



## Математическое моделирование биомеханических параметров моторно-эвакуаторной функции желудка и 12-перстной кишки для идентификации и прогноза развития морфофункциональных заболеваний верхних отделов желудочно-кишечного тракта

Устинова О.Ю.<sup>1,2</sup>, Камалтдинов М.Р.<sup>1</sup>, Кирьянов Д.А.<sup>1</sup>, Носов А.Е.<sup>1</sup>, Ивашова Ю.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное бюджетное учреждение науки «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Роспотребнадзора, (ул. Монастырская, д.82, 614045 г. Пермь, Россия)

<sup>2</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», (ул. Букирева, 15, г. Пермь, 614068, Россия)

**Для цитирования:** Устинова О.Ю., Камалтдинов М.Р., Кирьянов Д.А., Носов А.Е., Ивашова Ю.А. Математическое моделирование биомеханических параметров моторно-эвакуаторной функции желудка и 12-перстной кишки для идентификации и прогноза развития морфофункциональных заболеваний верхних отделов желудочно-кишечного тракта. Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2024;(11): 4–16  
doi: 10.31146/1682-8658-ecg-231-11-4-16

✉ Для переписки:

Устинова

Ольга Юрьевна

[ustinova@fcrisk.ru](mailto:ustinova@fcrisk.ru)

Устинова Ольга Юрьевна, д.м.н., профессор, заместитель директора по клинической работе; профессор кафедры микробиологии и иммунологии

Камалтдинов Марат Решидович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией ситуационного моделирования и экспертно-аналитических методов управления

Кирьянов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, заведующий отделом математического моделирования систем и процессов

Носов Александр Евгеньевич, к.м.н., заведующий отделом функциональной и лучевой диагностики

Ивашова Юлия Анатольевна, врач ультразвуковой диагностики отделения лучевой диагностики

### Резюме

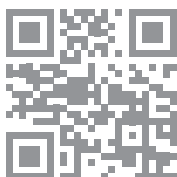
Авторами представлены материалы по существующим и перспективным методам диагностики нарушений моторно-эвакуаторной функции желудка и 12-перстной кишки для идентификации и прогноза развития морфофункциональных заболеваний верхних отделов желудочно-кишечного тракта.

В России актуальной проблемой остаются неинфекционные заболевания желудочно-кишечного тракта, приоритетное место в структуре которых занимает патология желудка и 12-перстной кишки, при этом их распространенность во взрослой популяции достигает 70–80%.

Эффективным путем снижения распространенности данного класса болезней является разработка инновационных методов диагностики, позволяющих не только идентифицировать наличие патологии, но и прогнозировать вероятность ее возникновения. Стандартные методы функциональной диагностики заболеваний желудка и 12-перстной кишки дают ограниченное представление о состоянии моторно-эвакуаторной функции, нарушение которой предшествует развитию морфологических изменений. В клинике наиболее востребованными остаются инвазивные или сложные инструментальные методы, ориентированные на выявление поздних признаков заболевания и не предполагающие оценки моторно-эвакуаторных нарушений. Одним из перспективных направлений ранней диагностики заболеваний верхнего отдела желудочно-кишечного тракта является внедрение в клиническую практику методов анализа результатов высокоинформативных и безопасных функциональных исследований (УЗИ) на основе математических моделей, описывающих свойства, связи, структурные и функциональные параметры объекта моделирования.

В статье представлена многоуровневая математическая модель процессов пищеварения с учетом функциональных нарушений верхних отделов желудочно-кишечного тракта, в которой на «мезоуровне» химус рассматривается как многофазная жидкость с переменными вязкостью и плотностью фаз, а его движение и перемешивание описывается

EDN: QQKPHK



балансовыми уравнениями сохранения массы и импульса. Применение результатов многоуровневой математической модели в эволюционном моделировании позволяет с высокой степенью достоверности прогнозировать развитие воспалительно-дистрофических заболеваний верхних отделов желудочно-кишечного тракта. Поиск литературы выполнен по базам данных Scopus, Web of Science, CyberLeninka, РИНЦ, статистическим сборникам за период 2016–2024 гг.

**Ключевые слова:** морфофункциональные заболевания желудка и 12-перстной кишки; методы функциональной диагностики; математические методы; многоуровневая математическая модель

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Mathematical modeling of biochemical parameters of motor-evacuation function of the stomach and duodenum to identify morphofunctional diseases in the upper GI tract and to predict their progression

O.Yu. Ustinova<sup>1,2</sup>, M.R. Kamaltdinov<sup>1</sup>, D.A. Kiryanov<sup>1</sup>, A.E. Nosov<sup>1</sup>, Yu.A. Ivashova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies of Rospotrebnadzor, (82 Monastyrskaya St., Perm, 614045, Russia)

<sup>2</sup> Perm State National Research University, (15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia)

**For citation:** Ustinova O.Yu., Kamaltdinov M.R., Kiryanov D.A., Nosov A.E., Ivashova Yu.A. Mathematical modeling of biochemical parameters of motor-evacuation function of the stomach and duodenum to identify morphofunctional diseases in the upper GI tract and to predict their progression. *Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2024;(11): 4–16. (In Russ.) doi: 10.31146/1682-8658-ecg-231-11-4-16

✉ **Corresponding author:**

**Olga Yu. Ustinova**  
ustinova@fcrisk.ru

**Olga Yu. Ustinova**, Doctor of Medical Sciences, Professor, Deputy Director for Healthcare Services; Professor at the Microbiology and Immunology Department; ORCID: 0000-0002-4098-5583

**Marat R. Kamaltdinov**, Candidate of Physics-Mathematical Sciences, Head of the Situation Modeling and Expert and Analytical Management Techniques Laboratory; ORCID: 0000-0003-0969-9252

**Dmitriy A. Kiryanov**, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Mathematical Modeling of Systems and Processes; ORCID: 0000-0002-5406-4961

**Aleksandr E. Nosov**, Candidate of Medical Sciences, Head of the Department for Functional and X-ray Diagnostics; ORCID: 0000-0003-0539-569X

**Yulia A. Ivashova**, ultrasound diagnostician at the Department for Functional and X-ray Diagnostics; ORCID: 0000-0002-5671-3953

### Summary

The authors present materials on existing and promising methods for diagnosing disorders of the motor-evacuation function of the stomach and duodenum aimed at identifying morphofunctional diseases in the upper GI tract and predicting their progression. In Russia, non-communicable diseases of the GI tract remain an acute health issue, stomach and duodenum pathology holding the first rank place among them. Their prevalence reaches 70–80% in adult population.

Development of innovative diagnostic methods seems an effective way to reduce prevalence of such diseases since such methods allow not only identifying already existing pathology but also predicting its likelihood in future. Conventional methods for functional diagnostics of diseases of the stomach and duodenum provide only limited insight into the actual condition of the motor-evacuation function and we should point out that its impairment is usually a precursor of morphological changes in future. Clinical practice largely relies on using invasive or complex instrumental methods aimed at detecting late signs of disease, which do not involve any assessment of motor-evacuation impairments. A promising trend in early diagnostics of diseases in the upper GI tract is implementing analysis of results obtained by highly informative and safe functional examinations (US) in clinical practice. These examinations are based on mathematical models that describe properties, relations, structural and functional parameters of a modeled object.

The review presents a multi-level mathematical model that describes digestion considering dysfunctions of the upper GI tract. In the 'meso-level' of the model, chyme is considered a multi-phase liquid with variable viscosity and density of its phases and its movement and mixing are described with the balance mass and impulse conservation equations.

Use of results obtained with the multi-level mathematical model in evolution modeling makes it possible to predict the development of inflammatory-dystrophic diseases of the upper GI tract with high reliability. Literature sources were sought in several relevant databases including Scopus, Web of Science, CyberLeninka, Russian Science Citation Index, and statistical data collections issued in 2016–2024.

**Keywords:** morphofunctional diseases of the stomach and duodenum; functional diagnostic methods; mathematical methods; multi-level mathematical model

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interest.

В Российской Федерации одной из актуальных медицинских и социально-экономических проблем остаются неинфекционные заболевания органов желудочно-кишечного тракта, уровень распространенности которых составляет 10 026,6–10 427,7 сл. на 100 000 населения [1]. Хронические воспалительные и функциональные заболевания этого класса регистрируются во всех возрастных группах населения, занимая в структуре общей заболеваемости и смертности 4-е место (6,0% и 5,2% соответственно) и являясь причиной 1 036 954 сл./13 876 752 дней временной нетрудоспособности в год [1, 2]. Приоритетное место в структуре болезней этого класса занимает патология желудка и 12-перстной кишки, распространенность которой во взрослой популяции может достигать 70–80% [3, 4, 5].

