

УДК 636.085:577.17:636.088.31

DOI: 10.33284/2658-3135-103-1-8

**Оценка переваримости и биодоступности металлоорганических комплексов, подвергнутых экструзионной обработке на моделях «in vitro» и «in situ»**

**М.Я. Курилкина, О.А. Завьялов, К.Н. Атландерова, Т.Н. Холодилина**

*Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (г. Оренбург)*

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований по оценке физических и биологических свойств экструдированных кормовых добавок, состоящих из пшеничных отрубей и высокодисперсных порошков (ВДП) металлов: Cu, Fe, Zn, ВДП CaCO<sub>3</sub>. Выявлено, что использование экструзионной обработки пшеничных отрубей в сочетании с ВДП изменяет структурный и химический составы опытного комплекса, способствуя повышению переваримости питательных веществ в эксперименте «in vitro» с 64,2 до 78,2 %, при этом сопровождается ростом биодоступности минеральных веществ из кормового продукта: по Zn – на 21,6 %, Cu – 2,98 и Fe – 7,3 % (P≤0,05). Введение ВДП (Cu, Fe, Zn, CaCO<sub>3</sub>) при экструдировании кормовых субстратов способствует повышению биологической доступности микроэлементов из опытного экструдата в организм животного на модели «in situ», с динамикой по Cu на 13 % (P≤0,05) через три часа, 9,9 % (P≤0,05) – через 6 часов; по Fe – на 4,2 % и 3,1 % (P≤0,05) через три и шесть часов; по Zn – на 8,5 % и 6,4 % (P≤0,05) через три и шесть часов соответственно. В рамках проведенных исследований также было установлено, что повышение переваримости сухого вещества происходит посредством увеличения пористости кормовых субстратов.

Положительный эффект исследуемых высокодисперсных частиц на биодоступность минеральных веществ из опытных кормовых субстратов в организм животного показывает перспективы их использования в практике животноводства.

**Ключевые слова:** крупный рогатый скот, бычки, казахская белоголовая порода, корма, высокодисперсные порошки металлов, пшеничные отруби, экструзионная обработка, пористость, переваримость, биодоступность.

UDC 636.085:577.17:636.088.31

**Assessment of the digestibility and bioavailability of organometallic complexes extruded on «in vitro» and «in situ» models**

**Marina Ya Kurilkina, Oleg A Zavyalov, Ksenia N Atlanderova, Tatyana N Kholodilina**

*Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia)*

**Summary.** The article presents the results of studies evaluating physical and biological properties of extruded feed additives, consisting of wheat bran and highly dispersed powders (HDP) of metals: Cu, Fe, Zn, CaCO<sub>3</sub>. It was found that the use of extruded wheat bran in combination with HDP changes structural and chemical composition of the experimental complex, contributing to an increase in the digestibility of nutrients in the in vitro experiment from 64.2 to 78.2%, while it is accompanied by an increase in bioavailability of mineral substances from feed product, Zn by 21.6%, Cu - 2.98 and Fe - 7.3% (P≤0.05). The introduction of HDP (Cu, Fe, Zn, CaCO<sub>3</sub>) during the extrusion of feed substrates is accompanied by an increase in the bioavailability of trace elements from the experimental extrudate into animal organism using in situ model, with Cu dynamics by 13% (P≤0.05) after three hours, 9.9% (P≤0.05) after 6 hours, by Fe by 4.2% and 3.1% (P≤0.05) after three and six hours, by Zn by 8.5% and 6.4% (P≤0.05) after three and six hours, respectively. As part of the studies, it was also found that an increase in the digestibility of dry matter occurs by increasing the porosity of feed substrates.

The positive effect of the studied fine particles on the bioavailability of mineral substances from experimental feed substrates into the animal organism shows the prospects for their use in animal husbandry.

**Key words:** cattle, bulls, Kazakh white-headed breed, feed, finely divided metal powders, wheat bran, extrusion processing, porosity, digestibility, bioavailability.

### **Введение.**

Проблема дефицита микронутриентов в потребляемых кормах приводит к развитию ряда серьёзных заболеваний сельскохозяйственных животных, снижению интенсивности их роста и репродуктивных качеств, а также вызывает уменьшение их содержания в конечных продуктах животноводства, предназначенных для потребления человеком (Pietrojusti A et al., 2016; Fisinin VI et al., 2018). В связи с чем разработка и внедрение новых технологий обогащения продуктов путём трансформации макро- и микроэлементов в биодоступные для организма сельскохозяйственных животных и человека минеральные комплексы является перспективным направлением (Самохин В.Т., 2003; Gorlov IF et al., 2015).

В последние десятилетия активно прогрессирует направление по выявлению новых форм биологически активных веществ, необходимых организму животного для его нормального функционирования и реализации генетического потенциала продуктивности (Мирошников С.А. и др., 2006; Miroshnikov SA et al., 2019). В качестве таких добавок могут использоваться высокодисперсные металлы. Применение последних в кормах позволит повысить их биологическую доступность, обеспечит малотоксичность и пролонгированность действия (Богословская О.А. и др., 2009; Дускаев Г.К. и Каримов И.Ф., 2018; Лебедев С.В. и др., 2019).

Вместе с тем эффективность препаратов, содержащих частицы высокодисперсных металлов, может быть значительно повышена путём воздействия на них различными физическими методами, в т. ч. экструзией. Согласно современным представлениям, экструзионная обработка концентрированных кормов способствует повышению усвояемости питательных веществ, улучшению сенсорных характеристик и продлению сроков годности заготавливаемых кормов (Яушева Е.В. и др., 2013; Курилкина М.Я. и др., 2017; Сизова Е.А., 2017). Однако вопрос о перспективах применения метода экструзии при производстве кормов с включением комплексов минеральных веществ остаётся нерешённым.

В связи с этим исследования, направленные на изучение эффективности использования кормовых композиций на основе отрубного продукта, подверженного экструзионной обработке в комбинации с высокодисперсными порошками (ВДП), в кормлении сельскохозяйственных животных являются актуальными и представляют определённый научный интерес.

