

ЗООЛОГИЯ, ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ

Оригинальная научная статья

УДК 619:577.11:616.15:616.34:577.15:615. 31

doi: 10.26897/2949-4710-2023-2-59-68



Роль марганца в обмене кальция на уровне энтеральной и внутренней среды организма

Дмитрий Анатольевич Ксенофонтов, Ольга Александровна Войнова,
Анжелика Александровна Ксенофонтова, Татьяна Владимировна Саковцева

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Анатольевич Ксенофонтов; e-mail: dksenofontov@rgau-msha.ru

Аннотация. В эксперименте на кроликах изучали влияние марганца на метаболизм кальция на уровне энтеральной и внутренней среды. В опыте использовали две группы кроликов, подобранных методом пар-аналогов по 3 головы в контрольной и опытной группах. Животные опытной группы получали рацион с трехкратным увеличением уровня марганца. В конце эксперимента у всех животных под общим наркозом производили отбор крови, притекающей и оттекающей от разных отделов пищеварительного тракта. После контрольного убоя брали на анализ органы и ткани, извлекали кишечник с последующим отбором проб химуса и слизистой оболочки стенки разных отделов. Химус по разработанной методике разделяли на фракции. Методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии определили концентрацию марганца и кальция в кишечном химусе и его фракциях, в слизистой оболочке стенки кишечника, в крови, притекающей к пищеварительному тракту и оттекающей от его разных отделов, в органах и тканях. Экспериментально выявили, что при увеличении концентрации марганца в рационе кроликов в три раза элемент не накапливается во внутренней среде, а кумулируется эндогенными структурами химуса и слизистой оболочкой стенки тонкого и толстого отделов кишечника. Выявили изменение метаболизма кальция при увеличении марганца в рационе в три раза: уменьшилась его концентрации в оттекающей от кишечника крови и в слизистом слое стенки тонкого кишечника. В итоге зафиксированы достоверное снижение концентрации в костях и тенденция снижения в печени и в почках. Делается вывод об антагонистичном влиянии избыточного количества марганца в рационе на метаболизм кальция на уровне энтеральной и внутренней среды организма. При взаимодействии элементов отмечается ведущая роль эндогенных структур химуса благодаря ионообменным свойствам гликопротеинов полостной слизи кишечника.

Ключевые слова: метаболизм, марганец, обмен кальция, эксперимент на кроликах, химус, кишечник, гликопротеины, энтероплазма, кровь, слизистая оболочка

Для цитирования. Ксенофонтов Д.А., Войнова О.А., Ксенофонтова А.А., Саковцева Т.В. Роль марганца в обмене кальция на уровне энтеральной и внутренней среды организма // Тимирязевский биологический журнал. – 2023. – № 2. – С. 59-68. <http://dx.doi.org/10.26897/2949-4710-2023-2-59-68>

© Ксенофонтов Д.А., Войнова О.А., Ксенофонтова А.А., Саковцева Т.В., 2023

ZOOLOGY, HUMAN AND ANIMAL PHYSIOLOGY

Original article

doi: 10.26897/2949-4710-2023-2-59-68



Role of Manganese in Calcium Metabolism at the Level of the Enteral and Internal Environment of the Body

Dmitry A. Ksenofontov, Olga A. Voinova, Angelika A. Ksenofontova, Tatiana V. Sakovtseva

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Dmitry A. Ksenofontov, dksenofontov@rgau-msha.ru

Abstract. The authors studied the effect of manganese on calcium metabolism at the level of the enteral and internal environment of the body in an experiment on rabbits. Two groups (control and experimental) of rabbits selected by the paired-analysis method were used in the experiment. There were three animals in each group. The animals in the experimental group were given a diet containing three times the amount of manganese. At the end of the experiment, blood was collected from various parts of the digestive tract of all animals under general anaesthesia. Organs and tissues were

collected for analysis after control slaughter, and the intestines were removed, followed by sampling of chyme and mucosa from the walls of various sections. The chyme was separated into fractions using the developed method. The concentration of manganese and calcium in intestinal chyme and its fractions, in mucosa of the intestinal wall, in the blood flowing in and out of the digestive tract, in organs and tissues was determined by the atomic absorption spectrophotometry method. It was shown experimentally that when the concentration of manganese in the diet of rabbits was tripled, the element was not accumulated in the internal environment but was accumulated by endogenous structures of the chyme and the mucous membrane of the wall of the small and large intestines. A metabolic change in calcium metabolism was revealed when manganese was tripled in the diet: its concentrations in the blood flowing from the intestines and in the mucous layer of the small intestine wall decreased. As a result, there was a significant decrease in bone concentrations and a downward trend in liver and kidney concentrations. The antagonistic effect of manganese on calcium metabolism in the enteric and internal environment is concluded. In the interaction of elements, the leading role of endogenous structures of chyme is noted due to ion-exchange properties of glycoproteins of intestinal cavity mucosa.

Key words: metabolism, manganese, calcium metabolism, rabbit experiment, chyme, intestine, glycoproteins, enteroplasma, blood, mucosa

For citation. Ksenofontov D.A., Voinova O.A., Ksenofontova A.A., Sakovtseva T.V. Role of manganese in calcium metabolism at the level of the enteral and internal environment of the body // Timiryazev Biological Journal. 2023; 2: 59-68. (In Rus.). <http://dx.doi.org/10.26897/2949-4710-2023-2-59-68>

Введение

В организме животных минеральные элементы обладают высокой лабильностью и способностью к образованию связей, в результате чего вероятность их взаимодействия значительно выше, чем вероятность взаимодействия других питательных веществ. Наглядно пример такого взаимодействия прослеживается в синергизме марганца и кальция. Марганец, как важный элемент в обмене веществ и в процессах формирования костной ткани, значительно влияет на скорость роста, функции размножения и кроветворения, воздействуя на метаболизм кальция в периоды формирования и деструкции скелета у животных. Это достаточно достоверно установлено в экспериментальных и клинических исследованиях.

