

ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ

Оригинальная научная статья

УДК 664.7: 613.3.03

<https://doi.org/10.26897/2949-4710-2024-2-3-84-91>



Кальций как фактор структурирования энтеральной среды

Дмитрий Анатольевич Ксенофонтов, Анжелика Александровна Ксенофонтова

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

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

Аннотация

В экспериментах на животных разных видов проведены исследования по изучению показателей метаболизма кальция на уровне тонкого и толстого отделов кишечника. У моно- и полигастрических животных методом центрифугирования изучали фракционный состав химуса и определяли концентрацию кальция в его экзогенных и эндогенных компонентах методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Методом малоугловой дифракции проведен рентгеноструктурный анализ нативного химуса из разных отделов пищеварительного тракта кроликов, фиксированного на пленке. Установлено, что по мере продвижения по кишечнику в химусе и его эндогенной фракции уровень кальция возрастает с преобладающей относительной долей среди других минеральных элементов. На рентгенограммах получены дифракционные максимумы, превышающие по ширине размеры истинных кристаллов и характерные для аморфных кристаллических веществ. Сделано заключение об общебиологическом феномене депонирования кальция эндогенными структурами химуса для формирования нанопорядоченного каркаса энтероцитоплазмы. Установленные в ходе экспериментов закономерности энтерального обмена кальция у животных разных видов имеют научную значимость в плане изучения механизмов его гомеостаза в организме и практическую ценность в области уточнения норм минерального питания с учетом значительной кумуляции кальция эндогенными компонентами тонкого и толстого отделов кишечника. Рентгеноструктурный анализ химуса дополняет теоретическую базу в концепции полосного пищеварения и позволяет провести предварительную оценку его физико-химических свойств.

Ключевые слова

кишечник, химус, кальций, рентгеноструктурный анализ, атомно-абсорбционная спектрофотометрия

Для цитирования

Ксенофонтов Д.А., Ксенофонтова А.А. Кальций как фактор структурирования энтеральной среды // Тимирязевский биологический журнал. 2024. Т. 2, № 3. С. 84-91. <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2024-2-3-84-91>

HUMAN AND ANIMAL PHYSIOLOGY

Original article

<https://doi.org/10.26897/2949-4710-2024-2-3-84-91>



Calcium as a factor in structuring the enteral flora

Dmitriy A. Ksenofontov, Angelika A. Ksenofontova

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

Corresponding author: Dmitriy A. Ksenofontov; dksenofontov@rgau-msha.ru

Abstract

Experiments were carried out on animals of different species to study the parameters of calcium metabolism at the level of the small and large intestines. In monogastric and polygastric animals, the fractional composition of chyme was studied by centrifugation and the concentration of calcium in its exogenous and endogenous components was determined by atomic absorption spectrophotometry. An analysis of native chyme from different parts of the rabbit intestine was carried out by X-ray structural analysis using the small-angle diffraction method. It was found that as the chyme and its endogenous fraction move along the intestine, the calcium content increases with a predominant relative proportion of other mineral elements. Diffraction maxima exceeding the width of true crystals and characteristic of amorphous crystalline substances were obtained on X-ray patterns. The general biological phenomenon of calcium deposition in endogenous structures of chyme to form a nano-ordered framework of enteroplasm was inferred. The regularities of enteral calcium metabolism in animals of different species established during the experiments are of scientific importance for the study of the mechanisms of its homeostasis in the body and of practical value in the field of setting mineral nutritional standards, taking

into account the significant calcium accumulation by endogenous components of the small and large intestines. The X-ray structural analysis of chyme complements the theoretical basis of the strip digestion concept and allows for a preliminary assessment of its physicochemical properties..

Keywords

intestine, chyme, calcium, X-ray structural analysis, atomic absorption spectrophotometry

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

For citation

Ksenofontov D.A., Ksenofontova A.A. Calcium as a factor in structuring the enteral flora. *Timiryazev Biological Journal*. 2024;2(3):84-91. <https://doi.org/10.26897/2949-4710-2024-2-3-84-91>

Введение Introduction

Пищеварение представляет собой комплекс происходящих в желудочно-кишечном тракте процессов. Активно развивающееся направление по разработке рационов и индивидуализации диетического питания в нутрициологии человека и животных должно основываться на глубоком анализе функциональных особенностей гидролиза органических и минеральных нутриентов. Особая роль в пищеварительной функции отводится кальцию, который прямо или опосредованно участвует во всех физиологических процессах, а при его алиментарной недостаточности либо патологиях обмена возникают остеомалация или остеопороз, нарушаются нервная деятельность, сократительная функция мышц, свертывание крови, секреция желез и иммунный ответ [1, 2]. Возникающий при нарушениях метаболизма кальция симптоматический комплекс также может проявляться снижением продуктивности и нарушением воспроизводительной функции сельскохозяйственных животных [3].