### **Цель исследования.**

Изучение переваримости кормов и биологической доступности минеральных веществ из опытных кормовых компонентов в организм животных при использовании в кормлении молодняка крупного рогатого скота высокодисперсных форм металлов Cu, Fe, Zn, CaCO<sub>3</sub>.

### **Материалы и методы исследования.**

**Объект исследования.** Бычки казахской белоголовой породы в возрасте 13 месяцев, рубцовая жидкость.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями Russian Regulations, 1987 (Order No. 755 on 12.08.1977 the USSR Ministry of Health) and «The Guide for Care and Use of Laboratory Animals (National Academy Press Washington, D.C. 1996). При выполнении исследований были предприняты усилия, чтобы свести к минимуму страдания животных и уменьшения количества образцов.

**Схема эксперимента.** Исследования были проведены в условиях Испытательного центра ЦКП ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (аттестат аккредитации № RA.RU.21ПФ59 от 02.12.2015 г.).

Отбор рубцовой жидкости проводился у бычков через хроническую фистулу рубца. Исследования проводили методом нейлоновых мешочков: *in vitro* – с использованием «искусственного рубца KPL 01», 48-часовая экспозиция.

В качестве объектов исследования были использованы следующие опытные комплексы: нативные пшеничные отруби (ОК1), экструдированные пшеничные отруби (ОК2), экструдированная смесь отрубей 80 % + ВДП CaCO<sub>3</sub> 20 % (ОК3), экструдированная смесь отрубей 79,9 % + ВДП CaCO<sub>3</sub> 20 % + ВДП Cu, Fe, Zn 0,1 % (ОК4), экструдированная смесь отрубей 99,9 % + ВДП Cu, Fe, Zn 0,1 % (ОК5).

В исследованиях применялись: пшеничные отруби с содержанием сырой клетчатки – 8-10 %, сырого протеина – 13-15 %, с размером частиц – до 0,5 см, высокодисперсные порошки карбоната кальция (частицы менее 10 мкм), чистота Ca – 40 %; Cu, Zn, Fe произведены Alfa Aesar GmbH & Co KG (ЕЕС № 231-096-4), Германия, размер частиц – 9-10 мкм, чистота – 99,7 %.

Дозировка вводимых в кормовые субстраты ВДП составлялась из расчёта на 1 кг экструдата: CaCO<sub>3</sub> – 200 г, Zn – 0,1 г, Fe – 2 г, Cu – 0,1 г. При выборе высокодисперсных порошков металлов и их дозировок руководствовались результатами исследований Тимановой А.С. с соавторами (2006), установившей феномен 2-3-кратного повышения биодоступности химических элементов из экструдатов с клинкерной пылью (КП) для животных. Однако в связи с токсичностью КП встал вопрос её замены на более безопасные источники минеральных веществ. КП содержит свыше 60 химических элементов, при этом наибольшая массовая доля характерна для Ca (порядка 40 %), а также Fe, Zn и Cu. В результате чего, моделируя состав КП по Ca, Fe, Zn и Cu, целесообразно проводить соэкструзию с данными металлами, повышая тем самым питательность экструдированных кормов и биодоступность химических элементов из опытных кормосмесей.

Для получения экструдата использовали универсальный одношнековый пресс-экструдер ПЭШ-30/1 (Россия) производительностью 45 кг/ч. Предварительно увлажнённые до влажности 30 % образцы смеси подвергались процессу экструдирования при мощности 7,7 кВт, давлении 10 МПа и температуре не более +120 °С. Объём воды для увлажнения образцов определяли по формуле:

$$V = \frac{W_2 - W_1}{100 - W_2} \times m,$$

где:  $V$  – объём воды, необходимый для увлажнения образцов, мл;

$W_1$  и  $W_2$  – начальная и конечная массовая доля влаги, %;

$m$  – масса образца, г.

Оценка пористости сырья предполагала использование корма в воздушно-сухом состоянии, помещаемого в мерный цилиндр ( $V=100$  мл,  $d=25$  мм), с плотностью корма – до  $300 \pm 10$  г/л. Цилиндр с образцом взвешивался с точностью до 0,01 г и наполнялся ацетоном до постоянного уровня ацетона над слоем образца. Через 30 минут экспозиции избыток ацетона сливался, и цилиндр с образцом взвешивался. Пористость по ацетону вычислялась по формуле (в объёмных %):

$$X = D'' - D' \times \frac{100}{p} \times V,$$

где:  $D'$  – вес цилиндра с образцом до пропитывания, г;

$D''$  – вес цилиндра с образцом, пропитанным ацетоном, г;

$p$  – плотность ацетона при температуре опыта, г/см<sup>3</sup>;

$V=100$  см<sup>3</sup> – объём образца.

Переваримость сухого вещества определяли методом «*in vitro*» при помощи «искусственного рубца» KPL 01, термостата электрического суховоздушного ТС-1/80 СПУ, весов лабораторных электронных ВМ 153, желудочного зонда.

Навески исследуемых кормовых добавок массой 500 мг развешивали в мешочки, изготовленные из полиамидной ткани. Стеллаж с закреплёнными мешочками опускался в смесь сока рубца и буферного раствора и помещался в термостат на 48 часов при температуре +39 °С. Затем мешочки с образцами погружались в разведённый пепсин, и прибор снова переносили в термостат на

24 часа для вторичного переваривания. По окончании переваривания с пепсином пробы вынимались из ванны, тщательно промывались водопроводной водой и высушивались до постоянной массы. Переваримость сухого вещества кормов *in vitro* определяли по разности массы образца корма вместе с мешочком и после двухстадийной инкубации и высушивания до постоянной массы при температуре +60 °С.

Оценку биодоступности исследуемых элементов из опытных кормовых субстратов осуществляли по результатам *in vitro* в процентах по разнице содержания оцениваемых элементов до и после экспозиции в искусственном рубце.

На втором этапе *in situ* на бычках через хроническую фистулу рубца оценивали биологическую доступность микроэлементов из кормовых субстратов в организм животных. Для чего осуществляли закладку заранее подготовленных кормовых субстратов в нейлоновых мешочках в количестве трёх штук на каждую дозировку на 3, 6 и 9 часов. По истечению этого времени производили изъятие мешочков, промывание под проточной водой и высушивание в сушильном шкафу при температуре +60 °С до постоянной массы, после чего делали расчёт биодоступности минеральных веществ в процентах по разнице их содержания до и после экспозиции.

