МЕДИЦИНАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ
MEDICAL SCIENCES

CENTRAL ASIAN SCIENTIFIC JOURNAL
ISSN 3135-3061
2026. №4 (32), Том 2. С. 915–922
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.24504148
Сайт журнала: https://cajournal.kz

УДК 534.8:61

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

С.А. Умаров, Б.Н. Жүсіп, Х.Г. О, М.М. Абдашим, В.Е. Ажажа
школа «Болашак», Шымкент, Казахстан

Умаров Султанбек Акмаливич — учащийся 10 ‘‘Д’’ класса, школа «Болашак», Шымкент, Казахстан.

Жүсіп Бексұлтан Нұрланұлы — учащийся 10 ‘‘Д’’ класса, школа «Болашак», Шымкент, Казахстан.

О Хан Ги — учащийся 10 ‘‘Д’’ класса, школа «Болашак», Шымкент, Казахстан.

Абдашим Мухаммадсалих Мухамеддинұлы — учащийся 10 ‘‘Д’’ класса, школа «Болашак», Шымкент, Казахстан.

Ажажа Владислав Евгеньевич — учащийся 10 ‘‘Д’’ класса, школа «Болашак», Шымкент, Казахстан.

Научный руководитель: А.А. Камбарбекова — Преподаватель физики, магистр естественных наук, PhD докторант Южно-Казахстанского педагогического университета имени Ө. Жәнібеков, Шымкент, Казахстан.

© С.А. Умаров, Б.Н. Жүсіп, Х.Г. О, М.М. Абдашим, В.Е. Ажажа, 2026

Аннотация: Ультразвуковая диагностика (УЗИ) широко применяется в медицине, однако её физику трудно понять без эксперимента, поскольку реальный аппарат недоступен. Цель работы – с помощью искусственного интеллекта создать виртуальную лабораторию на HTML и JavaScript и исследовать на ней два базовых закона УЗИ: зависимость длины волны от частоты и отражение ультразвука на границах сред. При изменении частоты от 1 до 15 МГц длина волны в мягких тканях уменьшилась с 1,54 до 0,10 мм; из шести сравнённых пар сред на границе мягких тканей и воздуха отражается 99,9 % энергии, мягких тканей и кости – 42,5 %, мягких тканей и мышц – лишь 0,03 %. Результаты лаборатории совпали с независимым расчётом на Python (расхождение менее 0,001 %). Модель верно передаёт главные закономерности и объясняет, зачем при УЗИ используют гель и почему воздух и кость затрудняют обследование.

Ключевые слова: медицинская физика, ультразвуковая диагностика, компьютерное моделирование, искусственный интеллект, виртуальная лаборатория, акустические волны, акустическое сопротивление, коэффициент отражения.

Введение

Медицинская физика объясняет, как законы физики работают в больнице: на них основаны рентген, томография, УЗИ, ЭКГ и лазерная хирургия. Современная медицина технологична, и без понимания физики приборов невозможно объяснить, как устроены диагностика и лечение [1]. Однако при подготовке школьников, планирующих связать жизнь с медициной, упор обычно делается на химию и биологию, а роль физики недооценивается. В результате возникает разрыв между растущим интересом учащихся к медицине и

ограниченным использованием физики как инструмента профессионально ориентированного обучения [2].

Одним из самых распространённых методов обследования является ультразвуковая диагностика (УЗИ). Она не использует ионизирующее излучение, поэтому её можно проводить многократно, в том числе при наблюдении за беременностью, а аппарат работает в реальном времени и показывает движение органов, например сердца и кровотока [3, 4]. Ультразвук применяют для исследования брюшной полости, щитовидной железы, сосудов, сердца, мышц и суставов [4]. Но освоить физику УЗИ на практике сложно: настоящий аппарат стоит дорого и в школе недоступен.

Решением может стать компьютерная модель, которая заменяет часть эксперимента: параметры можно менять за секунды, сразу строить графики и повторять опыт сколько угодно раз, причём безопасно и с любого устройства. Сочетание искусственного интеллекта (ИИ) с наглядной визуализацией повышает эффективность обучения физике [5], а модели «виртуальных пациентов» на основе машинного обучения помогают восполнять нехватку реальных клинических данных [6, 7]. ИИ умеет по описанию задачи писать программный код, объяснять формулы и помогать с оформлением, что позволяет быстро получить рабочий прототип лаборатории даже тем, кто только учится программировать. Но ИИ может ошибаться в числах и формулах, а модель всегда упрощает реальность, поэтому все результаты необходимо проверять.

