Дата публикации: 01.06.2025
DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_02_5
УДК 612.111.6

Publication date: 01.06.2025
DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_02_5
UDC 612.111.6

АКУСТИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ЭРИТРОЦИТОВ ПАЦИЕНТОВ С ЗАБОЛЕВАНИЯМИ ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОГО ТРАКТА, ОСЛОЖНЕННЫМИ ГИПОХРОМНОЙ АНЕМИЕЙ

Т.А. Веселова[1], А.И. Садовская[2], А.В. Клемина[1], Е.В. Балавина[3]
[1]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород, Россия
[2]Общество с ограниченной ответственностью «МеЛСиТек», г. Нижний Новгород, Россия
[3]Государственное бюджетное учреждение здравоохранения Нижегородской области «Борская ЦРБ», г. Бор, Россия

Аннотация. Цель исследования – акустический анализ упругости эритроцитов пациентов с заболеваниями желудочно-кишечного тракта, осложненными гипохромной анемией, и оценка возможности использования акустической интерферометрии в комплексной диагностике тяжести анемического синдрома. Показано уменьшение упругости эритроцитов и акустического параметра цельной крови у пациентов с патологиями желудочно-кишечного тракта, осложненными гипохромной анемией, по сравнению с показателями у пациентов с гастроэнтерологическими заболеваниями без анемии и практически здоровых доноров. При тяжелых формах анемии снижение акустического параметра цельной крови и упругости эритроцитов сопровождалось повышением показателя соотношения упругости эритроцитов и концентрации гемоглобина в крови, что обусловлено изменением физических характеристик мембраны эритроцитов и цитоскелета.
Ключевые слова: заболевания желудочно-кишечного тракта, гипохромная анемия, акустическая интерферометрия, акустический параметр, упругость эритроцитов.

ACOUSTIC INTERFEROMETRY OF ERYTHROCYTES IN PATIENTS WITH GASTROINTESTINAL DISEASES COMPLICATED BY HYPOCHROMIC ANEMIA

T.A. Veselova[1], A.I. Sadovskaya[2], A.V. Klemina[1], E.V. Balavina[3]
[1]N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia
[2]MelSyTech LLC, Nizhny Novgorod, Russia
[3]Bor Central District Hospital, Bor, Russia

Abstract. The aim of the study is to analyze the elasticity of erythrocytes in patients with gastrointestinal diseases complicated by hypochromic anemia and to assess the possibility of using acoustic interferometry in the comprehensive diagnosis of the anemic syndrome severity. A decrease in the erythrocyte elasticity and the acoustic parameter of whole blood was shown in patients with gastrointestinal pathologies complicated by hypochromic anemia, compared with the parameters in patients with gastrointestinal diseases without anemia and practically healthy donors. In severe forms of anemia, a decrease in the acoustic parameter of whole blood and erythrocyte elasticity was accompanied by an increase in ratio of erythrocyte elasticity and hemoglobin concentration, which is due to a change in the physical characteristics of the erythrocyte membrane and cytoskeleton.
Keywords: gastrointestinal diseases, hypochromic anemia, acoustic interferometry, acoustic parameter, erythrocyte elasticity.

Введение. В связи с высокой частотой встречаемости анемии у пациентов гастроэнтерологического профиля проблема коморбидности патологий желудочно-кишечного тракта и анемий остается актуальной по настоящее время. В большинстве случаев с заболеваниями органов пищеварения ассоциированы анемии, обусловленные дефицитом железа – железодефицитная анемия (ЖДА) и железоперераспределительная анемия (анемия хронического заболевания (АХЗ)), а также их сочетание. Развитие анемии при заболеваниях желудка и кишечника сопровождается системным нарушением микроциркуляции, капиллярно-трофической недостаточностью,

гипоксическим повреждением и дисфункцией органов, так называемой «анемической висцеропатией» [1-5].

По результатам общеклинического и биохимического анализов ЖДА представляет собой классическую нормо- или гипорегенераторную, микроцитарную и гипохромную анемию [6-8]. АХЗ в большинстве случаев – исходно умеренная нормохромная и нормоцитарная анемия, на следующем этапе – нормоцитарная гипохромная анемия, а на завершающем этапе – микроцитарная гипохромная анемия. Дифференциальный диагноз АХЗ и ЖДА основан на отличиях в гомеостазе железа и возможен с помощью биохимических методов оценки концентрации сывороточного железа, ферритина, трансферрина и др. [9, 10].

Вне зависимости от показателей феркинетики при недостаточном содержании гемоглобина в эритроцитах, которое обусловлено железодефицитными состояниями, могут изменяться вязко-эластичные свойства эритроцитов, в частности такие микрореологические параметры, как способность к деформируемости и агрегации, ригидность клеток. Изменения реологических параметров эритроцитов при патологиях ЖКТ сопровождаются значительным ухудшением реологических свойств крови, что является важным фактором патогенеза этих заболеваний и лежит в основе развития «анемической висцеропатии» [11, 12].

Таким образом, микрореологические характеристики эритроцитов являются дополнительным критерием тяжести гипохромной анемии и, как следствие, гипоксического повреждения тканей и органов.

В настоящее время успешно развиваются различные прямые и косвенные методы оценки вязко-эластичных свойств эритроцитов [13, 14]. Однако в условиях недостаточного содержания гемоглобина в эритроцитах при гипохромных формах анемии изменения деформируемости, ригидности эритроцитов обусловлены с одной стороны снижением внутриклеточной вязкости клеток, а с другой – повышением вязкости мембраны и цитоскелета, что важно учитывать при оценке реологического статуса клеток.

