергента, содержащего сернистокислый натрий, без применения термостабильной амилазы; сырой протеин (общий азот  $\times 6,25$ ) – по макро-Кьельдалю, сырой жир – экстракцией диэтиловым эфиром методом обезжиренного остатка, сырую золу – озолением в муфельной печи при температуре 525 °С в течение 4 ч. Водорастворимые углеводы (ВРУ) экстрагировали водой при температуре 60 °С в течение 2 ч. В остатке определяли крахмал ферментативным методом. В экстрактах ВРУ и крахмала определяли их редуцирующую силу по методу Бертрана. Содержание НДРУ вычисляли по уравнению (1) в листьях и стеблях, а также в целом растении, используя данные соотношения между ними. В 2015 г. анализировали пробы целых растений.

## Результаты и их обсуждение Results and discussion

Изучение состава сортов люцерны показало (табл. 1), что по мере вегетации растений люцерны всех сортов наблюдаются существенные изменения в содержании наиболее значимых по величине членов уравнения (1): снижение содержания сырого протеина и накопление структурных веществ.

При этом имеет место неравномерная скорость протекания этих процессов в течение роста растений. В среднем для всех сортов наблюдается значительное ежесуточное увеличение НДК между фазами ветвления и начала бутонизации, что связано с усиленным ростом стеблей за этот период и возрастанием их доли в сухом веществе (табл. 2). Во время развития цветочных органов от начала бутонизации до бутонизации несколько падает скорость снижения СП, но накопление НДК остается на том же уровне.

Значительное ухудшение качества травы происходит в период между бутонизацией и цветением в связи с резким возрастанием скорости накопления структурных веществ ввиду продолжающегося роста стеблей и повышения концентрации НДК

Таблица 1

**Состав сортов люцерны в зависимости от фаз вегетации в 2021 г., % в с.в.**

Сорт	Фазы вегетации							
	ветвление		начало бутонизации		бутонизация		начало цветения	
	СП	НДК	СП	НДК	СП	НДК	СП	НДК
Пастбищная 88	24,50	24,87	21,00	35,41	18,88	40,08	13,95	46,90
Селена	24,78	24,16	22,43	30,73	19,90	36,42	15,12	47,04
Вега 87	25,39	26,14	18,81	33,83	17,92	38,41	14,61	45,81
Луговая 67	25,32	24,84	22,84	28,56	17,69	38,28	15,72	50,26
Среднее	25,00	24,57	21,27	32,13	18,60	38,30	14,85	47,50
Стандартная ошибка среднего	0,55	2,04	1,68	3,07	0,75	1,50	0,55	1,92

Table 1

**Contents of CP and NDF in alfalfa varieties depending on the growth phases in 2021 (% in dry weight (in d.w.))**

Variety	Growth phases							
	branching		beginning of budding		budding		beginning of flowering	
	CP	NDF	CP	NDF	CP	NDF	CP	NDF
Pastbishchnaya 88	24.50	24.87	21.00	35.41	18.88	40.08	13.95	46.90
Selena	4.78	24.16	22.43	30.73	19.90	36.42	15.12	47.04
Vega 87	25.39	26.14	18.81	33.83	17.92	38.41	14.61	45.81
Lugovaya 67	25.32	24.84	22.84	28.56	17.69	38.28	15.72	50.26
Average	25.00	24.57	21.27	32.13	18.60	38.30	14.85	47.50
Standard error of the average	0.55	2.04	1.68	3.07	0.75	1.50	0.55	1.92

Таблица 2

**Доля листьев в сухом веществе, %**

Сорт	Фазы вегетации			
	ветвление	начало бутонизации	бутонизация	начало цветения
Пастбищная 88	60,5	52,5	46,0	41,9
Селена	62,9	51,2	47,5	42,9
Вега 87	56,2	44,2	44,9	41,4
Луговая 67	62,9	52,6	45,6	40,3

Table 2

**Proportion of leaves in d.w., %**

Variety	Growth phases			
	branching	beginning of budding	budding	beginning of flowering
Pastbishchnaya 88	60.5	52.5	46.0	41.9
Selena	62.9	51.2	47.5	42.9
Vega 87	56.2	44.2	44.9	41.4
Lugovaya 67	62.9	52.6	45.6	40.3

как в листьях, так и (особенно) в стеблях, то есть их одревеснения и лигнификации. В течение этого же времени также возрастает скорость снижения СП. Сорты несколько различались от общей картины по динамике изменения их состава по фазам вегетации. Так, у сорта Вега в отличие от других сортов имеет место резкое снижение СП от ветвления до начала бутонизации, так как в течение этого периода у данного сорта происходили усиленный рост стеблей и увеличение их доли в сухом веществе, в связи с чем наблюдалась высокая скорость накопления НДК. По-другому происходило развитие сорта Луговая: резкое снижение СП произошло позже, с одновременным усилением накопления структурных веществ, которое продолжалось до цветения. По-видимому, в связи с разными темпами роста и развития различных сортов не отмечено стабильных различий между ними по фазам в течение вегетации растений.