Элементный состав кормов определялся методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) в лаборатории АНО «Центр биотической медицины» (г. Москва, Россия).

**Оборудование и технические средства.** Процесс экструдирования производили на универсальном одношнековом пресс-экструдере ПЭШ-30/1 (Россия). Переваримость сухого вещества и биодоступность микроэлементов *in vitro* определяли с помощью «Искусственного рубца» KPL 01; термостата электрического суховоздушного ТС-1/80 СПУ (ОАО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия), весов лабораторных электронных ВМ 153 (ООО «ОКБ Веста», Россия), желудочного зонда (Россия). Для озоления использовали микроволновую систему разложения Multiwave 3000 («Anton Paar», Австрия). Оценку содержания элементов определяли на атомно-эмиссионном спектрометре Optima 2000V («Perkin Elmer», США) в лаборатории АНО «Центр биотической медицины» (г. Москва, Россия, Registration Certificate of ISO 9001:2000, Number 4017-5.04.06).

**Статистическая обработка.** Статистический анализ проводили с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel» («Microsoft», США) с обработкой данных в «Statistica 10.0» («Stat Soft Inc.», США).

#### Результаты исследования.

Анализ полученных данных показал, что пористость пшеничных отрубей под действием экструзионной обработки увеличилась по отношению к нативным отрубям на 8,8 % ( $P \leq 0,05$ ). Установлено, что введение минеральных добавок в виде ВДП не оказало выраженного влияния на оцениваемый показатель (рис. 1).

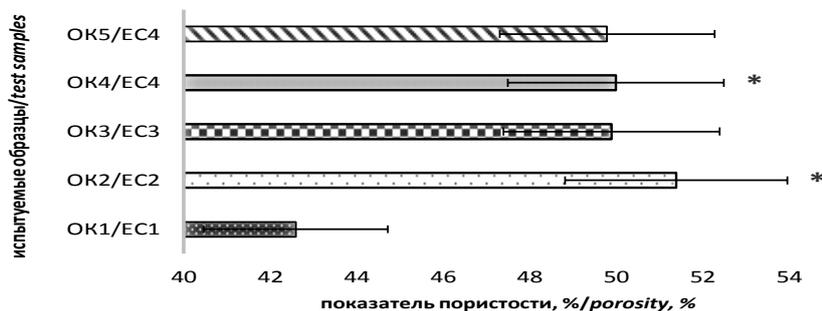


Рис. 1 – Оценка пористости испытуемых образцов, %

Figure 1 – Assessment of porosity of test samples, %

Результаты по оценке действия ВДП на переваримость *in vitro* представлены на рисунке 2.

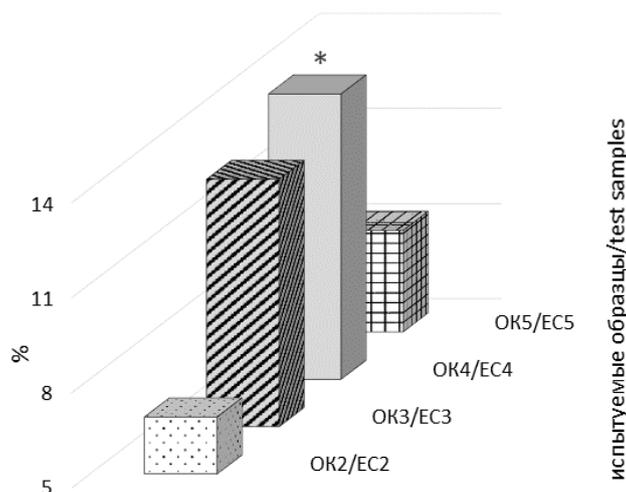


Рис. 2 – Разность переваримости сухого вещества «*in vitro*» опытных комплексов относительно ОК1, %

Figure 2 – The difference in "in vitro" digestibility of dry matter from experimental complexes relative to EC1, %

Оценка переваримости корма «*in vitro*» выявила существенное изменение от использования экструзионной обработки. Процент переваримости нативных отрубей составил 64,2 %, переваримость отрубей в следствии экструзионной обработки повысилась на 6,8 %. Введение ВДП в эктрудат увеличило степень переваримости сухого вещества на 14 % ( $P \leq 0,05$ ) относительно нативных отрубей. Сравнительный анализ результатов между группами экструдированных кормов с ВДП показал, что внесение ВДП  $\text{CaCO}_3$ , Cu, Zn и Fe способствовало переваримости субстрата на 1,2 % больше, чем при внесении ВДП карбоната кальция, и на 5,8 % – при внесении ВДП Cu, Zn и Fe.

Расчёты биодоступности «*in vitro*» металлов из опытных препаратов показали увеличение этого параметра при экструзионной обработке пшеничных отрубей по Cu на 19,3 %, Zn – на 6,3 %, Fe – на 23,1 % ( $P \leq 0,05$ ) (рис. 3).

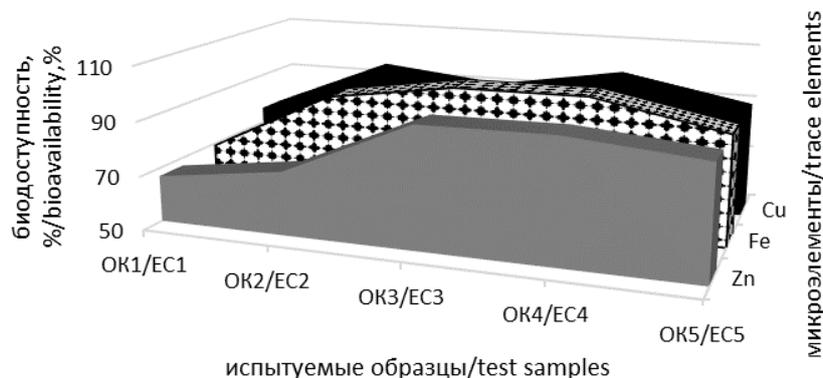


Рис. 3 – Биодоступность «*in vitro*» микроэлементов из испытуемых кормов, %

Figure 3 – The bioavailability of trace elements from the tested feed «*in vitro*», %

Введение в состав экструдированной смеси ВДП  $\text{CaCO}_3$ , Cu, Zn, Fe сопровождалось увеличением биодоступности всех оцениваемых металлов. Так, максимальное увеличение для Cu составило 2,98 % ( $P \leq 0,05$ ), для Zn – 21,6 % и для Fe – 7,3 % ( $P \leq 0,05$ ) относительно экструдированных отрубей.