Высокие показатели заболеваемости населения функциональными и хроническими воспалительными болезнями желудка и 12-перстной кишки обусловлены широким спектром экзогенных и эндогенных этиологических факторов, оказывающих негативное влияние на морфофункциональное состояние верхнего отдела желудочно-кишечного тракта: несбалансированное питание, воздействие неблагоприятных факторов окружающей среды, хронический стресс, вредные привычки, влияние экзогенных и эндогенных токсических веществ, нерациональная фармакотерапия, инфицирование *Helicobacter pylori*, бактериями рода *Enterococcus*, *Mycobacteria*, цитомегаловирусами, энтеровирусами, вирусом Эпштейн-Барр, грибковой флорой, паразитами рода *Cryptosporidium*, *Strongyloides stercoralis*, наследственная и гендерная предрасположенность, возраст, нейроэндокринная дисрегуляция, иммунная недостаточность, наличие интеркуррентной патологии и т.д. [6–9]. Итогом воздействия комплекса негативных факторов является развитие хронического патологического процесса в слизистой оболочке желудка и 12-перстной кишки с расстройством моторики, дегенерацией клеточных элементов и нарушением функционирования желез, последующим развитием дисметаболических, дисрегенераторных, дистрофических и атрофических процессов, нарушением выработки

соляной кислоты, синтеза гастроинтестинальных ферментов и гормонов [6, 10, 11].

Одним из эффективных путей снижения распространенности этого класса болезней является разработка инновационных методов диагностики, позволяющих не только идентифицировать наличие патологии, но и прогнозировать вероятность ее возникновения, прогрессирования, развития тяжелых и осложненных форм.

В настоящее время протоколы диагностики различных форм функциональных и хронических воспалительных заболеваний желудка и 12-перстной кишки базируются на комплексном использовании клинических (анамнестических, физикальных), функциональных (<sup>13</sup>C-дыхательный уреазный тест), эндоскопических (эзофагогастродуоденоскопия с биопсией и быстрым уреазным тестом), морфологических (гистологическое исследование гастробиоптатов), инструментальных (УЗИ, МРТ и КТ органов брюшной полости, рентгеноскопия с контрастированием, суточная рН-метрия, электрогастрография, внутриполостная манометрия и т.д.) и лабораторных (выявление признаков анемии, дефицита железа и кальция, витаминов B<sub>12</sub> и C; наличие в кале антигена *Helicobacter pylori*, в крови – IgG-антител к *Helicobacter pylori*; содержание и соотношение в крови пепсиногена I и II; уровни гастрин-17 и хромогранина А; наличие антител к париетальным клеткам слизистой оболочки желудка и внутреннему фактору Кастла) методов исследований [6, 12–16]. Сочетанное использование вышеперечисленных методов позволяет получить объективную информацию о морфологическом состоянии слизистых оболочек гастродуоденального отдела желудочно-кишечного тракта, вероятном этиологическом факторе патологического процесса, активности секреторной и инкреторной функций желудка, форме и стадии заболевания [6, 8, 12, 16]. В то же время, большая часть стандартных методов исследования не характеризует или дает ограниченное представление о состоянии одной из основных функций желудка и 12-перстной кишки – моторно-эвакуаторной, нарушение которой, как правило, предшествует развитию морфологических изменений [17].

## Секреторно-эвакуаторная функция желудка и 12-перстной кишки в норме и патологии

У здорового человека активность моторно-эвакуаторной функции верхних отделов желудочно-кишечного тракта и, прежде всего, желудка и 12-перстной кишки, адекватная компонентному составу принятой пищи, ее объему и физико-химическим свойствам, обеспечивает полноценность механической и химической переработки нутриентов, качество их последующего гидролиза и эффективность всасывания. Механическое воздействие на содержимое желудка реализуется за счет последовательной смены релаксации продольных, циркулярных и косых гладкомышечных волокон желудка на тоническое напряжение, в то время как ферменты желудочного сока запускают процессы химического расщепления пищи. Время

нахождения химуса в желудке и продолжительность его эвакуации в 12-перстную кишку зависят от целого ряда факторов: состава пищи, функционального состояния sphincter pylori, градиента давления между антральным отделом желудка и 12-перстной кишкой, объема, консистенции, рН, осмотического давления и температуры химуса и т.д. [18]. Регуляция моторно-эвакуаторной функции реализуется за счет сочетанного влияния комплекса миогенных, рефлекторных, нервных и гуморальных воздействий. Ее нарушения могут возникать в связи с изменением тонуса гладкомышечных волокон желудка (гипертонус, гипотонус, атония), несогласованностью перистальтики желудка и состояния кардиального

и пилорического сфинктеров (гиперкинез, гипокинез), дефектами нейрогуморальной регуляции, нарушением выработки соляной кислоты, протеолитических ферментов, гормонов желудочного сока (секретины, холецистокинина, гастрина, мотилина и т.д.), что сопровождается развитием постпрандиального дистресс-синдрома, гастроэзофагального и дуоденогастрального рефлюксов, гастро- и дуоденостаза и т.д. [18, 19].

Одним из существенных факторов, определяющих состояние моторно-эвакуаторной функции желудка, является состав принятой пищи или жидкости. А.Е. Шкляев с соавт., исследуя влияние маломинерализованной сульфатно-хлоридно-натриевой воды на уровень гормонов-регуляторов моторики гастродуоденального отдела, показали достоверное повышение содержания в крови холецистокинина, блокирующего эвакуацию желудочного содержимого за счет сокращения пилорического сфинктера и снижения тонуса мышц проксимального отдела желудка [20]. Экспериментальными исследованиями С.Т. Шатманова и Х.М. Алиева с соавт. доказано негативное влияние потребления избирательно белковой диспергированной пищи на секреторно-эвакуаторную активность структурных компонентов слизистой оболочки гастродуоденального отдела [21, 22]. Прием холодных жидкостей также оказывает отрицательное влияние на активность моторно-эвакуаторной функции [23]. Используя у здоровых людей различные типы тестовых завтраков, А.В. Речкалов подтвердил ранее известный факт, максимальной активности моторно-эвакуаторной функции желудка при приеме углеводного завтрака, средней – белковой пищи и значительное удлинение времени пребывания химуса в просвете желудка при употреблении жирной пищи. В тоже время, автор установил, что характер обменных процессов оказывает существенное влияние на временные параметры полувыведения из желудка различных типов пищи: предварительная физическая нагрузка только у профессионально тренированных спортсменов с адаптированным к быстрой перестройке обменом веществ существенно сокращает эти показатели, в то время как у малотренированных – практически не меняет [24].

Известно, что моторно-эвакуаторные нарушения желудка и 12-перстной кишки не только облигатно сопровождают развитие патологических процессов гастродуоденального отдела, зачастую определяя появление первых клинических симптомов болезни, но и усугубляют секреторные нарушения железистого аппарата слизистой желудка, потенцируя тяжесть и распространенность ее морфологических изменений [8, 11, 15, 19]. Исследованиями И.М. Павлович с соавт. доказана тесная связь нарушений моторно-эвакуаторной функции желудка – с выраженностью и распространенностью атрофических процессов в слизистой [25]. С другой стороны, дискоординация моторной функции гастродуоденального отдела с развитием дуоденостаза и дуоденогастрального рефлюкса вызывает повреждение слизистой оболочки желудка желчными кислотами

и лизолецитином с последующим снижением протективных свойств слизистой барьера, развитием кишечной метаплазии и формированием эрозивно-язвенных дефектов, усугубляющих прогноз патологического процесса [26]. В свою очередь, ускоренная эвакуация кислого желудочного содержимого в 12-перстную кишку способствует язвообразованию в ее начальных отделах из-за формирующейся, в этих случаях, несостоятельности кислотонейтрализующих механизмов пилорического отдела желудка [17, 19, 25]. Г.В. Волюнец с соавт. установили, что гастроэзофагальный рефлюкс формируется чаще при аутоиммунном атрофическом гастрите, в то время как дуоденогастральный – при неаутоиммунном (реактивном, химическом, радиационном, лимфоцитарном, эозинофильном, инфекционном и т.д.) [27].

Следует отметить, что результатом нарушений моторно-эвакуаторной функции гастродуоденального отдела нередко становятся и общесоматические расстройства. Я.М. Вахрин с соавт. показали, что нарушение моторики верхних отделов желудочно-кишечного тракта провоцирует рост патогенной микрофлоры в тонком кишечнике со смещением бактериального спектра в сторону грамотрицательной микрофлоры и анаэробов, что сопровождается не только прогрессирующим воспалительно-дегенеративным заболеванием всего желудочно-кишечного тракта, но и нарушением процессов пищеварения в целом, развитием мальабсорбции железа, витаминов  $B_{12}$  и D с последующим дисбалансом обменных процессов [28]. С другой стороны, моторно-эвакуаторные нарушения гастродуоденального отдела развиваются не только при гастроинтестинальной патологии, но и при заболеваниях других органов и систем. В частности, В.В. Антонян с соавт. выявили выраженные нарушения моторно-эвакуаторной функции желудка у лиц с расстройствами вегетативной нервной системы по парасимпатическому типу, лежащие в основе формирования у пациентов пептических язв [29]. По мнению В.Н. Буряка с соавт., облигатные atopическому дерматиту нарушения секреторно-моторной функции желудка не только сами являются следствием общей сенсibilизации, но и способствуют развитию мальдигестии с образованием эндоаллергенов [30]. С точки зрения эндокринологов, снижение активности моторно-эвакуаторной функции верхних отделов желудочно-кишечного тракта при сахарном диабете является наиболее частым проявлением интеркуррентной гастроинтестинальной патологии, а прогрессирование гастро- и дуоденостаза рассматривается как прогностический маркер вероятной декомпенсации углеводного обмена с опасностью развития гипогликемического состояния [31, 32]. Установлена связь развития нарушений моторно-эвакуаторной функции желудка с заболеваниями гепатобилиарной системы, поджелудочной железы, ожирением и т.д. [33–36].