Одним из информативных экспресс-методов оценки микрореологических свойств эритроцитов в условиях гипохромной анемии может быть акустическая интерферометрия. Метод позволяет оценить упругость эритроцитов в целом, которая в первую очередь зависит от внутриклеточного содержания гемоглобина, а также показатели упругости мембраны и цитоскелета, не связанные с содержанием гемоглобина в клетках [15-19].

Цель исследования – анализ упругости эритроцитов пациентов с заболеваниями ЖКТ, осложненными гипохромной анемией, и оценка возможности использования акустической интерферометрии в комплексной диагностике тяжести анемического синдрома.

Методы и организация исследования. В исследовании использовали образцы цельной крови (стабилизатор K_3ЭДТА) и плазмы крови пациентов с гастроэнтерологическими заболеваниями в возрасте от 25 до 60 лет (n=124) со следующими нозологиями: хронический гастрит (n=57), язвенная болезнь желудка (n=24), хронический гастродуоденит (n=12), язвенный колит (n=12), язвенная болезнь двенадцатиперстной кишки (n=6), а также хронический панкреатит, холецистит, гастроэзофагеальная рефлюксная болезнь, дивертикулярная болезнь кишечника (n=13). На основании результатов общего клинического анализа образцы крови пациентов с заболеваниями ЖКТ рассматривались в двух группах сравнения: гастроэнтерологические заболевания с анемией (1) и заболевания ЖКТ без анемического синдрома (2). Контролем служили образцы крови практически здоровых доноров (n=20). Материалы получены из ГБУЗ НО «Борская ЦРБ».

Для определения наличия и патогенетического варианта анемии на автоматическом гематологическом анализаторе Abacus Junior 30 исследовали такие показатели эритроцитарного звена, как концентрация в крови гемоглобина (HGB), количество эритроцитов (RBC), средний объем эритроцита (MCV), среднее содержание гемоглобина в эритроците (MCH), ширина распределения эритроцитов по объему (RDW).

Акустическим методом на анализаторе АКБа-01 «БИОМ» исследовали показатели упругости эритроцитов. Резонаторный метод или метод интерферометра фиксированной длины, основанный на использовании стоячих ультразвуковых волн в диапазоне частот 6-9 МГц в цилиндрическом резонаторе, позволяет определять ультразвуковые характеристики биологических жидкостей в малых (порядка 100 мкл) объемах образца по положению и ширине характерных резонансных пиков. Интенсивность ультразвуковых волн в акустическом резонаторе имеет величину не более 10^{-6} Вт/см^2. Такая величина интенсивности не производит необратимых изменений в биологических жидкостях [20].

Акустический анализатор АКБа-01 «БИОМ» определяет акустический показатель (АКП), пропорциональный скорости распространения ультразвуковых волн в биообразцах. Прохождение ультразвуковой волны через пробу тем быстрее, чем более упругая среда в пробе.

В работе измеряли АКП цельной крови, плазмы, затем рассчитывали упругость эритроцита (G) по формуле (1):

$$G = \frac{(\text{АКП}_{\text{цельной крови}} - \text{АКП}_{\text{плазмы}})}{\text{RBC}(\times 10^{-12}/\text{л})}, \text{отн. ед.} \quad (1)$$

Акустический показатель упругости эритроцитов (G) в первую очередь отражает состояние внутриклеточной вязкости клеток, обусловленной содержанием в них гемоглобина. Показатель упругости эритроцитов (G/Hb), рассчитанный по формуле (2), служит характеристикой вязко-эластичных свойств мембраны и цитоскелета эритроцитов:

$$\text{G/HGB} = \frac{(\text{АКП}_{\text{цельной крови}} - \text{АКП}_{\text{плазмы}})}{\text{RBC}(\times 10^{-12}/\text{л}) \times \text{HGB}(\text{г}/\text{л})} \times 100, \text{отн. ед.} \quad (2)$$

Реологические параметры эритроцитов – способность к агрегации, вязко-эластичные свойства клеток, в том числе упругость, оказывают основное влияние на реологические свойства крови, критерием которых может служить акустический параметр цельной крови, дополнительный к упругости эритроцитов.

Таким образом в представленной работе у пациентов с гастроэнтерологическими заболеваниями и практически здоровых доноров анализировали три акустических параметра: АКП цельной крови и показатели упругости эритроцитов – G и G/Hb.

Статистический анализ полученных результатов был проведен с использованием программ Statistica v.10.0 (StatSoft Inc., США) и Excel (Microsoft, США). Рассчитывали M – среднее арифметическое значение показателей в группах сравнения, m – стандартную ошибку среднего, которые использовали для представления результатов на графиках и в таблицах. Достоверность отличий упругости эритроцитов и АКП цельной крови пациентов с заболеваниями ЖКТ, осложненными и не осложненными анемией, по сравнению с группой практически здоровых доноров оценивали с помощью критерия Стьюдента для независимых выборок при анализе двух групп сравнения и критерия Стьюдента с поправкой Бонферрони при анализе более двух групп сравнения.

Зависимость упругости эритроцитов от концентрации гемоглобина в крови как основного критерия анемии оценивали на основании значений коэффициента линейной корреляции Пирсона.

Результаты исследования и их обсуждение. На основании результатов исследования эритроцитарных гематологических показателей у 50% пациентов с гастроэнтерологическими патологиями (n=62) обнаружена анемия. Статистика основных заболеваний у пациентов с диагностированной анемией и без анемического синдрома (табл.1).

Анемический синдром наиболее часто был связан с хроническими воспалительными заболеваниями желудка и кишечника, а также с язвенными поражениями органов пищеварительного тракта, что подтверждает наличие у пациентов относительного и абсолютного дефицита железа.