Эффект введения ВДП ( $\text{CaCO}_3$ , Cu, Fe, Zn) в состав экструдата выражался повышением биологической доступности микроэлементов из опытного экструдата с ВДП в организм животного на модели «*in situ*» (рис. 4).

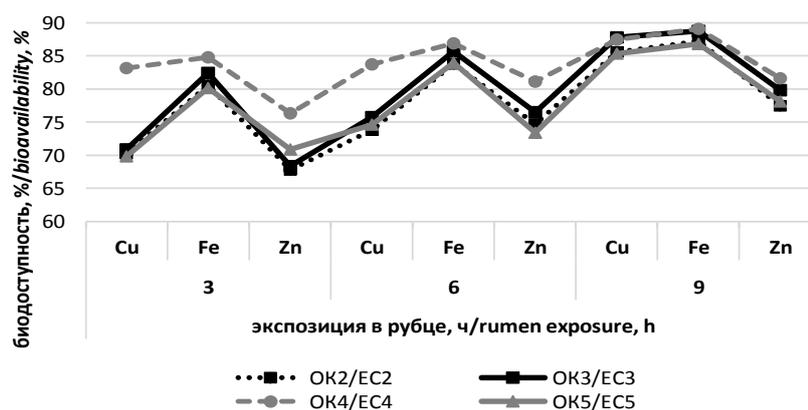


Рис. 4 – Биодоступность микроэлементов «in situ», %

Fig. 4 – Bioavailability microelements «in situ», %

Увеличение биологической доступности микроэлементов из опытного экструдата в организм животного на модели «*in situ*» составило: по Cu – 13 % ( $P \leq 0,05$ ) через три часа экспозиции и 9,9 % ( $P \leq 0,05$ ) – через шесть часов; по Fe – 4,2 % и 3,1 % ( $P \leq 0,05$ ) через три и шесть часов; по Zn – 8,5 % и 6,4 % ( $P \leq 0,05$ ) через три и шесть часов соответственно.

#### Обсуждение полученных результатов.

С целью формирования биологически полноценных рационов в науке активно ведутся работы, направленные на производство высокоэффективных кормовых добавок (Кальницкий Б.Д., 1990; Мирошников С.А. и Сизова Е.А., 2017). Тем самым встаёт вопрос применения высокодисперсных минеральных порошков в качестве альтернативы существующим препаратам в кормлении животных.

При планировании эксперимента мы опирались на результаты ранее проведённых исследований, в которых было обосновано введение ВДП и их дозировок в состав кормов для сельскохозяйственных животных и птицы и описано положительное действие данных веществ на их организм (Назарова А.А. и Полищук С.Д., 2009; Сизова Е.А. и Яушева Е.В., 2019; Лебедев С.В. и др., 2006; Лебедев С.В., 2009).

В нашем исследовании отмечен факт повышения переваримости сухого вещества опытных комплексов посредством процесса экструдирования на 6,8 %, а при дополнительном введении в экструдированную смесь ВДП в комплексе – на 14 % ( $P \leq 0,05$ ). Полученные данные по переваримости подтверждаются результатами исследований ряда авторов. Данный процесс может объясняться структурными преобразованиями в опытных кормах, которые возникают в результате экструдирования (Zhao Y and Nalwa HS, 2006; Ognik K et al., 2016). Пищевые волокна, содержащиеся в значительном количестве в составе опытных кормов, под действием экструзии в комплексе с ВДП подвергаются химической модификации, вызывающей изменения свойств исходного сырья. Что мо-

жет свидетельствовать о том, что высокая переваримость питательных веществ корма происходит не только благодаря физическим преобразованиям под действием экструзии, но и за счёт биологического действия самих высокодисперсных частиц металлов. Это согласуется с ранее проведёнными исследованиями, в которых показано, что кормление высокодисперсными частицами улучшает пищеварительные процессы, повышает иммунитет и продуктивность сельскохозяйственных животных (Дерябин Д.Г. и др., 2011; Сизова Е.А. и др., 2018; Макаева А.М. и др., 2019; Sahoo A et al., 2014).

Кроме того, ВДП обладают рядом преимуществ, в числе которых высокая биодоступность, стабильность взаимодействия с другими компонентами, а также меньший токсичный эффект, так как основное всасывание частиц в организме происходит в результате энтерального пищеварения (МР 1.2.2566-09; Макаева А et al., 2019). Это подтверждают полученные нами данные по оценке биодоступности химических элементов из наших опытных препаратов. Нами установлено достоверное увеличение данного показателя в экструдированном образце с высокодисперсным комплексом по всем оцениваемым элементам. Объяснение этого факта возможно с учётом ранее полученных знаний, согласно которым повышение биодоступности минеральных элементов из состава опытных кормовых добавок обусловлено активизацией деятельности микрофлоры пищеварительного тракта и частичного разрушения сырой клетчатки в окружении частиц высокодисперсных металлов. Помимо этого использование высокодисперсных систем даёт возможность облегчить проникновение минеральных веществ или биологически активного соединения через биологические барьеры, а также избежать метаболических модификаций, которые могли бы привести к низкой абсорбции (Атландерова К.Н. и др., 2018; Sharma K and Chugh A, 2009; Takeda K et al., 2011; Zeineldin M et al., 2018).

К числу факторов, влияющих на биодоступность кормов, также относят состав переваренной пищевой матрицы, синергизм и антагонизм различных компонентов, а также разнообразные физико-химические свойства материалов. Однако в рамках нашего эксперимента данные процессы остаются не раскрытыми, что определяет перспективность дальнейших исследований.