Таким образом, анализ экспериментальных данных, клинических наблюдений, результатов лабораторных и функциональных исследований свидетельствует об актуальности

и научно-практической значимости углубленного изучения моторно-эвакуаторных нарушений гастродуоденального отдела желудочно-кишечного тракта для интернистов различных специальностей. Детализация механизмов развития и прогрессирования моторно-эвакуаторных нарушений желудка и 12-перстной кишки позволяет

установить дополнительные патогенетические закономерности развития и клинический патоморфоз патологических процессов не только на уровне желудочно-кишечного тракта, но и других органов и систем, а, следовательно, разработать и обосновать новые подходы к их диагностике, фармакотерапии и профилактике.

## Методы диагностики моторно-эвакуаторных нарушений гастродуоденального отдела желудочно-кишечного тракта

Клинической практике известен широкий спектр методов изучения состояния моторной функции гастродуоденального отдела желудочно-кишечного тракта, часть из которых в настоящее время имеет только историческое значение. Несмотря на разнообразие методических и технических подходов к оценке моторно-эвакуаторных нарушений, все известные методы базируются на: а) манометрической регистрации изменений внутриполостного давления гастродуоденального отдела; б) рентгеновском/радионуклидном мониторинге транзита контраста; в) фонографическом анализе звуковых сигналов, сопровождающих моторно-эвакуаторные процессы г) динамической оценке электрических потенциалов, отражающих моторную деятельность; д) визуализация верхних отделов желудочно-кишечного тракта с помощью магнитного поля и радиоволн; е) ультразвуковым методе сканирования желудка и 12-перстной кишки [37].

Манометрический метод регистрации изменений внутриполостного давления гастродуоденального отдела в различные периоды моторной деятельности является исторически самым ранним и впервые был использован Н. Kronecker и S.J. Meltzner еще в конце 19 века (1883 г) [38]. Современные модификации метода (водно-перфузионная, твердотельная манометрия, манометрия высокой разрешающей способности, объемная 3D-манометрия, радиотелеметрический и тензометрический методы) являются «золотым стандартом» в диагностике нарушений двигательной активности верхних отделов желудочно-кишечного тракта и его сфинктерного аппарата. В целом, данный диагностический подход обеспечивает регистрацию голодной и пищевой моторики желудка и 12-перстной кишки, дает объективную информацию о характере, амплитуде, длительности и частоте сокращений и величине тонуса различных участков гастродуоденальной зоны, позволяет проследить периодичность моторной активности, провести нагрузочные пробы. В тоже время метод не предусматривает изучение линейных и объемных размеров органов, оценки их изменений на различных этапах функциональной активности. В настоящее время манометрические методы не находят широкого применения в терапевтической клинике в связи с большим спектром противопоказаний, трудоемкостью, техническими сложностями и применяются чаще в лапароскопической хирургии или экспериментальных исследованиях на животных [38, 39].

Длительное время основным методом исследования моторной функции желудка и 12-перстной кишки оставался визуальный рентгеноскопический контроль с оценкой вариантов и временных характеристик перистальтических движений гастродуоденального отдела [37]. В начале 20 века был разработан рентгенокинематографический метод, базирующийся на анализе траектории перемещения фиксированных точек контура стенок органов гастродуоденального отдела на серии последовательных рентгенограмм. Увеличенное количество снимков в единицу времени позволяло оценить динамику изменения формы контура органов и скорость продвижения контрастной бариевой взвеси. В настоящее время рентгенокинематография осуществляется с использованием электроннооптического преобразователя, что позволяет несколько снизить дозу облучения и наблюдать моторику кишечника непосредственно на экране монитора [40]. Однако использование рентгенологических методов сопряжено с целым рядом недостатков: субъективностью оценки параметров перистальтики врачами-рентгенологами, длительностью периода исследования, опасностью превышения допустимых доз облучения, возможностью получения данных преимущественно о качественных характеристиках процесса, необходимость использования в ходе исследования контрастного препарата. В 70-е годы 20 века был разработан сцинтиграфический метод с оценкой транзита изотоп-маркированной пищи (изотопы технеция или индия) [37, 39]. Компьютерная обработка полученных данных позволяет рассчитать количественные показатели моторно-эвакуационной функции желудка и построить кривую «активность-время» с последующим расчетом периода полувыведения пищи. Однако и данный метод имеет ряд недостатков: необходимость использования радиоактивного препарата, наличие значимой лучевой нагрузки, высокая частота ложноположительной диагностики гастроэзофагеального и дуоденогастрального рефлюксов из-за наложения на радиоактивность желудка излучения с петель кишечника [41]. В настоящее время для диагностики структурно-функциональных нарушений гастродуоденального отдела желудочно-кишечного тракта все чаще используются методы позитронно-эмиссионной томографии и компьютерной томографии с внутривенным болюсным контрастированием. Основным достоинством методов является возможность получения информативного трехмерного графического изображения органов

с оценкой их морфологии и объемных параметров, в то время как для оценки динамики функционального состояния желудка и 12-перстной кишки их применение ограничено [41].

Разработанная в середине 20 века фонографическая оценка моторной функции верхних отделов желудочно-кишечного тракта, является неинвазивным и технически доступным методом исследования, базирующимся на анализе амплитудно-частотных характеристик перистальтических шумов. Однако до настоящего времени метод не нашел широкого применения в связи с константным положением датчика во время исследования и, следовательно, оценкой ограниченной площади органа, сложностью расшифровки фонограмм и наличием большого количества звуковых помех, связанных с деятельностью других внутренних органов (кишечника, сердца, легких) [37, 40].

Более широкое применение в научных исследованиях и клинической практике нашли неинвазивные электрофизиологические методы регистрации активности моторно-эвакуаторной функции желудка и 12-перстной кишки – электромиография желудка, периферическая электрогастрография и электрогастроэнтерография, позволяющие оценить двигательную активность гастроудоденального отдела как натощак, так и после пищевой стимуляции. В тоже время, позволяя с достаточно высокой степенью достоверности оценить общий тонус, ритмичность, мощность и координацию сокращений желудка и 12-перстной кишки, методы не предполагают статико-динамическую оценку их размерных и объемных параметров [15, 17, 41, 42, 43].

В настоящее время для диагностики структурно-функциональных нарушений гастроудоденального отдела желудочно-кишечного тракта предпринимаются попытки использования метода магнитно-резонансной томографии (МРТ) в сочетании с нагрузочными тестами [41]. Несомненным достоинством метода является возможность получить послойные 3D изображения органов, позволяющие оценить морфологию и объемные параметры желудка и 12-перстной кишки. Кроме того, метод является относительно безопасным в связи с отсутствием во время исследования воздействия ионизирующего облучения на пациента, в связи с чем, метод не имеет ограничений по частоте и кратности применения. Однако применение МРТ ограничено целым рядом клинических противопоказаний – отдельные заболевания головного мозга и сердца, наличие у пациента кардиостимулятора, металлических имплантов, ожирение III степени и т.д. В настоящее время метод используется чаще всего для оценки морфологического состояния органов; данные по оценке функционального состояния желудка и 12-перстной кишки ограничены [19, 41].

Все большее внимание привлекает метод УЗИ-диагностики – один из ведущих современных

инструментальных методов исследования, отличающийся отсутствием инвазивного вмешательства, безопасностью и доступностью, позволяющий с высокой степенью достоверности оценить морфофункциональное состояние верхних отделов желудочно-кишечного тракта [42, 43, 44]. Впервые метод УЗИ-диагностики для оценки моторно-эвакуаторной функции и выявления морфологической патологии желудочно-кишечного тракта в России был применен З.А. Лемешко [46]. Для более объективной оценки моторной функции желудка и 12-перстной кишки и лучшей воспроизводимости результатов Т.Е. Куглер была предложена модификация метода с предварительной пищевой нагрузкой. По мнению автора, такой подход позволил в ходе обследования пациентов получить не только более достоверные данные, но и проводить одновременную оценку аккомодационной, эвакуаторной и сенсорной функции гастроудоденального отдела [47]. В настоящее время для трансабдоминального исследования желудка и 12-перстной кишки наиболее оптимальной является методика мультипараметрического УЗИ-исследования с питьевой/пищевой нагрузкой, осуществляемая в режимах 2D-3D ультразвуковой визуализации с использованием конвексного, миниконвексного, секторного, линейного типов датчиков частотой от 3,5 до 7,5 МГц [46, 48, 49, 50]. Подобный подход позволяет не только с высокой точностью оценить состояние моторной, сократительной и эвакуаторной функции гастроудоденального отдела, сопоставить его линейные размеры с показателями физиологической нормы, но и оценить морфологическое состояние стенок изучаемых органов [46, 50]. Результаты исследований показывают, что при изучении морфологических особенностей желудка и 12-перстной кишки чувствительность, точность и специфичность метода достигает 93–97%, что превышает показатели МРТ и КТ диагностики [50, 51]. По данным Д.С. Таюпова с соавт. показатели состояния моторно-эвакуаторной функции гастроудоденального отдела, полученные в ходе трансабдоминального УЗИ, характеризуются высокой степенью корреляции с результатами сцинтиграфии [52]. Е.И. Кропачевой и Т.К. Тюриной показана приоритетность использования ультразвукового метода в изучении моторных нарушений и линейно-объемных параметров верхних отделов желудочно-кишечного тракта в связи с установленной высокой достоверностью результатов и безопасностью проведения исследования [53, 54].

