

А.В. Блинов¹
З.А. Рехман¹ ✉
А.А. Гвозденко¹
А.Б. Голик¹
А.А. Нагдалян¹
М.Б. Ребезов^{2, 3}

¹ Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

² Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, Москва, Россия

³ Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

✉ zafrehman1027@gmail.com

Поступила в редакцию:
20.02.2024

Одобрена после рецензирования:
10.04.2024

Принята к публикации:
24.04.2024

Research article

DOI: 10.32634/0869-8155-2024-382-5-117-123

Andrey V. Blinov¹
Zafar A. Rehman¹ ✉
Alexey A. Gvozdenko¹
Alexey B. Golik¹
Andrey A. Naghdalyan¹
Maksim B. Rebezov^{2, 3}

¹ North-Caucasus Federal university, Stavropol, Russia

² V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

✉ zafrehman1027@gmail.com

Received by the editorial office:
20.02.2024

Accepted in revised:
10.04.2024

Accepted for publication:
24.04.2024

Молочный продукт, обогащенный тройным марганецсодержащим комплексом

РЕЗЮМЕ

Дефицит микроэлементов является серьезной проблемой на территории России. В данной статье разработали комплекс эссенциального микроэлемента марганца с аскорбиновой кислотой и L-изолейцином. Свойства полученного соединения исследовали методами рентгенофазового анализа, ИК-спектроскопии, компьютерного квантово-химического моделирования. Установлено, что комплекс обладает аморфной структурой. В результате моделирования определили оптимальную модель взаимодействия: через карбоксильную группу и α-аминогруппу L-изолейцина и через C₂ и C₃ атомы аскорбиновой кислоты ($E = -2264,757$ ккал/моль). Данные квантово-химического моделирования подтвердили методом ИК-спектроскопии. Исследовали стабильность комплекса при различных технологических параметрах (pH, температура и время экспозиции). Для этого проводили многофакторный эксперимент с тремя входными параметрами и тремя уровнями варьирования. Показано, что на стабильность тройного комплекса эссенциального микроэлемента марганца с аскорбиновой кислотой и незаменимой аминокислотой L-изолейцин значительное влияние оказывают все параметры (pH, температура и время экспозиции). Установлено, что при увеличении pH, температуры и времени экспозиции происходит увеличение ΔEh , что свидетельствует о потере стабильности комплекса и его разрушении. Параметры, при которых наблюдается стабильность образцов, соответствуют наименьшим значениям ΔEh : pH = 3–7, $t = 25–60^\circ$, $\tau = 5–15$. На следующем этапе проводили обогащение молока полученным соединением в расчете 30% от суточной дозы потребления марганца и исследовали физико-химические параметры молока в зависимости от концентрации разработанного комплекса. Установили, что для обогащения аскорбатизолейцинатом марганца необходимо использовать концентрации 0,005 моль/л и меньше, так как полученные показатели соответствуют стандартам качества, установленным в Российской Федерации. По данным органолептической оценки, значения показателей (запах и вкус) молока, обогащенного аскорбатизолейцинатом марганца, превышают значения показателей контрольного образца (АО «МКС», г. Ставрополь, Россия) и образца, обогащенного неорганической формой железа — сульфатом марганца.

Ключевые слова: L-изолейцин, аскорбиновая кислота, марганец, молочный продукт, стабильность

Для цитирования: Блинов А.В., Рехман З.А., Гвозденко А.А., Голик А.Б., Нагдалян А.А., Ребезов М.Б. Молочный продукт, обогащенный тройным марганецсодержащим комплексом. *Аграрная наука*. 2024; 382(5): 117–123.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-382-5-117-123>

© Блинов А.В., Рехман З.А., Гвозденко А.А., Голик А.Б., Нагдалян А.А., Ребезов М.Б.

Dairy product enriched with triple manganese complex

ABSTRACT

Micronutrient deficiency is a serious problem in Russia. In this article, we developed a complex of the essential microelement manganese with ascorbic acid and L-isoleucine. The properties of the resulting compound were studied by X-ray phase analysis, IR spectroscopy, and computer quantum chemical modeling. It was established that the complex has an amorphous structure. As a result of the simulation, the optimal interaction model was determined: through the carboxyl group and α-amino group of L-isoleucine, and through the C₂ and C₃ atoms of ascorbic acid ($E = -2264.757$ kcal/mol). Quantum chemical modeling data were confirmed by IR spectroscopy. The stability of the complex was studied under various technological parameters (pH, temperature and exposure time). To do this, a multifactorial experiment was carried out with three input parameters and three levels of variation. It has been shown that the stability of the ternary complex of the essential microelement manganese with ascorbic acid and the essential amino acid L-isoleucine is significantly influenced by all parameters (pH, temperature and exposure time). It was found that with increasing pH, temperature and exposure time, ΔEh increases, which indicates a loss of stability of the complex and its destruction. The parameters at which the stability of the samples is observed correspond to the lowest values of ΔEh : pH = 3–7, $t = 25–60^\circ$, $\tau = 5–15$. At the next stage, milk was enriched with the resulting compound at the rate of 30% of the daily dose of manganese consumption and studied the physicochemical parameters of milk depending on the concentration of the developed complex. It was found that for the enrichment of manganese ascorbate isoleucinate it is necessary to use concentrations of 0.005 mol/l or less, since the obtained indicators correspond to the quality standards established in the Russian Federation. According to the organoleptic assessment, the values of the indicators (smell and taste) of milk enriched with manganese ascorbate isoleucinate exceed the values of the indicators of the control sample (JSC MKS, Stavropol, Russia) and the sample enriched with the inorganic form of iron — manganese sulfate.

Key words: L-isoleucine, ascorbic acid, manganese, dairy product, stability

For citation: Blinov A.V., Rehman Z.A., Gvozdenko A.A., Golik A.B., Naghdalyan A.A., Rebezov M.B. Dairy product enriched with triple manganese complex. *Agrarian science*. 2024; 382(5): 117–123 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-382-5-117-123>

© Blinov A.V., Rehman Z.A., Gvozdenko A.A., Golik A.B., Naghdalyan A.A., Rebezov M.B.