#### **Выводы.**

Использование экструзионной обработки пшеничных отрубей в сочетании с ВДП (CaCO<sub>3</sub>, Cu, Zn, Fe) изменяет структурный и химический составы опытного комплекса, способствуя повышению переваримости питательных веществ, при этом сопровождается ростом биодоступности минеральных веществ из кормового продукта.

**Исследования выполнены в соответствии с планом НИР на 2019-2021 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ 0761-2019-0005)**

#### Литература

1. Атландерова К.Н., Макаева А.М., Курилкина М.Я. Перспективы использования ультрадисперсных частиц в кормлении молодняка крупного рогатого скота // Нанотехнологии в сельском хозяйстве: перспективы и риски: материалы междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. чл.-корр. РАН С.А. Мирошникова, (г. Оренбург, 26-27 сент. 2018 г.). Оренбург: Изд-во ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН, 2018. С. 46-50. [Atlanderova KN, Makaeva AM, Kurilkina MYa. Perspektivy ispol'zovaniya ul'tradispersnykh chastits v kormlenii molodnyaka krupnogo rogatogo skota. (Conference proceedigs) Nanotekhnologii v sel'skom khozyaistve: perspektivy i riski: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. pod obshch. red. chl.-korr. RAN S.A. Miroshnikova, (g. Orenburg, 26-27 sent. 2018 g.). Orenburg: Izd-vo FGBNU FNTs BST RAN; 2018:46-50. (In Russ)].

2. Биологическая активность ионов, нано- и микрочастиц Cu и Fe в тесте ингибирования бактериальной биолюминисценции / Д.Г. Дерябин, Е.С. Алешина, Т.Д. Дерябина, Л.В. Ефремова // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2011. Вып. 6. С. 31-36. [Deryabin DG, Aleshina ES, Deryabina TD, Efremova LV. Biological activity of ions, nano- and micro-sized Cu

and Fe particles determined with a bioluminescence inhibition assay. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*. 2011;6:31-36. (*In Russ*).

3. Биологические эффекты, связанные с поступлением в организм цыплят-бройлеров наночастиц хрома в разной дозировке / С.В. Лебедев, И.А. Гавриш, И.З. Губайдуллина, С.В. Шабунин // *Сельскохозяйственная биология*. 2019. Т. 54. № 4. С. 820-831. doi: 10.15389/agrobiology.2019.4.820eng [Lebedev SV, Gavrish IA, Gubajdullina IZ, Shabunin SV. Effects caused by different doses of dietary chromium nanoparticles fed to broiler chickens. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*. 2019;54(4):820-831. (*In Russ*). doi: 10.15389/agrobiology.2019.4.820eng

4. Воздействие высокодисперсных частиц металлов на переваримость питательных веществ и обмен энергии в организме молодняка крупного рогатого скота / М.Я. Курилкина, Т.Н. Холодилина, Д.М. Муслимова, К.Н. Атландерова, О.А. Завьялов // *Вестник мясного скотоводства*. 2017. № 4(100). С. 197-201. [Kurilkina MYa, Kholodilina TN, Muslyumova DM, Atlanderova KN, Zavyalov OA. The effect of finely dispersed metal particles on the digestibility of nutrients and energy exchange in the body of young cattle. *Herald of Beef Cattle Breeding*. 2017;4(100):197-201. (*In Russ*).

5. Дускаев Г.К., Каримов И.Ф. Некоторые рекомендации и разработки для использования в кормлении крупного рогатого скота // *Мясное скотоводство – приоритеты и перспективы развития: материалы междунар. науч.-практ. конф. / под ред. чл.-корр. РАН С.А. Мирошников, (г. Оренбург, 25-27 апреля 2018 г.)*. Оренбург: Изд-во ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН, 2018. С. 167-175. [Duskaev GK, Karimov IF. Nekotorye rekomendatsii i razrabotki dlya ispol'zovaniya v kormlenii krupnogo rogatogo skota. (Conference proceedigs) *Myasnoe skotovodstvo – priority i perspektivy razvitiya: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. pod red. S.A. Miroshnikova, (g. Orenburg, 25-27 april 2018 g.)*. Orenburg: Izd-vo FGBNU FNTs BST RAN. 2018:167-175. (*In Russ*).

6. Изучение безопасности введения наночастиц меди с различными физико-химическими характеристиками в организм животных / О.А. Богословская, Е.А. Сизова, В.С. Полякова, С.А. Мирошников, И.О. Лейпунский, И.П. Ольховская, Н.Н. Глущенко // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2009. № 2(96). С. 124-127. [Bogoslovskaya OA, Sizova EA, Polyakova VC, Miroshnikov SA, Leipunsky IO, Olkhovskaya IP, Glushchenko NN. Studying of safety of copper nanoparticles introduction with different physical-chemical characteristics into animals' organism. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2009;2(96):124-127. (*In Russ*).

7. Использование клинкерной пыли как фактора способствующего повышению биологической доступности веществ экструдатов / А.С. Тиманова, С.А. Мирошников, О.Я. Соколова, Т.Н. Холодилина // *Вестник Оренбургского государственного университета. Приложение Биоэлементология*. 2006. 12S(62). С. 256-257. [Timanova AS, Miroshnikov SA, Sokolova OYa, Kholodilina TN. Ispol'zovanie klinkernoi pyli kak faktora sposobstvuyushchego povysheniyu biologicheskoi dostupnosti veshchestv ekstrudatov. *Vestnik of the Orenburg State University. Prilozhenie Bioelementologiya*. 2006;12S(62):256-257. (*In Russ*).

8. Исследование наночастиц металлов в качестве источника микроэлементов для животных / Е.В. Яушева, А.Г. Зелепухин, Н.И. Рябов, О.В. Кван, В.А. Раменский, А.Х. Заверюха, Ф.Х. Сиразетдинов // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 5. С. 470. [Yausheva EV, Zelepukhin AG, Ryabov NI, Kvan OV, Ramenskii VA, Zaveryukha AH, Sirazetdinov FH. Study of metal nanoparticles as a source of micronutrient for animals. *Modern Problems of Science and Education*. 2013;5:470. (*In Russ*).