Используя уровни СП, НДК, СЗ и СЖ, по формуле (1) рассчитали содержание НДРУ в зависимости от фаз вегетации (табл. 3). Максимальный уровень НДРУ во всех сортах отмечен в фазе ветвления. По мере роста происходит его значительное снижение: в среднем по всем сортам от 39,44% в фазе ветвления до 26,64% в цветении. Однако по некоторым данным, не всегда по мере

вегетации растений наблюдается снижение НДРУ. Так, в условиях Сербии содержание НДРУ оставалось на одном уровне (25%) независимо от фазы вегетации, при этом изучались сравнительно поздние фазы: полная бутонизация, начало цветения и полное цветение [7].

Снижение характерно для всех сортов, хотя в различной степени. Так, у сорта Вега в целом растении почти не изменилось содержание НДРУ от начала бутонизации до бутонизации, но оно было самым низким в фазе ветвления, когда этот сорт характеризовался более высокой долей стеблей в отличие от других сортов.

Оценивая уровни НДРУ, полученные в условиях исследований, следует отметить, что они достаточно высокие. Так, НДРУ в фазе бутонизации в среднем по сортам превышает 30%, в то время как люцерновое сено, содержащее 31,5% НДРУ, считается «превосходным» [4]. Близкое к этому значение получено в условиях Чехии, где в траве люцерны в конце фазы бутонизации содержалось НДРУ 29,9% при НДК 37,8 и СП 17,7% соответственно [1]. При более высоком уровне НДК (52,1%) и более низком СП (15,1%) НДРУ составили лишь 22,2. По данным таблицы состава кормов по результатам анализов, проведенных в университете штата Флорида, в люцерновом сене найдено 31% НДРУ [6].

Таблица 3

**Содержание углеводов, растворимых в нейтральном детергенте в сортах люцерны, в зависимости от фаз вегетации**

Сорта	Фаза вегетации			
	ветвление	начало бутонизации	бутонизация	цветение
Пастбищная 88	39,58	32,89	29,97	29,73
Селена	40,92	36,14	32,84	27,22
Вега 87	37,62	36,06	35,83	28,54
Луговая 67	39,65	36,94	33,27	21,08
Среднее	39,44	35,51	32,73	26,64
Стандартная ошибка среднего	1,36	1,79	2,03	3,55

Table 3

**Content of neutral detergent soluble carbohydrates in alfalfa varieties depending on the growth phases**

Variety	Growth phase			
	branching	beginning of budding	budding	beginning of flowering
Pastbishchnaya 88	39.58	32.89	29.97	29.73
Selena	40.92	36.14	32.84	27.22
Vega 87	37.62	36.06	35.83	28.54
Lugovaya 67	39.65	36.94	33.27	21.08
Average	39.44	35.51	32.73	26.64
Standard error of the average	1.36	1.79	2.03	3.55

Изучение взаимосвязи уровня НДРУ и содержания наиболее значительных по величине членов уравнения (1) показало (табл. 4), что наиболее тесно НДРУ связаны с суммой СП и НДК, меньше – с СП. Изучение взаимосвязи между уровнем НДРУ и содержанием наиболее значительных по величине членов уравнения (1) показало (табл.) тесную связь с НДК, что связано с более высокой скоростью накопления НДК по мере роста растений, чем со снижением СП. Об отрицательной корреляции между НДРК и НДК сообщается и в другом исследовании [6].

Снижение НДРУ по мере вегетации растений связано с уменьшением доли листьев за этот период, так как в листьях содержание НДРУ выше, чем в стеблях, причем в них в отличие от стеблей отсутствует их значительное снижение по мере роста растений (табл. 5). Максимальное содержание НДРУ отмечено в фазу ветвления, когда по этому показателю листья и стебли отличались незначительно – на 1,71%, а в фазу бутонизации эта разница достигла 9,25%. В литературе также отмечается, что в молодых листьях люцерны содержалось 41,1% НДРУ, а в стеблях зрелых растений – 22%, что является близким к полученным нами результатам.