У пациентов с анемическим синдромом преобладали случаи гипохромной микроцитарной анемии, о чем свидетельствует уменьшение содержания гемоглобина в крови (HGB<110 г/л), гематокрита (HCT<36%), среднего объема эритроцитов (MCV<80 фл), наличие в крови эритроцитов с низкой концентрацией гемоглобина (MCH<27 пг), а также увеличение индекса RDW (RDW>15%) по сравнению с показателями у практически здоровых доноров (табл. 2).

Таблица 1

Статистика заболеваний ЖКТ, осложненных и не осложненных анемией, количество случаев на 100%

Основное заболевание	Патологии ЖКТ без анемического синдрома (n=62/100%)	Патологии ЖКТ, осложненные анемией (n=62/100%)
Хронические гастрит и гастродуоденит	46/74,19%	23/37,09%
Язвенная болезнь желудка	2/3,23%	22/35,48%
Язвенный колит	3/4,84%	9/14,52%
Язвенная болезнь двенадцатиперстной кишки	2/3,23%	4/6,45%
Другие*	9/14,52%	4/6,45%

Примечание: ЖКТ – желудочно-кишечный тракт; * – хронический панкреатит, синдром раздраженного кишечника, хронический холецистит, острый неинфекционный гастроэнтерит, колит и др.

Таблица 2

Содержание эритроцитов, концентрация гемоглобина в крови и эритроцитарные индексы пациентов с заболеваниями ЖКТ и практически здоровых доноров (контроль), M±m

Показатели гематологического анализа	Контроль	Патологии ЖКТ с анемией	Патологии ЖКТ без анемии
RBC, $\times 10^{12}$/л	4,59±0,23	4,14±0,49	4,72±0,34
HGB, г/л	138,65±8,64	94,66±10,00*	142,11±8,13
HCT, %	40,22±2,23	30,12±2,53*	40,99±2,11
MCV, фл	87,74±3,15	72,12±7,90*	87,07±3,34
MCH, пг	30,25±0,91	23,00±3,13*	30,14±1,16
RDW, %	12,95±0,50	17,98±2,65*	13,14±0,64

Примечание: ЖКТ – желудочно-кишечный тракт; RBC – количество эритроцитов; HGB – концентрация в крови гемоглобина; HCT – содержание гематокрита; MCV – средний объем эритроцита; MCH – среднее содержание гемоглобина в эритроците; RDW – распределение эритроцитов по объему; * – статистически значимо по сравнению с контролем, $p<0,05$.

Наличие гипохромной анемии у пациентов с заболеваниями желудочно-кишечного тракта приводило к снижению АКП цельной крови по сравнению с таковым у практически здоровых доноров (контроль). АКП цельной крови пациентов с патологиями ЖКТ, не осложненными анемией, не отличался от контроля (рис. 1).

АКП цельной крови отражает вязко-эластичные свойства и, как следствие, реологические характеристики плазмы крови и форменных элементов. Ключевая роль в формировании реологических параметров крови принадлежит эритроцитам, которые составляют 98% от общего объема клеточной популяции [22].

Вязко-эластичные характеристики (деформируемость, упругость) и, как следствие, способность эритроцитов к микроциркуляции в свою очередь определяются, во-первых, вязкоупругими свойствами мембраны и цитоскелета, во-вторых – внутриклеточной вязкостью, которая зависит от содержания гемоглобина в эритроцитах [11, 22].

Показатель упругости эритроцитов (G) у пациентов с патологиями ЖКТ, осложненными анемией, снижался по сравнению с контролем и не отличался от контрольных значений у пациентов с гастроэнтерологическими заболеваниями без анемии. Обратная зависимость наблюдалась для упругости эритроцитов, соотнесенной с концентрацией гемоглобина в крови (G/HGB). Показатель G/HGB у пациентов с заболеваниями ЖКТ, осложненными гипохромной анемией, превышал значения у пациентов с заболеваниями ЖКТ без анемического синдрома и практически здоровых доноров (рис. 2).

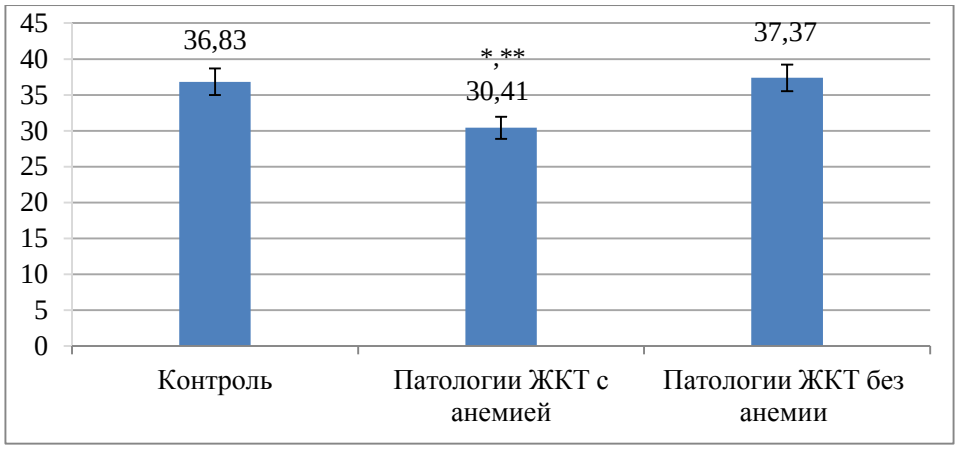


Рис. 1. АКП цельной крови пациентов с патологиями ЖКТ с наличием и отсутствием анемии и практически здоровых доноров (контроль)

Примечание: АКП – акустический параметр; ЖКТ – желудочно-кишечный тракт; * – статистически значимо по сравнению с контролем, $p<0,05$; ** – статистически значимо по сравнению с патологиями ЖКТ без анемии, $p<0,05$.