9. Кальницкий Б.Д. Эффективность применения минеральной смеси и тесты для контроля обеспеченности животных минеральными элементами: справочник по кормовым добавкам. Минск: Ураджай, 1990. С. 190-194. [Kal'nitskii BD. Effektivnost' primeneniya mineral'noi smesi i testy dlya kontrolya obespechennosti zhivotnykh mineral'nymi elementami. *Spravochnik po kormovym dobavkam*. Minsk: Uradzhai; 1990:190-194. (*In Russ*).

10. К методике формирования однородных групп животных по элементному статусу / С.А. Мирошников, С.В. Лебедев, О.В. Кван, Ш.Г. Рахматуллин // *Вестник Оренбургского государственного университета. Приложение Биоэлементология*. 2006. № 2S(52). С. 45-46. [Miroshnikov SA, Lebedev SV,

Khvan OV, Rakhmatullin ShG. K metodike formirovaniya odnorodnykh grupp zhivotnykh po elementnomu status. Vestnik of the Orenburg State University. Prilozhenie Bioelementologiya. 2006;2S(52):45-46. (*In Russ*).

11. Лебедев С.В., Барышева Е.С., Малышева Н.В. Степень накопления и особенности взаимодействия токсичных и эссенциальных элементов в организме лабораторных животных (экспериментальные исследования) // Вестник Оренбургского государственного университета. Приложение Биоэлементология. 2006. № 2S(52). С. 33-35. [Lebedev SV, Barysheva ES, Malysheva NV. Stepen' nakopleniya i osobennosti vzaimodeistviya toksichnykh i essentsial'nykh elementov v organizme laboratornykh zhivotnykh (eksperimental'nye issledovaniya). Vestnik of the Orenburg State University. Prilozhenie Bioelementologiya. 2006;2S(52):33-35. (*In Russ*)].

12. Лебедев С.В. Особенности влияния дополнительного введения в рацион кур-несушек микроэлементов Cd, I, Se и Zn на макроэлементный состав яиц // Вестник Оренбургского государственного университета. 2009. № 12. С. 96-98. [Lebedev SV. Peculiarities of influence of Cd, I, Se and Zn microelements additional introduction into hen-layers ration on makroelementary structure of eggs. Vestnik of the Orenburg State University. 2009;12:96-98. (*In Russ*)].

13. Мирошников С.А., Сизова Е.А. Наноматериалы в животноводстве (обзор) // Вестник мясного скотоводства. 2017. № 3(99). С. 7-22. [Miroshnikov SA, Sizova EA. Nanomaterials in animal husbandry (review). Herald of Beef Cattle Breeding. 2017;3(99):7-22. (*In Russ*)].

14. МР 1.2.2566-09. Оценка безопасности наноматериалов in vitro и в модельных системах in vivo. Введ. 2009-12-10. М., 2009. 71 с. [MR 1.2.2566-09. Otsenka bezopasnosti nanomaterialov in vitro i v model'nykh sistemakh in vivo. Vved. 2009-12-10. Moscow, 2009:71 p. (*In Russ*)].

15. Назарова А.А., Полищук С.Д. Влияние нанокристаллического железа на минеральный обмен в организме животных: сб. тез. докл. участников Второго междунар. конкурса науч. работ молодых учёных в области нанотехнологий. М., 2009. С. 790-792. [Nazarova AA, Polishchuk SD. Vliyanie nanokristallicheskogo zheleza na mineral'nyi obmen v organizme zhivotnykh. (Conference proceedings) sb. tez. dokl. uchastnikov Vtorogo mezhdunar. konkursa nauch. rabot molodykh uchenykh v oblasti nanotekhnologii. Moscow. 2009;790-792. (*In Russ*)].

16. Самохин В.Т. Профилактика нарушений обмена микроэлементов у животных. 2-е изд., доп. Воронеж: Воронеж. ГАУ, 2003. 136 с. [Samokhin VT. Profilaktika narushenii obmena mikroelementov u zhivotnykh. 2-e izd., dop. Voronezh: Izd-vo Voronezh. GAU; 2003:136 p. (*In Russ*)].

17. Сизова Е.А. Сравнительная характеристика биологических эффектов разноразмерных наночастиц меди и железа // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2017. № 3. С. 13-17. [Sizova EA. Comparative analysis of the different-sized copper and iron nanoparticles biological effects. Vestnik of the Russian Agricultural Science. 2017;3:13-17. (*In Russ*)].

18. Сизова Е.А., Яушева Е.В. Сравнительная продуктивность цыплят-бройлеров при инъекционном введении разноразмерных ультрадисперсных частиц железа // Животноводство и кормопроизводство. 2019. Т. 102. № 1. С. 6-21. [Sizova EA, Yausheva EV. Comparative productivity of broiler chickens injected with variously sized ultrafine iron particles. Animal Husbandry and Fodder Production. 2019;102(1):6-21. (*In Russ*)]. doi: 10.33284/2658-3135-102-1-6

19. Сравнительные испытания ультрадисперсного сплава, солей и органических форм Cu и Zn как источников микроэлементов в кормлении цыплят-бройлеров / Е.А. Сизова, С.А. Мирошников, С.В. Лебедев, Ю.И. Левахин, И.А. Бабичева, В.И. Косилов // Сельскохозяйственная биология. 2018. Т. 53. № 2. С. 393-403. doi: 10.15389/agrobiology.2018.2.393eng [Sizova EA, Miroshnikov SA, Lebedev SV, Levakhin YuI, Babicheva IA, Kosilov VI. Comparative tests of various sources of microelements in feeding chicken-broilers. Sel'skokhozaistvennaya Biologia [Agricultural Biology]. 2018;53(2):393-403. (*In Russ*)]. doi: 10.15389/agrobiology.2018.2.393eng

20. Элементный и микробиологический состав рубца при использовании в кормлении крупного рогатого скота высокодисперсных частиц / А.М. Макаева, К.Н. Атландерова, Е.А. Сизова, С.А. Мирошников, В.В. Ваншин // Животноводство и кормопроизводство. 2019. Т. 102. № 3. С. 19-32. [Makaeva AM, Atlanderova KN, Sizova EA, Miroshnikov SA, Vanshin VV. The elemental and mi-

croecological composition of rumen after use of highly dispersive particles in cattle feeding. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019;102(3):19-32. (*In Russ*)]. doi: 10.33284/2658-3135-102-3-19

21. Gorlov IF, Levakhin VI, Radchikov VF, Tsai VP, Bozhkova SE. Effect of feeding with organic microelement complex on blood composition and beef production of young cattle. *Modern Applied Science*. 2015;9(10):8-16. doi: 10.5539/mas.v9n10p8

22. Fisinin VI, Miroshnikov SA, Sizova EA, Ushakov AS, Miroshnikova EP. Metal particles as trace-element sources: Current state and future prospects. *World's Poultry Science Journal*. 2018;74(3):523-540.