Как отмечалось, НДРУ состоит из ОК, НСУ и НДРК. Из них нами определялись содержание НСУ в сухом веществе и их доля в НДРУ (табл. 6). Уровни НСУ в сухом веществе в среднем по всем

сортам снижались по мере роста растений. В таком же порядке изменялась их доля в НДРУ, за исключением фазы цветения, когда у сорта Луговая в связи с повышенным накоплением НДК получено низкое содержание НДРУ, в то же время низкая концентрация НСУ.

Различия между сортами по уровню НСУ по фазам были нестабильными. Так, в раннюю фазу более высокой концентрацией отличался сорт Селена, в начале бутонизации и в цветении – Пастбищный 88, в бутонизацию – Вега 87. Доля НСУ в НДРУ в среднем по сортам колебалась от 25,6 до 30,5%. О доле других составных частей в НДРУ можно судить по данным литературы. Так, в сене из люцерны при уровне НДРУ 31% доли НСУ, ОК и НДРК в них составили 35,5; 19,4; 45,1% соответственно [6]. В молодых листьях люцерны эти показатели равнялись 32,3; 21,6; 46,1%, а в зрелых стеблях – 32,8; 22,9; 44,3%. Судя по этим данным, доля отдельных составных частей НДРУ остается приблизительно на одном уровне, при этом НДРК представляет собой наиболее значительную фракцию.

Для приготовления кормов (сена, силоса) рекомендуется использовать траву люцерны в фазу бутонизации. В связи с этим еще в 2015 г. проводилась оценка состава тех же сортов люцерны в эту фазу (табл. 7), что дало возможность сравнить данные за два года. Несмотря на то, что в среднем

Таблица 4

**Уравнения взаимосвязи НДРУ с показателями состава люцерны**

Уравнение	Параметры уравнений		
	n	r	s
$y = 89,91 - 1,01 x_1$	16	0.96	1.03
$y = 53,68 - 0,56 x_2$	16	0,90	1,72
$y = 11,79 + 1,10 x_3$	16	0.71	2,86

\* $y$  – предсказуемое значение НДРУ, %;  $x_1$  – сумма СП и НДК, %;  $x_2$  – НДК, %;  $x_3$  – СП, %;  $n$  – количество переменных;  $r$  – коэффициент корреляции;  $s$  – стандартная ошибка уравнения.

Table 4

**Equations of the relationship of NDSC with alfalfa composition indicators**

Equation	Parameters of equations		
	n	r	s
$y = 89.91 - 1.01 x_1$	16	0.96	1.03
$y = 53.68 - 0.56 x_2$	16	0.90	1.72
$y = 11.79 + 1.10 x_3$	16	0.71	2.86

**Notes.** \*  $y$  – the predictable value of NDSC, %;  $x_1$  – the sum of CP and NDF, %;  $x_2$  – NDF, %;  $x_3$  – CP, %;  $n$  – the number of variables;  $r$  – the correlation coefficient;  $s$  – the standard error of the equation.

**Содержание НДРУ в листьях и стеблях сортов люцерны, % в с.в.**

Сорт	Фазы вегетации							
	Ветвление		Начало бутонизации		Бутонизация		Начало цветения	
	листья	стебли	листья	стебли	листья	стебли	листья	стебли
Пастбищная 88	41,19	39,75	38,17	30,39	34,94	28,41	38,99	25,08
Селена	43,51	40,28	40,76	35,84	39,90	30,44	33,95	25,37
Vega 87	38,42	37,95	43,54	33,76	42,47	30,07	40,48	26,85
Луговая 67	42,5	40,77	37,83	35,79	39,08	30,49	30,19	19,11
Среднее	41,40	39,69	40,06	33,94	39,1	29,85	35,90	24,10
Стандартная ошибка среднего	2,20	1,23	2,62	2,56	3,09	0,98	4,97	3,42

Table 5

**Contents of NDSC in leaves and stems of alfalfa varieties depending on the growth phases (% in d.w.)**

Variety	Growth phase							
	branching		beginning of budding		budding		beginning of flowering	
	leaves	stems	leaves	stems	leaves	stems	leaves	stems
Pastbishchnaya 88	41.19	39.75	38.17	30.39	34.94	28.41	38.99	25.08
Selena	43.51	40.28	40.76	35.84	39.90	30.44	33.95	25.37
Vega 87	38.42	37.95	43.54	33.76	42.47	30.07	40.48	26.85
Lugovaya 67	42.5	40.77	37.83	35.79	39.08	30.49	30.19	19.11
Average	41.40	39.69	40.06	33.94	39.1	29.85	35.90	24.10
Standard error of the average	2.20	1.23	2.62	2.56	3.09	0.98	4.97	3.42