Полученные в последнее время экспериментальные сведения указывают на то, что в пищеварительной системе кальций необходим для нормального течения гидролиза и абсорбции нутриентов в желудочно-кишечном тракте. Наличие внеклеточных кальций-чувствительных рецепторов кишечного эпителия у млекопитающих позволяет как эффективно регулировать абсорбцию самого кальция, так и анализировать химический состав химуса и его микробиальный состав. Эти кальциевые рецепторы также регулируют проницаемость, целостность и иммунитет кишечника, способствуют пролиферации и дифференцировке эпителиальных клеток в кишечнике [4].

Установлено изменение концентрации кальция в кишечном содержимом в зависимости от времени и характера потребления пищи, а также его влияние на переваримость и биодоступность липидов [5]. Кальций необходим для работы протонной помпы при синтезе соляной кислоты желудочного сока. При этом он одновременно участвует в синтезе гликопротеинов защитного слоя слизистой оболочки желудка, благодаря чему создается интактная

поверхность, нечувствительная к агрессивным факторам и гидролитическим ферментам [6, 7].

Таким образом, благодаря кальцию осуществляется модуляция различных процессов в желудочно-кишечном тракте, а пищеварительная система является важным компонентом системы поддержания оптимального уровня кальция во внутренней среде организма [8]. При этом новые концептуальные характеристики структурной организации гастро-энтеральной среды, ее функциональные особенности и участие в поддержании гомеостаза по кальцию позволяют предположить особую роль элемента в организации и поддержании специфической системы энтероплазмы кишечного химуса [9, 10].

Цель исследований: изучение структурой организации химуса и показателей метаболизма кальция на уровне гастро-энтеральной среды у животных разных видов.

Методика исследований Research method

Исследования проводили в 5 экспериментах на виварии и кафедре физиологии, этологии и биохимии животных РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, в лаборатории фармако моделирования ФГБУН НЦБМТ ФМБА России. Эксперименты проводились в соответствии с биоэтическими правилами. В опытах использовали здоровых животных, содержащихся в условиях, соответствующих зоогигиеническим и зоотехническим требованиям. Рационы животных составлялись в соответствии с детализированными нормами кормления. На протяжении экспериментов за животными осуществлялся ветеринарный контроль. В качестве объектов исследований использовали моно- и полигастричных животных: куры яичного направления 80-120-дневного возраста (24 гол.); мини-пиги светлогорской породы – возраст 1,5 года (4 гол.); кролики (3 гол.); быки-кастраты – возраст 18-22 месяца (3 гол.).

В конце экспериментов проводили острый опыт в соответствии с методикой. У всех животных извлекали пищеварительный тракт с последующим разделением на отделы и отбором из них проб химуса. Методами центрифугирования и декантирования химус из разных отделов кишечника разделяли

на компоненты: растворимую фракцию (РФ), плотную эндогенную фракцию (ПЭФ) и пищевые частицы (ПЧ) [11]. В полученных образцах химуса и его фракциях методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии на приборе «Спектр 5-4» определяли содержание кальция. У кроликов химус из разных отделов пищеварительного тракта исследовали методом малоугловой и широкоугловой рентгеновской дифракции SAXS/WAXS на специализированном источнике синхротронного излучения «КИСИ-Курчатов» в экспериментальной станции ДИКСИ в монохроматическом рентгеновском излучении синхротронного источника, позволяющей оценить структуру биологических объектов в статике.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Сравнительный анализ динамики концентрации кальция в химусе кишечника у животных с разным морфологическим строением пищеварительного тракта и характером питания выявил

сходные закономерности, обусловленные процессами гидролиза, абсорбции и экскреции нутриентов. Минимальная концентрация кальция у всех видов животных фиксируется в 12-перстной кишке, где химус изначально разбавляется пищеварительными соками, а ионизированный соляной кислотой желудка кальций легко абсорбируется в кровь (табл. 1). По мере продвижения химуса по отделам тонкого кишечника концентрация кальция в нем у мини-пигов возрастает в 7 раз, у быков и кроликов – в 2,8 раза. Это, несомненно, обусловлено снижением его абсорбции, несмотря на активный гидролиз нутриентов при одновременном поступлении кишечных соков, десквамации эпителия и пристеночной слизи в энтеральную полость. На протяжении толстого отдела кишечника у всех исследуемых животных концентрация кальция в химусе также продолжает увеличиваться, что связано со снижением его абсорбции и, вероятно, имеет общебиологическое значение для формирования оптимальных условий энтеральной среды, для функционирования симбиотической микрофлоры и формирования каловых масс.

