

АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИЛЬФИИ ПРОНЗЕННОЛИСТНОЙ ПЕРВОГО ГОДА ЖИЗНИ

ЧЖАО СЮЭПИН, Б. В. ШЕЛЮТО

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 23.09.2025)

В данной работе в качестве объекта исследования была выбрана сильфия пронзеннолистная первого года жизни. Было определено содержание в ней минеральных элементов и проведено сравнение с широко используемыми кормовыми культурами – люцерной и кукурузой – с использованием однофакторного дисперсионного анализа. Также была проведена оценка сильфии в качестве корма по соответствию содержания минеральных веществ предельным нормам рациона животных. Результаты показали, что содержание кальция в сильфии составило 5,39 г/кг, что значительно выше, чем в кукурузе ($P < 0,05$). Содержание фосфора составило около 1,06 г/кг, что значительно выше, чем в люцерне и кукурузе ($P < 0,05$). Содержание калия составило около 3,25 г/кг, что ниже, чем в люцерне, но выше, чем в кукурузе ($P < 0,05$). Содержание магния и натрия составило около 1,27 г/кг и 0,54 г/кг, что значительно выше, чем в люцерне и кукурузе ($P < 0,05$). Среди уровней содержания микроэлементов, содержание Fe и Si было значительно выше, чем у других микроэлементов, среди которых содержание Fe составило около 435,79 мг/кг, содержание Cu – около 3,43 мг/кг, содержание Zn – около 4,77 мг/кг, содержание Mo – около 0,28 мг/кг, а содержание Si – около 588,17 мг/кг, что было значительно выше, чем у люцерны и кукурузы ($P < 0,05$). В качестве отдельного корма сильфия была оценена в соответствии с потребностями дойных коров. Макроэлементы минеральных веществ фосфора, калия и натрия были значительно ниже нижнего предела потребностей дойных коров. Наблюдался серьезный дефицит основных электролитов, содержание микроэлементов меди и цинка было недостаточным, а элемент железа превышал рекомендуемый верхний предел в 7,3 раза. Содержание мышьяка (0,05 мг/кг) соответствует стандартам комиссии по Codex Alimentarius и ЕС (0,01–0,5 мг/кг). Содержание свинца (0,56 мг/кг) ниже свободного предела, установленного кодексом (1 мг/кг), но превышает верхний предел, установленный стандартом ЕС (0,5 мг/кг), на 12 %. Содержание ртути (0,013 мг/кг) значительно ниже нижнего предела (0,1 мг/кг).

Ключевые слова : сильфия, минеральные элементы, оценка минеральных элементов.

In this study, silphia perfoliate in the first year of life was used as the object of study. Its mineral content was determined and compared with commonly used forage crops – alfalfa and corn – using one-way analysis of variance. Silphia as a feed was also assessed for its compliance with the maximum dietary allowances for animal mineral content. The results showed that the calcium content of silphia was 5.39 g/kg, significantly higher than that of corn ($p < 0.05$). The phosphorus content was approximately 1.06 g/kg, significantly higher than that of alfalfa and corn ($p < 0.05$). The potassium content was about 3.25 g/kg, which was lower than that of alfalfa but higher than that of corn ($p < 0.05$). The magnesium and sodium contents were about 1.27 g/kg and 0.54 g/kg, which were significantly higher than those of alfalfa and corn ($p < 0.05$). Among the micronutrient levels, the Fe and Si content were significantly higher than other micronutrients, among which the Fe content was about 435.79 mg/kg, the Cu content was about 3.43 mg/kg, the Zn content was about 4.77 mg/kg, the Mo content was about 0.28 mg/kg, and the Si content was about 588.17 mg/kg, which were significantly higher than those of alfalfa and corn ($p < 0.05$). As a single feed, silphium was evaluated according to the needs of dairy cows. The macronutrient minerals phosphorus, potassium, and sodium were significantly below the lower limit of requirements for dairy cows. Serious deficiencies of essential electrolytes were observed, trace mineral levels of copper and zinc were insufficient, and iron exceeded the recommended upper limit by 7.3 times. The arsenic content (0.05 mg/kg) complies with Codex Alimentarius Commission and EU standards (0.01–0.5 mg/kg). The lead content (0.56 mg/kg) is below the Codex Alimentarius Commission's free limit (1 mg/kg) but exceeds the EU standard upper limit (0.5 mg/kg) by 12 %. The mercury content (0.013 mg/kg) is significantly below the lower limit (0.1 mg/kg).