В кормах растительного происхождения уровень марганца находится на сравнительно высоком уровне – 30-40 мг/кг. Не наблюдается также его дефицит в рационах сельскохозяйственных животных. Однако в органах и тканях животных содержание марганца на порядок меньше.

В литературе имеется много сведений о том, что при дополнительном введении марганца в рацион сельскохозяйственных животных и птицы с активным метаболизмом кальция наблюдается хороший эффект в отношении роста костной ткани и прочности скорлупы, но при этом его абсорбция, напротив, снижается. Обнаруженное явление исследователи объясняют плохим усвоением марганца из корма либо задержкой всасывания в стенке кишечника, либо повторным выведением с желчью в полость кишечника после всасывания и поступления в печень [3, 7].

Из вышесказанного следует, что физиологический механизм воздействия марганца на активацию метаболизма кальция в целом остается не до конца установленным, а также не совсем понятным является процесс их взаимодействия на уровне энтеральной среды. В то же время новые сведения о структурно-функциональной организации энтеральной среды и локализации биотических элементов в химусе у животных разных видов наглядно показывают важную роль полостной кишечной слизи в процессах минерального гомеостазирования. Секретируемая стенкой кишечника слизь гидратируется благодаря входящим в ее состав гликопротеинам, образуя энтероплазму химуса, которая вкупе с пищеварительными соками и десквамированным эпителием создает плотную эндогенную фракцию. При этом она неминуемо вступает во взаимодействие с нутриентами, образуя универсальную, генетически детерминированную и динамически меняющуюся систему полостного пищеварения [1, 2, 4].

В экспериментальных исследованиях на курах-несушках было показано, что при увеличении в два раза уровня марганца в рационе отмечается его активное экстрагирование из пищевых частиц, однако далее в печень он не поступает и не концентрируется в слизистом слое кишечной стенки. Дополнительный марганец связывается гидратированной плотной эндогенной фракцией химуса, одновременно стимулируя абсорбцию кальция, концентрация которого достоверно возросла в плотной эндогенной фракции, в печени и крови воротной вены печени кур [5].

Вероятный механизм воздействия обусловлен тем, что избыток положительно заряженных катионов марганца активно образует комплексы с отрицательными гидроксильными группами гликопротеинов полостной слизи кишечника, в дальнейшем удаляясь из организма с пометом. При этом в полости кишечника марганец через активацию гидролитических ферментов химуса оказывает положительное влияние и на метаболизм кальция. Такой механизм не является случайным, так как у кур-несушек обмен веществ и его регуляция сконцентрированы на формировании яйца при напряженном метаболизме кальция.

У животных с менее выраженной кальциевой нагрузкой роль марганца может, напротив, существенно варьировать.

Цель исследований: экспериментальное изучение влияния марганца на показатели метаболизма кальция на уровне желудочно-кишечного тракта и во внутренней среде организма кроликов.

В задачи исследований входило изучение особенностей обмена марганца при увеличении его уровня в рационе в три раза и влияния разного уровня марганца в рационе на показатели обмен кальция у кроликов.

Методика исследований

В условиях естественного питания или при использовании сбалансированных рационов уровень биогенных минеральных элементов в органах и тканях животных находится в относительно динамическом равновесии. Поэтому для выявления биологической роли того или иного минерального элемента необходимо его сдвинуть. Нарушение минерального гомеостаза возможно при создании либо избытка, либо недостатка биоэлемента в рационе.

Эксперимент был проведен на кафедре физиологии, этологии и биохимии животных РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева на 6 кроликах (возраст – 10 мес.), подобранных методом пар-аналогов и подразделенных на контрольную и опытную группы (по 3 гол. в группе). Условия содержания соответствовали требованиям ветеринарно-санитарных и зоотехнических норм. Животные контрольной группы получали основной рацион (ОР) из 100 г комбикорма (ПК-90) и 200 г сена злаково-разнотравного. Фоновая концентрация марганца в ОР составила 25 мг/кг сухого вещества. Животные опытной группы дополнительно к ОР получали марганец в виде $MnSO_4$ из расчета 50 мг/кг сухого вещества. Сульфат марганца традиционно используется в производстве премиксов и комбикормов для животных и птицы в качестве дополнительного источника марганца. Таким образом, поступление марганца в организм кроликов было увеличено в три раза.

Продолжительность опытного периода составила 30 дней. В конце опытного периода животных подвергли общей анестезии для вскрытия брюшной полости. Комбинированный наркоз состоял из внутривенного введения 33%-ного этилового спирта в физиологическом растворе с добавлением 5%-ной глюкозы и внутримышечного введения миорелаксанта Rampun. Местную анестезию делали подкожным введением 0,5%-ного раствора новокаина, после этого вскрывали брюшную полость по средней линии живота, извлекали желудок и брыжейку кишечника. Шприцем производили отбор крови из брюшной артерии, из портальной вены печени, желудочной, дуоденальной, брыжеечной и левой ободочной вен. Далее была произведена эвтаназия животных методом воздушной эмболии. Затем отбирались образцы печени, легких, почек, костная и мышечная ткань. После извлечения желудочно-кишечного тракта из разных отделов кишечника отбирали образцы химуса. Из химуса методом декантирования и центрифугирования получали экзогенные пищевые частицы (ПЧ), плотную эндогенную (ПЭФ) и растворимую фракции (РФ) [6].