Таблица 1

Концентрация кальция в химусе, г/кг сухого вещества

Отдел кишечника	Свиньи (мини-пиги)	Кролики	КРС (быки-кастраты)
12-перстная кишка	2,42 ± 0,11	4,14 ± 1,65	5,30 ± 0,9
Тошая кишка (проксимальный отдел)	10,34 ± 0,47	5,79 ± 2,41	4,50 ± 0,8
Тошая кишка (дистальный отдел)	17,56 ± 2,39	5,93 ± 3,43	11,43 ± 4,6
Подвздошная кишка	15,18 ± 2,51	11,8 ± 4,72	14,97 ± 1,4
Слепая кишка	14,15 ± 1,56	11,8 ± 5,01	16,88 ± 3,5
Ободочная кишка	13,55 ± 4,23	12,0 ± 4,76	16,98 ± 2,2
Прямая кишка	17,13 ± 0,86	-	19,41 ± 4,4

Table 1

Calcium concentration in chyme, g/kg dry matter

Intestinal section	Pigs (mini pigs)	Rabbits	Cattle (castrate bulls)
Duodenum	2.42 ± 0.11	4.14 ± 1.65	5.30 ± 0.9
Jejunum (proximal)	10.34 ± 0.47	5.79 ± 2.41	4.50 ± 0.8
Jejunum (distal)	17.56 ± 2.39	5.93 ± 3.43	11.43 ± 4.6
Ileum	15.18 ± 2.51	11.8 ± 4.72	14.97 ± 1.4
Caecum	14.15 ± 1.56	11.8 ± 5.01	16.88 ± 3.5
Colon	13.55 ± 4.23	12.0 ± 4.76	16.98 ± 2.2
Rectum	17.13 ± 0.86	-	19.41 ± 4.4

Анализ фракционного состава химуса показал его сходный гетерогенный состав на протяжении всего кишечника у животных разных видов, представленный экзогенными структурными компонентами в виде пищевых частиц и плотной эндогенной фракцией, содержащей молекулярно-корпускулярную и симбиотическую часть. В нативном химусе основу молекулярно-корпускулярной части составляет секретируемая оболочкой кишечника внутрисполостная слизь, богатая гликопротеидами. Доля плотной эндогенной фракции в сухом веществе химуса у животных с разным спектром питания имеет сходную динамику. В химусе тонкого кишечника она находится на уровне 9-20%, снижаясь в подвздошной кишке до 7% и вновь возрастая в среднем до 15-30% после перехода в толстый отдел. Такая закономерность связана с функциональными особенностями пищеварения в разных отделах кишечника, где плотная эндогенная фракция реализует специфические функции. Стоит подчеркнуть, что благодаря высоким гидротационным свойствам [12] вода, составляющая в химусе 80-85%, связывается гликопротеидами плотной эндогенной фракции, в результате чего образуется энтеральная среда с реакционными

зонами для протекания гидролитических процессов в фермент-субстратных взаимодействиях. В итоге до 90% массы нативного химуса фактически представлено гидратированной плотной эндогенной фракцией вкупе с растворимой фракцией, образующих единую структурно-функциональную систему энтеральной среды, или так называемую «энтероплазму кишечного химуса», которая обладает определенными физико-химическими свойствами и является местом полостного гидролиза и транспорта нутриентов.

Анализ концентрации кальция в сухом веществе химуса и его фракциях показал, что элемент преимущественно локализуется в плотной эндогенной и растворимой фракциях с закономерной динамикой изменения от проксимального к дистальному отделам кишечника у животных разных видов (табл. 2). Концентрация кальция в ПЭФ у кур-несушек возрастает в 6,8 раза, у мини-пиггов – в 11,5 раза, у кроликов – в 5 раз, у быков-кастратов – в 5,7 раза. Видовые отличия по содержанию кальция связаны с рациональными особенностями кормления и морфо-функциональными особенностями пищеварительного тракта у моно- и полигастрических животных.