Key words: silphium, mineral elements, mineral element assessment.

Введение

Сильфия пронзеннолистная (*Silphium perfoliatum*) – это высокопродуктивный, питательный и легко адаптируемый высококачественный корм [1]. Он может значительно улучшить привес животных, продуктивность и репродуктивную функцию, одновременно снижая затраты на корма [2]. Она богата такими питательными веществами, как железо, марганец, медь и цинк, которые положительно влияют на рост, развитие и здоровье животных [3]. Сильфия имеет хорошие перспективы развития в качестве нового кормового сырья и является перспективным кормовым ресурсом в современном животноводстве, особенно в разведении жвачных животных [4].

Минеральные элементы можно разделить на два типа в зависимости от их содержания: макроэлементы и микроэлементы [5]. Макроэлементы включают кальций (Ca), фосфор (P), калий (K), натрий (Na), магний (Mg), серу (S), хлор (Cl) и т. д. Микроэлементы делятся на незаменимые микроэлементы, потенциально незаменимые микроэлементы и потенциально токсичные элементы. К незаменимым микроэлементам относятся цинк (Zn), железо (Fe), медь (Cu), йод (I), селен (Se), хром (Cr), кобальт (Co), молибден (Mo) и т. д. К потенциально необходимым элементам относятся

марганец (Mn), кремний (Si), никель (Ni), бор (B), ванадий (V) и т. д. К потенциально токсичным элементам относятся фтор (F), свинец (Pb), кадмий (Cd), ртуть (Hg), мышьяк (As) и т. д. Низкие дозы могут быть полезными, но чрезмерные дозы токсичны.

Виды и содержание минеральных элементов имеют жизненно важное значение и играют важнейшую роль в кормах. Они являются не только необходимыми базовыми веществами для формирования тканей и органов животных, но и ключевыми факторами, участвующими и регулируемыми практически все жизненные процессы, включая обмен веществ, рост и развитие, репродуктивную функцию, иммунную защиту и образование продуктов (мяса, яиц, молока, шерсти и т. д.). Кальций, фосфор и магний являются основными компонентами костей и зубов. Их правильное соотношение и достаточное поступление являются основой для нормального развития костей у молодых животных, поддержания прочности костей у взрослых животных и профилактики метаболических заболеваний, таких как рахит, остеопороз и послеродовой паралич. Фосфор также широко участвует в энергетическом обмене (АТФ), синтезе генетического материала (ДНК/РНК) и поддержании структуры клеточных мембран [6]. Натрий, калий и хлорид являются основными электролитами, которые совместно поддерживают баланс осмотического давления, кислотно-щелочное равновесие, проведение нервных импульсов и функцию мышечного сокращения жидкостей организма [7]. Дефицит или дисбаланс их пропорций может привести к потере аппетита, задержке роста, обезвоживанию и даже нервно-мышечной дисфункции [8].

Хотя микроэлементы требуются в очень малых количествах, их физиологические функции чрезвычайно важны и незаменимы. Железо является основным компонентом гемоглобина и миоглобина, отвечая за транспорт и хранение кислорода. Дефицит железа напрямую приводит к алиментарной анемии и снижению жизнеспособности. Медь является кофактором многих важных ферментов (таких как цитохром С оксидаза, лизилоксидаза, супероксиддисмутаза СОД) и участвует в метаболизме железа, образовании соединительной ткани, синтезе меланина и системе антиоксидантной защиты [9]. Цинк является компонентом или активатором более 300 ферментов в организме и необходим для синтеза белка, деления и дифференцировки клеток, заживления ран, развития иммунных органов и иммунной функции (например, активности тимозина), здоровья кожи и шерсти (предотвращения паракератоза), репродуктивной функции (качества спермы) и поддержания вкуса и обоняния [10]. Марганец является важным компонентом гликозилтрансферазы и супероксиддисмутазы (Mn-SOD) и участвует в развитии костей (синтез мукополисахаридов), углеводном и жировом обмене, репродуктивной функции и антиоксидантном процессе [11]; йод является единственным компонентом гормона щитовидной железы (Т3, Т4), который напрямую регулирует основной обмен веществ, скорость роста и развития, поддержание температуры тела и репродуктивную активность. Дефицит йода вызывает зоб, задержку роста и репродуктивные нарушения. Селен, как ключевой компонент семейства глутатионпероксидазы (GPx) и дейодиназы, является основным членом мощной антиоксидантной защиты организма. Он может защищать клеточные мембраны от окислительного повреждения и работать синергетически с витамином Е. Он играет решающую роль в профилактике болезни белых мышц, некроза печени, повышении иммунитета, обеспечении репродуктивной функции (подвижности сперматозоидов) и антистрессовых способностей. Кобальт является компонентом витамина В12 и необходим для синтеза В12 микроорганизмами рубца жвачных животных, тем самым влияя на метаболизм белка и нуклеиновых кислот и кроветворную функцию [12].