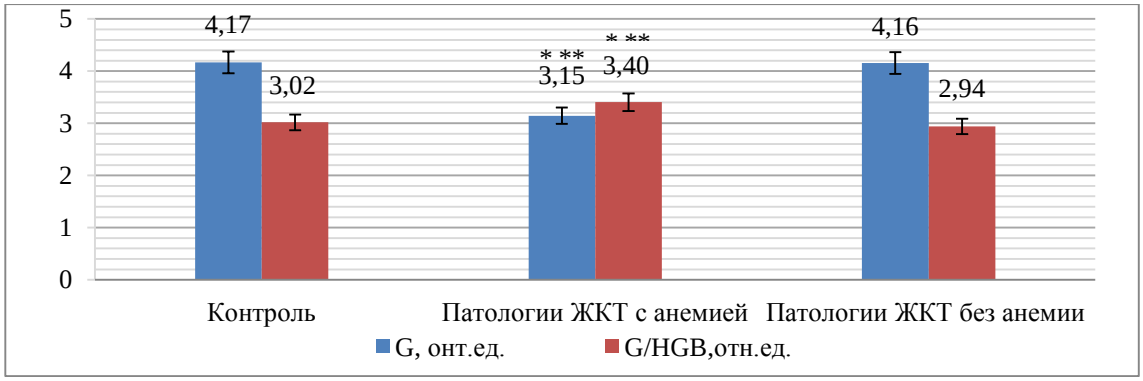


Рис. 2. Упругость эритроцитов пациентов с патологиями ЖКТ с наличием и отсутствием анемии и практически здоровых доноров (контроль)

Примечание: ЖКТ – желудочно-кишечный тракт; G – показатель упругости эритроцитов; G/HGB – отношение упругости эритроцитов и концентрации гемоглобина в крови; * – статистически значимо по сравнению с контролем, $p<0,05$; ** – статистически значимо по сравнению с патологиями ЖКТ без анемии, $p<0,05$.

По всей видимости, основная причина снижения упругости эритроцитов (G) и, как следствие, уменьшения АКП цельной крови у пациентов с патологиями желудочно-кишечного тракта и гипохромной анемией – уменьшение содержания в эритроцитах гемоглобина и уменьшение внутриклеточной вязкости. Уменьшение акустических параметров эритроцитов служит дополнительным диагностическим критерием железодефицитного состояния (эритропоэза), но затрудняет анализ наличия возможных нарушений микрореологических характеристик клеток, обусловленных изменением физико-химических параметров мембраны и цитоскелета. В этих условиях наиболее информативным показателем может быть упругость эритроцитов, соотнесенная с концентрацией гемоглобина в крови (G/HGB). Повышение показателя (G/HGB) у пациентов с заболеваниями ЖКТ с анемическим синдромом и гипохромией свидетельствует об изменениях физико-химических характеристик мембраны и цитоскелета.

Так как упругость эритроцитов (G) и концентрация гемоглобина в крови положительно коррелировали между собой ($r=0,70$; $p<0,05$) (рис. 3), в работе были проанализированы акустические параметры эритроцитов и цельной крови у пациентов с анемией различной степени тяжести.

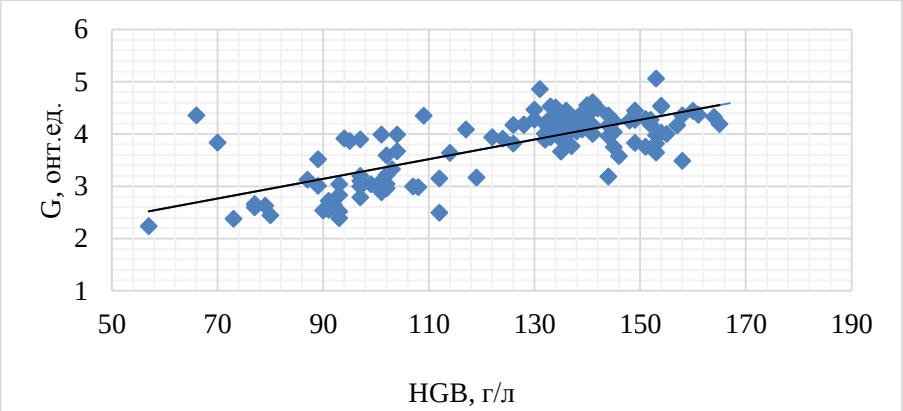


Рис. 3. Сопряженность (по данным корреляции Пирсона) между упругостью эритроцитов и концентрацией гемоглобина в крови

Примечание: G – показатель упругости эритроцитов; HGB – концентрация гемоглобина в крови.

От тяжести анемии, которая определяется содержанием гемоглобина в крови, зависят течение гастроэнтерологического заболевания и выбор тактики лечения. Выделяют тяжелые анемии (Hb<70 г/л), анемии средней тяжести (Hb 70-100 г/л) и легкие формы анемий (Hb>100 г/л) [3, 9, 21].

В представленной работе у 59,68% (n=37) больных выявлена анемия легкой степени, у 24,19% (n=15) и 16,13% (n=10) пациентов – средняя и тяжелая анемии, соответственно (табл. 3).

Акустический параметр цельной крови у пациентов с патологиями ЖКТ, осложненными анемией различной степени тяжести, снижался по сравнению с контролем соответственно степени тяжести осложнения (рис. 4).