Таким образом, результаты аналитического исследования свидетельствуют о том, что ультразвуковая диагностика является современным, доступным, высокоинформативным, безопасным и объективным методом изучения морфофункциональных особенностей верхних отделов желудочно-кишечного тракта.

## Математическое моделирование моторно-эвакуаторных процессов как метод прогнозирования развития патологии гастродуоденального отдела желудочно-кишечного тракта

Инновационный вектор современной медицины (профилактика, персонализация, партисипативность и прецизионность) требует разработки новых подходов к диагностике хронических функциональных и воспалительно-дистрофических заболеваний верхнего отдела желудочно-кишечного тракта: не только констатации текущего морфофункционального состояния органов, идентификации наличия/отсутствия патологии, но и прогностической оценки вероятного развития негативных событий. В тоже время, до настоящего времени в клинической практике среди классических методов морфофункциональной диагностики заболеваний желудка и 12-перстной кишки наиболее востребованными остаются инвазивные (рН-метрия, фиброгастродуоденоскопия с биопсией) или сложные инструментальные (МРТ/КТ-диагностика) методы, ориентированные на выявление поздних признаков заболевания, и не предполагающие всесторонней оценки наиболее ранних проявлений патологии – моторно-эвакуаторных нарушений [6]. Помимо достаточно широкого спектра индивидуальных противопоказаний, использование данных методов на преморбидных стадиях патологического процесса и, прежде всего, у детей и подростков, в связи с некомфортностью процедуры, является деонтологически неоправданным. Кроме того, результаты выполненных исследований констатируют состояние желудка и 12-перстной кишки в status presents и не дают оснований для формулирования надежного прогноза. Одним из перспективных направлений преодоления выше перечисленных трудностей является внедрение в клиническую практику методов анализа результатов высокоинформативных и безопасных функциональных исследований на основе математических моделей, описывающих свойства, связи, структурные и функциональные параметры объекта моделирования [55].

Одна из наиболее известных математических моделей прогнозирования нарушений моторики желудочно-кишечного тракта была разработана П.М. Косенко с соавт. [56, 57, 58]. Математическая модель основывалась на результатах дискриминантного анализа показателей периферической электрогастроэнтерографии и суточной рН-метрии, и в последующем была использована авторами для разработки компьютерной системы автоматической диагностики и прогнозирования степени нарушения эвакуаторной функции [57, 58]. В тоже время, для получения исходных данных применялся инвазивный метод суточной рН-метрии, а использованный электрофизиологический способ диагностики позволял оценить только моторные показатели деятельности желудка и 12-перстной кишки. В итоге, при разработке модели авторы учитывали показатели натурной рН-метрии и данные только о моторной деятельности верхних отделов желудочно-кишечного тракта без учета динамики и особенностей их линейно-объемных параметров, что не позволило, в конечном итоге, разработать прогностическую модель вероятного развития моторных, но не морфологических нарушений слизистой.

Более объективный методический подход был использован Н.В. Зайцевой с соавт., которые предложили многоуровневую математическую модель для описания процессов пищеварения с учетом функциональных нарушений верхних отделов желудочно-кишечного тракта [59]. В предложенной модели на «мезоуровне» химус рассматривался с позиции механики гетерогенных сред как многофазная жидкость с переменными вязкостью и плотностью фаз, его движение и перемешивание в тракте описывалось балансовыми уравнениями сохранения массы и импульса. Балансовые соотношения массы для компонент первой (основной) жидкой фазы представляют собой уравнения адвекции-диффузии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{(1)}\alpha_{(1)}Y_{(i)}) + \nabla \cdot (\rho_{(1)}\alpha_{(1)}\mathbf{v}_{(1)}Y_{(i)}) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_{(i)} + R_{(i)} + S_{(i)} + \sum_j m'_{(j)(i)}, \text{ где}$$

$\rho_{(1)}$  – плотность первой (основной) жидкой фазы,  $\text{кг/м}^3$ ,  $j = \overline{1, J}$ ;

$\alpha_{(1)}$  – объемная доля жидкой фазы,  $\sum_j \alpha_{(j)} = 1$ ,  $j = \overline{1, J}$ ;

$Y_{(i)}$  – массовая доля  $i$ -ой компоненты первой фазы,  $\sum_i Y_{(i)} = 1$ ,  $i = \overline{0, I}$ ;

$\mathbf{J}_{(i)}$  – вектор интенсивности потока массы  $i$ -ой компоненты первой фазы за счет диффузионных процессов,  $\text{кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ ,  $i = \overline{0, I}$ ;

$R_{(i)}$  – интенсивность источника массы  $i$ -ой компоненты первой фазы за счет ферментативных и химических реакций между компонентами,  $\text{кг/(м}^3 \cdot \text{с)}$ ,  $i = \overline{0, I}$ ;

$S_{(i)}$  – интенсивность массовых источников  $i$ -ой компоненты первой фазы в области за счет секреции и всасывания,  $\text{кг/(м}^3 \cdot \text{с)}$ ,  $i = \overline{0, I}$ ;

$m'_{(j)(i)} \geq 0$  – слагаемое, определяющее интенсивность перехода массы из  $j$ -ой фазы в  $i$ -ую компоненту первой фазы за счет растворения частиц пищи,  $\text{кг/(м}^3 \cdot \text{с)}$ ,  $i = \overline{0, I}$ ,  $j = \overline{2, J}$ .

Пищеварительный тракт рассматривался авторами как биоканал переменного сечения и кривизны. Моторика желудка, 12-перстной кишки

и пилорического сфинктера описывалась кинематическими граничными условиями. Секреция пищеварительных соков, всасывание простых белков,

жиров и углеводов, ферментативные и химические реакции были представлены соответствующими слагаемыми в уравнениях сохранения массы. Скорости массо-обмена зависели от уровня кислотности химуса. В модели учитывались регуляторные связи – интенсивность массовых источников зависит от концентраций питательных веществ. Для получения индивидуальной формы рассматриваемых в модели участков тракта, динамически меняющих свою конфигурацию вследствие моторики, использовались данные ультразвукового исследования желудка и 12-перстной кишки, выполненного по методике С.И. Пиманова, с применением различных типов тестовых завтраков [60, 61, 62]. Авторами показано, что использование результатов многоуровневой математической модели в эволюционном моделировании позволяет с высокой степенью достоверности прогнозировать развитие воспалительно-дистрофических заболеваний верхних отделов желудочно-кишечного тракта [63].

Для получения данных, использованных авторами для построения многоуровневой математической модели, ультразвуковое исследование проводилось на аппарате экспертного класса EPIQ 5 (Philips Ultrasound Inc., США). Снимки и видеозаписи ультразвукового исследования сохранялись в формате DICOM, последующая их цифровая обработка проводилась в программе MultiVox DICOM Viewer.

При обработке данных эксперимента (применение различных типов завтрака) разработаны методика оцифровки снимков и видеозаписей, а также шаблоны таблиц для занесения результатов оцифровки. В ходе исследования выполнялись расчеты амплитуды, скорости, периода перистальтической волны в антральном отделе желудка, периода полувыведения пищи из желудка [60].

В начале ультразвукового исследования (первые 90 мин. после приема пищи) измерение размеров желудка и оценка параметров, характеризующих его моторику, осуществлялось каждые 10 мин; в последующие 90 мин. – каждые 15 мин. Общая продолжительность ультразвукового исследования составляла 180 мин. Все замеры проводились в положении стоя. В каждой 10–15-минутной серии УЗИ запись изображений и видеопетель осуществлялась в следующей последовательности:

- для определения размеров просвета желудка с целью последующего моделирования его формы получали 8 изображений, из которых 3 – в аксиальной плоскости (через середину антрального отдела желудка, выше и ниже от него на 1 см), а 5 изображений – в сагиттальной и парасагиттальных плоскостях (по срединной линии тела и по 2 – на расстоянии примерно 1 см правее и левее от нее и друг от друга);
- для расчета времени полувыведения содержимого из желудка получали изображения в парасагиттальной плоскости через середину антрального отдела желудка и в аксиальной плоскости через максимальный поперечный срез тела желудка, по которым в последующем методом трассировки определяли площадь поперечных сечений антрума и тела желудка; высота стояния

содержимого в просвете тела желудка измерялась на изображении, полученном в парасагиттальной плоскости;

- в последующие 2 мин. осуществлялась видеозапись перистальтических волн в аксиальной плоскости через середину антрального отдела желудка, по которой рассчитывались период перистальтического цикла и скорость прохождения перистальтических волн;
- далее в течение 2 мин. проводилась запись волны в антруме в парасагиттальной плоскости через середину антрального отдела для последующего расчета амплитуды перистальтики;
- в течение последующих 2 мин. осуществлялась запись области пилорического сфинктера и луковицы двенадцатиперстной кишки, по которой в процессе постобработки измерялся диаметр пилорического отверстия во время эвакуации содержимого из желудка и рассчитывался период открытия сфинктера.