Кроме того, существуют сложные синергические (например, витамин D способствует усвоению кальция и фосфора, цинк и медь взаимодействуют в синтезе металлотионеинов) или антагонистические отношения (например, антагонизм кальция и цинка, антагонизм меди, молибдена и серы) между минеральными элементами и другими питательными веществами.

Если соотношение содержания несбалансированно, даже если общее количество достаточно, это может привести к затрудненному усвоению и использованию или даже вызвать дефицит или отравление.

Таким образом, полное разнообразие и точное содержание минеральных элементов в корме являются ключом к обеспечению здоровья животных, реализации генетического потенциала, оптимизации эффективности конверсии корма и улучшению качества продукции (например, прочности яичной скорлупы, цвета мяса, усвоения воды и состава молока). Недостаток любого необходимого минерала или его недостаточное содержание приводит к соответствующим симптомам дефицита, которые проявляются в виде задержки роста, снижения продуктивности, нарушений репродуктивной функции, снижения иммунитета, повышенной восприимчивости к болезням и даже смерти. В то же время избыточное поступление не только приводит к растрате ресурсов и увеличению стоимости

кормов, но и может вызвать отравление вследствие накопления (например, отравление фтором, селеном, медью), нарушение баланса между элементами, угнетение усвоения других питательных веществ и загрязнение окружающей среды (высокое содержание меди и цинка в фекалиях) [13].

Минеральные элементы являются незаменимыми «регуляторами метаболизма» в кормах. Полноценность их состава, точность содержания, эффективность форм и сбалансированность пропорций напрямую определяют питательную ценность кормов, здоровье животных, эффективность производства и устойчивость. Они являются основной технической основой современной кормовой промышленности, эффективного и здорового разведения животных.

Основная часть

Сильфия – растение, обладающее значительной способностью к обогащению минеральными веществами. Благодаря глубокой корневой системе, она особенно хорошо обогащается микроэлементами. В данной работе изучены типы и содержание минералов в сильфии первого года жизни и проведено сравнение с такими распространёнными кормовыми культурами, как кукуруза и люцерна. Данные были обработаны и проанализированы с помощью однофакторного дисперсионного анализа в программе SPSS, результаты представлены в виде «среднее значение \pm стандартная ошибка». Критерием оценки значимости различий было $P < 0,05$.

На рис. 1 и табл. 1 показано содержание макроэлементов в сильфии пронзеннолистной, люцерне посевной и кукурузе.

Таблица 1. Содержание макроминеральных элементов в различных кормовых культурах

Культура	Содержание макроэлементов, г/кг				
	кальций	фосфор	калий	магний	натрий
Сильфия	5.39 \pm 0.14	1.06 \pm 0.04	3.25 \pm 0.03	1.27 \pm 0.04	0.54 \pm 0.03
Люцерна	7.06 \pm 0.04	0.78 \pm 0.06	5.00 \pm 0.04	0.59 \pm 0.01	0.06 \pm 0.01
Кукуруза	0.20 \pm 0.02	0.61 \pm 0.01	2.59 \pm 0.07	0.31 \pm 0.02	0.11 \pm 0.01