От стенки тонкого и толстого отделов методом соскоба отделяли слизистую оболочку (СО). Во всех полученных образцах определяли концентрацию марганца и кальция методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии, используя спектрофотометр «Спектр-5-4». Статистическая обработка результатов исследований была проведена с помощью компьютерной программы Microsoft Office Excel 2007.

Результаты и их обсуждение

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что у кроликов в обеих группах распределение марганца по фракциям химуса на протяжении всего кишечника имеет сходную картину (рис. 1). Максимальная концентрация элемента фиксируется в ПЭФ химуса с устойчивой динамикой роста в каудальном направлении, свидетельствующей о высоких сорбционных свойствах эндогенных структур. Важно уточнить, что в нативном химусе отсутствует разделение на ПЭФ и РФ. Гликопротеиды ПЭФ, благодаря гидратации, образуют единую коллоидную систему, где марганец может быть либо связанным с отрицательными группировками гликопротеидов, либо может находиться в ионизированном растворенном виде.

Стоит отметить, что трехкратное увеличение марганца в рационе вызвало перераспределение между экзогенными пищевыми частицами, поступившими с кормом, и эндогенными фракциями химуса, выделенными в пищеварительную полость, изменив тем самым его обмен на уровне энтеральной среды. В химусе тонкого кишечника у животных опытной группы снизилась концентрация растворимого марганца на 52-69%, а в пищевых частицах за счет активаций экстрагирования его концентрация уменьшилась в 3-5 раз. Однако уже в химусе ободочной кишки вследствие активации симбиотической микрофлоры и преобладания гидролиза органических нутриентов, напротив, возрастает концентрация растворимого марганца на 62%, соответственно на 30% – концентрация в ПЧ.

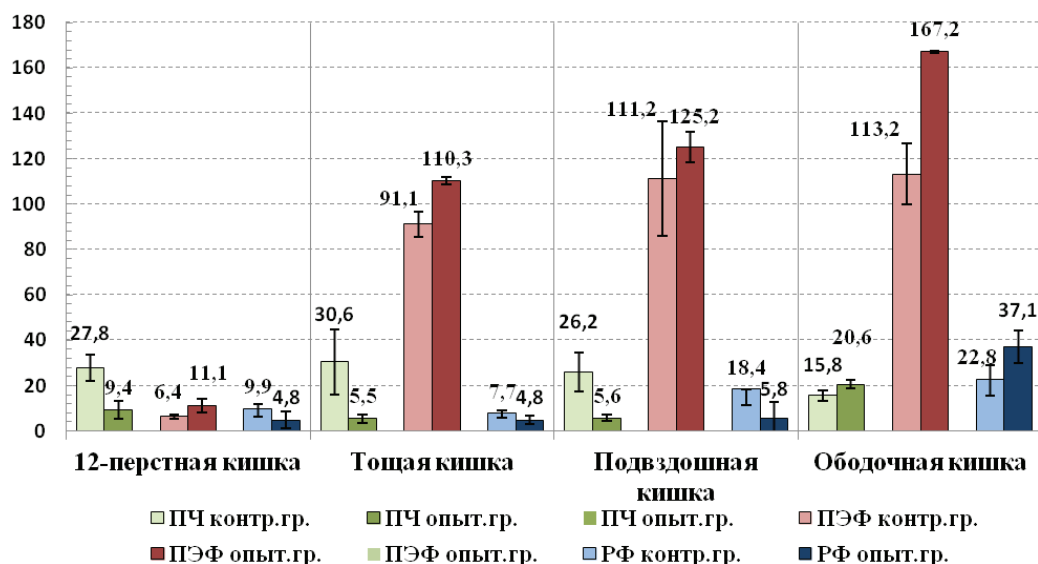


Рис. 1. Концентрация марганца во фракциях химуса у кроликов, мг% в сухого веществе

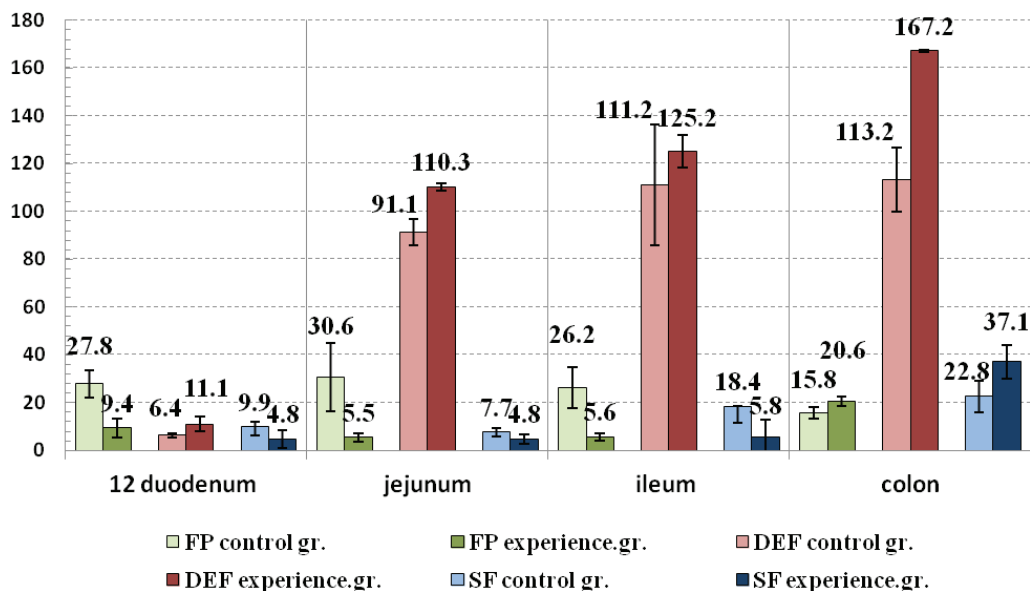


Fig. 1. Concentration of manganese in fractions of chyme in rabbits

FP – food particles, DEF – dense endogenous fraction, SF – soluble fraction (mg% in dry matter)