Для каждого параметра фиксировалось время его измерения, а в шаблон заносились данные:

- горизонтальные и вертикальные размеры сечения (мм) и площадь (мм<sup>2</sup>) желудка (по результатам анализа снимков);
- данные моторики антрального отдела желудка по съемке в аксиальной плоскости: расстояние от точки инициации волны до пилорического сфинктера (мм); расстояние от точки окончания волны до сфинктера (мм); в дальнейшем по этим данным выполнялся расчет скорости и периода волны;
- данные моторики антрального отдела желудка по съемке в вертикальном сечении – площадь сечения минимальная и максимальная (мм<sup>2</sup>), по которым выполнялся расчет амплитуды волны;
- данные моторики пилорического отверстия – диаметр пилорического отверстия во время эвакуации (мм), время открытия и закрытия сфинктера.

Несомненным достоинством, использованного авторами методического подхода, является применение неинвазивного, высокоинформативного и безопасного метода ультразвукового исследования, не оказывающего негативного влияния на моторно-эвакуаторную функцию желудка и 12-перстной кишки и позволяющего оценить не только моторную активность, но и осуществить многократные замеры линейных размеров органов на различных стадиях пищеварительного процесса. Кроме того, осуществление исследования на фоне различных типов завтраков позволило объективизировать особенности процессов пищеварения на уровне верхних отделов желудочно-кишечного тракта в условиях различной пищевой нагрузки. Авторами убедительно показано, что в результате численных расчетов с помощью разработанной модели «на мезоуровне» с высокой достоверностью обнаруживаются зоны повышенной кислотности, являющейся фактором риска развития дистрофических изменений слизистых [63]. Используя полученные локальные значения pH для каждого участка желудка и 12-перстной кишки в эволюционной



модели на «макроуровне», была показана возможность выполнения прогноза риска формирования повреждений слизистых [63, 64].

Таким образом, основным преимуществом разработанной математической модели, по сравнению

с аналогичными исследованиями, является возможность выполнения прогнозных оценок рисков возникновения не только моторных, но и морфологических повреждений слизистых желудка и 12-перстной кишки безопасным и высокоинформативным способом.

## Выводы

1. Установление особенностей механизмов развития и прогрессирования моторно-эвакуаторных нарушений желудка и 12-перстной кишки позволяет выявить дополнительные патогенетические закономерности развития и клинический патоморфоз патологических процессов не только на уровне желудочно-кишечного тракта, но и других органов и систем.
2. Ультразвуковая диагностика состояния желудка и 12-перстной кишки является современным, доступным, высокоинформативным, безопасным и объективным методом исследования функциональных особенностей верхних отделов желудочно-кишечного тракта.
3. Многоуровневая математическая модель, разработанная на основе данных ультразвукового исследования желудка и 12-перстной кишки, выполненного в условиях применения различных типов тестовых завтраков, позволяет с высокой степенью достоверности идентифицировать зоны повышенной кислотности.
4. Эволюционное моделирование результатов применения многоуровневой математической модели позволяет с высокой степенью достоверности прогнозировать развитие воспалительно-дистрофических заболеваний верхних отделов желудочно-кишечного тракта.

## Литература | References

1. Healthcare in Russia 2023: Statistical collection Rosstat. Moscow. 2023. 179 p. (in Russ.)  
Здравоохранение в России. 2023: Стат. сб./Росстат. – М., 2023. – 179 с.
2. Budaev B.S., Kitsul I.S., Banzarova L.P. et al. The diseases of digestive apparatus: the structure and dynamics at regional level. *Problems of social hygiene, public health and history of medicine*. 2022; 30(2): 232–238. (in Russ.) doi: 10.32687/0869–866X-2022–30–2–232–238.  
Будаев Б.С., Кицул И.С., Банзарова Л.П. и соавт. Болезни органов пищеварения: структура и динамика на региональном уровне. *Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины*. 2022; 30(2): 232–238. doi: 10.32687/0869–866X-2022–30–2–232–238.
3. Dmitrikova D.S. On the state of morbidity of the Russian population with diseases of the digestive system for 2005–2019. *Symbol of science: international scientific journal*. 2022; 5–2: 87–90. (in Russ.)  
Дмитрикова Д.С. О состоянии заболеваемости населения России болезнями органов пищеварения за 2005–2019 гг. *Символ науки: международный научный журнал*. 2022; 5–2: 87–90.
4. Chirkina T.M., Aslanov B.I., Kokovina Yu.V., Bakulin I.G. Epidemiology of pathology of the upper gastrointestinal tract in Saint Petersburg. *Experimental and clinical gastroenterology*. 2020; 5(177): 42–46. (in Russ.) doi: 10.31146/1682–8658-ecg-177–5–42–46.  
Чиркина Т.М., Асланов Б.И., Коковина Ю.В. и соавт. Эпидемиологические особенности патологии верхних отделов желудочно-кишечного тракта среди населения Санкт-Петербурга. *Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология*. 2020; 5(177): 42–46. doi: 10.31146/1682–8658-ecg-177–5–42–46.
5. Pylskaya R., Porada N. Quantative analysis of the gastrointestinal disease rate among adult population in Minsk. Sakharov readings 2020: environmental problems of the XXI century: Materials of the 20th international scientific conference. Minsk. 2020: 154–158. (in Russ.) doi: 10.46646/SAKH-2020–2–154–158.
6. Пыльская Р.С., Порада Н.Е. Количественный анализ заболеваемости взрослого населения г. Минска болезнями желудочно-кишечного тракта. Сб. «Сахаровские чтения 2020 года: экологические проблемы XXI века. Мат. 20-й междунар. науч. конф. в 2 частях. Минск. 2020: 154–158. doi: 10.46646/SAKH-2020–2–154–158.
7. Ivashkin V.T., Maev I.V., Lapina T.L. et al. Clinical recommendations of Russian gastroenterological association and REndO endoscopic society on diagnosis and treatment of gastritis and duodenitis. *Russian Journal of Gastroenterology, Hepatology, Coloproctology*. 2021; 31(4): 70–99. (in Russ.) doi: 10.22416/1382–4376–2021–31–4–70–99.  
Ивашкин В.Т., Маев И.В., Лапина Т.Л. и соавт. Клинические рекомендации Российской гастроэнтерологической ассоциации и ассоциации «Эндоскопическое общество РЭндО» по диагностике и лечению гастрита, дуоденита. *Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии*. 2021; 31(4): 70–99. doi: 10.22416/1382–4376–2021–31–4–70–99.
8. Sakaguchi T., Sugihara T., Ohnita K., Fukuda D. et al. Pyloric Incompetence Associated with Helicobacter pylori Infection and Correlated to the Severity of Atrophic Gastritis. *Diagnostics (Basel)*. 2022; 12(3): 572. doi: 10.3390/diagnostics12030572.
9. Inevatova V.S., Minushkin O.N., Zverkov I.V. et al. Modern ideas of the chronic gastritis and specificity of its typing. *Kremlin medicine. Clinical Bulletin*. 2024; 1: 109–112. (in Russ.) doi: 10.48612/cgma/n6eh-n9mm-xh1p.  
Иневатова В.С., Минушкин О.Н., Зверков И.В. и соавт. Современные представления о хроническом гастрите и особенностях его типирования. *Кремлевская медицина. Клинический вестник*. 2024; 1: 109–112. doi: 10.48612/cgma/n6eh-n9mm-xh1p.
10. Lanin D.V., Zaytseva N.V., Zemlyanova M.A., Dolgikh O.V. et al. Characteristics of regulatory system in children