Таблица 2

Содержание кальция в плотной эндогенной фракции химуса, г/кг сухого вещества

Отдел кишечника	Птица (куры-несушки)	Свиньи (мини-пиги)	Кролики	КРС (быки-кастраты)
12-перстная кишка	12,8 ± 0,8	4,01 ± 0,76	7,54 ± 1,5	6,34 ± 0,1
Тощая кишка	50,3 ± 6,2	16,01 ± 1,8	29,03 ± 1,25	16,3 ± 2,4
Подвздошная кишка	86,7 ± 7,25	46,12 ± 0,97	37,5 ± 2,02	22,0 ± 1,1
Слепая кишка	-	22,1 ± 6,02	16,1 ± 3,26	28,3 ± 2,6
Ободочная кишка	-	18,41 ± 0,4	33,5 ± 0,8	28,6 ± 5,6
Прямая кишка	85,2 ± 13,0	37,7 ± 1,37	-	36,1 ± 6,2

Table 2

Calcium concentration in the dense endogenous fraction of chyme, g/kg dry matter

Intestinal section	Poultry (laying hens)	Pigs (mini pigs)	Rabbits	Cattle (castrate bulls)
Duodenum	12.8 ± 0.8	4.01 ± 0.76	7.54 ± 1.5	6.34 ± 0.1
Jejunum	50.3 ± 6.2	16.01 ± 1.8	29.03 ± 1.25	16.3 ± 2.4
Ileum	86.7 ± 7.25	46.12 ± 0.97	37.5 ± 2.02	22.0 ± 1.1
Caecum	-	22.1 ± 6.02	16.1 ± 3.26	28.3 ± 2.6
Colon	-	18.41 ± 0.4	33.5 ± 0.8	28.6 ± 5.6
Rectum	85.2 ± 13.0	37.7 ± 1.37	-	36.1 ± 6.2

Однако общая закономерность увеличения элемента в ПЭФ химуса в дистальном направлении имеет определенное биологическое значение. Накопление кальция в химусе с помощью ПЭФ не только сдерживает его абсорбцию, но одновременно создает определенное обменное депо, из которого организм может извлекать элемент в случае необходимости, используя для функционирования самого кишечника либо для поддержания гомеостатического уровня в плазме крови.

Сравнение содержания макро- и микроэлементов в ПЭФ кишечного химуса показало, что наибольшее количество из всех минеральных элементов приходится на долю кальция (табл. 3). При этом наблюдается динамика роста относительного его уровня у кур в 1,9 раза, у КРС в 3,2 раза. У мини-пигов динамика не так существенно выражена, составляя 50-68%.

Преобладание кальция в энтероплазме химуса неслучайно, физиологически значимо и, вероятно, связано с высокой сорбционной емкостью гликопротеидов по отношению к катионам кальция, что влияет на трехмерную структуру его олигосахаридной цепочки и приводит к образованию геля [13, 14]. В энтеральной среде кальций,

депонируясь в гидратированной ПЭФ химуса, может образовывать быстрообмениваемый фонд либо, как активный комплексообразователь, может участвовать в структурировании химуса. Путем перераспределения между ПЭФ и РФ химуса запас элемента можно легко мобилизовать из энтероплазмы при его недостатке во внутренней среде. Такая мобилизация кальция возможна и при патологических процессах как внутри организма, связанных с метаболизмом кальция, так и при расстройствах пищеварения, когда структура энтероплазмы разрушается.

На основании способности кальция образовывать металлоорганические комплексы с гликопротеинами полосной кишечной слизи можно предположить его активное участие в формировании молекулярной структуры энтеральной среды. Поскольку структурированные системы обеспечивают большее биохимическое совершенство, то в пространственно организованной энтеральной среде скорость гидролиза нутриентов, очевидно, будет выше, чем в бесструктурной массе химуса. Структура энтероплазмы необходима для ускорения многоэтапных превращений метаболитов и более

Таблица 3

Доля кальция в ПЭФ химуса относительно других минеральных элементов, %

Отдел ЖКТ	Птица (куры-несушки)	Свиньи (мини-пиги)	КРС (быки-кастраты)
12-перстная кишка	28,50	50,3	14,3
Тощая кишка	45,61	65,8	26,1
Подвздошная кишка	52,84	68,1	33,0
Слепая кишка	-	57,0	30,0
Ободочная кишка	51,59	53,0	36,3
Прямая кишка	-	57,3	45,8