Концентрация марганца в ПЭФ химуса также возросла в опытной группе на 72% в дуоденуме, на 21 и 12% – в тощей и подвздошной кишках, что в целом является неадекватным по отношению к введению в рацион. Вероятно, гликопротеины, входящие в ПЭФ химуса, обладают лимитированным сорбционным резервом для катионов металлов. В результате при избыточном поступлении марганца в пищеварительный тракт резерв свободных катионсвязывающих групп в ПЭФ химуса быстро иссякает, в результате чего металл перестает образовывать комплексы с полостной слизью. Таким образом, в полости тонкого и толстого кишечника избыточное поступление марганца в кишечную полость нарушает минеральное гомеостазирование энтеральной среды, вызывая напряжение в системе не только полостного, но и пристеночного пищеварения. У животных опытной группы фиксируется увеличение концентрации марганца в слизистой оболочке кишечника двенадцатиперстной кишки в 2,5 раза, а в тощей подвздошной и в ободочной кишках – на 20, 34, 27% соответственно (табл. 1). Таким образом, избыточно поступивший марганец не только аккумулируется эндогенными компонентами химуса, но и удерживается либо гликопротеинами пристеночной слизи, либо клетками слизистой оболочки кишечника кроликов.

Трансформация метаболизма марганца на уровне энтеральной среды практически не привела к изменениям его метаболизма во внутренней среде. Его концентрация в органах и тканях у кроликов обеих групп находилась в физиологических пределах (табл. 1). При этом в опытной группе отмечена тенденция снижения его концентрации в печени на 7%, в костях – на 3,6%, в почках – на 10% соответственно, а в легких и мышцах, напротив, фиксируется рост на 7 и 6% при недостоверной разнице. В целом эти изменения

являются неадекватными и не зависят от избытка марганца в рационе. Следовательно, способность гликопротеинов полостной и пристеночной слизи вынужденно фиксировать марганец, дополнительно поступивший с рационом, может быть общебиологической закономерностью, которая является ограничителем его абсорбции во внутреннюю среду. Это, во-первых, приводит к эвакуации излишков элемента из организма, а во-вторых, влияет на конформацию самих гликопротеидов, и в целом – на структурно-функциональную организацию энтеральной среды.

Анализ артерио-венозной разницы на уровне кишечника выявил увеличение на 30% уровня марганца в крови у животных опытной группы, оттекающей от желудка, от 12-перстной кишки – на 45% в сравнении с контрольной группой (рис. 2). В крови, оттекающей от дистального отдела тонкого отдела кишечника, концентрация марганца, напротив, снижается на 11% относительно контрольной группы. В целом концентрация марганца в воротной вене печени кроликов обеих групп не отличается, что свидетельствует об отсутствии дополнительной абсорбции во внутреннюю среду избыточного элемента, который остается в полости кишечника, а именно в плотной эндогенной фракции химуса, о чем сказано выше. У кроликов опытной группы также снизилась концентрация марганца в артериальной крови на 24%, однако в целом в обеих группах фиксируется положительная артерио-венозная разница по марганцу на протяжении кишечника.

В метаболизме кальция на уровне энтеральной среды также выявлены определенные закономерности. У животных обеих групп максимальная концентрация кальция отмечается в сухом веществе ПЭФ при 3-5-кратном росте в каудальном направлении кишечника (рис. 3). С учетом содержания в химусе растворимого кальция и аналогичной динамики роста концентрации можно предположить, что кальций является физиологически необходимым элементом в энтеральной среде.

Увеличение уровня марганца в рационе в три раза повлияло на распределение кальция в энтеральной среде и его поступление во внутреннюю среду. На протяжении кишечника кроликов опытной группы увеличилась на 30-60% концентрация кальция в ПЧ химуса, указывающая на снижение экскреции элемента из корма. При этом у животных опытной группы достоверно снижается в среднем на 36-58% концентрация кальция в РФ химуса, а также уровень кальция в ПЭФ химуса на 45-51% в тощей, подвздошной и ободочной кишках ($P < 0,01$).

Таблица 1

Концентрация марганца в органах и тканях кроликов, мг% в сухом веществе

Отдел кишечника	Контрольная группа	Опытная группа
Слизистая оболочка 12-перстной кишки	2,52±1,7	6,70±1,5*
Слизистая оболочка тощей кишки	3,82±1,9	4,60±3,0
Слизистая оболочка подвздошной кишки	5,86±1,9	7,88±0,9
Слизистая оболочка ободочной кишки	10,43±2,2	13,23±1,6
Печень	1,34 ± 0,374	1,25 ± 0,36
Легкие	0,37 ± 0,156	0,40 ± 0,097
Почки	0,927 ± 0,25	0,84 ± 0,156
Мышцы	0,16 ± 0,003	0,17 ± 0,049
Кость бедренная	0,86 ± 0,082	0,83 ± 0,019

*Разница достоверна в сравнении с контролем при $P < 0,1$.