- exposed to the environmental chemical factors. *Hygiene and sanitation*. 2014; 93(2): 23–26. (in Russ.)  
Ланин Д.В., Зайцева Н.В., Землянова М.А., Долгих О.В. и соавт. Характеристика регуляторных систем у детей при воздействии химических факторов среды обитания. Гигиена и санитария. 2014; 93(2): 23–26.
10. Magomedov R.A., Malyutina A.P. Etiology and pathogenesis of chronic gastritis in students. *Bulletin of Kaluga university*. 2023;2(59): 50–53. (in Russ.) doi: 10.54072/18192173\_2023\_2\_50.  
Магомедов Р.А., Малютин А.П. Этиология и патогенез хронического гастрита у студентов. Вестник Калужского университета. 2023;2(59): 50–53. doi: 10.54072/18192173\_2023\_2\_50.
11. Nagornov I.V., Bova A.A., Yanul A.N., Kriushev P.V. Chronic gastritis. Part 1. Epidemiology. Etiology and pathogenesis. Classification. Clinical manifestations. *Military medicine*. 2024; 2(71): 56–64. (in Russ.) doi: 10.51922/2074–5044.2024.2.56.  
Нагорнов И.В., Бова А.А., Януль А.Н., Криушев П.В. Хронический гастрит часть 1. Этиология и патогенез. Классификация. Клинические проявления. Военная медицина. 2024; 2(71): 56–64. doi: 10.51922/2074–5044.2024.2.56.
12. Anichkov N.M., Baryshnikova N.V. Practical recommendations to diagnose and treat chronic gastritis. *University Therapeutic Journal*. 2021; 3(4):173–183. (in Russ.)  
Аничков Н.М., Барышников Н.В. Практические рекомендации по диагностике и лечению хронического гастрита. *University Therapeutic Journal*. 2021; 3(4): 173–183.
13. Manyakina O.M. Features of chronic gastritis in adolescents. *Children's medicine of the North-West*. 2022; 10(1): 88–92. (in Russ.)  
Манякина О.М. Особенности хронического гастрита у подростков. *Children's medicine of the North-West*. 2022; 10(1): 88–92.
14. Dolgalev I.V., Kareva E.N., Lyalukova E.A., Pavlova N.V. Chronic gastritis: from histological protocol to the rationale for etiopathogenetic therapy. *Attending physician*. 2021; 2: 30–34. (in Russ.) doi: 10.26295/OS.2021.76.84.006.  
Долгалева И.В., Карева Е.Н., Лялюкова Е.А., Павлова Н.В. Хронический гастрит: от гистологического протокола до обоснования этиопатогенетической терапии. *Лечащий врач*. 2021; 2: 30–34. doi: 10.26295/OS.2021.76.84.006.
15. Pestova A.S., Erdes S.I. Peripheral electrogastroenterography and diagnosis of gastroesophageal reflux disease in paediatric patients. *Doctor.Ru*. 2021; 20(10): 35–38. (in Russ.) doi: 10.31550/1727–2378–2021–20–10–35–38.  
Пестова А.С., Эрдес С.И. Периферическая электрогастроэнтерография в диагностике гастроэзофагеальной рефлюксной болезни у детей. *Доктор. Ру*. 2021; 20(10): 35–38. doi: 10.31550/1727–2378–2021–20–10–35–38.
16. Bordin D.S., Shchelochkov S.V., Livzan M.A. et al. Principles for diagnosing chronic gastritis associated with pathological duodenogastric reflux: a series of clinical observations. *Effective pharmacotherapy*. 2023; 19(43):64–74. (in Russ.) doi: 10.33978/2307–3586–2023–19–43–64–74.  
Бордин Д.С., Щелочков С.В., Ливзан М.А. и соавт. Принципы диагностики хронического гастрита, ассоциированного с патологическим дуоденогастральным рефлюксом: серия клинических наблюдений. Эффективная фармакотерапия. 2023; 19(43):64–74. doi: 10.33978/2307–3586–2023–19–43–64–74.
17. Vakhrushev Ya.M., Busygina M.S., Opolonsky D.V. Treatment of patients with a duodenal ulcer with disorders of the motor evacuator function of the stomach and duodenal. *Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2020;(3):47–53. (In Russ.) doi: 10.31146/1682–8658-ecg-175–3–47–53.  
Вахрушев Я.М., Бусыгина М.С., Ополонский Д.В. Лечение больных язвенной болезнью двенадцатиперстной кишки с нарушением моторно-эвакуаторной функции желудка и двенадцатиперстной кишки. Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2020; 3(175): 47–53. doi: 10.31146/1682–8658-ecg-175–3–47–53.
18. Uspenskaya Yu.A. [Normal human physiology: textbook. Krasnoyarsk State Agrarian University]. Krasnoyarsk, 2022. 414 p. (In Russ.)  
Успенская Ю.А. Нормальная физиология человека: учебное пособие. Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск, 2022. – 414 с.
19. Shklyayev A.E., Maksimov K.V., Panteleev K.E. et al. Assessment of the evacuation function of the stomach by magnetic resonance imaging with drinking stress test in patients with functional dyspepsia. *Health, demography, ecology of the Finno-Ugric peoples*. 2024; 1: 62–67. (In Russ.)  
Шкляев А.Е., Максимов К.В., Пантелеев К.Э. и соавт. Оценка эвакуаторной функции желудка методом магнитно-резонансной томографии с нагрузочным питьевым тестом у пациентов с функциональной диспепсией. Здоровье, демография, экология финно-угорских народов. 2024; 1: 62–67.
20. Shklyayev A.E., Kazarin D.D., Benderskaya E. Yu., Grigorieva O.A., Merzlyakova Yu.S. Dynamics of the level of hormones-regulators of gastric motility when drinking low-mineralized water. *Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2023;(11): 12–18. (In Russ.) doi: 10.31146/1682–8658-ecg-219–11–12–18.  
Шкляев А.Е., Казарин Д.Д., Бендерская Е.Ю. и соавт. Динамика уровня гормонов-регуляторов моторики желудка при приеме маломинерализованной воды. Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2023; 219(11): 12–18. doi: 10.31146/1682–8658-ecg-219–11–12–18.
21. Shatmanov S.T., Buvabekov M.M., Rakhmonov R.R. et al. The influence of irrational protein food on the histostucture of the gastric mucosa of rats. *Medicine of Kyrgyzstan*. 2018; 2: 130–134. (In Russ.)  
Шатманов С.Т., Бувабеков М.М., Рахмонов Р.Р. и соавт. Влияние нерациональной белковой пищи на гистоструктуру слизистой оболочки желудка крыс. Медицина Кыргызстана. 2018; 2: 130–134.
22. Aliev Kh.M., Rakhmonov R.R., Umarova Z.M., Rakhmonova Kh.N. The hystostructure of mucous membrane of the stomach in rats under same protein feeding. *Re-Health Journal*. 2020; 3–2(7): 204–208. (In Russ.) doi: 10.24411/2181–0443/2020–10153.  
Алиев Х.М., Рахмонов Р.Р., Умарова З.М., Рахмонова Х.Н. Гистоструктура слизистой оболочки желудка крыс при однообразном белковом питании. *Re-Health Journal*. 2020; 3–2(7): 204–208. doi: 10.24411/2181–0443/2020–10153.
23. Abdulaev A.M-R. The influence of the temperature of orally ingested liquid on the rate of gastric emptying during labor. *Bulletin of Medical Internet Conferences*. 2020; 10(6): 191. (In Russ.)  
Абдулаев А.М-Р. Влияние температуры перорально принимаемой жидкости на скорость опорож-