Таблица 3

Содержание эритроцитов, концентрация гемоглобина в крови и гематокрит пациентов с заболеваниями ЖКТ с диагностированной анемией различной степени тяжести

Показатели	Степени тяжести анемии при заболеваниях ЖКТ		
	Легкая	Средняя	Тяжелая
RBC, $\times 10^{12}$/л	4,32±0,54	4,10±0,33	2,84±0,86
HGB, г/л	101,69±7,72	82,33±6,42	64,33±6,66
HCT, %	32,01±1,89	27,61±4,53	20,13±1,17

Примечание: ЖКТ – желудочно-кишечный тракт; RBC – количество эритроцитов; HGB – концентрация гемоглобина в крови; HCT – содержание гематокрита.

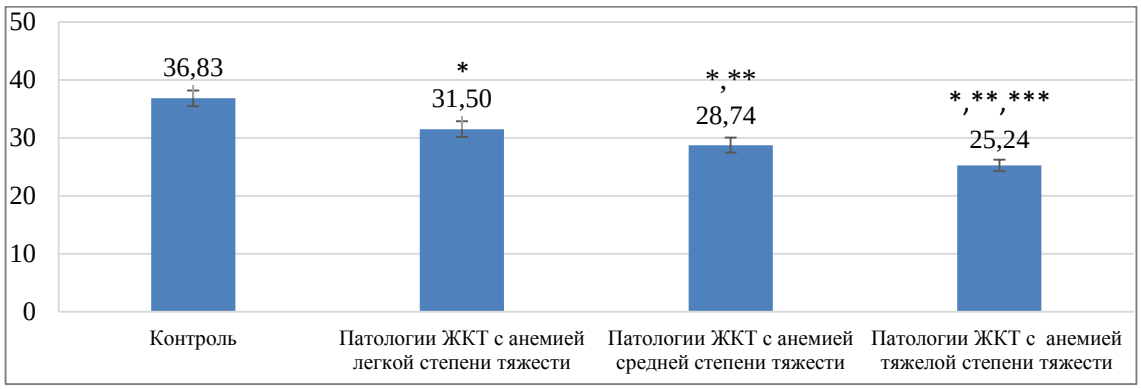


Рис. 4. АКП цельной крови пациентов с заболеваниями ЖКТ, осложненными гипохромной анемией различной степени тяжести, и практически здоровых доноров (контроль)

Примечание: АКП – акустический параметр; ЖКТ – желудочно-кишечный тракт; * – статистически значимо по сравнению с контролем, p<0,05; ** – статистически значимо по сравнению с анемией легкой степени тяжести, p<0,05; *** – статистически значимо по сравнению с анемией средней степени тяжести, p<0,05.

Снижение показателя упругости эритроцитов (G) также наблюдали у пациентов с патологиями ЖКТ с наличием анемии различной степени тяжести. Наиболее выраженные изменения этого показателя обнаружены в случаях анемии средней тяжести и при тяжелых формах анемии (рис. 5).

Параметр упругости эритроцитов, рассчитанный с учетом содержания гемоглобина (G/HGB) в биообразцах, достоверно повышался по сравнению с контролем только у пациентов с анемией тяжелой степени (рис. 5).

Таким образом, при дифференциальном анализе акустических параметров цельной крови и эритроцитов пациентов с заболеваниями ЖКТ и гипохромной анемией различной степени тяжести обнаружено: снижение АКП цельной крови, наиболее выраженное при тяжелых формах анемии, снижение упругости эритроцитов G, характерное для всех случаев анемического синдрома, повышение показателя G/HGB лишь у пациентов с тяжелой анемией. В случаях тяжелой гипохромной анемии, вызванной заболеваниями желудка и кишечника, упругость эритроцитов зависит не только от содержания гемоглобина в клетках, но и от физических параметров поверхности клеток – мембраны и цитоскелета. Тяжелые формы анемии, осложняющие течение основного заболевания ЖКТ, сопровождаются интоксикацией, развитием воспаления, что приводит к накоплению в крови и оседанию на эритроцитах токсинов, циркулирующих иммунных комплексов, активации свободнорадикального окисления липидов и белков мембраны эритроцитов, ковалентным модификациям белков, к накоплению в мембране насыщенных липидов, и, как следствие, к повышению жесткости мембраны и цитоскелета эритроцита [22-24].

Заключение. Результаты исследования показали возможность использования акустической интерферометрии эритроцитов в комплексной диагностике гипохромной анемии, развивающейся вследствие основного гастроэнтерологического заболевания.

