

ИЗУЧЕНИЕ НЕЙРОПРОТЕКТОРНОЙ АКТИВНОСТИ ОБОГАЩЕННОГО БЕЛКОВОГО КОНЦЕНТРАТА НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ХОЛОДОВОГО СТРЕССА

Лебедева С.Н.¹,
Щёктова А.В.¹,
Атласова Д.В.²,
Аюшеева Р.Б.¹,
Жамсаранова С.Д.¹,
Котова Т.И.¹

¹ ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» Министерства науки и высшего образования РФ (670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, Россия)

² ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» Министерства науки и высшего образования РФ (690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, Россия)

Автор, ответственный за переписку:
Лебедева Светлана Николаевна,
e-mail: lebedeva1959@mail.ru

РЕЗЮМЕ

Обоснование. Холодовой стресс, как один из важнейших факторов внешней среды в районах холодного климата, может вызывать нарушения гомеостаза организма и приводить к различным патологическим состояниям. Дефицит магния в этих условиях может быть компенсирован путем добавления в рацион питания органических форм магнийсодержащих добавок.

Цель исследования. Оценка нейропротекторных свойств белкового сывороточного концентрата, обогащенного магнием и пробиотическими культурами, на модели холодового стресса.

Методы. Был использован концентрат термически осажденных белков молочной сыворотки (белковая добавка), содержащий хелатную форму магния и обогащенный лактобактериями. Исследование проводилось 21 день на модели холодового стресса на 18 беспородных крысах-самцах: 1-я группа – интактная, 2-я группа – контрольная (перорально вода 0,2 мл + холодовой стресс), 3-я группа – опытная (перорально добавка 0,2 мл + холодовой стресс). В тесте «Открытое поле» определяли параметры общей двигательной и исследовательской активности, интегральный уровень тревожности. Статистический анализ проводили с помощью пакета программ «Biostat-2006».

Результаты. Животные, получавшие добавку, проявляли большую горизонтальную и вертикальную активность. Их суммарная двигательная активность была на 42,5 % выше по сравнению с контрольной группой и на 122,2 % – по сравнению с интактной группой. У крыс опытной группы исследовательская активность была на 143,9 % выше, чем у животных интактной группы, и на 42,3 % выше, чем в контрольной. Уровень тревожности в опытной группе был на 75,3 % ниже, чем в интактной и на 74,9 % ниже, чем в контрольной.

Заключение. На модели холодового стресса установлена нейропротекторная эффективность обогащенного белкового концентрата, о чем свидетельствует увеличение общей и исследовательской активности, снижение уровня тревожности животных. Добавка может быть рекомендована в качестве источника белка и магния при воздействии низких температур самостоятельно и в составе пищевых продуктов.

Ключевые слова: холодовой стресс, белковый концентрат, хелатный магний, нейротропная активность

Статья поступила: 14.09.2024
Статья принята: 25.04.2025
Статья опубликована: 20.05.2025

Для цитирования: Лебедева С.Н., Щёктова А.В., Атласова Д.В., Аюшеева Р.Б., Жамсаранова С.Д., Котова Т.И. Изучение нейропротекторной активности обогащенного белкового концентрата на экспериментальной модели холодового стресса. *Acta biomedica scientifica*. 2025; 10(2): 217-228. doi: 10.29413/ABS.2025-10.2.22

STUDY OF NEUROPROTECTIVE ACTIVITY OF ENRICHED PROTEIN CONCENTRATE ON AN EXPERIMENTAL MODEL OF COLD STRESS

Lebedeva S.N.¹,
Shchekotova A.V.¹,
Atlasova D.V.²,
Ayusheeva R.B.¹,
Zhamsaranova S.D.¹,
Kotova T.I.¹.

¹ East-Siberian State University
of Technology and Management
(Klyuchevskaya str., 40V Ulan-Ude 670013,
Russian Federation)

² Far Eastern Federal University (Ayaks
settlement, 10, Russky Island, Vladivostok
690922, Russian Federation)

Corresponding author:
Svetlana N. Lebedeva,
e-mail: lebedeva1959@mail.ru

RESUME

Background. Cold stress, as one of the most important environmental factors in cold climates, can cause disturbances in the body's homeostasis and lead to various pathological conditions. Magnesium deficiency in these conditions can be compensated by adding organic forms of magnesium-containing supplements to the diet.

The aim. To evaluate the neuroprotective properties of whey protein concentrate enriched with magnesium and probiotic cultures on a cold stress model.

Materials and methods. A concentrate of thermally precipitated whey proteins (protein supplement) containing a chelated form of magnesium and enriched with lactobacilli was used. The study was conducted for 21 days on a cold stress model on 18 outbred male rats: group 1 – intact, group 2 – control (oral water 0.2 ml + cold stress), group 3 – experimental (oral supplement 0.2 ml + cold stress). In the Open Field test, the parameters of general motor and exploratory activity, and the integral level of anxiety were determined. Statistical analysis was performed using the Biostat-2006 software package.

Results. Animals that received the supplement showed greater horizontal and vertical activity. Their summary motor activity was 42.5 % higher than in the control group and 122.2 % higher than in the intact group. In the experimental group, exploratory activity was 143.9 % higher than in the intact group and 42.3 % higher than in the control group. The anxiety level in the experimental group was 75.3 % lower than in the intact group and 74.9 % lower than in the control group.

Conclusion. The neuroprotective efficacy of the enriched protein concentrate was established in the cold stress model, as evidenced by an increase in general and exploratory activity, a decrease in the anxiety level of animals. The supplement can be recommended as a source of protein and magnesium when exposed to low temperatures, independently and as part of food products.

Key words: cold stress, protein concentrate, chelated magnesium, neurotropic activity

Received: 14.09.2024
Accepted: 25.04.2025
Published: 20.05.2025

For citation: Lebedeva S.N., Shchekotova A.V., Atlasova D.V., Ayusheeva R.B., Zhamsaranova S.D., Kotova T.I. Study of neuroprotective activity of enriched protein concentrate on an experimental model of cold stress. *Acta biomedica scientifica*. 2025; 10(2): 217-228. doi: 10.29413/ABS.2025-10.2.22

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что причиной многих заболеваний человека является реакция организма на условия существования и образ жизни в современных условиях. Неотъемлемой частью нашей жизни являются стрессы различной природы. Стресс можно определить как неспецифическое состояние или реакция организма на различные, воздействующие на него, неблагоприятные факторы. Это адаптивная реакция, которая позволяет организму справляться с трудностями и восстанавливать гомеостаз [1, 2]. Стресс может оказывать на организм как стимулирующее воздействие, так и приводить к развитию ряда заболеваний. Когда ситуация требует быстрой реакции, в организме запускаются механизмы адаптации, заложенные природой. А частые и длительные стрессы отрицательно влияют на психологическое и физическое здоровье человека. При стрессе нарушается деятельность и поведение человека, проявляются различные психоэмоциональные нарушения, такие как тревожность, депрессия, неврозы, эмоциональная неустойчивость или, наоборот, перевозбуждение, гнев, бессонница, повышенная утомляемость, нарушения памяти и др. Стресс оказывает влияние практически на все органы и системы организма: мышечную, сердечно-сосудистую, нервную, пищеварительную, репродуктивную, иммунную и др. Стрессы являются одними из основных факторов проявления и обострения таких заболеваний как диабет, гипертония, заболевания сердца и сосудов, депрессия, нейродегенеративные заболевания и многие другие [3, 4].