23. Makaeva A, Atlanderova K, Miroshnikov S, Sizova E. Rumen microbiome of cattle after introduction of ultrafine particles in feed. *FEBS Open Bio*. 2019;9(S1):416. doi: <https://doi.org/10.1002/2211-5463.12672>

24. Miroshnikov S, Sizova E, Yausheva E, Uimin M, Konev A, Minin A, Yermakov A, Nikiyan H. Comparative toxicity of CuZn nanoparticles with different physical and chemical characteristics. *Oriental Journal of Chemistry*. 2019;35(3):973-981. doi: <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/350308>

25. Ognik K, Stępniewska A, Cholewińska E, Kozłowski K. The effect of administration of copper nanoparticles to chickens in drinking water on estimated intestinal absorption of iron, zinc, and calcium. *Poultry Sci*. 2016;95(9):2045-2051. doi: <https://doi.org/10.3382/ps/pew200>

26. Pietroiusti A, Magrini A, Campagnolo L. New frontiers in nanotoxicology: Gut microbiota/microbiome-mediated effects of engineered nanomaterials. *Toxicol Appl Pharmacol*. 2016;299:90-95. doi: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2015.12.017>

27. Sahoo A, Swain R, Mishra SK. Effect of inorganic, organic and nano zinc supplemented diets on bioavailability and immunity status of broilers. *Int J Adv*. 2014;2(11):828-837.

28. Sharma K, Chugh A. Legal aspects of nanobiotechnology inventions: An Indian perspective. *SCRIPTed*. 2009;6(2):433-448. doi: 10.2966/script.060209.433

29. Takeda K et al. Health effects of nanomaterials on next generation. *Yakugaku Zasshi*. 2011;131(2):229-236. doi: <https://doi.org/10.1248/yakushi.131.229>

30. Zhao Y, Nalwa HS, editors. *Nanotoxicology – interactions of nanomaterials with biological systems*. American Scientific Publishers; 2006:500 p.

31. Zeineldin M, Barakat R, Elolimy A, Salem AZM, Elghandour MMY, Monroy JC. Synergetic action between the rumen microbiota and bovine health. *Microb Pathog*. 2018;124:106-115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.08.038>

#### References

1. Atlanderova KN, Makaeva AM, Kurilkina MYa. Prospects for the use of ultrafine particles in feeding of young cattle (Conference proceedings) *Nanotechnology in agriculture: prospects and risks: international materials of scientific-practical conf.* edited by RAS Corr. Memb. Miroshnikov SA, (Orenburg, September 26-27, 2018). Orenburg: Publishing House of the Federal State Budget Research Institution Federal Research Centre of BST RAS; 2018:46-50.

2. Deryabin DG, Aleshina ES, Deryabina TD, Efremova LV. Biological activity of ions, nano- and micro-sized Cu and Fe particles determined with a bioluminescence inhibition assay. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*. 2011;6:31-36.

3. Lebedev SV, Gavrish IA, Gubajdullina IZ, Shabunin SV. Effects caused by different doses of dietary chromium nanoparticles fed to broiler chickens *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*. 2019;54(4):820-831. (*In Russ*)]. doi: 10.15389/agrobiology.2019.4.820eng

4. Kurilkina MYa, Kholodilina TN, Muslyumova DM, Atlanderova KN, Zavyalov OA. The effect of finely dispersed metal particles on the digestibility of nutrients and energy exchange in the body of young cattle. *Herald of Beef Cattle Breeding*. 2017;4(100):197-201.

5. Duskaev GK, Karimov IF. Some recommendations and developments for use in feeding cattle (Conference proceedings) *Beef cattle breeding - priorities and development prospects: international materials of scientific-practical conf.* ed. RAS Corr. member Miroshnikov SA. (Orenburg, April 25-27, 2018).

Orenburg: Publishing House of the Federal State Budget Research Institution of Federal Research Centre of BST RAS; 2018:167-175.

6. Bogoslovskaya OA, Sizova EA, Polyakova VC, Miroshnikov SA, Leipunsky IO, Olkhovskaya IP, Glushchenko NN. Studying of safety of copper nanoparticles introduction with different physical-chemical characteristics into animals' organism. Vestnik of the Orenburg State University. 2009;2(96):124-127.

7. Timanova AS, Miroshnikov SA, Sokolova OYa, Kholodilina TN. Ispol'zovanie klinkernoi pyli kak faktora sposobstvuyushchego povysheniyu biologicheskoi dostupnosti veshchestv ekstrudatov. Vestnik of the Orenburg State University. Bioelementology application. 2006;12S(62):256-257.

8. Yausheva EV, Zelepukhin AG, Ryabov NI, Kvan OV, Ramenskii VA, Zaveryukha AH, Si-razetdinov FH. Study of metal nanoparticles as a source of micronutrient for animals. Modern Problems of Science and Education. 2013;5:470.

9. Kalnitsky BD. The effectiveness of the use of mineral mixtures and tests to control the provision of animals with mineral elements: a guide to feed additives. Minsk: Urajay; 1990:190-194.

10. Miroshnikov SA, Lebedev SV, Khvan OV, Rakhmatullin ShG. K metodike formirovaniya od-norodnykh grupp zhivotnykh po elementnomu status. Vestnik of the Orenburg State University. Bioelementology application. 2006;2S(52):45-46.