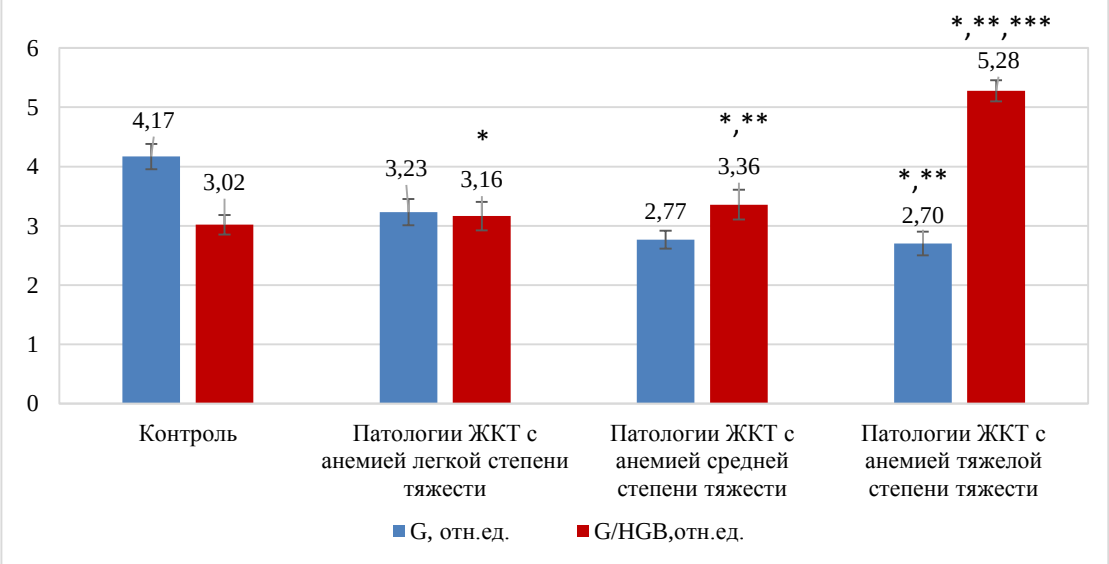


Рис. 5. Упругость эритроцитов пациентов с заболеваниями ЖКТ, осложненными гипохромной анемией различной степени тяжести, и практически здоровых доноров (контроль)

Примечание: ЖКТ – желудочно-кишечный тракт; G – показатель упругости эритроцитов; G/HGB – отношение упругости эритроцитов и концентрации гемоглобина в крови; * – статистически значимо по сравнению с контролем, $p<0,05$; ** – статистически значимо по сравнению с анемией легкой степени тяжести, $p<0,05$; *** – статистически значимо по сравнению с анемией средней степени тяжести, $p<0,05$.

Снижение упругости эритроцитов (G) и АКП цельной крови у пациентов с патологиями ЖКТ, осложненными гипохромной анемией различной степени тяжести, обусловленное уменьшением содержания гемоглобина в клетках и, как следствие, изменением вязкоэластических свойств внутреннего содержимого эритроцитов,

служит дополнительным критерием наличия гипохромной анемии. Наиболее информативным в оценке тяжести анемического синдрома является использование двух показателей упругости эритроцитов – G и G/Hb. Снижение показателя упругости эритроцитов G и повышение показателя G/HGB, обусловленное, по всей видимости, увеличением жесткости мембраны и цитоскелета, свидетельствует об ухудшении реологических свойств эритроцитов и, как следствие, о нарушении микроциркуляции и газообмена в органах и тканях, гипоксическом повреждении тканей, что позволяет выбрать правильную тактику лечения пациентов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев, С.А. Анемии и заболевания желудочно-кишечного тракта, особенности ведения коморбидных пациентов/ С.А. Воробьев // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. – 2022. – №200(4). – С.20-32.
2. Анемический синдром при гастроэнтерологических заболеваниях: состояние проблемы и пути решения / О.В. Рыбина, А.В. Губкин, В.Т.Сахин, О.А. Рукавицын // Гематология. Трансфузиология. Восточная Европа. – 2020. – Т. 6. – № 3. – С. 357-371.
3. Харитонова, Е.Р. Анемия при воспалительных заболеваниях кишечника: патофизиология, диагностика и лечение / Е.Р. Харитонова, В.П. Новикова, А.И. Хавкин // Вопросы Диетологии. – 2020. – Т. 10. – № 3. – С. 23-34.
4. Богданов, А.Н. Анемии при воспалительных заболеваниях кишечника: этиология, патогенез, диагностика, лечение/ А.Н. Богданов, С.В. Волошин, Т.Г. Кулибаба // Университетский терапевтический вестник. – 2023. – Т. 5. – № 1. – С. 53-63.
5. Zhu, A. Evaluation and treatment of iron deficiency anemia: a gastroenterological perspective / A. Zhu, M. Kaneshiro, Jd. Kaunitz // Dig Dis Sci. – 2010. – Vol. 55. – P. 548-559.
6. Особенности патогенеза и пути коррекции анемии у пациентов с воспалительными заболеваниями кишечника / О.В. Рыбина, В.Т. Сахин, А.В. Губкин [и др.] // Онкогематология. – 2024. – № 19(2). – С. 132-140.
7. Лабораторные возможности дифференциальной диагностики анемий / Л.М. Мещерякова, А.А. Левина, М.М. Цыбульская [и др.] // Онкогематология. – 2015. – № 10(2). – С. 46-50.
8. Абдурахманов, Д.Т. Железодефицитная анемия при заболеваниях желудочно-кишечного тракта / Д.Т. Абдурахманов // Фарматека. – 2012. – № 13(246). – С. 9-14.
9. Рукавицын, О.А. Анемия хронических заболеваний: отдельные аспекты патогенеза и пути коррекции / О.А. Рукавицын // Онкогематология. – 2016. – Т.11. – С. 44 -67.
10. Зубрихина, Г.Н. Дифференциально-диагностические возможности в оценке железодефицитного состояния при анемиях / Г.Н. Зубрихина, В.Н Блиндарь, И.И. Матвеева // Клиническая лабораторная диагностика. – 2016. – № 61(3). – С. 45-66.
11. Оценка реологических детерминант крови человека с железодефицитной анемией в сравнении с аналогичными показателями крови здоровых людей/ П.В. Нагорнова, А.В. Белкин, В.Н. Дубровский [и др.] // Актуальные вопросы биологической физики и химии. – 2020. – Т. 5. – № 3. – С. 499-504.
12. Роль нарушений реологических свойств эритроцитов в патогенезе воспалительных заболеваний кишечника у детей / Г.Я. Левин, А.Н. Поповичева, Л.Н. Соснина [и др.] // Тромбоз, гемостаз и реология. – 2017. – №. 217. – С 45-52.
13. Математическая модель эритроцитов для расчета их упругих свойств и морфологии / Ю.С. Нагорнов, В.В. Гноевых, А.Ю. Смирнова [и др.] // Электронный научный журнал. Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – Режим доступа: https://science-education.ru/ru/article/view?id=8474 (дата обращения: 29.01.2025).
14. Оценка деформируемости эритроцитов у пациентов с гипертонической болезнью / Ю.И. Пивоваров, Л.А. Дмитриева, А.С. Сергеева [и др.] // Артериальная гипертензия. – 2021. – № 27(1). – С. 94-99.
15. Применение высокодобротного термостатируемого акустического интерферометра для исследования изменений структуры белков сыворотки крови человека / В.А. Клемин, С.Н. Гурбатов, И.Ю. Демин [и др.] // Известия Ран. Серия физическая. – 2018. – Т. 82. – № 5. – С. 607-612.
16. Акустическая интерферометрия эритроцитов в условиях гипергликемии in vitro / А.И. Стародумова, Т.А. Веселова, С.А. Боаге [и др.] // Медицинский альманах. – 2018. – № 6. – С. 113-116.
17. Акустическая интерферометрия эритроцитов пациентов со злокачественными новообразованиями желудочно-кишечного тракта на фоне эритроцитарных проявлений