Введение/Introduction

В организме человека происходит большое количество сложных физических и химических процессов, таких как метаболизм углеводов, белков, жиров, внутриклеточные энергетические процессы, рост костной, а также соединительной ткани, свертывание крови [1–3]. Все эти процессы объединяет потребность в наличии различных микронутриентов^{1, 2}, таких как *Co*, *Mn*, *Se*, *I*, *Cr* и т. д. [4–8].

На данный момент одна из актуальных проблем — дефицит микроэлементов с высокой биологической доступностью [9], которые отвечают за нормальное функционирование различных процессов в организме человека и обеспечивают защиту организма от негативных факторов окружающей среды, а также предотвращают развитие ряда болезней [10–13]. Недостаток микроэлементов приводит к развитию хронических заболеваний, снижению умственной и физической активности [14–17].

Согласно исследованиям, в почвах средней и южной Сибири наблюдается низкое содержание марганца, из-за чего продукты растительного происхождения имеют дефицит *Mn* [18, 19]. Одна из ключевых функций марганца — участие в метаболизме инсулина, у людей с сахарным диабетом наблюдается дефицит этого микроэлемента в крови.

Для восполнения дефицита марганца можно скорректировать рацион питания и увеличить количество потребляемой пищи с высоким содержанием марганца, а также включить в рацион биологически активные добавки и витаминно-минеральные комплексы [20].

Другим способом восполнения дефицита марганца является потребление продуктов питания, обогащенных хелатными формами эссенциального микроэлемента марганца. Например, молочные продукты, обогащенные марганецсодержащим комплексом.

Современные исследования показали, что применение в качестве хелаторов эссенциальных микроэлементов органических соединений (аскорбиновая кислота, незаменимые аминокислоты) является эффективным способом повышения усвояемости микроэлементов [21].

Цель данного исследования — получение молочного продукта, обогащенного тройным марганецсодержащим комплексом — аскорбатойзолейцинатом марганца.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Синтез и исследование образцов аскорбатойзолейцината марганца проводили на базе кафедры физики и технологии наноструктур и материалов физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» в январе 2024 года.

Работу проводили с использованием следующих реактивов: *L*-изолейцин (ч., PanReas Applichem, г. Дармштадт, Германия), аскорбиновая кислота (ч. д. а., «ЛенРеактив», г. Санкт-Петербург), гидроксид бария и сульфат марганца (ч. д. а., «Интерхим», г. Санкт-Петербург).

Для синтеза аскорбатойзолейцината марганца (II) смешивали *L*-изолейцин с аскорбиновой кислотой в

мольном соотношении 1:1. Затем к полученной смеси добавляли гидроксид бария, дистиллированную воду и сульфат марганца (II). Из полученного раствора удаляли сульфат бария центрифугированием при 3000 об/мин в течение 5 мин.

Для изучения функциональных групп в полученных образцах использовали ИК-спектроскопию. Исследование проводили на ИК-спектрометре ФСМ-1201 с преобразованием Фурье (ООО «Инфраспек», г. Санкт-Петербург). Диапазон измерений составлял 400–4400 см^{–1}.

Для исследования фазового состава образцы исследовали методом рентгенофазового анализа на рентгеновском дифрактометре *PANalytical Empyrean* (корпорация Spectris, Великобритания).

Компьютерное квантово-химическое моделирование аскорбатойзолейцината марганца проводили в программе *QChem*³ с использованием молекулярного редактора *IQmol*⁴. Расчет осуществлялся на оборудовании центра обработки данных (Schneider Electric, Франция) ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». Расчеты проводили со следующими параметрами: расчет — *Energy*, метод — *HF*, базис — 6-31G, *convergence* — 5, силовое поле — *Chemical*.

Для исследования стабильности аскорбатойзолейцината марганца при различных значениях технологических параметров проводили многофакторный эксперимент, который включал в себя три входных параметра и три уровня варьирования.

В качестве входных параметров рассматривали активную кислотность среды (pH), время перемешивания (τ , мин.), температуру раствора (t , °C).

В качестве выходного параметра выступало изменение значения окислительно-восстановительного потенциала (ΔE_h). Значение окислительно-восстановительного потенциала определяли методом редокс-симметрии⁵.

Матрица многофакторного эксперимента представлена в таблице 1.

Таблица 1. Матрица многофакторного эксперимента

Table 1. Matrix of a multivariate experiment

| Опыт 1 | | Опыт 2 | | Опыт 3 | |
|---------------|----|---------------|----|---------------|----|
| pH | 3 | pH | 3 | pH | 3 |
| t , °C | 25 | t , °C | 60 | t , °C | 95 |
| τ , мин. | 5 | τ , мин. | 15 | τ , мин. | 25 |
| Опыт 4 | | Опыт 5 | | Опыт 6 | |
| pH | 7 | pH | 7 | pH | 7 |
| t , °C | 25 | t , °C | 60 | t , °C | 95 |
| τ , мин. | 15 | τ , мин. | 25 | τ , мин. | 5 |
| Опыт 7 | | Опыт 8 | | Опыт 9 | |
| pH | 11 | pH | 11 | pH | 11 |
| t , °C | 25 | t , °C | 60 | t , °C | 95 |
| τ , мин. | 25 | τ , мин. | 5 | τ , мин. | 15 |

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием программы *Statistica* 12.0⁶ и пакета прикладных программ *Statistica Neural Networks*⁷.