Как показано в табл. 1, среди уровней содержания основных элементов в различных кормовых культурах содержание Са варьируется в широких пределах – от 0,20 до 7,06 г/кг. Наибольшее содержание Са наблюдается в люцерне, при этом содержание Са в сильфии значительно выше, чем в кукурузе, около 5,39 г/кг ($P < 0,05$). Содержание Р в различных кормовых культурах составляет 0,61–1,06 г/кг, а содержание Р в сильфии значительно выше, чем в люцерне и кукурузе, около 1,06 г/кг ($P < 0,05$). Содержание К в различных кормовых культурах составляет 2,59–5,00 г/кг, а содержание К в сильфии значительно ниже, чем в люцерне, и выше, чем в кукурузе, около 3,25 г/кг ($P < 0,05$). Содержание Mg в различных кормовых культурах составляет 0,31–1,27 г/кг, а содержание Mg в сильфии значительно выше, чем в люцерне и кукурузе, около 1,27 г/кг ($P < 0,05$). Содержание Na в различных кормовых культурах варьировалось от 0,06 до 0,54 г/кг. Содержание Na в сильфии было значительно выше, чем в люцерне и кукурузе, около 0,54 г/кг ($P < 0,05$).

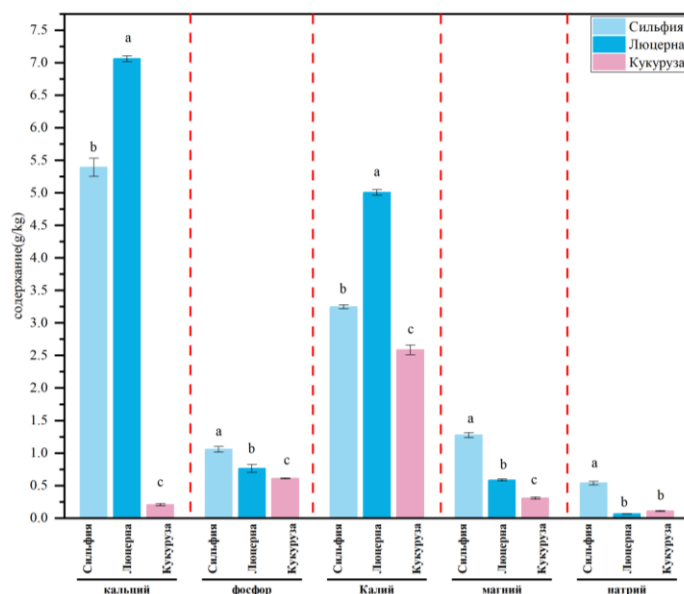


Рис. 1. Анализ содержания основных минеральных элементов в различных кормовых культурах

Содержание макроэлементов очень хорошо визуально видно на рис. 1. По сравнению с люцерной содержание Са и К в сильфии было ниже, но уровни содержания были одного порядка величин.

ны. Содержание P, Mg и Na было значительно выше, чем в люцерне и кукурузе ($P < 0,05$). Кукуруза характеризовалась самым низким содержанием изучаемых макроэлементов по сравнению с люцерной и сильфией.

Содержание микроэлементов в сильфии, люцерне и кукурузе показано в табл. 2 и рис. 2.

Таблица 2. Содержание микроэлементов в различных кормовых культурах

Культура	Содержание микроэлементов, мг/кг				
	железо	медь	цинк	молибден	кремний
Сильфия	435.79±3.2	3.43±0.18	4.77±0.08	0.28±0.07	588.17±6.90
Люцерна	79.5±0.51	2.31±0.17	3.57±0.09	0.15±0.03	303.21±2.32
Кукуруза	21.84±0.60	0.84±0.13	1.75±0.06	0.13±0.02	192.11±8.88

Как показано в табл. 2, среди микроэлементов, содержащихся в изучаемых кормовых культурах, содержание Fe и Si значительно превышает содержание других микроэлементов. Содержание Fe варьирует от 21,84 до 435,79 мг/кг, Cu – от 0,84 до 3,43 мг/кг, Zn – от 1,75 до 4,77 мг/кг, Mo – от 0,13 до 0,28 мг/кг, а Si – от 192,11 до 588,17 мг/кг.