Table 1

Concentration of manganese in organs and tissues of rabbits (mg% in dry matter)

Intestinal segment	Control group	Experimental group
The mucous membrane of the 12 duodenum	2.52±1.7	6.70±1.5*
The mucous membrane of the jejunum	3.82±1.9	4.60±3.0
The mucous membrane of the ileum	5.86±1.9	7.88±0.9
The mucous membrane of the colon	10.43±2.2	13.23±1.6
Liver	1.34 ± 0.374	1.25 ± 0.36
Lungs	0.37 ± 0.156	0.40 ± 0.097
Kidneys	0.927 ± 0.25	0.84 ± 0.156
Muscles	0.16 ± 0.003	0.17 ± 0.049
Femoral bone	0.86 ± 0.082	0.83 ± 0.019

* The difference is significant in comparison with the control at $P < 0.1$

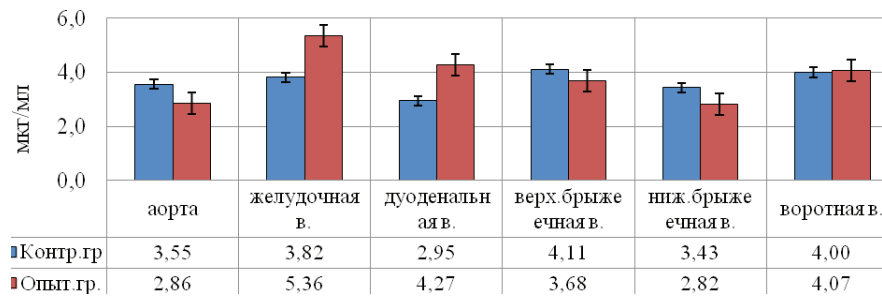


Рис. 2. Концентрация марганца в крови, притекающей и оттекающей от пищеварительного тракта кролико, мкг/мл

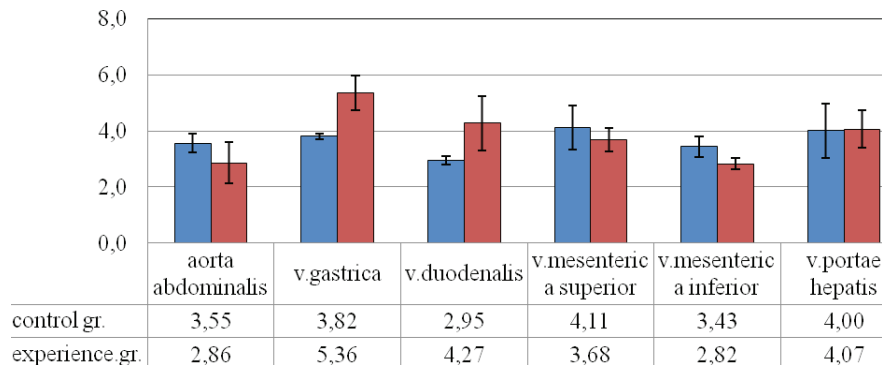


Fig. 2. Concentration of manganese in the blood flowing in and out of the digestive tract of rabbits (mcg/ml)

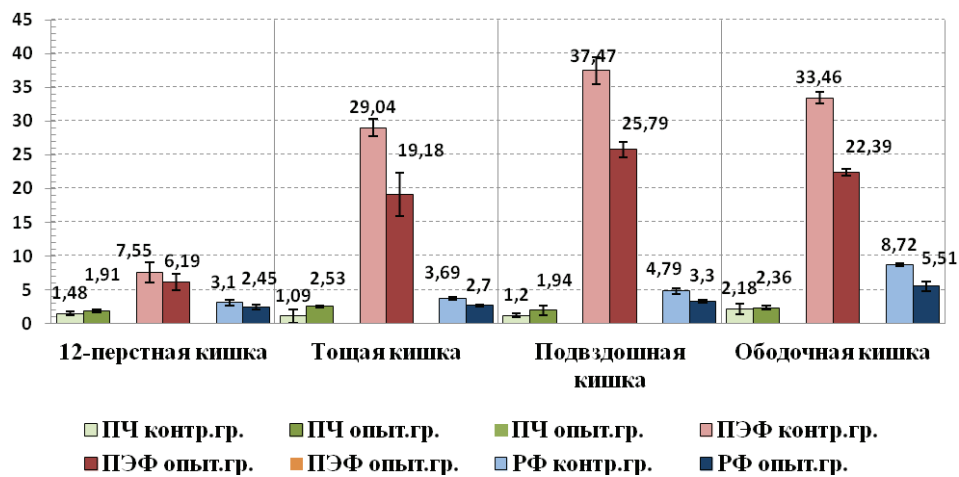


Рис. 3. Концентрация кальция во фракциях химуса у кроликов, г/кг в сухом веществе

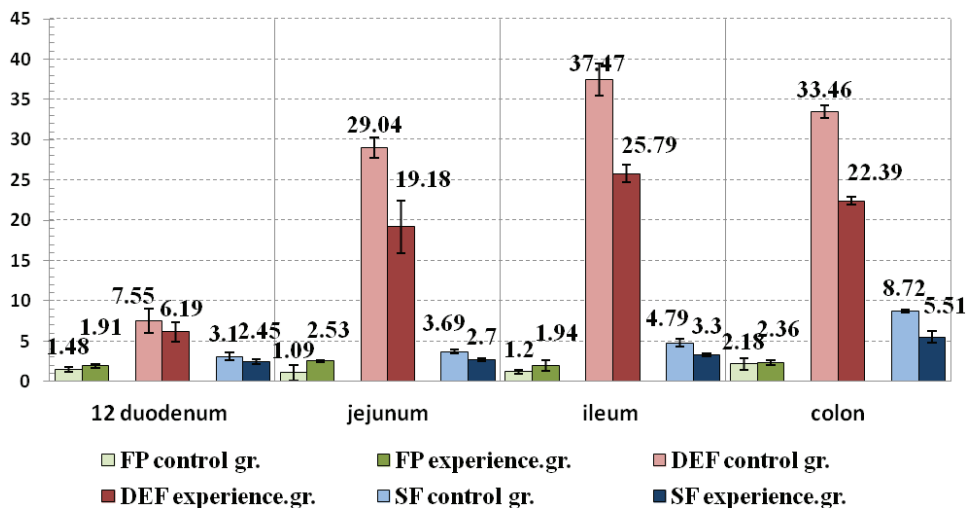


Fig. 3. Concentration of calcium in chyme fractions in rabbits
FP – food particles, DEF – dense endogenous fraction, SF – soluble fraction (g/kg in dry matter)