Одним из факторов внешней среды в районах холодного климата на территории РФ (Арктика, регионы Крайнего Севера и др.) является холодовой стресс, который связан со многими сферами деятельности человека (хозяйственной, производственной, оборонной). Холодовой стресс представляет собой комплекс физиологических и биохимических реакций организма на воздействие низких температур. Это явление имеет большое практическое значение, так как может вызывать нарушения гомеостаза и, в конечном итоге, привести к различным патологическим состояниям.

Холодовой стресс — это форма экологического стресса, которая может воздействовать как на людей, так и на животных. Воздействие низких температур на организм в течение длительного времени приводит как к общим последствиям холодового стресса, так и психофизиологическим эффектам. Например, такие физиологические изменения, как снижение кровотока и снабжение кислородом, окислительный стресс могут привести к повреждению клеток и нарушению функции нервной системы [2, 5, 6]. Холодовой стресс особенно сильно влияет на производительность и поведение людей, когнитивные и двигательные функции [7].

Среди многочисленных методов противодействия развитию стрессового воздействия на организм (психотерапия, физические упражнения, аутогенная тренировка и др.) важное место отводится регуляции

питания и особенно тем его компонентам, которые обладают антистрессорным действием [8]. Многочисленные исследования на людях и животных посвящены изучению влияния стрессовых факторов как на концентрацию и распределение микронутриентов в организме, так и на процессы, происходящие при стрессовом воздействии. Среди этих элементов, в том числе, обозначена роль важного для организма макроэлемента — магния [4, 8-10].

Как известно, магний — эссенциальный макроэлемент, который играет ключевую роль во многих жизненно важных процессах в организме, участвует в поддержании его нормального функционирования и стабильности (кофактор в более чем 300 ферментативных системах), особенно в условиях стресса [4, 11]. Он необходим для осуществления клеточных процессов, которые включают энергетический метаболизм, синтез белков и аминокислот, а также поддержание электрического потенциала нервных тканей и клеточных мембран. Mg^{2+} имеет множество функций, в первую очередь связанных с энергетическим метаболизмом; его дефицит вызывает митохондриальную дисфункцию и повреждение, увеличивая выработку активных форм кислорода, что, в дополнение к воспалительной реакции, наблюдаемой при дефиците Mg^{2+} , приводит к хроническим метаболическим заболеваниям [10]. С дефицитом магния связан целый спектр заболеваний и расстройств: неврологические, нейродегенеративные, сердечно-сосудистые, респираторные, кожные, иммунные и др. [12]. Магний не вырабатывается в организме и может быть получен только из пищи или добавок. Согласно эпидемиологическим исследованиям, около 30 % жителей нашей страны получают в день менее 70 % суточной дозы элемента [13]. Установлено, что потребление магния с пищей часто недостаточно и в других странах (например, в США, Великобритании, Франции, Испании, Италии) [9]. Рекомендованная суточная норма потребления Mg составляет 250-500 мг/сут (310–320 мг/сут для женщин и 400–420 мг/сут для мужчин) [11].

Результаты как доклинических, так и клинических исследований указывают на двунаправленную связь между уровнем магния и стрессом: дефицит магния может вызывать симптомы и повышать восприимчивость к стрессу, а острый и хронический стресс могут спровоцировать дефицит магния [8, 14]. Установлено, что добавление в рацион питания разных форм добавок, содержащих магний, способствовало снижению выраженности окислительного стресса, воспалительных процессов, тем самым способствуя снижению риска развития хронических воспалительных заболеваний [8, 9]. Интерес исследователей именно к этому элементу связан также с тем, что магний может оказывать нейропротекторное действие, защищая ткани мозга в условиях стресса нейронов [4, 8].

Необходимо отметить, что для коррекции нехватки магния в организме используются как неорганические, так и органические формы этого элемента. Исследованиями установлено, что органические формы магния

более биодоступны, чем неорганические [15-18]. Так, в исследовании Sadia Sadir et al. (2019) установлен эффект перорального применения L-треоната магния (в сравнении с его хлоридом и сульфатом) в поведенческих реакциях крыс в условиях окислительного стресса [19]. Магний-L-треонат положительно влиял на когнитивные функции крыс, такие как способность к обучению и запоминанию [20]. Было установлено, что L-треонат магния эффективно повышал уровень элемента в мозге и нейронах, улучшал память и познавательные способности организма человека [21]. Авторами Case D.R. et al. (2021) описан синтез, проведен химический и биологический анализ глицинового трипептидного хелата магния [22]. Исследованиями установлено, что магний в таких формах, как аспарат, цитрат, лактат и хлорид характеризуется хорошей всасываемостью и биодоступностью по сравнению с оксидом и сульфатом магния [11]. Показано, что биодоступность неорганических солей магния напрямую связана с их растворимостью, а органических солей этого элемента – может зависеть и от характера хелатирующих агентов [23].

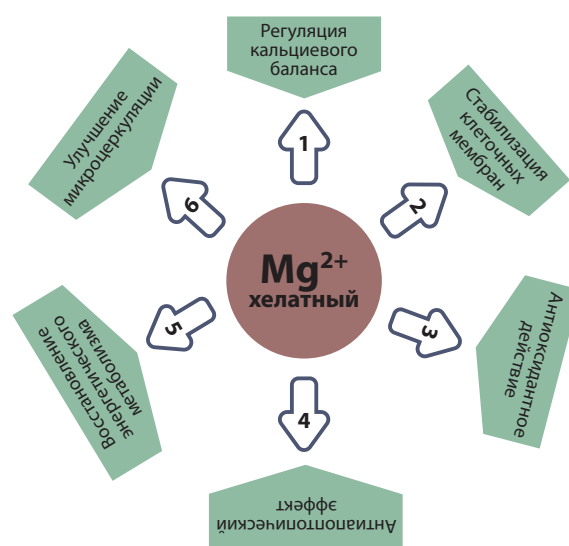
В настоящее время выделяют 4 поколения магний-содержащих добавок. Препараты первого поколения (неорганические соединения магния – оксид, диоксид, карбонат и фосфат магния) мало влияют на баланс этого элемента в организме. Препараты второго поколения (органические соли магния – малат, глюконат, оротат, цитрат, пидолат и лактат магния) хорошо всасываются в ЖКТ, практически не вызывая побочных эффектов. Обязательным компонентом препаратов третьего поколения являются магнезиофиксаторы или протекторы магния (например, кальций, калий, рибоксин, карнитин, витамины С, А, Е, D, группы В), которые улучшают биодоступность магния из соединений, обеспечивают его прохождение в клетки и повышают его эффективность. К препаратам четвертого поколения относятся комплексы магния с аминокислотами – хелаты (аспарагинат, лизинат, треонат, таурат, глицинат и бисглицинат магния). Установлено, что хелатные формы магния (металл, связанный с аминокислотами) играют важную роль в оказании нейропротекторного действия на клеточном и молекулярном уровне. Они обеспечивают наибольшее усвоение ионов магния, т.к. минерал в аминокислотной оболочке максимально усваивается клетками тонкого кишечника [14, 16].