¹ Food Fortification: Unlocking Essential Nutrition for Mass Impact. — URL: <https://www.graygroupintl.com/blog/food-fortification>

² Food Fortification. — URL: <https://www.clearias.com/food-fortification/>

³ Q-Chem is a comprehensive ab initio quantum chemistry software for accurate predictions of molecular structures, reactivities, and vibrational, electronic and NMR spectra. — URL: <https://www.q-chem.com>

⁴ Gilbert A. Introduction to IQmol / A. Gilbert. — URL: <http://iqmol.org/downloads/IQmolUserGuide.pdf>

⁵ <https://electrochemistry.ru/methods/titrimetricheskij-analiz/okislitelno-vosstanovitelnoe-titrovanie/>

⁶ <https://statistica.software.informer.com/12.0/>

⁷ <https://docs.tibco.com/pub/stat/14.0.0/doc/html/UsersGuide/GUID-F60C241F-CD88-4714-A8C8-1F28473C52EE.html>

Обогащение молока с жирностью 3,2% (АО «МКС», г. Ставрополь, Россия) хелатным комплексом эссенциального микроэлемента марганца с аскорбиновой кислотой и *L*-изолейцином проводили из расчета 30% от суточной нормы потребления марганца (3 мг).

Исследование среднего гидродинамического радиуса мицелл казеина проводили методом динамического рассеяния света (DLS) на приборе Photocor-Complex (ООО «Антекс-97», Россия). Компьютерную обработку полученных результатов осуществляли с использованием программного обеспечения DynaLS⁸.

Исследование ζ -потенциала и электропроводности проводили методом акустической и электроакустической спектроскопии на установке DT-1202 (Dispersion Technology Inc., США). Активную кислотность среды определяли на рН-метре-(иономере) «Эксперт-001» (ООО «Эконикс-Эксперт», Россия).

Титруемую кислотность молока определяли титриметрическим методом согласно ГОСТ 3624⁹. Метод базируется на титровании молока раствором щелочи (гидроксидом натрия или калия) в присутствии индикатора фенолфталеина.

Исследования органолептических свойств проводили в соответствии с ГОСТ 28283¹⁰.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

На первом этапе полученный образец аскорбатизолейцината марганца исследовали методом рентгенофазового анализа. Результаты исследований представлены на рисунке 1.

Анализ дифрактограммы показал, что образец комплекса эссенциального микроэлемента с аскорбиновой кислотой и *L*-изолейцином (незаменимой аминокислотой) обладает аморфной структурой. Для исследования процесса взаимодействия *L*-изолейцина, аскорбиновой кислоты и марганца проводили квантово-химическое моделирование, в результате которого получили распределение электронной плотности, значения полной энергии молекулярной системы и абсолютной химической жесткости. Полученные данные представлены на рисунке 2 и в таблице 2.

Анализ полученных данных показал, что энергетически выгодной является молекулярная система комплекса аскорбатизолейцината марганца, в котором взаимодействие происходит через карбоксильную группу и α -аминогруппу *L*-изолейцина и через C_2 и C_3 атомы аскорбиновой кислоты. Данная молекулярная система обладает наименьшей энергией ($E = -2264,757$ ккал/моль).

Стоит отметить, что все варианты взаимодействия обладают значением химической жесткости $\eta \geq 0,100$ эВ.

Рис. 1. Дифрактограмма аскорбатизолейцината марганца

Fig. 1. Diffractogram of manganese ascorbate isoleucinate

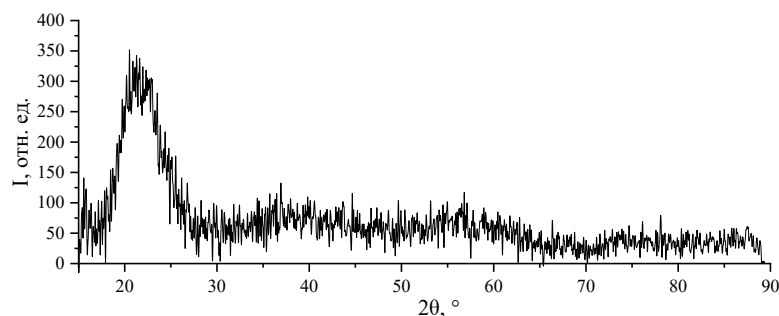


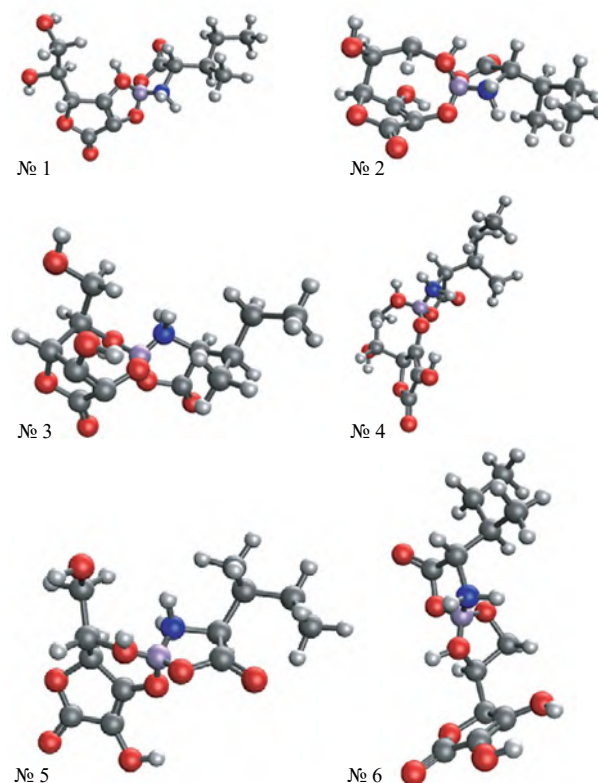
Таблица 2. Результаты квантово-химического моделирования аскорбатизолейцината марганца