У кроликов опытной группы отмечается достоверное снижение концентрации кальция в слизистой оболочке стенки кишечника в тощей кишке на 18%, а также тенденция снижения на 11 и 15% в подвздошной и ободочной кишках, свидетельствуя об уменьшении его абсорбции (табл. 2). Анализ содержания кальция в органах и тканях у животных опытной группы указывает на изменения метаболизма кальция во внутренней среде, куда элемент поступил, а концентрация заметно возросла (на 41%) только в легких. В большинстве тканей и органов концентрация кальция, напротив, имеет тенденцию снижения: в печени – на 29%, в почках – на 10%. В костной ткани его содержание достоверно снизилось на 12%.

Артерио-венозная разница по кальцию у кроликов контрольной и опытной групп на уровне кишечника в целом была положительной. Увеличение уровня марганца в рационе кроликов в три раза привело к общей тенденции снижения кальция в крови, притекающей к пищеварительному тракту и в оттекающей от него (рис. 4). В аортальной крови концентрация кальция снизилась на 20%, а в крови, оттекающей от желудка, тонкого кишечника и в воротной вене печени, – на 3-15%. Таким образом, снижение кальция в крови, оттекающей от кишечника у кроликов опытной группы, свидетельствует о снижении его абсорбции при трехкратном увеличении марганца в рационе, что в итоге приводит к напряженности метаболизма во внутренней среде организма.

Результаты исследований показывают, что в норме марганец, поступивший в пищеварительный тракт, является необходимым элементом не только во внутренней среде организма, но и на уровне энтеральной среды, то есть до момента всасывания. Вероятно, фиксируясь специфическими лигандами гликопротеинов, марганец концентрируется в плотной эндогенной фракции химуса, участвуя в формировании упорядоченной наноструктуры энтероплазмы [8], которая в норме имеет ограниченное количество мест фиксации для марганца вследствие генетически детерминированной гомеостатичной модели. При избытке в рационе марганца обнаруживается увеличение элемента в крови, оттекающей от желудка и 12-перстной кишки, и в слизистой оболочке тонкого и толстого отделов кишечника, что в целом является неадекватным по отношению к введенной дозе. При этом не происходит его накопление в органах и тканях. Избыточной марганец остается в кишечном просвете и концентрируется преимущественно в ПЭФ и РФ химуса благодаря ионно-обменным свойствам гликопротеидов полостной слизи.

Таблица 2

Концентрация кальция в органах и тканях кроликов, мг% в сухом веществе

Орган/ткань	Контрольная группа	Опытная группа
Слизистая оболочка 12-перстной кишки	154,1 ± 32,3	165,0 ± 69,2
Слизистая оболочка тощей кишки	177,2 ± 19,2	144,5 ± 10,9*
Слизистая оболочка подвздошной кишки	260,8 ± 25,8	232,4 ± 10,6
Слизистая оболочка ободочной кишки	280,0 ± 24,3	240,0 ± 18,1
Печень	30,97 ± 8,3	22,21 ± 5,0
Легкие	41,07 ± 10,2	58,67 ± 12,8
Почки	47,64 ± 11,2	41,93 ± 8,6
Мышцы бедренные	34,67 ± 5,9	35,21 ± 6,3
Кость бедренная	21562,4 ± 1188,9	19170,1 ± 1072,8*

*Разница достоверна в сравнении с контролем при $P < 0,1$.

Table 2

Concentration of calcium in organs and tissues of rabbits (mg % in dry matter)

Organ/tissue	Control group	Experimental group
The mucous membrane of the 12 duodenum	154.1 ± 32.3	165.0 ± 69.2
The mucous membrane of the jejunum	177.2 ± 19.2	144.5 ± 10.9*
The mucous membrane of the ileum	260.8 ± 25.8	232.4 ± 10.6
The mucous membrane of the colon	280.0 ± 24.3	240.0 ± 18.1
Liver	30.97 ± 8.3	22.21 ± 5.0
Lungs	41.07 ± 10.2	58.67 ± 12.8
Kidneys	47.64 ± 11.2	41.93 ± 8.6
Muscles	34.67 ± 5.9	35.21 ± 6.3
Femoral bone	21562.4 ± 1188.9	19170.1 ± 1072.8*

* The difference is significant in comparison with the control at $P < 0.1$

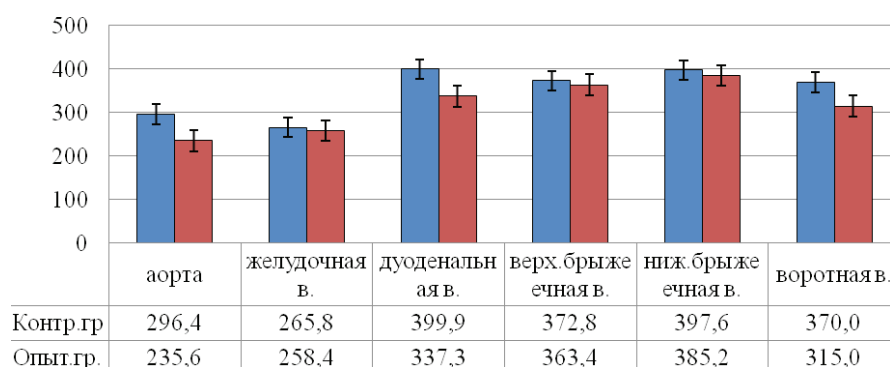


Рис. 4. Концентрация кальция в крови, притекающей и оттекающей от пищеварительного тракта, мкг/мл