Эффект соединений магния на организм не одинаков и зависит от способа его введения [14, 24]. В настоящее время для коррекции дефицита этого элемента чаще всего применяется пероральная форма терапии. Среди множества биологических эффектов соединений с магнием особо отмечается его нейропротекторная активность и устойчивость к стрессам [10, 25]. Как известно, мозг является центральным органом восприятия и реакции на стресс, и повышение стрессоустойчивости организма на разных его уровнях (клетки и генома в целом) является целью как профилактических, так и терапевтических мероприятий [17].

Предполагают несколько механизмов действия хелатных форм магния, которые объясняют их способность защищать нервные клетки от отрицательных факторов окружающей среды (рис. 1).

По данным литературы в результате этих механизмов нейропротекторное действие хелатов магния может способствовать предотвращению или замедлению развития различных нейродегенеративных заболеваний, таких как болезнь Паркинсона, болезнь Альцгеймера, ишемическое повреждение мозга и др. [22, 26].

В нашей стране выпускаются и реализуются магний-содержащие БАД, обладающие высокой биодоступностью: Цитрат магния® от Solgar (магниева соль лимонной кислоты), Магний хелат® от Эвалар (хелатная форма – сочетание магния с аминокислотой), Малат магния® от NOW (NOW FOODS), Раствор Магний В₆® от Эвалар (лактат и глюконат магния + В₆), Магний В₆® от Эвалар (В₆ + аспарагинат магния) и другие. Тем не менее, разработка БАД и продуктов, содержащих биодоступную форму магния, является актуальной с целью компенсации дефицита этого элемента в организме и при различных видах стресса.



1. Как природный антагонист кальция, магний способствует уменьшению его избыточного поступления в нервные клетки, предотвращая активацию кальций-зависимых протеаз и нарушение деятельности митохондрий, которые могут привести к клеточной смерти и нейродегенерации.
2. Концентрация магния внутри клетки регулирует активность молекулярных компонентов клеточных мембран, таких как фосфолипиды и ионофоры, что способствует стабильности мембраны и защите нейронов.
3. Магний способен оказывать антиоксидантный эффект путем снижения образования свободных радикалов и, следовательно, перекисного окисления липидов, что важно для предотвращения окислительного стресса, являющегося одной из основных причин нейродегенерации.
4. Хелатные формы магния могут предотвращать активацию апоптоза путем блокировки интрацеллюлярных сигнальных путей, которые приводят к активации протеаз и клеточной смерти.
5. Магний активирует множество метаболических путей в клетках, участвующих в образовании АТФ, а также улучшает функцию митохондрий, что способствует обеспечению энергетических потребностей нейронов и предотвращает их дегенерацию.
6. Хелаты магния могут оказывать вазодилатационное действие, улучшая микроциркуляцию и кровоснабжение тканей мозга.

РИС. 1.

Механизмы действия хелатных форм магния

FIG. 1.

Mechanisms of action of chelated forms of magnesium

В числе перспективных и экономически оправданных подходов к компенсации магния в рационе является увеличение потребления данного элемента с помощью обогащения им продуктов питания для разных категорий населения. В перечень данных групп пищевых продуктов входят и молочные продукты (в том числе с добавлением пробиотических микроорганизмов) [27].

Актуальность и новизна данной работы связана не только с биологическим эффектом магния, но и с рациональным использованием отходов молочного производства. Молочная сыворотка является побочным продуктом при производстве сыра и творога, но обладает ценными питательными свойствами, которые могут быть дополнительно улучшены путем обогащения магнием. Установлено, что пептиды из казеина или сыворотки могут связывать магний, способствуя повышению его усвояемости, аналогично другим двухвалентным катионам [26]. Кроме того, практически все пищевые продукты с добавлением сывороточных белков имеют более высокие антиоксидантные свойства, защищая организм от окислительного стресса [28].

Использование обогащенных магнием белков молочной сыворотки может позволить получить продукт с улучшенными питательными и лечебными свойствами, что может быть полезно для профилактики и лечения различных заболеваний, связанных с недостатком этого элемента. Использование молочной сыворотки может явиться основой для создания новых видов продуктов питания, таких как напитки, йогурты, смузи, обогащенные магнием.

Таким образом, актуальность данной темы обусловлена, прежде всего, ростом числа заболеваний, вызванных стрессом, среди которых холодовой стресс занимает особое место в условиях интенсивного освоения Арктики и районов Крайнего Севера, а также безопасностью и эффективностью методов его коррекции с помощью хелатных соединений магния. Предоставляется возможность использования побочного продукта молочного производства с низкой себестоимостью для расширения ассортимента функциональных продуктов массового потребления и профилактики стресса.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка нейропротекторных свойств белкового сывороточного концентрата, обогащенного магнием и пробиотическими культурами, на модели холодового стресса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе был использован концентрат термически осажденных белков молочной сыворотки, содержащий хелатную форму магния и обогащенный пробиотическими культурами (лактобактериями) по технологии,

созданной сотрудниками ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологии и управления» [29].

Основные качественные показатели обогащенного белкового концентрата приведены в таблице 1.

В исследовании было использовано 18 белых беспородных крыс-самцов (возраст 3 мес.) с массой тела 225–265 г. Животных содержали в стандартных условиях вивария на базе ФГБОУ ВО «ВСГУТУ» при искусственном освещении (смена «день/ночь» освещения проводилась каждые 12 часов) и свободном доступе к корму и воде. Поддерживались параметры: температура воздуха (20–25 °C) и относительная влажность (60–70 %).

Для проведения эксперимента была выбрана модель холодового стресса. Данная модель изучения холодовых нагрузок на крысах позволяет экстраполировать полученные данные на человека [30]. Животные были разделены на 3 группы: интактная (1-я группа); контрольная (2-я группа) – получали воду (перорально зондом по 0,2 мл) + холодовой стресс; опытная (3-я группа) – получали концентрат термически осажденных белков молочной сыворотки, обогащенный магнием и пробиотическими культурами (перорально зондом по 0,2 мл) + холодовой стресс. Животных 1-й группы не подвергали никаким воздействиям. Животные 2-й и 3-й группы получали, соответственно, воду или концентрат в течение 21 дня, 1 раз в сутки, в утренние часы до помещения в климатикамеру. В климатикамере крыс содержали при -15 ± 2 °C в течение 180 мин ежедневно в течение 21 дня. Тестирование проводили на 22-й день эксперимента. Необходимо отметить, что в эксперименте использовали белковую добавку до процесса сушки; ее доза в пересчете на сухой белковый концентрат составила 0,24 г/кг веса животного.