по сортам показатели содержания СП и НДК по годам близки между собой, все же следует отметить, что в 2021 г. содержание СП и НДК было несколько выше, чем 2015 г. Это, по-видимому, связано с особенностями погодных условий. По данным метеостанции, температура воздуха в мае 2021 г. была выше при недостатке влаги. В 2015 г. погода была более холодной, с избыточным увлажнением в мае. В условиях вегетации указанного года люцерна характеризуется более высоким уровнем НДРУ и НСУ: в среднем по сортам 36,08 и 12,08% соответственно. В 2021 г. эти показатели были несколько ниже: 32,85 и 8,43%, что связано с более высоким содержанием СП и НДК.

Описанный выше метод основывался на химическом анализе состава кормов. Однако в последнее время цифровые технологии все больше используются в анализе качества кормов. К таким методам можно отнести, например, использование приборов, основанных на определении состава и качества кормов методами NIRS-анализа,

при котором используются компьютерная техника и соответствующее программное обеспечение. В определении формы листьев, их массы и ее соотношения с массой растения могут использоваться технологии компьютерного зрения и технологии искусственных нейронных сетей.

Калибровочные модели, как правило, несут нелинейный характер зависимости между спектрами и свойствами корма скота. Для разработки модели могут использоваться методы искусственных нейронных сетей (ANN), метод SVM, нелинейные PSL-модели либо локальная регрессия. При применении локальной регрессии общая модель строится на основе множества линейных моделей, для моделирования выбираются похожие образцы. Метод ANN способен строить адекватные модели при отсутствии линейных связей. Однако данный метод имеет такие минусы, как необходимость большого количества данных, длительное время для подбора весов. Поэтому здесь также может быть использован такой метод искусственного интеллекта, как

Таблица 6

**Содержание НСУ в сухом веществе и их доля в НДРУ в различные фазы роста растений, %**

Сорта	Фазы вегетации							
	ветвление		начало бутонизации		бутонизация		начало цветения	
	% в с.в.	доля в НДРУ, %	% в с.в.	доля в НДРУ, %	% в с.в.	доля в НДРУ, %	% в с.в.	доля в НДРУ, %
Пастбищная 88	11,87	30,0	11,24	34,2	8,32	27,8	9,72	32,7
Селена	12,55	30,7	9,15	25,3	7,90	24,1	7,15	26,3
Vega 87	12,00	31,9	10,57	29,3	9,32	26,0	6,87	24,1
Луговая 67	11,88	29,4	9,34	25,3	8,10	24,3	7,84	37,2
Среднее	12,08	30,5	10,08	28,52	8,41	25,6	7,90	30,1
Стандартная ошибка среднего	0,38	1,07	1,00	4,22	0,63	1,73	1,28	5,99

Table 6

**Contents of nonstructural carbon (NSC) in dry matter and their share in NDSC in various growth phases, %**

Variety	Growth phase							
	branching		beginning of budding		budding		beginning of flowering	
	% in d.w.	share in NDSC, %	% in d.w.	share in NDSC, %	% in d.w.	share in NDSC, %	% in d.w.	share in NDSC, %
Pastbishchnaya 88	11.87	30.0	11.24	34.2	8.32	27.8	9.72	32.7
Selena	12.55	30.7	9.15	25.3	7.90	24.1	7.15	26.3
Vega 87	12.00	31.9	10.57	29.3	9.32	26.0	6.87	24.1
Lugovaya 67	11.88	29.4	9.34	25.3	8.10	24.3	7.84	37.2
Average	12.08	30.5	10.08	28.52	8.41	25.6	7.90	30.1
Standard error of the average	0.38	1.07	1.00	4.22	0.63	1.73	1.28	5.99

генетические алгоритмы (GA). Генетический алгоритм на первом этапе предполагает генерацию набора случайных решений; на втором этапе для каждого решения рассчитывается значение целевой функции; на третьем этапе выполняется процесс уточнения решений. На этом этапе решения для кроссовера выбираются с помощью оператора бинарного турнира по двум критериям: недоминируемая сортировка и расстояние краудинга. Алгоритм не останавливается в локальном оптимуме, применяя оператор мутации. Значения целевой функции рассчитываются еще раз после определения решений по переработке. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет удовлетворен один из критериев остановки [8].