Table 2. Results of quantum chemical modeling of manganese ascorbate isoleucinate

| Аминокислота | Взаимодействие с аминокислотой | Взаимодействие с аскорбиновой кислотой | E, ккал/моль | E _{номо} , эВ | E _{лumo} , эВ | η , эВ |
|---------------------|---|---|--------------|------------------------|------------------------|-------------|
| <i>L</i> -изолейцин | Через карбоксильную группу и α -аминогруппу изолейцина | Через OH группы C_2 и C_3 атомов аскорбиновой кислоты (№ 1) | -2264,757 | -0,206 | 0,039 | 0,123 |
| | | Через OH группы C_2 и C_6 атомов аскорбиновой кислоты (№ 2) | -2264,479 | -0,236 | 0,069 | 0,153 |
| | | Через OH группы C_2 и C_5 атомов аскорбиновой кислоты (№ 3) | -2264,543 | -0,211 | 0,055 | 0,133 |
| | | Через OH группы C_3 и C_6 атомов аскорбиновой кислоты (№ 4) | -2264,130 | -0,256 | 0,027 | 0,142 |
| | | Через OH группы C_5 и C_6 атомов аскорбиновой кислоты (№ 5) | -2264,456 | -0,160 | 0,055 | 0,108 |
| | | Через OH группы C_6 и C_5 атомов аскорбиновой кислоты (№ 6) | -2264,446 | -0,140 | 0,059 | 0,100 |

Рис. 2. Результаты моделирования аскорбатизолейцината марганца

Fig. 2. Modeling results of manganese ascorbate isoleucinate



⁸ https://bio.pnpi.nrcki.ru/wp-content/uploads/2020/01/Photocor-Compact-Z_Manual.pdf

⁹ ГОСТ 3624-92 Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности.

¹⁰ ГОСТ 28283-2015 Молоко коровье. Метод органолептической оценки вкуса и запаха.

Для подтверждения результатов моделирования образцы исследовали на ИК-спектрометре с преобразованием Фурье. Результаты исследований представлены на рисунке 3.

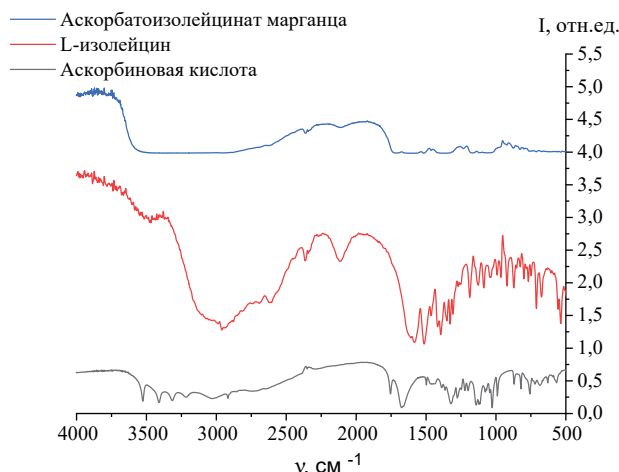
Анализ ИК-спектра аскорбиновой кислоты показал, что в области от 3150 до 3560 см^{-1} присутствуют полосы на 3525 см^{-1} , 3410 см^{-1} , 3315 см^{-1} и 3220 см^{-1} , которые характерны для валентных колебаний O-H групп. Полосы на 3030 и 2918 см^{-1} принадлежат CH_2 -группе. Полосы на 634, 719 и 1755 см^{-1} соответствуют колебаниям C=O . Полоса на 1670 см^{-1} соответствует колебаниям C=C . Полосы на 1498 см^{-1} , 1365 см^{-1} , 1197 см^{-1} , 990 см^{-1} соответствуют деформационным колебаниям CH_2 -группы. Полоса на 1220 см^{-1} соответствует деформационным колебаниям CH -группы. Полосы на 1278, 1392 и 1448 см^{-1} соответствуют деформационным колебаниям C-O-H , наблюдаемых у C_2 , C_3 , C_5 , C_6 атомов аскорбиновой кислоты. Полосы на 1075, 1112, 1144 и 1330 см^{-1} соответствуют деформационным колебаниям C-OH , наблюдаемых у C_2 , C_3 , C_5 , C_6 атомов аскорбиновой кислоты. Полосы на 756, 871 и 1755 см^{-1} соответствуют колебаниям C=C [22–24].

Анализ ИК-спектра L -изолейцина показал, что в спектре присутствуют характерные для аминокислот полосы колебаний на 1512 см^{-1} и 1610 см^{-1} , соответствующие деформационным колебаниям NH_3^+ группы. Установлено, что полосы колебаний на 1325 см^{-1} и 1579 см^{-1} соответствуют колебаниям COO^- группы. В области до 1300 см^{-1} присутствуют деформационные колебания $-\text{CH}_2$ и $-\text{CH}_3$ групп. В области от 2500 до 3200 см^{-1} присутствуют валентные колебания NH_3^+ , $-\text{CH}_2$ и $-\text{CH}_3$ групп [25].

В ИК-спектре аскорбатизолейцината марганца наблюдается уменьшение интенсивности полос на 1512 см^{-1} , на 1610 см^{-1} , соответствующих деформационным колебаниям NH_3^+ группы, и на 1325 см^{-1} , на 1579 см^{-1} , соответствующих колебаниям COO^- группы, характерных для L -изолейцина. Наблюдается уменьшение интенсивности полос на 1112, 1144 и 1330 см^{-1} , соответствующих деформационным колебаниям C-OH , на 1278, 1392 и 1448 см^{-1} , соответствующих деформационным колебаниям C-O-H аскорбиновой кислоты. Таким образом, можно сделать вывод о том, что образование аскорбатизолейцината марганца происходит через OH группы аскорбиновой кислоты и через COO^- и NH_3^+ группы аминокислот.

Полученные результаты ИК-спектроскопии согласуются с данными компьютерного квантово-химического моделирования.

Рис. 3. ИК-спектр аскорбатизолейцината марганца
Fig. 3. IR spectrum of manganese ascorbate isoleucinate



На следующем этапе исследовали стабильность аскорбатизолейцината марганца. В результате обработки экспериментальных данных получили зависимости изменения значения окислительно-восстановительного потенциала (ΔEh) от pH, температуры и времени экспозиции. Полученные зависимости представлены на рисунке 4.