В процессе проведения экспериментов были соблюдены принципы гуманности в соответствии с международными морально-этическими нормами, а также требованиями «Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других научных целей» (Страсбург, 1986) и Директивой 2010/63/EU Европейского парламента и Совета Европейского союза по охране животных. Содержание животных и уход за ними проводили в соответствии с ГОСТ 33216-2014. Протокол исследований был рассмотрен и одобрен этической комиссией ИОЭБ СО РАН (протокол № 11 от 10.04. 2023 г.).

Влияние разработанной белковой добавки на поведенческую активность крыс проводили в тесте «Открытое поле» в утреннее время в течение 5 минут [31]. Установка представляла собой квадратный короб на фанерном каркасе (100 см × 100 см) и бортом высотой 40 см. Дно короба (белый ватман) было расчерчено на 100 квадратов одинаковой площади (36 – центральных и 64 – периферических), покрыто стеклом, и освещалось лампой холодного света (300 Вт), расположенной на высоте 1 м от дна короба.

Последовательно каждую крысу помещали в центр поля и в течение 5 минут проводили видеозапись ее передвижения. У каждого животного регистрировали

ТАБЛИЦА 1

КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕЛКОВОГО КОНЦЕНТРАТА, ОБОГАЩЕННОГО МАГНИЕМ И ПРОБИОТИЧЕСКИМИ КУЛЬТУРАМИ

TABLE 1

QUALITATIVE INDICATORS OF PROTEIN CONCENTRATE ENRICHED WITH MAGNESIUM AND PROBIOTIC CULTURES

Показатели		Характеристики
Внешний вид		пористые комочки разного размера, рассыпающиеся при сдавливании
Вкус и запах		без запаха, кисломолочный
Цвет		белый с сероватым оттенком
Содержание магния мг/100 г		907,0 ± 0,4
Массовая доля влаги, %		4,0 ± 0,9
Массовая доля белка, %		40,0 ± 0,2
Индекс растворимости, см ³ сырого осадка		0,5 ± 0,8
Активная кислотность, pH		4,0-4,5
Количество жизнеспособных клеток лактобактерий, КОЕ/см ³		(1-3) 10 ⁷
Объем (масса) продукта, см ³ (г), в котором не допускаются:	БГКП (колиформы)	1
	патогенные, в том числе сальмонеллы:	25
	стафилококки <i>S. aureus</i>	1
	листерии <i>L. monocytogenes</i>	–
Дрожжи (Д), плесени (П), КОЕ/см ³ (г), не более		–

параметры: время выхода из центра; двигательную активность горизонтальную (количество пересеченных центральных и периферических квадратов); двигательную активность вертикальную (количество стоек с упором и без упора о борт); акты груминга и их длительность; количество болюсов помета и актов уринаций; отход от стенки и выход в центр; атипичные реакции поведения (писк, попытки выпрыгивать). Общую двигательную активность определяли по сумме стоек и двигательной активности горизонтальной. После тестирования каждого животного пол поля тщательно протирали (70%-м раствором этанола) и давали ему высохнуть, чтобы исключить запах ранее оцениваемой крысы.

Общая оценка поведения животных была проведена по методике, рекомендованной Буслович С.Ю. и соавт. [32]. Исследовательскую активность представляла сумма баллов за: латентное время выхода из центра (-0,5 балла за 1 сек.); двигательная активность горизонтальная (1 балл за 1 сектор); стойки вертикальные (3 балла за 1 стойку без упора и 2 балла за 1 стойку с упором); выход в центр (5 баллов). Общий уровень тревожности определяли как сумму баллов за: груминги короткие (1 балл); количество болюсов (1,5 балла), количество актов уринации (2 балла); атипичные реакции в поведении (4 балла).

Суммарная антиоксидантная активность белкового концентрата, обогащенного магнием и пробиотическими культурами, была определена амперометрическим методом на хроматографе «Цвет-Яуза-01-АА» по ГОСТ 54037-2010.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием пакета программ

«Biostat-2006» (AnalystSoft, США). Результаты исследования представлены в виде медианы (Me), верхнего и нижнего квартилей (Q1–Q3). При установлении статистической значимости полученных данных был применен непараметрический критерий Манна – Уитни. Различия считали статистически значимыми при уровне достоверности $p \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Длительное воздействие стрессоров может влиять на пищевое поведение и энергетический гомеостаз, вызывая различные изменения в количестве потребляемой пищи. Изменение веса тела может быть важным показателем физиологических реакций на стресс. Исследования на лабораторных животных в стрессовых условиях показывают, что потребление пищи либо стимулируется, либо подавляется [5]. Поэтому в начале

и конце исследования определялась масса тела животных (табл. 2).

Анализ изменения массы тела экспериментальных животных показал меньший его прирост в опытной группе (3 группа) по сравнению с интактной группой (1 группа). Необходимо отметить, что использованная добавка с магнием разрабатывалась специалистами и с целью профилактики ожирения (регуляции метаболизма и оптимизации биохимических процессов в организме).

Тест «открытое поле» — это поведенческий тест, используемый для оценки тревожности, общего уровня активности и привычек у грызунов. Он обычно проводится в экспериментах на животных для оценки стресса и тревожных расстройств [5].

Результаты исследования по влиянию белковой добавки на крыс в вышеуказанном тесте представлены в таблицах 3-6.

Как видно из таблицы 3, практически все показатели поведения животных в опытной группе (3 группа) имели достоверные отличия по сравнению с интактной

и контрольной группами животных (1 и 2 группа). Животные опытной группы проявляли более высокую двигательную активность по сравнению с интактной и контрольной группами: посещение центральных и периферических квадратов, количество стоек (с опорой и без опоры). При этом, у них снижался показатель тревожности: время замирания уменьшалось на 81,6 % по сравнению с интактной группой и на 76,5 % по сравнению с контрольной; время первичного выхода из центра – на 51,1 % относительно интактной группы ($p \leq 0,05$). Также у животных опытной группы отмечалось увеличение количества посещений центральных квадратов на 69,0 % по сравнению с интактной группой и на 35,2 % по сравнению с контрольной.

Эмоциональные показатели крыс в тесте «Открытое поле» представлены в таблице 4.

Из таблицы 4 следует, что у животных опытной группы снижены эмоциональные показатели: груминг (в 2 раза по сравнению с интактной группой), количество болюсов (в 2,6 раза по сравнению с интактной

ТАБЛИЦА 2

ИЗМЕНЕНИЕ МАССЫ ТЕЛА КРЫС ЗА ВРЕМЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Группа	Средняя масса, г		Изменение массы, %
	до эксперимента	после эксперимента	
1. Интактная	244,7	292,8	19,8
2. Контрольная	244,7	275,2 ^{*1}	12,5 ^{*1}
3. Опытная	244,7	276,5 ^{*1}	13,0 ^{*1}

Примечание. ^{*1} – изменения статистически достоверны относительно 1 группы ($p \leq 0,05$).