Недавно разработаны методы неразрушающего контроля с использованием ближнего ИК-излучения в сочетании с машинным обучением (ML), которые применялись для оценки качества риса [9]. Машинное обучение можно использовать

для моделирования таких прогнозных взаимосвязей на основе NIR-спектров; метод обычно используется с алгоритмами регрессии главных компонент (PCR), машинной регрессии опорных векторов (SVR), частичной регрессии наименьших квадратов (PLSR) и алгоритмов искусственной нейронной сети (ANN). Использование в исследовании качества риса искусственных нейронных сетей (ИНС) в сочетании с БИК-спектрами сырого риса предоставили модель с высоким  $R = 0,94$ . Технология искусственного интеллекта может иметь практическую реализацию при оценке уровня растворимых углеводов в люцерне в зависимости от фазы вегетации. Так, она может быть использована для рекомендации оптимального периода проведения укоса трав. Такая задача может быть решена при параллельном использовании метода ближнего ИК-излучения также и технологии машинного обучения.

Состав сортов люцерны в 2015 г., % в с.в.

Сорта	СП	НДК	СЖ	СЗ	НДРУ	НСУ	
						% в с.в.	доля в НДРУ%
Пастбищная 67	17,17	37,81	2,04	8,50	34,48	12,51	36,3
Селена	16,29	39,33	2,07	8,19	36,02	11,42	31,7
Vega 87	16,45	33,30	1,79	8,17	40,29	13,54	33,6
Луговая	18,27	36,09	2,39	9,74	33,51	10,84	32,4
Среднее	17,04	36,63	2,07	8,65	36,08	12,08	33,5
Стандартная ошибка среднего	0,90	2,59	0,25	0,74	3,01	1,20	2,02

Table 7

Composition of alfalfa varieties in 2015 (% in d.w.)

Variety	CP	NDF	CF	CA	NDSC	NSC	
						% in d.w.	share in NDSC, %
Pastbishchnaya 88	17.17	37.81	2.04	8.50	34.48	12.51	36.3
Selena	16.29	39.33	2.07	8.19	36.02	11.42	31.7
Vega 87	16.45	33.30	1.79	8.17	40.29	13.54	33.6
Lugovaya 67	18.27	36.09	2.39	9.74	33.51	10.84	32.4
Average	17.04	36.63	2.07	8.65	36.08	12.08	33.5
Standard error of the average	0.90	2.59	0.25	0.74	3.01	1.20	2.02

### Выводы Conclusions

Люцерна при возделывании ее в условиях Центрального Нечерноземья на дерново-подзолистой почве, в фазы использования для скармливания скоту и приготовления кормов характеризуется содержанием более 30% НДРУ в сухом веществе, состоящих на 1/4 или на 1/3 в зависимости от погодных условий из неструктурных углеводов. Максимальный уровень НДРУ в среднем для сортов найден в фазу ветвления – 39,4% в сухом веществе, который снижался по мере роста растений до 26,6% в фазу цветения. Эти изменения связаны

с уменьшением доли листьев и увеличением стеблей в сухом веществе. Листья отличаются более высоким уровнем НДРУ, чем стебли, который менее подвержен снижению по мере роста растений. Установлена отрицательная корреляция между содержанием НДРУ и суммой НДК + СП ( $r = 0.96$ ) и одной НДК ( $r = 0,90$ ).

Цифровая трансформация в настоящее время все шире охватывает химические науки. Наряду с технологиями интернета вещей для выявления химического состава кормов используются методы искусственного интеллекта, которые в сочетании с инфракрасной спектроскопией позволяют оперативно получать искомый результат.

### Список источников

1. Homolka P., Koukolova V., Podsedniček M., Hlaváčková A. Nutritive value of red clover and lucerne forages for ruminants estimated by in vitro and in vivo digestibility methods. *Czech Journal of Animal Science*. 2012; № 57(10):454-568. <http://doi.org/10.17221/6346-CJAS>
2. Rooke, John A. and Hatfield, Ronald D. *Biochemistry of ensiling*. P. 120. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1399> (дата обращения: 01.08.2024)

### References

1. Homolka P., Koukolova V., Podsedniček M., Hlaváčková A. Nutritive value of red clover and lucerne forages for ruminants estimated by in vitro and in vivo digestibility methods. *Czech Journal of Animal Science*. 2012;57(10):454-568. <http://doi.org/10.17221/6346-CJAS>
2. Rooke John A., Hatfield Ronald D. *Biochemistry of Ensiling*. URL: <http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1399> (accessed: August 01, 2024)

3. Hall M.B., Hoover W.H., Jennings J.P. and Miller Webster T.K. A method for partitioning neutral detergent-soluble carbohydrates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1999;79:2079-2086.