гематологического паранеопластического синдрома / А.И. Стародумова, Т.А. Веселова, Д.Н. Белослудцев [и др.] // Известия уфимского научного центра Ран. – 2019. – № 2. – С. 38-43.
18. Физико-химические параметры эритроцитов крыс с сахарным диабетом I типа до и после курсового перорального введения наноструктурированного комплекса «хитозан-инсулин-наночастицы золота» / Т.А. Веселова, А.С. Корягин, Н.В. Быкова [и др.] // Вестник пермского университета. – 2019. – № 1. – С. 101-108.
19. Акустическая интерферометрия эритроцитов крыс с алиментарной дислипидемией / А.И. Стародумова, Т.А. Веселова, С.А. Мысягин [и др.] // Генетика и разведение животных. – 2019. – №. 4. – С. 81-91.
20. Клемин, В.А. Акустический Анализатор «Биом» для безреагентной лабораторной медицинской диагностики / В.А. Клемин, А.В. Клемина // Известия ЮФУ. Технические Науки. – 2009. – № 10(99). – С. 258-259.
21. Лабораторная диагностика анемий / В.В. Долгов, С.А. Луговская, В.Т. Морозова, М.Е. Почтарь. – Тверь: ООО Губернская Медицина, 2009. – 148 с.
22. Строение и функция эритроцита в норме и при критических состояниях / В.В. Мороз, А.М. Голубев, А.В. Афанасьев [и др.] // Общая Реаниматология. – 2012. – № 8(1). – С. 52-60.
23. Герасимов, Л.В. Микрореологические нарушения при критических состояниях / Л.В. Герасимов, В.В. Мороз, А.А. Исакова // Общая Реаниматология. – 2010. – № 6(1). – С. 74-78.
24. Мороз, В.В. Нарушение наноструктуры мембран эритроцитов при острой кровопотере и их коррекция перфторуглеродной эмульсией / В.В. Мороз, А.М. Черныш, Е.К. Козлова // Общая Реаниматология. – 2011. – № 7(2). – С. 5-9.

REFERENCES

1. Vorobyov S.A. Anemia and diseases of the gastrointestinal tract, features of managementof comorbid patients. *Experimental and clinical gastroenterology*, 2022, no. 200(4), pp. 20-32. (in Russ.)
2. Rybina O.V., Gubkin A.V., Sakhin V.T., Rukavitsyn O.A. Anemic syndrome in gastroenterological diseases: state of the problem and solutions. *Hematology. Transfusiology. Eastern Europe*, 2020, vol. 6, no. 3, pp. 357-371. (in Russ.)
3. Kharitonova E.R., Novikova V.P., Khavkin A.I. Anemia in inflammatory bowel diseases: pathophysiology, diagnosis and treatment. *Questions of Dietology*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 23-34. (in Russ.)
4. Bogdanov A.N., Voloshin S.V., Kulibaba T.G. Anemia in inflammatory bowel diseases: etiology, pathogenesis, diagnosis, treatment. *University Therapeutic Bulletin*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 53-63. (in Russ.)
5. Zhu A., Kaneshiro M., Kaunitz Jd. Evaluation and treatment of iron deficiency anemia: a gastroenterological perspective. *Dig Dis Sci*, 2010, vol. 55, pp. 548-559.
6. Rybina O.V., Sakhin V.T., Gubkin A.V., Rukavitsyn O.A. Features of pathogenesis and ways of correction of anemia in patients with inflammatory bowel diseases. *Oncohematology*, 2024, no. 19(2), pp. 132-140. (in Russ.)
7. Meshcheryakova L.M., Levina A.A., Tsybulskaya M.M., Sokolova T.V. Laboratory capabilities of differential diagnostics of anemias. *Oncohematology*, 2015, no. 10(2), pp. 46-50. (in Russ.)
8. Abdurakhmanov D.T. Iron deficiency anemia in diseases of the gastrointestinal tract. *Pharmateka*, 2012, no. 13(246), pp. 9-14. (in Russ.)
9. Rukavitsyn O.A. Anemia of chronic diseases: individual aspects of pathogenesis and ways of correction. *Oncohematology*, 2016, vol. 11, pp. 44-67. (in Russ.)
10. Zubrikhina G.N., Blindar V.N., Matveeva I.I. Differential diagnostic capabilities in assessing iron deficiency in anemia. *Clinical laboratory diagnostics*, 2016, no. 61(3), pp. 45-66. (in Russ.)
11. Nagornova P.V., Belkin A.V., Dubrovsky V.N., Elifanov A.V., Shalabodov A.D. Evaluation of rheological determinants of human blood with iron deficiency anemia in comparison with similar indicators of the blood of healthy people. *Current issues in biological physics and chemistry*, 2020, vol. 5, no. 3, pp. 499-504. (in Russ.)
12. Levin G.Ya., Popovicheva A.N., Sosnina L.N., Fedorova O.V., Sheremetyev Yu.A. The role of disturbances in the rheological properties of erythrocytes in the pathogenesis of inflammatory bowel diseases in children. *Thrombosis, hemostasis and rheology*, 2017, no. 217, pp. 45-52. (in Russ.)
13. Nagornov Yu.S., Gnoevykh V.V., Smirnova A.Yu., Portnova Yu.A. Mathematical model of erythrocytes for calculating their elastic properties and morphology. *Electronic scientific journal. Modern problems of science and education*, 2013, no.2. Available at: https://science-education.ru/ru/article/view?id=8474 (accessed: 29.01.2025). (in Russ.)
14. Pivovarov Yu.I., Dmitrieva L.A., Sergeeva A.S., Sai O.V., Yankova T.S. Evaluation of erythrocyte deformability in patients with hypertension. *Arterial hypertension*, 2021, no. 27(1), pp. 94-99. (in Russ.)
15. Klemin V.A., Gurbatov S.N., Demin I.Yu. et al. Application of a high-Q thermostatted acoustic interferometer to study changes in the structure of human serum proteins. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physical Series*, 2018, vol. 82, no. 5, pp. 607-612. (in Russ.)