Table 3

Calcium proportion in the dense endogenous fraction of chyme relative to other mineral elements, %

Intestinal section	Poultry (laying hens)	Pigs (mini pigs)	Cattle (castrate bulls)
Duodenum	28.50	50.3	14.3
Jejunum	45.61	65.8	26.1
Ileum	52.84	68.1	33.0
Caecum	-	57.0	30.0
Colon	51.59	53.0	36.3
Rectum	-	57.3	45.8

совершенной регуляции переваривания; она увеличивает экономичность системы, обеспечивая переработку наибольшей массы субстратов наименьшим количеством ферментов в полости кишечника. При этом макро- и микроэлементы, имея разные собственные места фиксации в гликопротеидах полостной слизи, обеспечивают пространственную конформацию молекул и участвуют в структурировании матрикса энтероплазмы.

Рентгеноструктурный анализ, проведенный с помощью метода малоугловой рентгеновской дифракции, позволил получить рентгенограммы статичных образцов химуса из разных отделов пищеварительного тракта кроликов (рис.). Данный метод используется для объективной оценки и установления структуры кристаллических веществ. Во всех образцах химуса отмечается яркий максимум в виде широкого диффузного кольца, по форме напоминающий оптический феномен – гало, что свидетельствует о наличии в химусе кристаллов очень малого размера, случайно ориентированных в энтеральной среде. Наиболее широкое и плотное кольцо наблюдается в образцах химуса из 12-перстной и тощей кишок, что свидетельствует о наибольшей молекулярной упорядоченности.

Полученные диффузные кольца цельного химуса внешне схожи с рентгенограммами аморфных веществ, при этом их диаметр служит лишь для грубой оценки средних межатомных расстояний в нем. Чем плотнее и шире диффузный характер рассеянного химусом рентгеновского излучения

в образцах химуса тонкого кишечника, тем выше степень упорядоченности его атомного строения. Как правило, в аморфных веществах межатомные расстояния правильно повторяются внутри молекул, следовательно, в цельном химусе присутствуют молекулы с определенным числом часто встречающихся межатомных расстояний, что и является причиной появления на рентгенограмме аморфного гало, ширина которого значительно превышает ширину обычных кристаллических рефлексов.

Аморфность химуса придает ему важные физико-химические свойства. Прежде всего это изотропичность, то есть независимость механических, оптических, электрических и других свойств от направления вещества. Кроме того, аморфное состояние вещества, обладая некоторым избыточным запасом внутренней энергии, всегда менее устойчиво и стабильно по сравнению с кристаллическим, что является наиболее эффективным для энтеральной среды в отличие от жидкого состояния, которое характеризуется достаточно сильным межмолекулярным взаимодействием. Структура химуса, находясь в аморфном состоянии, будет стремиться к упорядочению и к образованию пространственно ориентированного матрикса из молекул гликопротеинов, образующих хелатные комплексы с минеральными элементами, и прежде всего – с кальцием. Таким образом, химус по своей структуре более близок к веществам с кристаллической основой, для которых характерна постоянная термодинамическая и кинетическая стабильность, существенно повышающая время жизни при агрессивном воздействии нутриентов, гидролитических ферментов и симбиотической микрофлоры.