4. Villalba J.J., Ates S and MacAdam J.W. Non-fiber Carbohydrates in Forages and Their influence on Beef Production Systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021;5:56633875. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.56633875>

5. 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. *The Journal of Dairy Science*. 1991;74:3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)

6. Mary Beth Hall. Working with Non-NDF Carbohydrates with Manure Evaluation and Environmental Considerations. URL: <https://www.txanc.org/Proceedings/2002/Non-NDF-Carbohydrates.pdf> (дата обращения: 01.08.2024)

7. Marković J., Babić S., Terzić D., Zornić V. et al. Carbohydrate content of alfalfa harvest at different development stage in the spring growth. *11th International Symposium 'Modern Trends in Livestock Production'. October 11-13, 2017*. Belgrade, Serbia, 2019:706-712.

8. Gu Y., Wu J., Guo Y., Hu S. et al. Grade Classification of Camellia Seed Oil Based on Hyperspectral Imaging Technology. *Foods*. 2024;13(20):3331. <https://doi.org/10.3390/foods13203331>

9. Kaewsoorn K., Phanomsophon T., Maichoon P., Pokhrel D.R. et al. Modeling Textural Properties of Cooked Germinated Brown Rice Using the near-Infrared Spectra of Whole Grain. *Foods*. 2023;12(24):4516. <https://doi.org/10.3390/foods12244516>

3. Hall M.B., Hoover W.H., Jennings J.P. and Miller Webster T.K. A method for partitioning neutral detergent-soluble carbohydrates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1999;79:2079-2086.

4. Villalba J.J., Ates S and MacAdam J.W. Non-fiber Carbohydrates in Forages and Their influence on Beef Production Systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021;5:56633875. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.56633875>

5. 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. *The Journal of Dairy Science*. 1991;74:3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)

6. Mary Beth Hall. Working with Non-NDF Carbohydrates with Manure Evaluation and Environmental Considerations. URL: <https://www.txanc.org/Proceedings/2002/Non-NDF-Carbohydrates.pdf> (accessed: August 01, 2024)

7. Marković J., Babić S., Terzić D., Zornić V. et al. Carbohydrate content of alfalfa harvest at different development stage in the spring growth. *11th International Symposium 'Modern Trends in Livestock Production'. October 11-13, 2017*. Belgrade, Serbia, 2019:706-712.

8. Gu Y., Wu J., Guo Y., Hu S. et al. Grade Classification of Camellia Seed Oil Based on Hyperspectral Imaging Technology. *Foods*. 2024;13(20):3331. <https://doi.org/10.3390/foods13203331>

9. Kaewsoorn K., Phanomsophon T., Maichoon P., Pokhrel D.R. et al. Modeling Textural Properties of Cooked Germinated Brown Rice Using the near-Infrared Spectra of Whole Grain. *Foods*. 2023;12(24):4516. <https://doi.org/10.3390/foods12244516>

### Сведения об авторах

**Хатима Каримовна Худякова**, ведущий научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук, Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса; 141055, Московская область, г. Лобня, Научный городок, корпус 1; e-mail: [hatima40@mail.ru](mailto:hatima40@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-2738-3438>

**Елена Викторовна Худякова**, профессор кафедры прикладной информатики, доктор экономических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: [evhudyakova@rgau-msha.ru](mailto:evhudyakova@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7875-074X>

**Марина Николаевна Степанцевич**, доцент кафедры прикладной информатики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: [stepantsevich@rgau-msha.ru](mailto:stepantsevich@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0002-7125-3027>

Статья поступила в редакцию 29.08.2024  
Одобрена после рецензирования 20.09.2024  
Принята к публикации 30.09.2024

### Information about the authors

**Hatima K. Khudyakova**, CSc (Ag), Leading Research Associate, Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology (building 1, Nauchniy Cp., Lobnya, Timiryazevskaya St., Moscow region, 141055, Russian Federation); e-mail: [hatima40@mail.ru](mailto: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 St., Moscow, 127434, Russian Federation); e-mail: [evhudyakova@rgau-msha.ru](mailto:evhudyakova@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7875-074X>

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

The article was submitted to the editorial office August 29, 2024  
Approved after reviewing September 20, 2024  
Accepted for publication September 30, 2024