Анализ изменения значения окислительно-восстановительного потенциала (ΔEh) от pH, температуры и времени экспозиции показал, что на стабильность тройного комплекса эссенциального микроэлемента марганца с аскорбиновой кислотой и L -изолейцином (незаменимой аминокислотой) значительное влияние оказывают все параметры (pH, температуры и времени экспозиции). Установлено, что при увеличении pH, температуры и времени экспозиции происходит увеличение ΔEh , что свидетельствует о потере стабильности комплекса и его разрушении.

Параметры, при которых наблюдается стабильность образцов, соответствуют наименьшим значениям ΔEh : pH = 3–7, t = 25–60°, τ = 5–15.

Далее проводили обогащение молока тройным марганецсодержащим комплексом и исследовали влияние концентрации данного соединения на физико-химические параметры дисперсной фазы молока. Использовали концентрацию аскорбатизолейцината марганца — 0,05 моль/л. Результаты исследований представлены в таблице 3.

Рис. 4. Зависимости изменения значения окислительно-восстановительного потенциала (ΔEh) от pH, температуры и времени экспозиции: а — pH и t , б — pH и τ , в — t и τ

Fig. 4. Dependence of changes in the value of the redox potential (ΔEh) on pH, temperature and exposure time: а — pH and t , б — pH and τ , в — t and τ

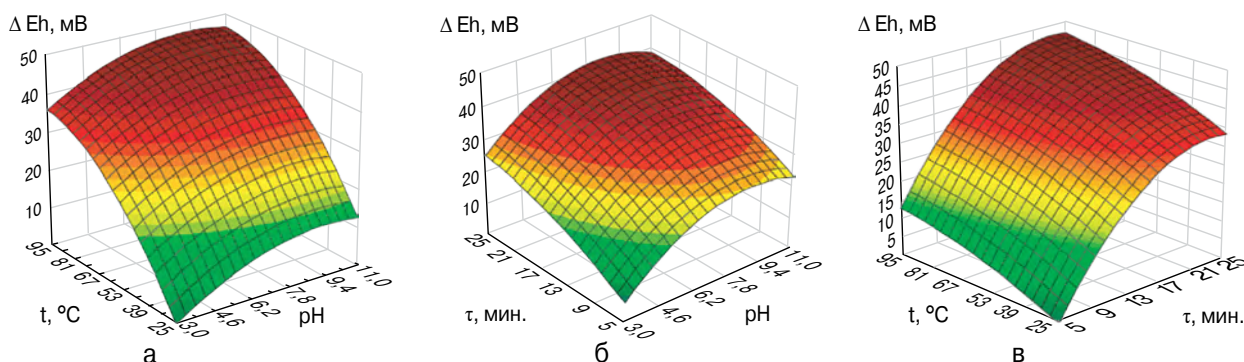


Таблица 3. Физико-химические параметры дисперсной фазы молока
Table 3. Physico-chemical parameters of the dispersed phase of milk

| Параметр | Концентрация аскорбатизолейцината марганца | | | | Контроль |
|---------------------------|--|--------------|---------------|----------------|----------|
| | 0,05 моль/л | 0,005 моль/л | 0,0005 моль/л | 0,00005 моль/л | |
| R, нм | 300 | 33 | 31 | 30 | 30 |
| Электропроводность, См/м | 1,425 | 1,313 | 1,134 | 0,9246 | 0,78 |
| ζ-потенциал, мВ | -1,09 | 1,00 | -0,79 | 0,99 | -0,52 |
| pH | 6,23 | 6,71 | 6,77 | 6,77 | 6,78 |
| Титруемая кислотность, °Т | 28,5 | 18,00 | 18,50 | 20,50 | 18 |

Анализ полученных данных показал, что изменение концентрации практически не оказывает влияния на электропроводность образцов и заряд мицелл казеина дисперсной фазы молока. Однако концентрация тройного марганецсодержащего комплекса влияет на средний гидродинамический радиус мицелл казеина, титруемую кислотность и pH. При концентрации 0,00005 моль/л, 0,0005 моль/л и 0,005 моль/л значения среднего гидродинамического радиуса мицелл казеина, титруемой кислотности и pH значительно не отличаются от значений контрольного образца. При увеличении концентрации до 0,05 моль/л средний гидродинамический радиус мицелл казеина увеличивается до 300 нм, титруемая кислотность увеличивается до 28,5 °Т, а pH образца уменьшается до 6,23.

Таким образом, для обогащения аскорбатизолейцинатом марганца необходимо использовать концентрации 0,005 моль/л и меньше.

На заключительном этапе исследований проводили органолептическую оценку молока, обогащенного аскорбатизолейцинатом марганца. Результаты исследований представлены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты органолептической оценки
Table 4. Tasting results

| Наименование образцов | Запах и вкус | Оценка, балл |
|--|--------------------------------------|--------------|
| Молоко, обогащенное неорганической формой марганца — сульфатом марганца | Чистый, приятный, слегка сладковатый | 4,45 |
| Молоко, обогащенное хелатной формой эссенциального микроэлемента марганца аскорбатизолейцинатом марганца | Чистый, приятный, слегка сладковатый | 4,60 |
| Молоко «чистое» (из торговой сети, необогащенное) | Чистый, приятный, слегка сладковатый | 4,50 |

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-76-00029.
<https://rscf.ru/project/22-76-00029/>

FUNDING

This research was funded by Russian Science Foundation No. 22-76-00029.
<https://rscf.ru/project/22-7600029/>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Sultana S. *et al.* Impacts of nutritive and bioactive compounds on cancer development and therapy. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023; 63(28): 9187–9216.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2062699>
- Sarkar T. *et al.* Underutilized green leafy vegetables: frontier in fortified food development and nutrition. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023; 63(33): 11679–11733.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2095555>
- Thiruvengadam M. *et al.* A comprehensive review of beetroot (*Beta vulgaris* L.) bioactive components in the food and pharmaceutical industries. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024; 64(3): 708–739.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2108367>

REFERENCES

- Sultana S. *et al.* Impacts of nutritive and bioactive compounds on cancer development and therapy. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023; 63(28): 9187–9216.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2062699>
- Sarkar T. *et al.* Underutilized green leafy vegetables: frontier in fortified food development and nutrition. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023; 63(33): 11679–11733.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2095555>
- Thiruvengadam M. *et al.* A comprehensive review of beetroot (*Beta vulgaris* L.) bioactive components in the food and pharmaceutical industries. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024; 64(3): 708–739.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2108367>

Анализ результатов показал, что значения показателей (запах и вкус) молока, обогащенного аскорбатизолейцинатом марганца, превышают значения показателей контрольного образца и образца, обогащенного неорганической формой железа — сульфатом марганца.