- нения желудка в родах. *Бюллетень медицинских Интернет-конференций*. 2020; 10(6): 191.
24. Rechkalov A.V. Evacuation function of the stomach in the cases of taking different test breakfasts under the condition of physiological rest and under the influence of muscle tension. *Bulletin of Kurgan State University. Series: physiology, psychology and medicine*. 2015; 2(36): 3–6. (In Russ.)  
Речкалов А.В. Эвакуаторная функция желудка при приеме различных тестовых завтраков в условиях физиологического покоя и при действии мышечного напряжения. *Вестник Курганского Государственного университета. Серия: физиология, психология и медицина*. 2015; 2(36): 3–6.
  25. Pavlovich I.M., Alper G.A., Gordienko A.V. et al. Chronic gastritis: impaired motor-evacuation function of the stomach. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2020; 4(72): 37–42. (In Russ.)  
Павлович И.М., Альпер Г.А., Гордиенко А.В. и соавт. Хронический гастрит: нарушение моторно-эвакуаторной функции желудка. *Вестник Российской Военно-медицинской академии*. 2020; 4(72): 37–42.
  26. Vakhrushev Ya.M., Busygina M.S. Clinical and Pathogenetic Aspects of the Course of Peptic Ulcer Disease with Concomitant Duodenal Stasis. *The Russian Archives of Internal Medicine*. 2020; 10(3): 209–216. (In Russ.) doi: 10.20514/2226–6704–2020–10–3–209–216.  
Вахрушев Я.М., Бусыгина М.С. Клинико-патогенетические особенности течения язвенной болезни при сопутствующем дуоденостазе. *Архив внутренней медицины*. 2020; 10(3): 209–216. doi: 10.20514/2226–6704–2020–10–3–209–216.
  27. Volynets G.V., Khavkinn A.I., Zhikhareva N.S. et al. Impaired motor function of the stomach and duodenum in various types of chronic gastritis in children. *Gastroenterology of St. Petersburg*. 2016; 3–4: М6. (In Russ.)  
Волынец Г.В., Хавкин А.И., Жихарева Н.С. и соавт. Нарушение моторной функции желудка и двенадцатиперстной кишки при различных типах хронического гастрита у детей. *Гастроэнтерология Санкт-Петербурга*. 2016; 3–4: М6.
  28. Vakhrushev Y.M., Busygina M.S. State of enteral parallel microbiota in chronic duodenal insufficiency. *Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2021; 12(12): 21–27. (In Russ.) doi: 10.31146/1682–8658-ecg-196–12–21–27.  
Вахрушев Я.М., Бусыгина М.С. Состояние энтеральной пристеночной микробиоты при хронической дуоденальной недостаточности. *Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология*. 2021; 12(196): 21–27. doi: 10.31146/1682–8658-ecg-196–12–21–27.
  29. Antonyan V.V., Levitan B.N., Zurnadghyants A.V., Antonyan S.V. The vegetative disbalance and its effect on the formation of peptic ulcer of gastroenteroanastomosis. *Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2022; (3): 43–49. (In Russ.) doi: 10.31146/1682–8658-ecg-199–3–43–49.  
Антонян В.В., Левитан Б.Н., Журнаджянц А.В., Антонян С.В. Вегетативный дисбаланс и его влияние на формирование пептической язвы гастроэнтероанастомоза. *Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология*. 2022; 3(199): 43–49. doi: 10.31146/1682–8658-ecg-199–3–43–49.
  30. Buryak V.N., Antonova T.I., Malysheva I.V. et al. The role of secretory-motor stomach disorders in the genesis of atopic dermatitis in children. *Pediatrician* (St. Petersburg). 2020; 11(1): 13–18. doi: 10.17816/PED11113–18.  
Буряк В.Н., Антонова Т.И., Малышева И.В. и соавт. Роль секреторно-моторных нарушений желудка в генезе атопического дерматита. *Педиатр*. 2020; 11(1): 13–18. (In Russ.) doi: 10.17816/PED11113–18.
  31. Akhmadullina G.I., Kurnikova I.A. Functional disorders of the stomach as a marker of decompensation of carbohydrate metabolism in patients with type 1 diabetes mellitus without organic pathology of the digestive organs. *Collection: Diabetes mellitus and obesity – non-infectious interdisciplinary pandemics of the 21st century*. Collection of abstracts of the IX (XXVIII) National Diabetes Congress with international participation. NGO «Russian Association of Endocrinologists»; Federal State Budgetary Institution «National Medical Research Center of Endocrinology» of the Russian Ministry of Health. Moscow, 2022. 25. P. doi: 10.14341/Conf05–08.09.22–25.  
Ахмадуллина Г.И., Курникова И.А. Функциональные нарушения желудка как маркер декомпенсации углеводного обмена у пациентов с сахарным диабетом 1 типа без органической патологии органов пищеварения. Сб.: *Сахарный диабет и ожирение – неинфекционные междисциплинарные пандемии XXI века*. Сборник тезисов IX (XXVIII) Национального диабетологического конгресса с международным участием. ОО «Российская ассоциация эндокринологов»; ФГБУ «НМИЦ эндокринологии» Минздрава России. Москва, 2022. С. 25. doi: 10.14341/Conf05–08.09.22–25.
  32. Aslanov B.I., Chirkina T.M., Kokovina Yu.V. et al. Pathological changes in the gastrointestinal tract in patients with diabetes mellitus. *Medical alphabet*. 2022; (35): 29–36. (In Russ.) doi: 10.33667/2078–5631–2022–35–29–36.  
Асланов Б.И., Чиркина Т.М., Коковина Ю.В. и соавт. Патологические изменения органов желудочно-кишечного тракта у пациентов с сахарным диабетом. *Медицинский алфавит*. 2022; 35: 29–36. doi: 10.33667/2078–5631–2022–35–29–36.
  33. Galiev Sh.Z., Amirov M.B., Baranova O.A. et al. Contractile function violations of the gallbladder as a cause of reflux-gastritis at biliary system diseases. *Modern problems of science and education*. 2016; 2: 88. (In Russ.)  
Галиев Ш.З., Амиров М.Б., Баранова О.А. и соавт. Нарушение сократительной функции желчного пузыря как фактор развития рефлюкс-гастрита при заболеваниях желчевыводящей системы. *Современные проблемы науки и образования*. 2016; 2: 88.
  34. Kunovskiy V.V., Tutka M.M. Peristaltic ability of the digestive tract in patients with acute pancreatitis: diagnostics and correction. *Surgery. East Europe*. 2019; 8(4): 530–539. (In Russ.)  
Куновский В.В., Тутка М.М. Моторно-эвакуаторная функция дигестивного тракта у пациентов с острым панкреатитом: методы диагностики и пути медикаментозной терапии. *Хирургия. Восточная Европа*. 2019; 8(4): 530–539.
  35. Novikova V.P., Petrovskiy A.N. Stomach and obesity in children. *Pediatric nutrition*. 2015; 5: 38–44. (In Russ.)  
Новикова В.П., Петровский А.Н. Желудок и ожирение у детей. *Вопросы детской диетологии*. 2015; 5: 38–44.
  36. Zvenigorodskaya L.A., Lychkova A.E., Shinkin M.V., Puzikov A.M. Disturbances of motor function of the upper digestive tract with the development of gas-

- troesophageal reflux disease in abdominal obesity. *Experimental and clinical gastroenterology*. 2018; 154(6): 22–28. (In Russ.)
- Звенигородская Л.А., Лычкова А.Э., Шинкин М.В., Пузиков А.М. Нарушение моторной функции верхних отделов пищеварительного тракта с развитием гастроэзофагальной рефлюксной болезни при абдоминальном ожирении. Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2018; 154(6): 22–28.
37. Anisimov V.E., Vernidub E.I. Methods for assessing the motor-evacuation function of the gastrointestinal tract in the clinic. *Kazan Medical Journal*. 1984; LXV(5): 366–369. (In Russ.)  
Анисимов В.Е., Вернидуб Е.И. Методы оценки моторно-эвакуаторной функции желудочно-кишечного тракта в клинике. Казанский медицинский журнал. 1984; LXV(5): 366–369.
38. Stepanov Yu.M., Ratchik V.M., Prolom N.V. et al. Manometry for studying motor functioning of upper digestive tract. *Gastroenterology*. 2017; 51(2): 152–158. (In Russ.) doi: 10.22141/2308–2097.51.2.2017.101698.  
Степанов Ю.М., Ратчик В.М., Пролом Н.В. и соавт. Манометрия в исследовании двигательной функции верхних отделов пищеварительной системы. Гастроэнтерология. 2017; 51(2): 152–158. doi: 10.22141/2308–2097.51.2.2017.101698.
39. Repin V.N., Repin M.V., Gudkov O.S. et al. Aspects of diagnosis and reconstructive-restorative surgery in functional disorders of digestive system. *Perm Medical Journal*. 2016; 33(4): 33–42. (In Russ.)  
Репин В.Н., Репин М.В., Гудков О.С. и соавт. Аспекты диагностики и реконструктивно-восстановительной хирургии функциональных нарушений пищеварительной системы. Пермский медицинский журнал. 2016; 33(4): 33–42.
40. Shestopalov S.S., Kushnirenko O. Yu. Methods for recording the motor function of the gastrointestinal tract (literature review). Chelyabinsk, 2005. 12 p. (In Russ.)  
Шестопалов С.С., Кушниренко О.Ю. Методы регистрации моторной функции желудочно-кишечного тракта (обзор литературы). Челябинск, 2005. 12 с.
41. Shklyayev A.E., Maksimov K.V., Pantelev K.E. Magnetic resonance imaging with a stress drinking test as a method of assessing the evacuation function of the stomach. *Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2022;(11): 110–116. (In Russ.) doi: 10.31146/1682–8658-ecg-207–11–110–116.  
Шкляев А.Е., Максимов К.В., Пантелеев К.Э. Магнитно-резонансная томография с нагрузочным питьевым тестом как метод оценки эвакуаторной функции желудка. Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2022; 207(11): 110–116. doi: 10.31146/1682–8658-ecg-207–11–110–116.
42. Lychkova A.E., Khomeriki S.G., Puzikov A.M. Motor function of the gastrointestinal tract in gastric erosions. *Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2021;(3): 167–171. (In Russ.) doi: 10.31146/1682–8658-ecg-187–3–167–171.  
Лычкова А.Э., Хомерики С.Г., Пузиков А.М. Моторная функция желудочно-кишечного тракта при эрозиях желудка. Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2021; 3(187): 167–171. doi: 10.31146/1682–8658-ecg-187–3–167–171.
43. Diomidova V., Saifueva S. Diagnostic imaging of stomach and duodenum in multiparameter ultrasound examination. *Acta medica Eurasica*. 2016; 2: 5–11. (In Russ.)  
Диомидова В.Н., Сайфиева С.Х. Диагностическое изображение (Diagnostic Imaging) желудка и двенадцатиперстной кишки при мультипараметрическом ультразвуковом исследовании. *Acta medica Eurasica*. 2016; 2: 5–11.
44. Mitkov V.V., Mitkova M.D., Alekhin M.N. et al. RASUDM consensus statement on final reports of ultrasound examination. *Ultrasound & Functional Diagnostics*. 2019;(1): 107–111. (In Russ.) doi: 10.24835/1607–0771–2019–1–107–111.  
Митьков В.В., Митькова М.Д., Алехин М.Н. и соавт. Консенсусное заявление РАСУДМ о протоколе ультразвукового исследования. Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2019; 1: 107–111. doi: 10.24835/1607–0771–2019–1–107–111.
45. Veselov Yu.E., Borisov A.E., Akimov V.P. A method for ultrasound diagnostics of the motor-evacuation function of the stomach and duodenum. Patent for invention RU 2228210 C2, 05/10/2004. Application No. 2001134463/14 dated December 17, 2001. (In Russ.)  
Веселов Ю.Е., Борисов А.Е., Акимов В.П. Способ ультразвуковой диагностики моторно-эвакуаторной функции желудка и 12-перстной кишки. Патент на изобретение RU 2228210 C2, 10.05.2004. Заявка № 2001134463/14 от 17.12.2001.
46. Diomidova V.N. Visual Characteristic of Unaltered and Operated Stomach with the Help of Ultrasound Research. *Medical Visualization*. 2015; (4): 46–55. (In Russ.)  
Диомидова В.Н. Визуальная характеристика неизмененного и оперированного желудка при УЗИ-исследовании. Медицинская визуализация. 2015; 4: 46–55.
47. Kugler T.E. Prospects for using a new technique for ultrasound examination of the stomach with a drinking load in the diagnosis of functional dyspepsia. *News of medicine and pharmacy*. 2013; 6(478): 65–68. (In Russ.)  
Куглер Т.Е. Перспективы использования новой методики ультразвукового исследования желудка с питьевой нагрузкой в диагностике функциональной диспепсии. 2013; 6(478): 65–68.
48. Diomidova V.N. Echography in the differential diagnosis of gastric pathology. Cheboksary: Publishing house ChP L.A. Naumova, 2007. 140 p. (in Russ.)  
Диомидова В.Н. Эхография в дифференциальной диагностике патологии желудка. Чебоксары: Изд-во ЧП Л.А. Наумова, 2007. 140 с.
49. Diomidova V.N., Voropaeva L.A., Valeeva O.V. Complex ultrasound investigation in stomach cancer diagnosis using three-dimensional visualization (case report). *Ultrasound and functional diagnostics*. 2010; 4: 78–82. (in Russ.)  
Диомидова В.Н., Воропаева Л.А., Валеева О.В. Комплексное ультразвуковое исследование с применением трехмерной визуализации в диагностике и оценке распространенности рака желудка. Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2010; 4: 78–82.
50. Diomidova V.N., Saifueva S. Kh. Possibilities of multiparametric ultrasound examination for gastroduodenal ulcers. *Medical visualization*. 2016; 1: 86–93. (in Russ.)  
Диомидова В.Н., Сайфиева С.Х. Возможности мультипараметрического ультразвукового исследования при гастродуоденальных язвах. Медицинская визуализация. 2016; 1: 86–93.
51. Chen C.Y., Wu D.C., Kuo Y.T. et al. MDCT for differentiation of category T1 and T2 malignant lesions from