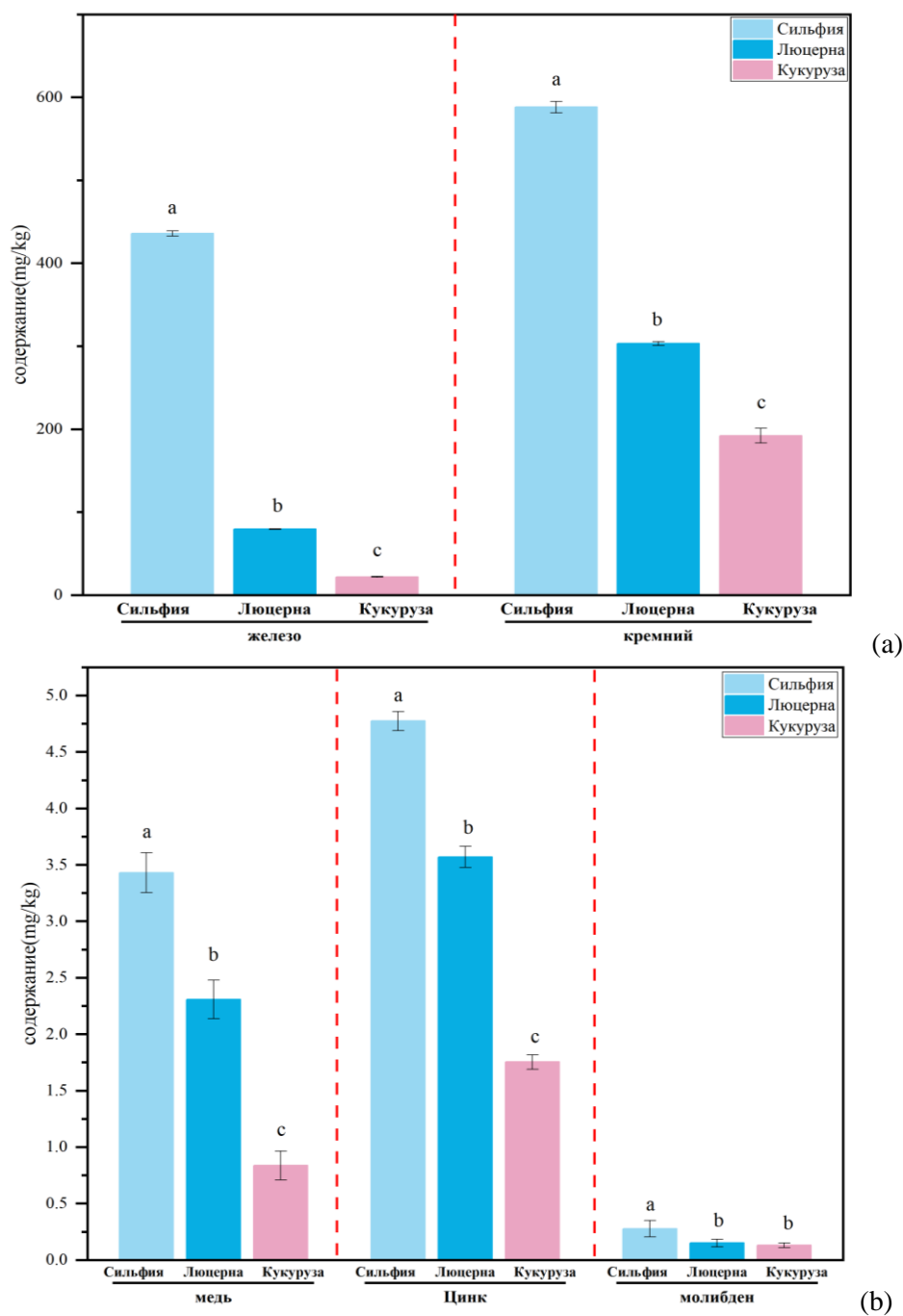


Рис. 2. Анализ микроэлементов в различных кормовых культурах

На рис. 2 визуально видно, что содержание Fe, Cu, Zn, Mo и Si в силфий значительно выше, чем в люцерне и кукурузе ($P < 0,05$).

Как по содержанию макро-, так и микроэлементов кукуруза значительно уступает силфии пронзеннолистной и люцерне посевной,

В табл. 3 и 4 представлены рекомендуемые нормы содержания макро и микроэлементов для различных возрастных групп КРС и их сравнение с содержанием в силфии пронзеннолистной.