Выводы/Conclusions

В данной статье проведен синтез тройного комплекса эссенциального микроэлемента марганца с аскорбиновой кислотой и L-изолейцином (незаменимой аминокислотой). С помощью метода рентгенофазового анализа установили, что комплекс обладает аморфной структурой.

В результате моделирования определили оптимальную модель взаимодействия: через карбоксильную группу и α-аминогруппу L-изолейцина и через C₂ и C₃ атомы аскорбиновой кислоты (E = - 2264,757 ккал/моль). Данные ИК-спектроскопии подтвердили выводы квантово-химического моделирования.

В рамках исследования стабильности аскорбатизолейцината марганца установлено, что при увеличении pH, температуры и времени экспозиции происходит увеличение ΔEh, что свидетельствует о потере стабильности комплекса и его разрушении. Параметры, при которых наблюдается стабильность образцов, соответствуют наименьшим значениям ΔEh: pH = 3–7, t = 25–60, τ = 5–15.

Исследовали влияние концентрации на физико-химические параметры дисперсной фазы молока. Установили, что для обогащения аскорбатизолейцинатом марганца необходимо использовать концентрации 0,005 моль/л и меньше. При данных концентрациях наблюдаются следующие значения: pH — 6,7–6,8, титруемая кислотность — от 18 до 20,5 °Т, средний гидродинамический радиус — около 30 ± 5 нм.

Органолептическая оценка образцов показала, что значения показателей (запах и вкус) молока, обогащенного аскорбатизолейцинатом марганца, превышают значения показателей контрольного образца (АО «МКС», г. Ставрополь, Россия) и образца, обогащенного неорганической формой железа — сульфатом марганца.