16. Starodumova A.I., Veselova T.A., Boage S.A., Klemina A.V., Veselov A.P. Acoustic interferometry of erythrocytes under conditions of hyperglycemia In Vitro. *Medical almanac*, 2018, no. 6, pp. 113-116. (in Russ.)
17. Starodumova A.I., Veselova T.A., Belosludtsev D.N., Samoilova A.I., Klemina A.V., Veselov A.P. Acoustic interferometry of erythrocytes of patients with malignant neoplasms of the gastrointestinal tract against the background of erythrocyte manifestations of hematological paraneoplastic syndrome. *Bulletin of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2019, no. 2, pp. 38-43. (in Russ.)
18. Veselova T.A., Korâgin A.S., Bykova N.V. et al. Physico-chemical parameters of erythrocytes in rats with the I type diabetes before and after oral course administration of the nanostructured complex "chitosan-insulin-gold nanoparticles". *Bulletin of Perm University. Biology*, 2019, no. 1, pp. 101-108. (in Russ.)
19. Starodumova A.I., Veselova T.A., Mysâgin S.A., Veselov A.P. Acoustic interferometry of erythrocytes with hypercholesterolemia. *Genetics and breeding of animals,* 2019, no. 4, pp. 81-91.(in Russ.)
20. Klemin V.A., Klemina A.V. Acoustic analyzer "Biom" for laboratory medical diagnostics. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*, 2009, no. 10(99), pp. 258-259. (in Russ.)
21. Dolgov V.V. Laboratory diagnosis of anemia. Tver, 2009, pp. 148. (in Russ.)
22. Moroz V.V., Golubev A.M., Afanas′ev A.V., A.N. Kuzovlev, V.A. Sergunova, O.E. Gudkova, Černyš A.M. The structure and function of a red blood cell in health and critical conditions. *General Reanimatology*, 2012, no. 8(1), pp. 52-60. (in Russ.)
23. Gerasimov L.V., Moroz V.V., Isakova A.A. Microrheological disorders in critical conditions. *General Reanimatology*, 2010, no. 6(1), pp. 74-78. (in Russ.)
24. Moroz V.V., Černyš A.M., Kozlova E.K. Impairments in the nanostructure of red blood cell membranes in acute blood loss and their correction with perfluorocarbon emulsion. *General Reanimatology*, 2011, no. 7(2), pp. 5-9. (in Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Татьяна Анатольевна Веселова – кандидат биологических наук, доцент кафедры биохимии и биотехнологии ИББМ, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, e-mail: Veselova-TA@yandex.ru.
Александра Игоревна Садовская – ведущий специалист по регистрации медицинских изделий, ООО «МеЛСиТек», Нижний Новгород, e-mail: Starodumovasa@gmail.com.
Анна Викторовна Клемина – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры акустики радиофизического факультета, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, e-mail: Annet17@yandex.ru.
Елена Вячеславовна Балавина – биолог клинико-диагностической лаборатории ГБУЗ НО «Борская ЦРБ», Бор, e-mail: balavina.elena@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Tatyana A. Veselova – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Biochemistry and Biotechnology, Institute of Biochemistry and Biotechnology, N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, e-mail: Veselova-TA@yandex.ru.
Aleksandra I. Sadovskaya – Leading Specialist in Registration of Medical Devices, MelSyTech, Nizhny Novgorod, e-mail: Starodumovasa@gmail.com.
Anna V. Klemina – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Acoustics, Faculty of Radiophysics, N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, e-mail: Annet17@yandex.ru.
Elena V. Balavina – Biologist of the Clinical Diagnostic Laboratory, Bor Central District Hospital, Bor, e-mail: balavina.elena@yandex.ru.

Для цитирования: Акустическая интерферометрия эритроцитов пациентов с заболеваниями желудочно-кишечного тракта, осложненными гипохромной анемией / Т.А. Веселова, А.И. Садовская, А.В. Клемина, Е.В. Балавина // Современные вопросы биомедицины. – 2025. – Т. 9. – № 2(32). DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_02_5

For citation: Veselova T.A., Sadovskaya A.I., Klemina A.V., Balavina E.V. Acoustic interferometry of erythrocytes in patients with gastrointestinal diseases complicated by hypochromic anemia. *Modern Issues of Biomedicine*, 2025, vol. 9, no. 2(32). DOI: 10.24412/2588-0500-2025_09_02_5