Таблица 3. Оценка основных минеральных элементов силфии

Минеральные элементы	Рекомендуемое содержание для дойных коров (от сухого вещества суточного рациона, %)	Рекомендуемое содержание для сухостойных коров (от сухого вещества суточного рациона, %)	Силфия, г/кг	Содержание после конвертации (%)
Кальций	0.43 % ~ 0.82 %	0.39 % ~ 0.44 %	5.39	0.54 %
Фосфор	0.32 % ~ 0.43 %	0.26 % ~ 0.30 %	1.06	0.11 %
Калий	1.00 % ~ 1.50 %	0.90 % ~ 1.00 %	3.25	0.32 %
Магний	0.20 % ~ 0.30 %	0.16 % ~ 0.20 %	1.27	0.13 %
Натрий	0.18 % ~ 0.25 %	0.10 % ~ 0.15 %	0.54	0.05 %

Как показано в табл. 3, содержание кальция (0,54 %) в силфии находится на критическом нижнем пределе для дойных коров (необходимо от 0,43 % до 0,82 %), но значительно превышает на 22,7 % норму для сухостойных коров (необходимо от 0,39 % до 0,44 %). При использовании в качестве единственного корма может вызвать гипокальциемию или нарушения обмена веществ. Содержание фосфора (0,11 %), калия (0,32 %) и натрия (0,05 %) значительно ниже нижней границы потребности дойных коров (всего 34 %, 32 % и 28 %), что указывает на серьёзный дефицит необходимых электролитов. Содержание магния (0,13 %) также ниже потребности дойных коров (65 %). В целом этот корм необходимо сочетать с кормами с высоким содержанием фосфора, калия и натрия, а также минеральными премиксами, чтобы избежать отрицательного электролитного баланса и снижения продуктивности молочных коров, а также избегать смешивания с кормами с высоким содержанием кальция (например, люцерной).

Таблица 4. Оценка содержания микроэлементов силфии

Минеральные элементы	Рекомендуемый нижний предел (мг/кг)	Верхний предел безопасности (мг/кг)	Силфия (мг/кг)
медь	10–18	40	3.43
цинк	40–80	500	4.77
марганец	40–60	1000	18.30
селен	0.3–0.5	5	0.04
кобальт	0.1–0.25	10	0.15
железо	40–60	1000	435.79

В табл. 4 показано, что содержание меди в силфии составляет всего 3,43 мг/кг, или 34,3 % от рекомендуемого нижнего предела (10 мг/кг) для молочных коров, содержание цинка 4,77 мг/кг, что составляет менее 11,9 % от рекомендуемого нижнего предела (40 мг/кг), а содержание селена 0,04 мг/кг составляет всего 13,3 % от необходимого нижнего предела (0,3 мг/кг). Такой дефицит может ослабить иммунную и антиоксидантную защиту.

Содержание железа 435,79 мг/кг превышает рекомендуемый верхний предел (60 мг/кг) в 7,3 раза. Высокие дозы железа могут конкурентно ингибировать всасывание меди и цинка в кишечнике и катализировать реакцию Фентона, что приводит к окислительному стрессу и вторичному дефициту микроэлементов.

Содержание марганца 18,30 мг/кг составляет 45,8 % от необходимого диапазона (40–60 мг/кг) и требует целенаправленного добавления для поддержания развития костей и глюконеогенеза.

Содержание кобальта 0,15 мг/кг находится в пределах рекомендуемого значения (0,1–0,25 мг/кг), но близко к верхней границе допустимой нормы для сухостойных коров (0,25 мг/кг).

Таким образом, корм из силфии первого года жизни необходимо дополнять медью, цинком, селеном и марганцем с помощью индивидуальных премиксов, а добавление экзогенного железа следует ограничить для обеспечения баланса микроэлементов в рационе.

Таблица 5. Оценка потенциально токсичных минеральных элементов в силфии

Стандартный источник	мышьяк	свинец	ртуть
Codex Стандарты кормов (CAC)	0.01 ~ 0.5 мг/кг	0.01 ~ 1 мг/кг	0.1 ~ 1 мг/кг
Силфия	0.05 мг/кг	0.56 мг/кг	0.013 мг/кг

Как показано в табл. 5, содержание мышьяка 0,05 мг/кг в силфии соответствует требованиям Комиссии по пищевым стандартам (Codex Alimentarius) и ЕС (0,01–0,5 мг/кг), что находится в пре-

делах безопасного диапазона и близко к нижнему пределу, это свидетельствует о контролируемом риске загрязнения мышьяком.