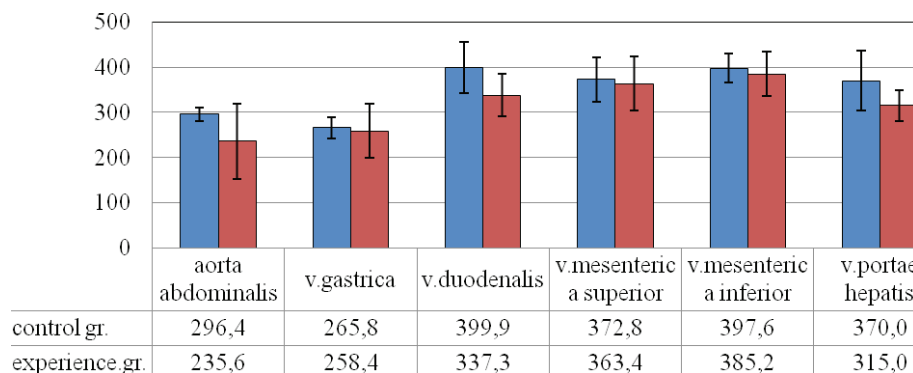


Fig. 4. Concentration of calcium in the blood flowing in and out of the digestive tract (mcg/ml)

Известно, что в гидролитических ферментах полостного и пристеночного пищеварения марганец не является специфическим активатором. В этой связи установленное явление накопления марганца в эндогенных структурах энтеральной среды нельзя объяснить с позиций механизма пристеночного пищеварения. Вероятно, благодаря комплексообразующим свойствам избыточный марганец связывается с гидроксильными группами гликопротеинов полостной слизи, что влияет на конформацию молекул, и в целом – на структуру энтероплазмы химуса. Кроме того, вынужденно кумулируясь в ПЭФ химуса, излишний марганец фактически выводится из организма с калом, что обеспечивает толерантность организма к его токсическому воздействию.

В то же время трехкратное увеличение марганца в рационе влияет на метаболизм кальция. Вероятно, гликопротеины слизи имеют ограниченное количество мест фиксации. В результате марганец как активный комплексообразователь гораздо быстрее захватывает лиганды, вытесняя кальций, уровень которого снижается в ПЭФ и РФ химуса, в слизистой оболочке кишечника. В итоге возникает тенденция снижения абсорбции кальция при достоверном уменьшении его уровня в костях. В определенной степени это обнаруживает механизм влияния марганца на метаболизм кальция. Но если у кур-несушек это взаимодействие является синергическим и благоприятным при интенсивном метаболизме кальция, то у кроликов, напротив, носит характер выраженного антагонизма. Вероятно, в отличие от сельскохозяйственной птицы, у которой кальций интенсивно используется для роста костной ткани и формирования скорлупы яиц, у кроликов увеличение марганца в рационе в три раза негативно влияет на поступление кальция во внутреннюю среду. Уже на уровне энтеральной среды возникает напряженность обменных процессов, уменьшается высвобождение кальция из корма, снижаются количество его растворимых форм и концентрация в плотной эндогенной фракции, что в итоге сдерживает абсорбцию кальция во внутреннюю среду. Данное явление возможно вследствие конкурентного замещения избыточным марганцем активных мест связывания в гликопротеинах полостной и пристеночной слизи путем вытеснения кальция, что в итоге модифицирует структуру и функцию ПЭФ химуса.

Выводы

1. У кроликов обеих групп в химусе тонкого и толстого отделов кишечника максимальная концентрация марганца и кальция зафиксирована в плотной эндогенной фракции с четко выраженной динамикой ее роста в каудальном направлении.

2. Концентрация марганца и кальция в растворимой, и особенно в плотной эндогенной фракциях химуса, в несколько раз превышает этот показатель в слизистой оболочке кишечника, в оттекающей

от кишечника крови, в органах и тканях, что указывает на роль элементов на уровне энтеральной среды при формировании эндогенных структур химуса.

3. Увеличение в три раза марганца в рационе кроликов повлияло на метаболизм кальция, вызвав снижение концентрации кальция в оттекающей от кишечника крови, в печени и почках. При этом уровень самого марганца в органах не был повышен, а в оттекающей от кишечника крови имел выраженную тенденцию повышения.

4. Избыток марганца в рационе кумулируется эндогенными структурами химуса, что препятствует его поступлению во внутреннюю среду организма. При этом происходит конкуренция за места фиксации в гликопротеидах, в результате которой из плотной эндогенной фракции вытесняется кальций, а его концентрация в ней достоверно снижается в 1,2-1,5 раза при уменьшении экскреции элемента из пищевых частиц.

5. Изменения метаболизма кальция на уровне энтеральной среды, снижение абсорбции и уровня в оттекающей от кишечника крови вызывают напряженность его гомеостатического равновесия во внутренней среде организма, что в итоге достоверно уменьшает концентрации в костях на 12%.

Список источников

1. Иванов А.А., Полякова Е.П., Ксенофонтов Д.А. Экспериментальное обоснование роли структурирования и других характеристик химуса в определении функциональных возможностей желудочно-кишечного тракта при проведении энтерального питания // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. – 2009. – № 6. – С. 51-56.

2. Иванов А.А., Полякова Е.П., Ксенофонтов Д.А., Ксенофонтова А.А. Экспериментальное обоснование функциональной взаимосвязи минеральных элементов пищевого рациона с полостной слизью и слизистой оболочкой кишки // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. – 2013. – № 2. – С. 37-41.