4. Казакова Т.В. Адаптационные реакции организма на фоне субхронического воздействия марганца. *Агаджанянские чтения. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. М.: Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы. 2023; 167–170. <https://elibrary.ru/fbaxkj>
5. Некрасов В.И., Скальный А.В., Дубовой Р.М. Роль микроэлементов в повышении функциональных резервов организма человека. *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2006; (1): 111–113. <https://elibrary.ru/kwznxl>
6. Новиков В.С., Шустов Е.Б. Роль минеральных веществ и микроэлементов в сохранении здоровья человека. *Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук*. 2017; (3): 5–16. <https://elibrary.ru/zsived>
7. Chen P., Bornhorst J.B., Aschner M. Manganese metabolism in humans. *Frontiers in Bioscience-Landmark*. 2018; 23(9): 1655–1679. <https://doi.org/10.2741/4665>
8. Leach R.M., Harris E.D. Manganese. O'Dell B.L., Sunde R.A. (eds.). *Handbook of Nutritionally Essential Mineral Elements*. Boca Raton: CRC Press. 1997; 335–356. <https://doi.org/10.1201/9781482273106-10>
9. Keen C.L., Ensunsa J.L., Clegg M.S. Manganese metabolism in animals and humans including the toxicity of manganese. Sigel A., Sigel H. (eds.). *Metal Ions in Biological Systems*. Boca Raton: CRC Press. 2000; 37: 89–121. <https://doi.org/10.1201/9781482289893-14>
10. Tuschl K., Mills P.B., Clayton P.T. Manganese and the Brain. *International Review of Neurobiology*. 2013; 110: 277–312. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410502-7.00013-2>
11. Budinger D., Barral S., Soo A.K.S., Kurian M.A. The role of manganese dysregulation in neurological disease: emerging evidence. *The Lancet Neurology*. 2021; 20(11): 956–968. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(21\)00238-6](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(21)00238-6)
12. Bauer J.A. et al. Critical windows of susceptibility in the association between manganese and neurocognition in Italian adolescents living near ferro-manganese industry. *NeuroToxicology*. 2021; 87: 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2021.08.014>
13. Gonzalez-Alvarez M.A., Hernandez-Bonilla D., Plascencia-Alvarez N.I., Riojas-Rodriguez H., Rosselli D. Environmental and occupational exposure to metals (manganese, mercury, iron) and Parkinson's disease in low and middle-income countries: a narrative review. *Reviews on Environmental Health*. 2022; 37(1): 1–11. <https://doi.org/10.1515/reveh-2020-0140>
14. Avila D.S., Puntel R.L., Aschner M. Manganese in Health and Disease. Sigel A., Sigel H., Sigel R.K.O. (eds.). *Interrelations between Essential Metal Ions and Human Diseases*. Dordrecht: Springer. 2014; 199–227. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7500-8_7
15. Wilcox J.M. et al. YAC128 mouse model of Huntington disease is protected against subtle chronic manganese (Mn)-induced behavioral and neuropathological changes. *NeuroToxicology*. 2021; 87: 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2021.09.002>
16. Ахметшина З.Р. Дефицит витаминов и микроэлементов в питании человека. *Гуманитарные и правовые проблемы современной России. Материалы XVIII Всероссийской студенческой научно-практической конференции*. Новосибирск: Золотой колос. 2023; 3: 19–22. <https://elibrary.ru/gpualm>
17. Муслимов Н.Ж., Туякова А.Р., Далабаев А.Б. Определение количественного выхода экстракта из пророщенного зерна. *Вестник науки Казахского агротехнического исследовательского университета им. С. Сейфуллина*. 2023; (2): 32–42 (на казах. яз.). <https://elibrary.ru/sdnhnx>
18. Побилат А.Е., Волошин Е.И. Марганец в почвах и растениях южной части Средней Сибири. *Микроэлементы в медицине*. 2017; 18(2): 43–47. <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2017-18-2-43-47>
19. Азаренко Ю.А. Закономерности содержания, распределения, взаимосвязей микроэлементов в системе «почва — растение» в условиях юга Западной Сибири. Омск: *Вариант-Омск*. 2013; 229. ISBN 978-5-904754-52-5 <https://elibrary.ru/tlztqj>
20. Скальный А.В., Сульдин А.В., Иванова Н.А., Самбулова А.А., Липина М.В. Разработка средств лечения и профилактики минералодифицитных состояний цинка, меди, марганца, хрома и кобальта. *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2011; (15): 123–126. <https://elibrary.ru/oydfdz>
21. Блинов А.В., Серов А.В., Кравцов В.А., Русанов А.Ю., Соловьева С.Н. Способы повышения биодоступности эссенциальных микроэлементов. Физико-химическая биология. Материалы III Международной научной интернет-конференции. Ставрополь: Ставропольский государственный медицинский университет. 2015; 28–30. <https://elibrary.ru/vjsvjb>
22. Lohmann W., Pagel D., Penka V. Structure of ascorbic acid and its biological function: Determination of the conformation of ascorbic acid and isoascorbic acid by infrared and ultraviolet investigations. *European Journal of Biochemistry*. 1984; 138(3): 479–480. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1984.tb07941.x>
23. Metreveli N.O. et al. UV-vis and FT-IR spectra of ultraviolet irradiated collagen in the presence of antioxidant ascorbic acid. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2010; 73(3): 448–455. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2009.12.005>
24. Yadav R.A., Rani P., Kumar M., Singh R., Singh P., Singh N.P. Experimental IR and Raman spectra and quantum chemical studies of molecular structures, conformers and vibrational characteristics of L-ascorbic acid and its anion and cation. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2011; 84(1): 6–21. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.07.043>
25. Zhang X., Yang Z., Li W., Yang L., Weng S., Wu J. The interaction between amino acids and metal ions (I). The FT-IR spectroscopic study of the binding between d,l-homocysteic acid and alkali metal ions. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2004; 60(1–2): 235–240. [https://doi.org/10.1016/S1386-1425\(03\)00224-5](https://doi.org/10.1016/S1386-1425(03)00224-5)
4. Kazakova T.V. Adaptive reactions of the body against the background of subchronic exposure to manganese. *Aghajanian readings. Materials of the IV All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba. 2023; 167–170 (in Russian). <https://elibrary.ru/fbaxkj>
5. Nekrasov V.I., Skalny A.V., Dubovoy R.M. The role of microelements in increasing the functional reserves of the human body. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2006; (1): 111–113 (in Russian). <https://elibrary.ru/kwznxl>
6. Novikov V.S., Shustov E.B. Role of minerals and microelements in human health maintenance. *Vestnik obrazovaniya i razvitiya nauki Rossiyskoy akademii yestestvennykh nauk*. 2017; (3): 5–16 (in Russian). <https://elibrary.ru/zsived>
7. Chen P., Bornhorst J.B., Aschner M. Manganese metabolism in humans. *Frontiers in Bioscience-Landmark*. 2018; 23(9): 1655–1679. <https://doi.org/10.2741/4665>
8. Leach R.M., Harris E.D. Manganese. O'Dell B.L., Sunde R.A. (eds.). *Handbook of Nutritionally Essential Mineral Elements*. Boca Raton: CRC Press. 1997; 335–356. <https://doi.org/10.1201/9781482273106-10>
9. Keen C.L., Ensunsa J.L., Clegg M.S. Manganese metabolism in animals and humans including the toxicity of manganese. Sigel A., Sigel H. (eds.). *Metal Ions in Biological Systems*. Boca Raton: CRC Press. 2000; 37: 89–121. <https://doi.org/10.1201/9781482289893-14>
10. Tuschl K., Mills P.B., Clayton P.T. Manganese and the Brain. *International Review of Neurobiology*. 2013; 110: 277–312. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410502-7.00013-2>
11. Budinger D., Barral S., Soo A.K.S., Kurian M.A. The role of manganese dysregulation in neurological disease: emerging evidence. *The Lancet Neurology*. 2021; 20(11): 956–968. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(21\)00238-6](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(21)00238-6)
12. Bauer J.A. et al. Critical windows of susceptibility in the association between manganese and neurocognition in Italian adolescents living near ferro-manganese industry. *NeuroToxicology*. 2021; 87: 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2021.08.014>
13. Gonzalez-Alvarez M.A., Hernandez-Bonilla D., Plascencia-Alvarez N.I., Riojas-Rodriguez H., Rosselli D. Environmental and occupational exposure to metals (manganese, mercury, iron) and Parkinson's disease in low and middle-income countries: a narrative review. *Reviews on Environmental Health*. 2022; 37(1): 1–11. <https://doi.org/10.1515/reveh-2020-0140>
14. Avila D.S., Puntel R.L., Aschner M. Manganese in Health and Disease. Sigel A., Sigel H., Sigel R.K.O. (eds.). *Interrelations between Essential Metal Ions and Human Diseases*. Dordrecht: Springer. 2014; 199–227. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7500-8_7
15. Wilcox J.M. et al. YAC128 mouse model of Huntington disease is protected against subtle chronic manganese (Mn)-induced behavioral and neuropathological changes. *NeuroToxicology*. 2021; 87: 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2021.09.002>
16. Akhmetshina Z.R. Deficiency of vitamins and trace elements in human nutrition. *Humanitarian and legal problems of modern Russia. Proceedings of the XVIII All-Russian student scientific and practical conference*. Novosibirsk: Zolotoy Kolos. 2023; 3: 19–22 (in Russian). <https://elibrary.ru/gpualm>
17. Muslimov N.J., Tuyakova A.R., Dalabaev A.B. Determination of the quantitative yield of the extract from sprouted grain. *Herald of science of S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University*. 2023; (2): 32–42 (in Kazakh). <https://elibrary.ru/sdnhnx>
18. Pobilat A.E., Voloshin E.I. Manganese in soils and plants of the southern part of Central Siberia. *Trace Elements in Medicine*. 2017; 18(2): 43–47 (in Russian). <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2017-18-2-43-47>
19. Azarenko Yu.A. Regularities of content, distribution, relationships of microelements in the soil — plant system in the conditions of the south of Western Siberia. Omsk: *Variat-Omsk*. 2013; 229 (in Russian). ISBN 978-5-904754-52-5 <https://elibrary.ru/tlztqj>
20. Skalny A.V., Suldin A.V., Ivanova N.A., Sambulova A.A., Lipina M.V. Development of medicines for treatment and prevention of zinc, copper, manganese, chromium and cobalt deficiency. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2011; (15): 123–126 (in Russian). <https://elibrary.ru/oydfdz>
21. Blinov A.V., Serov A.V., Kravtsov V.A., Rusanov A.Yu., Solovyova S.N. Methods for increasing the bioavailability of essential microelements. *Physico-chemical biology. Materials of the III International Scientific Internet Conference*. Stavropol: Stavropol State Medical University. 2015; 28–30 (in Russian). <https://elibrary.ru/vjsvjb>
22. Lohmann W., Pagel D., Penka V. Structure of ascorbic acid and its biological function: Determination of the conformation of ascorbic acid and isoascorbic acid by infrared and ultraviolet investigations. *European Journal of Biochemistry*. 1984; 138(3): 479–480. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1984.tb07941.x>
23. Metreveli N.O. et al. UV-vis and FT-IR spectra of ultraviolet irradiated collagen in the presence of antioxidant ascorbic acid. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2010; 73(3): 448–455. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2009.12.005>
24. Yadav R.A., Rani P., Kumar M., Singh R., Singh P., Singh N.P. Experimental IR and Raman spectra and quantum chemical studies of molecular structures, conformers and vibrational characteristics of L-ascorbic acid and its anion and cation. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2011; 84(1): 6–21. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.07.043>
25. Zhang X., Yang Z., Li W., Yang L., Weng S., Wu J. The interaction between amino acids and metal ions (I). The FT-IR spectroscopic study of the binding between d,l-homocysteic acid and alkali metal ions. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2004; 60(1–2): 235–240. [https://doi.org/10.1016/S1386-1425\(03\)00224-5](https://doi.org/10.1016/S1386-1425(03)00224-5)