Содержание свинца 0,56 мг/кг значительно превышает верхний предел стандарта ЕС (0,5 мг/кг) на 12 %. Хотя это значение ниже свободного предела, установленного Кодексом (1 мг/кг), оно представляет потенциальную угрозу безопасности, поскольку свинец обладает высокой биоаккумуляцией. Длительное кормление может передаваться в организм человека через молоко и вызывать поражение почек и нейротоксичность у молочных коров.

Содержание ртути 0,013 мг/кг значительно ниже нижнего предела стандарта (0,1 мг/кг), достигая лишь 13 % от предельного значения, что свидетельствует о крайне низком риске загрязнения ртутью и соответствии требованиям экологической безопасности.

Заключение

Содержание основного минерального элемента Са в силфий составляет 5,39 г/кг, что значительно выше, чем в кукурузе. Содержание Mg, Na и P составляет приблизительно 1,27 г/кг, 0,54 г/кг и 1,06 г/кг соответственно, что значительно выше, чем в люцерне и кукурузе. Содержание К составляет приблизительно 3,25 г/кг, что ниже, чем в люцерне, но значительно выше, чем в кукурузе.

Содержание Fe и Si значительно превышает содержание других микроэлементов, среди которых Fe составляет около 435,79 мг/кг, Cu – около 3,43 мг/кг, Zn – около 4,77 мг/кг, Mo – около 0,28 мг/кг, а Si – около 588,17 мг/кг, что значительно превышает показатели люцерны и кукурузы.

Оценивая силфию, как отдельный корм, где содержание макроэлементов – фосфора, калия и натрия – оказалось ниже нормативных требований, необходимо сказать, что его необходимо комбинировать с кормами с высоким содержанием фосфора, калия и натрия и минеральными премиксами.

Содержание микроэлементов меди и цинка недостаточно, а содержание железа превышает рекомендуемый верхний предел в 7,3 раза. Содержание мышьяка соответствует стандартам Комиссии по Codex Alimentarius и ЕС (0,01–0,5 мг/кг). Хотя содержание свинца 0,56 мг/кг ниже допустимого предела, установленного Кодексом (1 мг/кг), оно превышает верхний предел, установленный стандартом ЕС (0,5 мг/кг) на 12 %. Для снижения риска содержания ртути (0,013 мг/кг) используются корма с низким содержанием свинца (например, кукурузный силос), что значительно ниже нижнего предела (0,1 мг/кг).

ЛИТЕРАТУРА

1. Biel, W., Jaroszevska, A., & Stankowski, S. (2020). Chemical composition and nutritional value of leaves and stems of silphium perfoliatum L. Depending on vegetation stage. *Agronomy*, 10(10), 1596.
2. Vetter, A., et al. (2017). Silphium perfoliatum – a promising forage crop for temperate regions. *Grass and forage science*, 72(2), 205–214.
3. Karges, K., et al. (2022). Mineral composition of silphium perfoliatum herbage and silage. *Journal of animal science*, 100(skac247), 1–10.
4. 李胜利等.(2019). 《串叶松香草》在反刍动物饲料中的应用前景. *动物营养学报*, 31(10), 4473–4480.
5. National research council (nrc). (2001). *nutrient requirements of dairy cattle* (7th ed.). National academies press.
6. McDowell, L. R. (2003). *Minerals in animal and human nutrition* (2nd ed.). Elsevier.
7. Suttle, N. F. (2010). *Mineral nutrition of livestock* (4th ed.). Cabi publishing.
8. Goff, J. P. (2018). Invited review: mineral absorption mechanisms and interactions. *Journal of dairy science*, 101(4): 2763–2813.
9. Underwood, E. J. & Suttle, N. F. (1999). *The mineral nutrition of livestock* (3rd ed.). Cab international.
10. National research council (nrc). (2001). *Nutrient requirements of dairy cattle* (7th ed.). National academies press.
11. McDowell, L. R. (2003). *Minerals in animal and human nutrition*.
12. NRC (2001). *Nutrient requirements of dairy cattle*.
13. Nicholson, F. A. Et al. (1999). Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures. *Bioresource technology*, 70(1): 23–31.