3. Иванов А.А., Ильяшенко А.Н. Рост, развитие и формирование скелета цыплят-бройлеров при включении в рацион кофакторов минерального обмена // Известия ТСХА. – 2011. – № 4. – С. 114-130.

4. Ксенофонтов Д.А. Структурно-функциональная организация гастро-энтеральной среды и ее роль в метаболизме минеральных веществ в организме животных: Автореф... д-ра биол. наук. – Москва, РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. – 39 с.

5. Ксенофонтов Д.А., Полякова Е.П., Барбосова М.Е. Всасывание аминокислот, кальция и марганца в разных отделах желудочно-кишечного тракта у кур в зависимости от уровня марганца в рационе // Проблемы биологии в животноводстве. – 2013. – № 1. – С. 75-84.

6. Полякова Е.П., Ксенофонтов Д.А., Иванов А.А. Метод изучения полостного пищеварения // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. – 2016. – № 12 (136). – С. 110-114.

7. Шацких Е.В. Использование Биоплекса марганца в кормлении цыплят-бройлеров // Аграрный вестник Урала. – 2013. – № 3 (109). – С. 33-35.

8. Vazina A.A., Vasiliev V.D., Vasilieva A.A. et al. Nanostructural Mechanism of Modifying Adaptation of Proteoglycan Systems of Biological Tissues and Mucus // Crystallogr. – 2018. – Rep. 63. – Pp. 1063-1070. doi.org/10.1134/S1063774518070258.

References

1. Ivanov A.A., Polyakova E.P., Ksenofontov D.A. Experimental validation of the role of chyme structuring and other chyme characteristics in determining gastrointestinal functionality during enteral feeding. Eksperimental'naya i klinicheskaya gastroenterologiya. 2009; 6: 51-56. (In Rus.)

2. Ivanov A.A., Polyakova E.P., Ksenofontov D.A., Ksenofontova A.A. Experimental validation of the functional relationship between mineral elements in the diet and the cavity mucosa and intestinal mucosa. Eksperimental'naya i klinicheskaya gastroenterologiya. 2013; 2: 37-41. (In Rus.)

3. Ivanov A.A., Il'yashenko A.N. Growth, development and skeletal formation of broiler chickens with the inclusion of mineral exchange cofactors in the diet. Izvestiya TSKhA. 2022: 114-130. (In Rus.)

4. Ksenofontov D.A. Structural and functional organization of the gastro-enteric environment and its role in mineral metabolism in animals: DCs (bio) thesis abstract. Moscow: RGAU-MSKhA im. K.A. Timiryazeva, 2022: 39. (In Rus.)

5. Ksenofontov D.A., Polyakova E.P., Barbosova M.E. Absorption of amino acids, calcium and manganese in different parts of the gastrointestinal tract in chickens as a function of dietary manganese levels. Problemy biologii v zhivotnovodstve. 2013; 1: 75-84. (In Rus.)

6. Polyakova E.P., Ksenofontov D.A., Ivanov A.A. Method for studying cavity digestion. Eksperimental'naya i klinicheskaya gastroenterologiya. 2016; 12(136): 110-114. (In Rus.)

7. Shatskikh E.V. Use of Bioplex Manganese in broiler chicken feeding. Agrarniy vestnik Urala. 2013; 3 (109): 33-35. (In Rus.)

8. Vazina A.A., Vasiliev V.D., Vasilieva A.A. et al. Nanostructural Mechanism of Modifying Adaptation of Proteoglycan Systems of Biological Tissues and Mucus. Crystallogr. 2018; 63: 1063-1070. doi.org/10.1134/S1063774518070258

Информация об авторах

Дмитрий Анатольевич Ксенофонтов, заведующий кафедрой физиологии, этологии и биохимии животных, д-р биол. наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: smu@rgau-msha.ru, orcid: 0000-0002-2408-0776.

Ольга Александровна Войнова, доцент кафедры физиологии, этологии и биохимии животных, канд. биол. наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: voynovaoa@rgau-msha.ru, orcid: 0000-0002-4305-7969.

Анжелика Александровна Ксенофонтова, доцент кафедры кормления животных, канд. биол. наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: tmetre@rgau-msha.ru, orcid: 0000-0003-1920-2326.

Татьяна Владимировна Саковцева, доцент кафедры физиологии, этологии и биохимии животных, канд. биол. наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: sakovtseva@rgau-msha.ru, orcid: 0000-0002-7332-2057.

Статья поступила в редакцию 27.03.2023
Одобрена после рецензирования 25.04.2023
Принята к публикации 31.08.2023

About authors

Dmitry A. Ksenofontov, DSc (Bio), Associate Professor, Head of the Department of Animal Physiology, Ethology and Biochemistry, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation; E-mail: smu@rgau-msha.ru, orcid: 0000-0002-2408-0776.

Olga A. Voinova, CSc (Bio), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Animal Physiology, Ethology and Biochemistry, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation; E-mail: voynovaoa@rgau-msha.ru, orcid: 0000-0002-4305-7969.

Angelika A. Ksenofontova, CSc (Bio), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Animal Feeding, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation; E-mail: tmetre@rgau-msha.ru, orcid: 0000-0003-1920-2326.

Tatiana V. Sakovtseva, CSc (Bio), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Animal Physiology, Ethology and Biochemistry, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation; E-mail: sakovtseva@rgau-msha.ru, orcid: 0000-0002-7332-2057.

The article was submitted to the editorial office 27 Mar 2023
Approved after reviewing 25 Apr 2023
Accepted for publication 31 Aug 2023