ОБ АВТОРАХ

Андрей Владимирович Блинов¹

кандидат технических наук, доцент кафедры физики и технологии наноструктур и материалов
blinov.a@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4701-8633>

Зафар Абдулович Рехман¹

ассистент кафедры физики и технологии наноструктур и материалов

zafrehman1027@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2809-4945>

Алексей Алексеевич Гвозденко¹

ассистент кафедры физики и технологии наноструктур и материалов

gvozdenco.1999a@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7763-5520>

Алексей Борисович Голик¹

ассистент кафедры физики и технологии наноструктур и материалов

lexgooldman@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2580-9474>

Андрей Ашотович Нагдалян¹

кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории пищевой и промышленной биотехнологии

geniando@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6782-2821>

Максим Борисович Ребезов^{2, 3}

- доктор сельскохозяйственных наук, кандидат ветеринарных наук, профессор, главный научный сотрудник²;
- доктор сельскохозяйственных наук, кандидат ветеринарных наук, профессор кафедры биотехнологии и пищевых продуктов³

rebezov@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

¹ Северо-Кавказский федеральный университет, ул. им. Пушкина, 1, Ставрополь, 355002, Россия

² Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук,

ул. им. Талалихина, 26, Москва, 109316, Россия

³ Уральский государственный аграрный университет, ул. им. Карла Либкнехта, 42, Екатеринбург, 620075, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Andrey Vladimirovich Blinov¹

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials
blinov.a@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4701-8633>

Zafar Abdulovich Rekhman¹

Assistant at the Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials

zafrehman1027@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2809-4945>

Alexey Alexeevich Gvozdenco¹

Assistant at the Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials

gvozdenco.1999a@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7763-5520>

Alexey Borisovich Golik¹

Assistant at the Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials

lexgooldman@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2580-9474>

Andrey Ashotovich Nagdalyan¹

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Research Laboratory of Food and Industrial Biotechnology

geniando@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6782-2821>

Maksim Borisovich Rebezov^{2, 3}

- Doctor of Agricultural Sciences, Candidate of Veterinary Sciences, Professor, Chief Researcher²;
- Doctor of Agricultural Sciences, Candidate of Veterinary Sciences, Professor of the Department of Biotechnology and Food Products³

rebezov@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0857-5143>

¹ North Caucasus Federal University, 1 Pushkin Str., Stavropol, 355002, Russia

² V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences,

26 Talalikhin Str., Moscow, 109316, Russia

³ Ural State Agrarian University, 42 Karl Liebknecht Str., Yekaterinburg, 620075, Russia

Подпишитесь на печатные выпуски «АГРАРНОЙ НАУКИ» с любого месяца и на любой срок

» В РЕДАКЦИИ по тел. +7 (495) 777 67 67, доб. 1453, по e-mail agrovetpress@inbox.ru

» В АГЕНТСТВЕ ПОДПИСКИ
ООО «Урал-Пресс Округ»
<https://www.ural-press.ru/catalog/>



» БЕСПЛАТНАЯ ПОДПИСКА
НА ЭЛЕКТРОННУЮ ВЕРСИЮ
на отраслевом портале
<https://agrarnayanauka.ru>



» ПОДПИСКА НА АРХИВНЫЕ НОМЕРА
И ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ
на сайте Научной электронной библиотеки
www.elibrary.ru