TABLE 2

CHANGE IN BODY WEIGHT OF RATS DURING THE EXPERIMENT

ТАБЛИЦА 3

ОРИЕНТИРОВОЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ КРЫС В ТЕСТЕ «ОТКРЫТОЕ ПОЛЕ» (ME (Q1–Q3))

Группа	Посещение квадратов, кол-во		Период выхода из центра, сек	Стойки			Время замирания, сек.
	Центральные, кол-во	Периферические		Свободная (без опоры), кол-во	Время, сек	С опорой, кол-во	
1. Интактная	10,0 (8,3-11,7)	60,0 (50,9-69,1)	15,0 (9,4-20,6)	0,8 (0,7-0,9)	1,0 (0,9-1,1)	7,8 (6,2-9,4)	25,6 (6,2-45,0)
2. Контрольная	12,5 (10,6-14,4)	90,2 (80,4-100,0) ^{*1}	9,8 (8,9-11,6)	2,3 (1,7-2,9) ^{*1}	4,6 (3,1-6,1) ^{*1}	13,8 (12,7-14,9) ^{*1}	20,0 (19,5-24,1) ^{*1}
3. Опытная	16,9 (15,3-8,5) ^{*1,2}	126,6 (121,1-132,1) ^{*1,2}	7,3 (6,1-8,5) ^{*1}	5,8 (5,1-6,5) ^{*1,2}	14,2 ^{*1,2} (11,7-16,7)	17,3 ^{*1,2} (16,3-18,3)	4,7 (3,4-6,0) ^{*1,2}

Примечание. ^{*1, *1,2} – изменения статистически достоверны относительно 1, 1 и 2 групп, соответственно ($p \leq 0,05$).

TABLE 3

ORIENTING AND EXPLORATORY BEHAVIOR OF RATS IN THE OPEN FIELD TEST (ME (Q1–Q3))

группой и в 3,3 раза – по сравнению с контрольной) и уриаций ($p \leq 0,05$).

В таблице 5 представлены суммарные данные (в баллах), характеризующие двигательную активность животных в условиях эксперимента.

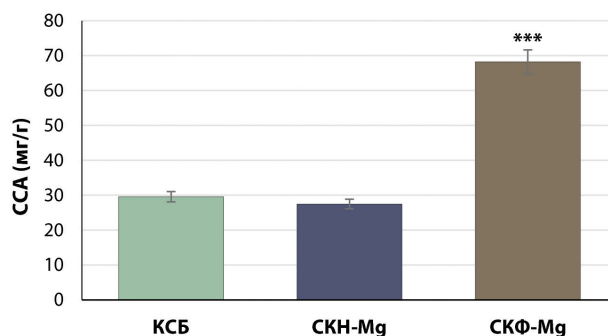
Как следует из таблицы 5, животные, получавшие добавку с хелатной формой магния (3 группа), проявляли большую и горизонтальную и вертикальную активность. Их суммарная двигательная активность была на 42,5 % больше по сравнению с контрольной группой (2 группа) и на 122,2 % по сравнению с интактной группой животных (1 группа).

Суммарный анализ показателей, отражающих активность и уровень тревожности у исследуемых животных, представлен в таблице 6.

На основании представленных в таблице 6 данных следует, что у крыс опытной группы исследовательская активность была на 143,9 % выше, чем у интактной, и на 42,3 % выше, чем у контрольной группы животных. У крыс опытной группы уровень тревожности был на 75,3 % ниже, чем у интактной и на 74,9 % ниже, чем у контрольной группы.

Таким образом, крысы, получавшие белковую добавку (концентрат белков, обогащенный магнием и пробиотическими культурами), характеризовались повышенной активностью (двигательной и исследовательской) и сниженным уровнем тревожности.

Для установления антиоксидантных свойств белкового концентрата, обогащенного магнием и пробиотическими культурами, была определена его суммарная антиоксидантная активность в сравнении с магниевым концентратом без ферментации и концентратом сывороточных белков (КСБ-контроль – ООО «Удача» г. Санкт-Петербург) (рис. 2).



КСБ – концентрат сывороточных белков (контроль); СКН-Mg – сывороточный концентрат с Mg не ферментированный; СКФ-Mg – сывороточный концентрат с магнием ферментированный; *** $p \leq 0,001$ относительно КСБ и СКН-Mg

РИС. 2.

Суммарная антиоксидантная активность белковой добавки

FIG. 2.

Summary antioxidant activity of protein supplement

ТАБЛИЦА 4

ЭМОЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КРЫС В ТЕСТЕ «ОТКРЫТОЕ ПОЛЕ» (ME (Q1–Q3))

Группа	Груминг, кол-во	Время груминга, сек.	Болюсы, кол-во	Уринация, кол-во
1. Интактная	4,4 (3,8-5,0)	9,9 (9,3-10,5)	3,4 (3,0-3,8)	0,6 (0,5-0,7)
2. Контрольная	3,6 (1,3-5,9)	10,6 (8,3-12,9)	4,3 (3,7-4,9)	0,5 (0,4-0,6)
3. Опытная	2,2 (1,6-2,8)* ¹	8,0±1,6 (6,4-9,6)	1,3 (1,1-1,4)* ^{1,2}	0

Примечание. *^{1,1,2} – изменения статистически достоверны относительно 1, 1 и 2 групп, соответственно ($p \leq 0,05$).

TABLE 4

EMOTIONAL INDICATORS OF RATS IN THE OPEN FIELD TEST (ME (Q1–Q3))

ТАБЛИЦА 5

ДВИГАТЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ КРЫС В УСЛОВИЯХ ЭКСПЕРИМЕНТА

Группа	Двигательная активность, баллы		
	Горизонтальная	Вертикальная	Суммарная
1. Интактная	70,0	18,0	88,0
2. Контрольная	102,7* ¹	34,5* ¹	137,2* ¹
3. Опытная	143,5* ^{1,2}	52,0* ^{1,2}	195,5* ^{1,2}

Примечание. *^{1,1,2} – изменения статистически достоверны относительно 1, 1 и 2 групп, соответственно ($p \leq 0,05$). ветственно ($p \leq 0,05$).

TABLE 5

MOTOR ACTIVITY OF RATS UNDER EXPERIMENTAL CONDITIONS

Как следует из рисунка 2, суммарная антиоксидантная активность изучаемой белковой добавки (сывороточный концентрат с Mg ферментированный) была в 2,3 и 2,5 раза выше, чем, соответственно, у КСБ контроля и сывороточного концентрата, неферментированного пробиотическими культурами. Поэтому можно предположить, что исследуемая белковая добавка действует, как антиоксидант, снижая образование свободных радикалов и уменьшая проявление окислительного стресса.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Использование разработанной нами белковой добавки (белкового сывороточного концентрата, обогащенного магнием и пробиотиками) в условиях экспериментального холодового стресса снижало склонность к эмоционально-стрессовым ситуациям и уровню тревожности, способствовало увеличению когнитивной и исследовательской деятельности животных.