11. Lebedev SV, Barysheva ES, Malysheva NV. Stepen' nakopleniya i osobennosti vzai-modeistviya toksichnykh i essentsial'nykh elementov v organizme laboratornykh zhivotnykh (eksperi-mental'nye issledovaniya). Vestnik of the Orenburg State University. Bioelementology application. 2006;2S(52):33-35.

12. Lebedev SV. Peculiarities of influence of Cd, I, Se и Zn microelements additional introduction into hen-layers ration on makroelementary structure of eggs. Vestnik of the Orenburg State University. 2009;12:96-98.

13. Miroshnikov SA, Sizova EA. Nanomaterials in animal husbandry (review). Herald of Beef Cattle Breeding. 2017;3(99):7-22.

14. MP 1.2.2566-09. Safety assessment of nanomaterials in vitro and in model systems in vivo. Enter 2009-12-10. Moscow, 2009:71 p.

15. Nazarova AA, Polishchuk SD. The effect of nanocrystalline iron on mineral metabolism in animals. (Conference proceedings) Collection of thesis. doc. participants of the Second Int. competition scientific. works of young scientists in the field of nanotechnology. Moscow, 2009:790-792.

16. Samokhin VT. Prevention of metabolic disorders in microelements in animals. 2nd ed., Ext. Voronezh: Voronezh. GAU; 2003:136 p.

17. Sizova EA. Comparative analysis of the different-sized copper and iron nanoparticles biological effects. Vestnik of the Russian Agricultural Science. 2017;3:13-17.

18. Sizova EA, Yausheva EV. Comparative productivity of broiler chickens injected with variously sized ultrafine iron particles. Animal Husbandry and Fodder Production. 2019;102(1):6-21. doi: 10.33284/2658-3135-102-1-6

19. Sizova EA, Miroshnikov SA, Lebedev SV, Levakhin YuI, Babicheva IA, Kosilov VI. Comparative tests of various sources of microelements in feeding chicken-broilers. Sel'skokhozyaistvennaya Biologia [Agricultural Biology]. 2018;53(2):393-403. doi: 10.15389/agrobiology.2018.2.393eng

20. Makaeva AM, Atlanderova KN, Sizova EA, Miroshnikov SA, Vanshin VV. The elemental and microecological composition of rumen after use of highly dispersive particles in cattle feeding. Animal Husbandry and Fodder Production. 2019;102(3):19-32. (In Russ)]. doi: 10.33284/2658-3135-102-3-19

21. Gorlov IF, Levakhin VI, Radchikov VF, Tsai VP, Bozhkova SE. Effect of feeding with organic microelement complex on blood composition and beef production of young cattle. Modern Applied Science. 2015;9(10):8-16. doi: 10.5539/mas.v9n10p8

22. Fisinin VI, Miroshnikov SA, Sizova EA, Ushakov AS, Miroshnikova EP. Metal particles as trace-element sources: Current state and future prospects. World's Poultry Science Journal. 2018;74(3):523-540.

23. Makaeva A, Atlanderova K, Mirosnikov S, Sizova E. Rumen microbiome of cattle after introduction of ultrafine particles in feed. *FEBS Open Bio*. 2019;9(S1):416. doi: <https://doi.org/10.1002/2211-5463.12672>
24. Mirosnikov S, Sizova E, Yausheva E, Uimin M, Konev A, Minin A, Yermakov A, Nikiyan H. Comparative toxicity of CuZn nanoparticles with different physical and chemical characteristics. *Oriental Journal of Chemistry*. 2019;35(3):973-981. doi: <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/350308>
25. Ognik K, Stępniewska A, Cholewińska E, Kozłowski K. The effect of administration of copper nanoparticles to chickens in drinking water on estimated intestinal absorption of iron, zinc, and calcium. *Poultry Sci*. 2016;95(9):2045-2051. doi: <https://doi.org/10.3382/ps/pew200>
26. Pietroiusti A, Magrini A, Campagnolo L. New frontiers in nanotoxicology: Gut microbiota/microbiome-mediated effects of engineered nanomaterials. *Toxicol Appl Pharmacol*. 2016;299:90-95. doi: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2015.12.017>
27. Sahoo A, Swain R, Mishra SK. Effect of inorganic, organic and nano zinc supplemented diets on bioavailability and immunity status of broilers. *Int J Adv*. 2014;2(11):828-837.
28. Sharma K, Chugh A. Legal aspects of nanobiotechnology inventions: An Indian perspective. *SCRIPTed*. 2009;6(2):433-448. doi: 10.2966/script.060209.433
29. Takeda K, et al. Health effects of nanomaterials on next generation. *Yakugaku Zasshi*. 2011;131(2):229-236. doi: <https://doi.org/10.1248/yakushi.131.229>
30. Zhao Y, Nalwa HS, editors. *Nanotoxicology – interactions of nanomaterials with biological systems*. American Scientific Publishers; 2006:500 p.
31. Zeineldin M, Barakat R, Elolimy A, Salem AZM, Elghandour MMY, Monroy JC. Synergetic action between the rumen microbiota and bovine health. *Microb Pathog*. 2018;124:106-115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.08.038>

**Курилкина Марина Яковлевна**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Испытательного центра ЦКП, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)30-81-77, e-mail: [K\\_marina4@mail.ru](mailto:K_marina4@mail.ru)

**Завьялов Олег Александрович**, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник отдела технологии мясного скотоводства и производства говядины, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)30-81-78, e-mail: [oleg-zavyalov83@mail.ru](mailto:oleg-zavyalov83@mail.ru)

**Атландерова Ксения Николаевна**, младший научный сотрудник Испытательного центра ЦКП, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)30-81-77, e-mail: [atlander-kn@mail.ru](mailto:atlander-kn@mail.ru)

**Холодилина Татьяна Николаевна**, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий Испытательным центром ЦКП, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)30-81-77, e-mail: [icvniims@mail.ru](mailto:icvniims@mail.ru)

Поступила в редакцию 9 марта 2020 г.; принята после решения редколлегии 16 марта 2020 г.; опубликована 31 марта 2020 г. / Received: 9 March 2020; Accepted: 16 March 2020; Published: 31 March 2020