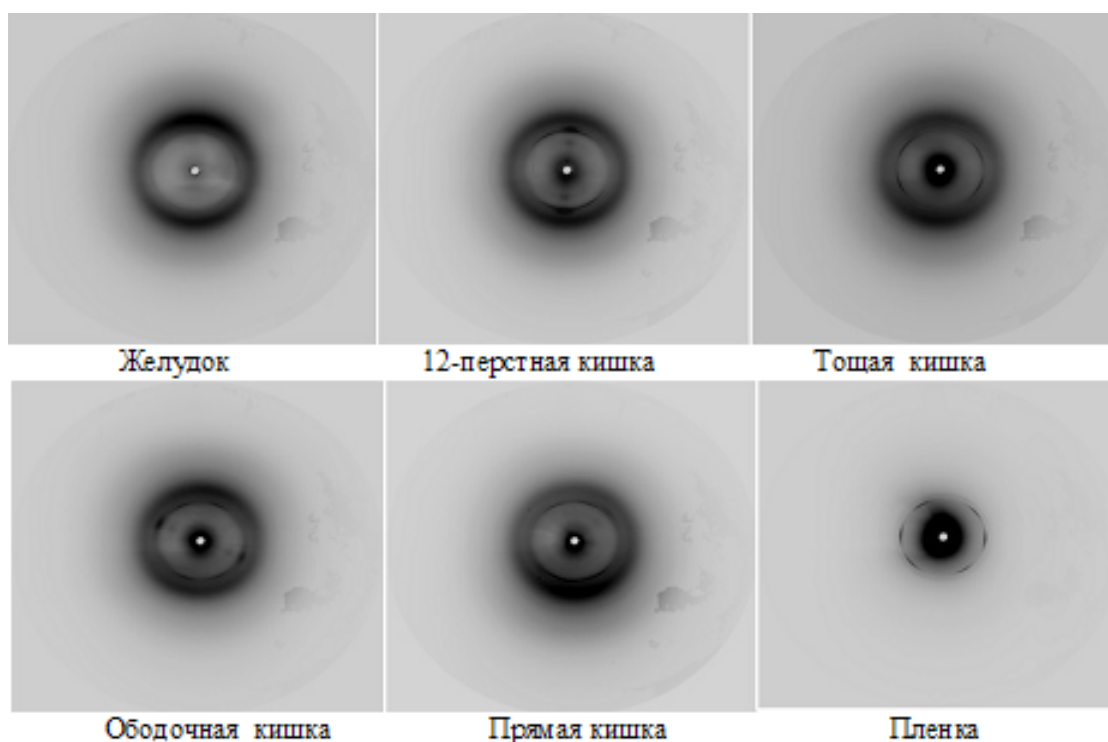


Рис. Рентгенограммы химуса кролика на пленке, расстояние от детектора 45 мм (фотографический метод)

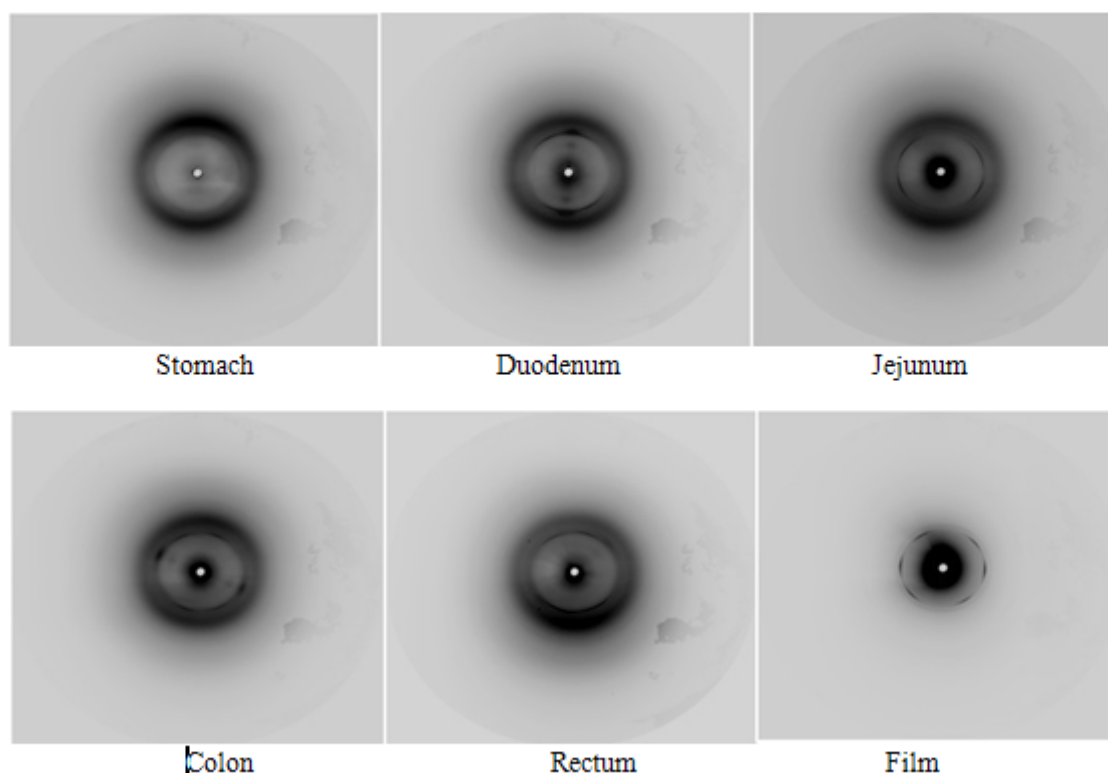


Fig. X-ray images of rabbit chyme on film, distance from the detector – 45 mm (photographic method)