Экспериментальные данные согласуются с результатами, полученными учёными в ходе исследования влияния хелатных форм магния в условиях холодового стресса. В исследовании Li W., et al. (2014) изучено влияние треоната магния на когнитивную функцию крыс,

подвергшихся холодовому стрессу. Было установлено, что лечение треонатом магния улучшало пространственную память крыс и уменьшало окислительный стресс в клетках головного мозга, обуславливая защитный эффект на нервную систему [19]. В другом исследовании Zhang B., et al. (2015) изучено влияние ацетилтаурата магния на восстановление неврологической функции у крыс после повреждения спинного мозга в условиях холодового стресса. Показано, что лечение ацетилтауратом магния значительно улучшало неврологическую функцию крыс и уменьшало воспаление в спинном мозге [21]. Poleszak E, et al (2019) изучали влияние таурата магния на экспрессию белков, участвующих в синаптической пластичности (способность мозга изменяться и адаптироваться в ответ на опыт) у крыс, подвергшихся холодовому стрессу. Исследователи обнаружили, что лечение тауратом магния увеличивало экспрессию этих белков, что указывает на защитный эффект в отношении нервной системы [15].

Авторами было предложено несколько механизмов для объяснения нейропротекторных свойств хелатов магния в условиях холодового стресса [33, 34]:

Во-первых, органические соединения магния могут действовать как антиоксиданты, нейтрализуя свободные радикалы и уменьшая окислительный стресс в мозге.

ТАБЛИЦА 6

СУММАРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ (ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ АКТИВНОСТЬ И УРОВЕНЬ ТРЕВОЖНОСТИ) КРЫС В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

№ п/п	Показатели исследовательской активности	1. Интактная группа	2. Контрольная группа	3. Опытная группа
1	Латентное время выхода из центра (-0,5 б за 1 с), баллов	-7,50	-4,90	-3,65
2	Двигательная активность горизонтальная 1 балл за каждый сектор, баллов	70,00	102,70	143,5
3	Двигательная активность вертикальная, стойки (3 б. за 1 стойку без упора, 2 б. за 1 стойку с упором), баллов	18,00	34,50	52,00
4	Выход в центр (5 б за каждый раз), баллов	6,00	16,00	19,15
ИТОГО: исследовательская активность, баллов		86,5	148,3 ^{*1}	211,0 ^{*1,2}
Показатели тревожности		1. Интактная	2. Контрольная	3. Опытная
1	Короткий груминг, 1 балл	3,60	2,30	0,50
2	Число болюсов, 1,5 балла	5,10	6,45	1,95
3	Число актов урикации, 2 балла	1,20	1,00	0
4	Атипичические поведенческие реакции, 4 балла	0	0	0
ИТОГО: тревожность, баллов		9,90	9,75	2,45 ^{*1,2}

Примечание. ^{*1, *1,2} – изменения статистически достоверны относительно 1, 1 и 2 групп, соответственно ($p \leq 0,05$).

TABLE 6

SUMMARY INDICATORS (EXPLORATORY ACTIVITY AND ANXIETY LEVEL) OF RATS IN THE EXPERIMENT

Во-вторых, магний может модулировать активность нейротрансмиттеров и ионных каналов, улучшая передачу сигналов нейронами и защищая их от повреждений.

Например, было показано, что треонат магния увеличивает количество синапсов в головном мозге, улучшая когнитивные функции у животных [19, 20].

В исследованиях последних лет отмечено, что регуляция гомеостаза магния является основным процессом при нейродегенеративных заболеваниях. Mg^{2+} играет решающую роль в пролиферации клеток, дифференциации, выживании и формировании нейронных сетей посредством регуляции клеточного метаболизма, внутриклеточной сигнализации, открытия каналов, синтеза белка и снижения токсичности активных форм кислорода. Как правило, мобилизация внутриклеточного Mg^{2+} стимулирует катаболизм и синтез белка, следовательно, активирует клеточные процессы. Хотя Mg^{2+} обычно защищает нейронные клетки от клеточного стресса, избыточные уровни элемента иногда вредны для здоровых нейронов. Таким образом, правильная регуляция клеточного гомеостаза Mg^{2+} необходима для осуществления нейронных функций мозга, а нарушение регуляции гомеостаза Mg^{2+} потенциально вызывает и усугубляет нейродегенеративные заболевания, такие как болезнь Паркинсона, Альцгеймера и демиелинизации. Восстановление гомеостаза Mg^{2+} посредством как химиотерапии, так и употребления магнийсодержащих БАД, нацеленных на систему транспортировки Mg^{2+} , может улучшить клеточные функции при патологических состояниях. Хотя исследователями было предложено несколько механизмов действия магния, точные механизмы его эффективности в настоящее время продолжают активно изучаться [33–37].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований было установлено, что крысы, получавшие добавку с хелатной формой магния, в тесте «Открытое поле» демонстрировали более высокую двигательную активность по сравнению с контрольной и интактной группами, более высокую исследовательскую активность по сравнению с контрольной и интактной группами, а также более низкий уровень тревожности по сравнению с контрольной и интактной группами животных.

Определено суммарное содержание антиоксидантов в белковой добавке, которое превышало аналогичный показатель в контрольном препарате.

Белковая добавка со связанной формой магния (обогащенный магнием и пробиотиками белковый сывороточный концентрат) в условиях экспериментального холодового стресса обладала выраженной биологической эффективностью: улучшала когнитивную функцию, повышала исследовательскую деятельность, снижала тревожность и нормализовала поведенческие реакции экспериментальных животных.

Данная добавка может быть рекомендована для употребления в качестве источника белка и магния

в условиях воздействия низких температур как самостоятельно, так и в составе пищевых продуктов функциональной направленности.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-20042, <https://rscf.ru/project/24-26-20042/>