- benign gastric ulcers. *Am J. Roentgenol.* 2008; 190 (6): 1505–1511. doi: 10.2214/AJR.07.2940.
52. Tayupova D.S., Valeeva F.V., Safiullina L.R., Bareeva L.T. Functional diagnosis of gastrointestinal form of diabetic autonomic neuropathy. *Practical medicine.* 2015; 4–2(89): 136–138. (in Russ.)  
Таяупова Д.С., Валеева Ф.В., Сафиуллина Л.Р., Бареева Л.Т. Функциональная диагностика гастроинтестинальной формы диабетической автономной нейропатии. *Практическая медицина.* 2015; 4–2(89): 136–138.
  53. Kropacheva E.I., Vorobyov M.V., Rudick A.A., Kamalova O.K. Complex evaluation of gastric motor-emptying disorders in patients with duodenal ulcer after functional operations. *Far Eastern Medical Journal.* 2002; 2: 59–64. (in Russ.)  
Кропачева Е.И., Воробьев М.В., Рудик А.А., Камалова О.К. Комплексная оценка моторно-эвакуаторной функции желудка после функциональных операций при язвенной болезни 12-перстной кишки. *Дальневосточный медицинский журнал.* 2002; 2: 59–64.
  54. Tyurina T.K., Bokova T.A. Comprehensive gastrointestinal ultrasound examination of the upper gastrointestinal tract with physiological stress in children. *Treatment and prevention.* 2021; 11(1): 80–85. (in Russ.)  
Тюрина Т.К., Бокова Т.А. Комплексное ультразвуковое исследование верхних отделов пищеварительного тракта с физиологической нагрузкой у детей. *Лечение и профилактика.* 2021; 11(1): 80–85.
  55. Karyakina O.E., Dobrodeeva L.K., Martynova N.A. et al. Use of mathematical models in clinical practice. *Human ecology.* 2012; 7: 55–64. (in Russ.)  
Карякина О.Е., Добродеева Л.К., Мартынова Н.А. и соавт. Применение математических моделей в клинической практике. *Экология человека.* 2012; 7: 55–64.
  56. Kosenko P.M., Vavrinchuk S.A., Kulikov L.K. et al. Mathematical modeling of motor-evacuation disorders of the gastrointestinal tract in patients with pyloroduodenal stenosis. *Surgery news.* 2014; 22(2): 224–230. (in Russ.) doi: 10.18484/2305–0047.2014.2.224.  
Косенко П.М., Вавринчук С.А., Куликов Л.К. и соавт. Математическое моделирование моторно-эвакуаторных нарушений желудочно-кишечного тракта у пациентов с пилоро-дуоденальным стенозом. *Новости хирургии.* 2014; 22(2): 224–230. doi: 10.18484/2305–0047.2014.2.224.
  57. Kosenko P.M., Vavrinchuk S.A., Popov A.I. et al. Mathematical modeling in pyloroduodenal stenosis surgery. *Far Eastern Medical Journal.* 2020; 3: 105–110. (in Russ.) doi: 10.35177/1994–5191–2020–3–105–110.  
Косенко П.М., Вавринчук С.А., Попов А.И. и соавт. Математическое моделирование в хирургии пилородуоденального стеноза. *Дальневосточный медицинский журнал.* 2020; 3: 105–110. doi: 10.35177/1994–5191–2020–3–105–110.
  58. Vavrinchuk S.A., Kosenko P.M., Sunozova G.D., Boyarintsev N.I. Electrophysiological assessment of gastrointestinal motility indicators in patients with axial hiatal hernia. *Modern problems of science and education.* 2024; 3: 41. (in Russ.) doi: 10.17513/spno.33479.  
Вавринчук С.А., Косенко П.М., Сунозова Г.Д., Бояринцев Н.И. Электрофизиологическая оценка показателей моторики желудочно-кишечного тракта у больных с аксиллярными грыжами пищевода и отверстия диафрагмы. *Современные проблемы науки и образования.* 2024; 3: 41. doi: 10.17513/spno.33479.
  59. Trusov P.V., Zaitseva N.V., Kamaltdinov M.R. Simulation of digestion processes in consideration of functional disorders in a human organism: conceptual and mathematical formulations, model structure. *Russian Journal of Biomechanics.* 2013; 17(4): 67–83. (in Russ.)  
Трусов П.В., Зайцева Н.В., Камалтдинов М.Р. Моделирование процессов пищеварения с учетом функциональных нарушений организма человека: концептуальная и математическая постановки, структура модели. *Российский журнал биомеханики.* 2013; 17(4): 67–83.
  60. Pimanov S.I. Ultrasound diagnostics in gastroenterology. Moscow. Practical medicine. 2016. 416 p. (in Russ.)  
Пиманов С.И. Ультразвуковая диагностика в гастроэнтерологии. М.: Практическая медицина. – 2016. – 416 с.
  61. Zaitseva N.V., Trusov P.V., Kiryanov D.A., Kamaltdinov M.R., Ivashova Yu.A., Lir D.N., Sitchikhina L.A. Full-scale experiment to identify biomechanical parameters of the motor and evacuation functions of the stomach used in a mathematical model of food flow. *Russian Journal of Biomechanics.* 2024; 28(2): 52–61. doi: 10.15593/RJBiomech/2024.2.05.
  62. Kamaltdinov M.R., Trusov P.V., Zaitseva N.V. Investigation of Digestion Processes in the Stomach and Duodenum Using Computational Fluid Dynamics Model. *CFD Letters.* 2024; 16(3): 82–95. doi: 10.37934/cfdl.16.3.8295.
  63. Trusov P.V., Zaitseva N.V., Kiryanov D.A. et al. A mathematical model for evolution of human functional disorders influenced by environment factors. *Mathematical Biology and Bioinformatics.* 2023; 18(S): t73–t93. doi: 10.17537/2023.18.t73.
  64. Kamaltdinov M.R., Zaitseva N.V., Shur P.Z. Numerical modeling of acidity distribution in antroduodenum aimed at identifying anomalous zones at consuming drinks with different pH level. *Health Risk Analysis.* 2017; 1: 38–46. doi: 10.21668/health.risk/2017.1.05.eng.