Выводы Conclusions

1. У поли- и моногастричных животных кальций, как активный комплексообразователь, концентрируется преимущественно в плотной эндогенной фракции химуса с закономерной динамикой увеличения в дистальном направлении кишечника.
2. Кальций является преобладающим элементом зольной части плотной эндогенной фракции химуса, в которой его доля составляет у мини-пиггов, кур и крупного рогатого скота 50-68, 28-52, 26-45% соответственно, что обеспечивает его

участие в формировании протеогликановой системы полостной слизи с образованием хелатных комплексов, полидентантные лиганды которых формируют наноупорядоченный каркас энтероплазмы и в целом структурируют химус.

3. Дифракционные максимумы в виде широкого диффузного кольца свидетельствуют о пространственной структурированности химуса в виде аморфного кристаллического вещества, устойчивого к физико-химическим воздействиям, функциональную основу которого составляет плотная эндогенная фракция, кумулирующая значительный объем кальция.

Список источников

1. Wawrzyniak N., Suliburska J. Nutritional and health factors affecting the bioavailability of calcium: a narrative review. *Nutrition Reviews*. 2021;79(12):1307-1320. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuaa138>
2. Diaz de Barboza G., Guizzardi S., Tolosa de Talamoni N. Molecular aspects of intestinal calcium absorption. *World Journal Gastroenterol*. 2015;21(23):7142-54. <http://dx.doi.org/10.3748/wjg.v21.i23.7142>
3. Ахполова В.О., Брин В.Б. Обмен кальция и его гормональная регуляция // *Журнал фундаментальной медицины и биологии*. 2017. № 2. С. 38-46. EDN: ZHRGCH.
4. Liu G., Cao W., Jia G., Zhao H., Chen X., Wang J. Calcium-sensing receptor in nutrient sensing: an insight into the modulation of intestinal homeostasis. *British Journal of Nutrition*. 2018;120(8):881-890. <https://doi.org/10.1017/S0007114518002088>
5. Tan Y., Li R., Zhou H., Liu J. et al. Impact of calcium levels on lipid digestion and nutraceutical bioaccessibility

References

1. Wawrzyniak N., Suliburska J. Nutritional and health factors affecting the bioavailability of calcium: a narrative review. *Nutrition Reviews*. 2021;79(12):1307-1320. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuaa138>
2. Diaz de Barboza G., Guizzardi S., Tolosa de Talamoni N. Molecular aspects of intestinal calcium absorption. *World Journal Gastroenterol*. 2015;21(23):7142-54. <http://dx.doi.org/10.3748/wjg.v21.i23.7142>
3. Akhpolova V.O., Brin V.B. Calcium exchange and its hormonal regulation. *Zhurnal fundamentalnoy meditsiny i biologii*. 2017;2:38-46. (In Russ.)
4. Liu G., Cao W., Jia G., Zhao H., Chen X., Wang J. Calcium-sensing receptor in nutrient sensing: an insight into the modulation of intestinal homeostasis. *British Journal of Nutrition*. 2018;120(8):881-890. <https://doi.org/10.1017/S0007114518002088>
5. Tan Y., Li R., Zhou H., Liu J. et al. Impact of calcium levels on lipid digestion and nutraceutical bioaccessibility

in nanoemulsion delivery systems studied using standardized INFOGEST digestion protocol. *Food Function*. 2020;11(1):174-186. <https://doi.org/10.1039/C9FO01669D>

6. Kopic S., Geibel J.P. Gastric acid, calcium absorption, and their impact on bone health. *Physiological Reviews*. 2013;93(1):189-268. <https://doi.org/10.1152/physrev.00015.2012>

7. Gustafsson J.K., Johansson M.E.V. The role of goblet cells and mucus in intestinal homeostasis. *Nature Reviews Gastroenterol Hepatol*. 2022;19:785-803. <https://doi.org/10.1038/s41575-022-00675-x>