Конфликт интересов

Авторы данной статьи сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Haykin H, Rolls A. The neuroimmune response during stress: A physiological perspective. *Immunity*. 2021; 54(9): 1933–1947. doi: 10.1016/j.immuni.2021.08.023
2. Basile F, et al. Omics insights into animal resilience and stress factors. *Animals*. 2020; 11(1): 47. doi: 10.3390/ani11010047
3. Ernst H, et al. Assessment of the human response to acute mental stress – An overview and a multimodal study. *PLoS One*. 2023; 18(11): e0294069. doi: 10.1371/journal.pone.0294069
4. Lopresti AL. The effects of psychological and environmental stress on micronutrient concentrations in the body: a review of the evidence. *Advances in Nutrition*. 2020; 11(1): 103–112. doi: 10.1093/advances/nmz082
5. Wendering P, Nikoloski Z. Model-driven insights into the effects of temperature on metabolism. *Biotechnology Advances*. 2023; 67: 108203. doi: 10.1016/j.biotechadv.2023.108203
6. El Marzouki H, Aboussaleh Y, Najimi M, Chigr F, Ahami A. Effect of cold stress on neurobehavioral and physiological parameters in rats. *Frontiers in physiology*. 2021; 12: 660124. doi: 10.3389/fphys.2021.660124
7. Муртазина Е.П., Коробейникова И.И., Поскотина Л.В., Каратыгин Н.А., Перцов С.С. Анализ когнитивных функций и нейрофизиологических процессов при адаптации человека к условиям Арктики. Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова. 2023; 31(2): 293–304. [Murtazina EP, Korobeynikova II, Poskotina LV, Karatygin NA, Pertsov SS. Analysis of cognitive functions and neurophysiological processes during human adaptation to Arctic conditions. *Rossiiskij mediko-biologicheskij vestnik imeni akademika I.P. Pavlova*. 2023; 31(2): 293–304. (In Russ.)]. doi: 10.17816/PAVLOVJ109581
8. Акарачкова Е.С., Беляев А.А., Кадырова Л.Р. и др. Стресс и питание. РМЖ. Медицинское обозрение. 2021; 5(5): 316–321. [Akarachkova ES, Belyaev AA, Kadyrova LR et al. Stress and nutrition. *RMZH. Medicinskoe obozrenie*. 2021; 5(5): 316–321. (In Russ.)]. doi: 10.32364/2587-6821-2021-5-5-316-321
9. Pickering G, et al. Magnesium status and stress: the vicious circle concept revisited. *Nutrients*. 2020; 12(12): 3672. doi: 10.3390/nu12123672

10. Arancibia-Hernández YL, Hernández-Cruz EY, Pedraza-Chaverri J. Magnesium (Mg^{2+}) deficiency, not well-recognized non-infectious pandemic: origin and consequence of chronic inflammatory and oxidative stress-associated diseases. *Cellular Physiology and Biochemistry*. 2023; 57(S1): 1-23. doi: 10.33594/000000603
11. Shatova O, et al. Bioelements: role in the development of diseases of civilization. *East European Scientific Journal*. 2021; 11(75): 45-58. doi: 10.31618/ESSA.2782-1994.2021.4.75.175
12. Mathew AA, Panonnummal R. 'Magnesium' – the master cation as a drug — possibilities and evidences. *Biometals*. 2021; 34(5): 955–986. doi: 10.1007/s10534-021-00328-7
13. Хашукоева А.З., Агаева З.А., Агаева М.И., Сухова Т.Н., Мосешвили Г.Г., Нурбекова Ж.К. Роль магния в терапии симптомов климактерического синдрома. Медицинский совет. 2018; 21: 162-166. [Khashukoeva AZ, Agaeva ZA, Agaeva MI, Sukhova TN, Moseshvili GG, Nurbekova ZhK. The role of magnesium in the treatment of symptoms of menopausal syndrome. *Medicinskij sovet*. 2018; 21: 162-166.]. doi: 10.21518/2079-701X-2018-21-162-166
14. Sankova MV, Kytko OV, Meylanova RD, Vasil'ev YuL, Nelipa MV. Possible prospects for using modern magnesium preparations for increasing stress resistance during COVID-19 pandemic. *Research Results in Pharmacology*. 2020; 6(4): 65–76. doi: 10.3897/rrpharmacology.6.59407
15. Pardo MR, et al. Bioavailability of magnesium food supplements: A systematic review. *Nutrition*. 2021; 89: 111294. doi: 10.1016/j.nut.2021.111294
16. Yamanaka R, Shindo Y, Oka K. Magnesium is a key player in neuronal maturation and neuropathology. *International journal of molecular sciences*. 2019; 20(14): 3439. doi: 10.3390/ijms20143439
17. Акарачкова Е.С., Вершинина С.В., Котова О.В., Рябokonь И.В. Основы терапии и профилактики стресса и его последствий у детей и подростков. Вопросы современной педиатрии. 2013; 12(3): 38–44. [Akarachkova ES, Vershinina SV, Kotova OV, Ryabokon IV. Fundamentals of therapy and prevention of stress and its consequences in children and adolescents. *Voprosy sovremennoj pediatrii*. 2013; 12(3): 38-44. (In Russ.)].
18. Elgar K. Magnesium: a review of clinical use and efficacy. *Nutritional Medicine Journal*, 2022; 1(1): 79-99.
19. Sadir S, et al. Neurobehavioral and biochemical effects of magnesium chloride ($MgCl_2$), magnesium sulphate ($MgSO_4$) and magnesium-L-threonate (MgT) supplementation in rats: A dose dependent comparative study. *Pakistan journal of pharmaceutical sciences*. 2019; 32(1): 277-283. URL: <http://142.54.178.187:9060/xmlui/handle/123456789/14993> [date of access: 01.09.2024].
20. Chen Y, et al. Role of magnesium-L-Threonate in alleviating skin/muscle incision and retraction induced mechanical allodynia and anxiodepressive-like behaviors in male rats. *Brain Research*. 2023; 1817: 148476. doi: 10.1016/j.brainres.2023.148476
21. Zhang C, et al. A Magtein®, magnesium L-Threonate-based formula improves brain cognitive functions in healthy Chinese adults. *Nutrients*. 2022; 14(24): 5235. doi: 10.3390/nu14245235
22. Case DR, et al. Synthesis and chemical and biological evaluation of a glycine tripeptide chelate of magnesium. *Molecules*. 2021; 26(9): 2419. doi: 10.3390/molecules26092419
23. Спасов А.А., Косолапов В.А. Применение магния L-аспарагината и комбинаций солей магния с витамином В₆ в медицине. Российский медицинский журнал. 2017; 23(2): 89-95. [Spasov AA, Kosolapov VA. Use of magnesium L-aspartate and combinations of magnesium salts with vitamin В₆ in medicine. *Rossiiskij medicinskij zhurnal*. 2017; 23(2): 89-95. (In Russ.)]. doi: 10.18821/0869-2106-2017-23-2-89-95
24. Трисветова Е.Л. Магний в клинической практике. Рациональная Фармакотерапия в Кардиологии. 2012; 8(4): 545-553. [Trisvetova EL. Magnesium in clinical practice. *Racional'naya Farmakoterapiya v Kardiologii*. 2012; 8(4): 545-553. (In Russ.)].
25. Беккер Р.А., Быков Ю.В., Шкурят А.О., Воронина А.С. Препараты магния в психиатрии, наркологии, неврологии и общей медицине. Часть I. Историческая. *Acta biomedica scientifica*. 2019; 4(3): 63-80. [Becker RA, Bykov YuV, Shkurat AO, Voronina AS. Magnesium preparations in psychiatry, narcology, neurology and general medicine. Part I. Historical. *Acta biomedica scientifica*. 2019; 4(3): 63-80. (In Russ.)]. doi: 10.29413/ABS.2019-4.3.9
26. Vegarud GE, Langsrud T, Svenning C. Mineral-binding milk proteins and peptides; occurrence, biochemical and technological characteristics. *British Journal of Nutrition*. 2000; 84(S1): 91–98. doi: 10.1017/S0007114500002300
27. Kochetkova AA, Kodentsova VM, Vorobyeva VM, Vorobyeva IS, Vrzhesinskaya OA, Smirnova EA, et al. Fortification of food with micronutrients: development of methodological and regulatory framework in the Russian Federation. *Theory and practice of meat processing*. 2021; 6(3): 269-278. doi: 10.21323/2414-438X-2021-6-3-269-278
28. Донская Г.А. Антиоксидантные свойства молока и молочных продуктов: обзор. Пищевая промышленность. 2020; 12: 86–91. [Donskaya GA. Antioxidant properties of milk and dairy products: a review. *Pishchevaya promyshlennost'*. 2020; 12: 86–91. (In Russ.)]. doi: 10.24411/0235-2486-2020-10150
29. Патент РФ № 2800267. Способ получения обогащенного концентрата сывороточных белков. Щекотова А.В., Атласова Д.В., Аюшеева Р.Б., Хамагаева И.С. Оpubл. 19.07.2023. Бюл. № 20. [RF patent № 2800267. Method for obtaining enriched whey protein concentrate. Shchekotova AV, Atlasova DV, Ayusheeva RB, Khamagaeva IS. Publ. 19.07.2023. Bul. N. 20. (In Russ.)].
30. Гмошинский И.В., Никитюк Д.Б. Полярный стресс: механизмы и моделирование в эксперименте. Вестник РАМН. 2022; 77(6): 447–457. [Gmoshinsky IV, Nikityuk DB. Polar stress: mechanisms and modeling in the experiment. *Vestnik RAMN*. 2022; 77(6): 447–457. (In Russ.)]. doi: 10.15690/vramn2209
31. Семина И.И., Байчурина А.З., Никитин Д.О., Никитина А.В., Мустафин Р.И., Хуторянский В.В. Поведенческая фармакология как основной подход в изучении эффективности потенциальных психотропных средств:

анализ современных методов. Разработка и регистрация лекарственных средств. 2023; 12(1): 161–181. [Semina II, Baichurina AZ, Nikitin DO, Nikitina AV, Mustafin RI, Khutoryansky VV. Behavioral pharmacology as the main approach in studying the effectiveness of potential psychotropic drugs: analysis of modern methods. *Razrabotka i registraciya lekarstvennyh sredstv*. 2023; 12(1): 161–181. (In Russ.)]. doi: 10.33380/2305-2066-2023-12-1-161-181

32. Буслович С.Ю., Котеленец А.И., Фридлянд Р.М. Интегральный метод оценки поведения белых крыс в открытом поле. Журнал высшей нервной деятельности. 1989; 39(1): 168–170. [Buslovich SYu, Kotelenets AI, Fridlyand RM. Integral method for assessing the behavior of white rats in an open field. *Zhurnal vysshej nervnoj deyatelnosti*. 1989; 39(1): 168–170. (In Russ.)].

33. Fassin M, Danhier P, Ris L. Effect of oral administration of Magnesium N-Acetyltaurate on synaptic plasticity in rodents. *Magnesium Research*. 2020; 33(4): 106–113. doi: 10.1684/mrh.2021.0475

34. Kumar A, et al. Magnesium (Mg²⁺): essential mineral for neuronal health: from cellular biochemistry to cognitive health and behavior regulation. *Current Pharmaceutical Design*. 2024; 30(39): 3074–3107. doi: 10.2174/0113816128321466240816075041

35. Patel V, et al. Neuroprotective effects of magnesium: Implications for neuroinflammation and cognitive decline. *Frontiers in Endocrinology*. 2024; 15: 1406455. doi: 10.3389/fendo.2024.1406455

36. Maier JAM, et al. Magnesium and the brain: A focus on neuroinflammation and neurodegeneration. *International journal of molecular sciences*. 2022; 24(1): 223. doi: 10.3390/ijms24010223

37. Gao Q, Cil O. Magnesium for disease treatment and prevention: emerging mechanisms and opportunities. *Trends in Pharmacological Sciences*. 2024; 45(8): 708–722. doi: 10.1016/j.tips.2024.06.004

Сведения об авторах

Лебедева Светлана Николаевна – доктор биологических наук, профессор кафедры биотехнологии Института пищевой инженерии и биотехнологии ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» Министерства науки и высшего образования РФ; e-mail: lebedeva1959@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5664-6028>

Щёктова Анна Владимировна – кандидат технических наук, доцент, директор Института пищевой инженерии и биотехнологии ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» Министерства науки и высшего образования РФ; e-mail: anna-krivosova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6665-2958>

Атласова Дарья Владимировна – аспирантка направления пищевые системы ФГАОВ «Дальневосточный федеральный университет» Министерства науки и высшего образования РФ; e-mail: atlasova.dv.l@indox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8488-8427>

Аюшеева Раджана Баировна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии продуктов животного происхождения. Товароведение Института пищевой инженерии и биотехнологии ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» Министерства науки и высшего образования РФ; e-mail: ayusheeva2008@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4958-2846>

Жамсаранова Сэсэма Дашиевна – доктор биологических наук, профессор кафедры биотехнологии Института пищевой инженерии и биотехнологии ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» Министерства науки и высшего образования РФ; e-mail: zhamsarans@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0574-1575>

Котова Татьяна Ивановна – кандидат технических наук, заведующая кафедрой технологические машины и оборудование. Агроинженерия Института пищевой инженерии и биотехнологии ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» Министерства науки и высшего образования РФ; e-mail: tatianakotova74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2644-0779>

Information about the authors

Svetlana N. Lebedeva – Dr. Sc. (Biol.), Professor of the Department of Biotechnology at the Institute of Food Engineering and Biotechnology of the East Siberian State University of Technology and Management; e-mail: lebedeva1959@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5664-6028>

Anna V. Shchekotova – Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor, Director of the Institute of food engineering and biotechnology, East Siberian State University of Technology and Management; e-mail: anna-krivosova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6665-2958>

Daria V. Atlasova – postgraduate student of the food systems direction, Far Eastern Federal University; e-mail: atlasova.dv.l@indox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8488-8427>

Radzhana B. Ayusheeva – Cand. Sc. (Tech.), Associate professor of the Department technologies of animal products. Commodity research at the Institute of Food Engineering and Biotechnology of the East Siberian State University of Technology and Management; e-mail: ayusheeva2008@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4958-2846>

Sesegma D. Zhamsaranova – Dr. Sc. (Biol.), Professor of the Department of Biotechnology of the Institute of Food Engineering and Biotechnology of the East Siberian State University of Technology and Management; e-mail: zhamsarans@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0574-1575>

Tatyana I. Kotova – Cand. Sc. (Tech.), Head of the Department of technological machines and equipment. Agroengineering at the Institute of Food Engineering and Biotechnology of the East Siberian State University of Technology and Management; e-mail: tatianakotova74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2644-0779>