8. Matikainen N., Pekkarinen T., Ryhänen E.M., Schalin-Jäntti C. Physiology of calcium homeostasis: an overview. *Endocrinology and Metabolism Clinics*. 2021;50(4):575-590. <https://doi.org/10.1016/j.ecl.2021.07.005>

9. Ксенофонтов Д.А., Ксенофонтова А.А. Общеприимчивые закономерности в структурно-функциональной организации полости пищеварения // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022. № 7 (121). С. 115-118. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.121.7.060>

10. Ksenofontov D.A., Ksenofontova A.A. Method for Studying Calcium Homeostasis at the Level of Gastroenteral Environment in Minipigs. *Journal Biomed*. 2023;19(3):23-28. <https://doi.org/10.33647/2074-5982-19-3-23-28>

11. Woods R.J. Predicting the Structures of Glycans, Glycoproteins, and Their Complexes. *Chemical Reviews*. 2018;118(17):8005-8024. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00032>

12. Demouveau B., Gouyer V., Magnien M., Plet S. et al. La structure des mucines conditionne les propriétés viscoélastiques des gels de mucus. *Med Sci (Paris)*. 2018;34(10):806-812. <https://doi.org/10.1051/medsci/2018206>

13. Полякова Е.П., Ксенофонтов Д.А., Иванов А.А. Метод изучения полости пищеварения // *Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология*. 2016. № 12 (136). С. 110-114. EDN: VWPGYE

14. Bagger H.L., Fuglsang C.C., Westh P. Hydration of a glycoprotein: relative water affinity of peptide and glycan moieties. *European Biophysics Journal*. 2006;35:367-371. <https://doi.org/10.1007/s00249-005-0035-5>

Сведения 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, <https://orcid.org/0000-0002-2408-0776>

Ангелика 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, <https://orcid.org/0000-0003-1920-2326>

Статья поступила в редакцию 26.08.2024
Одобрена после рецензирования 15.09.2024
Принята к публикации 21.09.2024

in nanoemulsion delivery systems studied using standardized INFOGEST digestion protocol. *Food Function*. 2020;11(1):174-186. <https://doi.org/10.1039/C9FO01669D>

6. Kopic S., Geibel J.P. Gastric acid, calcium absorption, and their impact on bone health. *Physiological Reviews*. 2013;93(1):189-268. <https://doi.org/10.1152/physrev.00015.2012>

7. Gustafsson J.K., Johansson M.E.V. The role of goblet cells and mucus in intestinal homeostasis. *Nature Reviews Gastroenterol Hepatol*. 2022;19:785-803. <https://doi.org/10.1038/s41575-022-00675-x>

8. Matikainen N., Pekkarinen T., Ryhänen E.M., Schalin-Jäntti C. Physiology of calcium homeostasis: an overview. *Endocrinology and Metabolism Clinics*. 2021;50(4):575-590. <https://doi.org/10.1016/j.ecl.2021.07.005>

9. Ksenofontov D.A., Ksenofontova A.A. Common biological patterns in the structural and functional organization of abdominal digestion. *International Research Journal*. 2022;7 (121):115-118. (In Russ.) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.121.7.060>

10. Ksenofontov D.A., Ksenofontova A.A. Method for Studying Calcium Homeostasis at the Level of Gastroenteral Environment in Minipigs. *Journal Biomed*. 2023;19(3):23-28. <https://doi.org/10.33647/2074-5982-19-3-23-28>

11. Woods R.J. Predicting the Structures of Glycans, Glycoproteins, and Their Complexes. *Chemical Reviews*. 2018;118(17):8005-8024. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00032>

12. Demouveau B., Gouyer V., Magnien M., Plet S. et al. La structure des mucines conditionne les propriétés viscoélastiques des gels de mucus. *Med Sci (Paris)*. 2018;34(10):806-812. <https://doi.org/10.1051/medsci/2018206>

13. Polyakova E.P., Ksenofontov D.A., Ivanov A.A. Method for cavitary digestion study. *Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2016;(12):110-114. (In Russ.)

14. Bagger H.L., Fuglsang C.C., Westh P. Hydration of a glycoprotein: relative water affinity of peptide and glycan moieties. *European Biophysics Journal*. 2006;35:367-371. <https://doi.org/10.1007/s00249-005-0035-5>

Information about the 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 St., Moscow, 127434, Russian Federation); e-mail: smu@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2408-0776>

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

The article was submitted to the editorial office August 26, 2024
Approved after reviewing September 15, 2024
Accepted for publication September 21, 2024