Цель работы – создать виртуальную лабораторию по физике ультразвука и с её помощью изучить, как длина волны зависит от частоты и как ультразвук отражается на границах сред. Задачи: изучить литературу по медицинской физике в школе и по физическим основам УЗИ; с помощью ИИ разработать лабораторию на HTML и JavaScript; провести два вычислительных эксперимента; проверить правильность модели независимым расчётом; оценить возможности использования лаборатории на занятиях.

Гипотеза: применение виртуальной лаборатории позволит наглядно показать скрытую физику УЗИ, а её результаты, полученные по формулам длины волны и коэффициента отражения (формулы (1) и (3) ниже), совпадут с ручным расчётом и покажут, что почти вся энергия отражается на границах «мягкая ткань – воздух» и «мягкая ткань – кость», тогда как между разными мягкими тканями отражается лишь малая доля.

Литературный обзор

Медицинская физика в школьном образовании

Курс медицинской физики традиционно преподают в медицинских колледжах и вузах, где основное внимание уделяют действию электрического тока и излучений на организм. В старшей школе (9–11 классы) её элементы удобно вводить в профильных классах и во внеурочной деятельности, поскольку разделы медицинской физики опираются на базовый школьный курс: механика связана с биомеханикой, гидродинамика – с движением крови, акустика – с физикой слуха и основами ультразвуковой диагностики, термодинамика – с терморегуляцией, электричество – с ЭКГ, оптика – с работой глаза, ядерная физика – с рентгеном и томографией [1, 2]. Курс целесообразно строить по трём принципам: согласовывать темы со школьной программой, в каждом разделе повторять теорию, разбирать применение законов к организму и решать задачи с реальными физиологическими параметрами, а также проводить практические и лабораторные работы. Связывание физических понятий с медицинскими технологиями повышает мотивацию: физика перестаёт быть только теоретическим предметом и становится инструментом для объяснения работы профессиональных приборов. Виртуальная лаборатория по УЗИ как раз относится к практической части раздела «Акустика».

Физические основы ультразвуковой диагностики

Подробное изложение физики УЗИ дано в монографиях [3, 4, 8]; здесь приведены только необходимые для работы сведения. Ультразвук – это механические упругие волны с частотой выше 20 кГц, то есть выше предела слышимости человека. Это продольные волны: частицы среды колеблются вдоль направления распространения, создавая области сжатия и

разрежения; в вакууме такие волны не распространяются [9, 10]. В диагностике используют частоты примерно от 1 до 20 МГц. Ультразвук можно направлять узким пучком, он отражается, преломляется и поглощается, как и обычные волны.

Длина волны λ связана со скоростью звука v в среде и частотой f формулой:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

В мягких тканях скорость звука близка к 1540 м/с и почти одинакова для разных органов, поэтому аппарат использует именно это значение; в воздухе она составляет около 343 м/с, в кортикальной кости – около 4080 м/с [4]. Чем выше частота, тем короче волна. Короткая волна позволяет различать более мелкие детали, то есть повышает разрешение, но сильнее поглощается тканями: в мягких тканях ослабление растёт примерно пропорционально частоте (порядка 0,5 дБ на сантиметр пути на каждый мегагерц) [8]. Поэтому для поверхностных органов (щитовидная железа) берут 7–15 МГц, а для глубоких (органы брюшной полости) – 2–5 МГц.

Акустическое сопротивление (импеданс) равно произведению плотности среды ρ на скорость звука в ней:

$$Z = \rho \cdot v \quad (2)$$

и показывает, насколько среда «сопротивляется» прохождению волны. В медицине его обычно выражают в мегарейлах (МРейл) [11]. У мягких тканей Z близко к 1,6 МРейл, у воздуха – около 0,0004 МРейл, у кости – около 7,8 МРейл.

Когда волна падает перпендикулярно на границу двух сред с сопротивлениями Z_1 и Z_2, часть энергии отражается, а часть проходит дальше. Доля отражённой энергии (коэффициент отражения по интенсивности) и доля прошедшей равны:

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (3)$$

$$T = 1 - R \quad (4)$$

Если сопротивления одинаковы, то R = 0 и граница «невидима»; чем сильнее различие Z, тем больше отражение. Именно отражённые волны (эхо) и создают изображение. Из-за очень большого различия Z на границе «кожа – воздух» почти вся энергия отражалась бы назад, поэтому на кожу наносят гель, вытесняющий воздух между датчиком и телом.

Датчик содержит пьезоэлектрические кристаллы: под действием электрического напряжения они излучают короткий ультразвуковой импульс (обратный пьезоэффект), а возвращающееся эхо превращают обратно в электрический сигнал (прямой пьезоэффект). Глубина отражающей границы определяется по времени задержки эха t:

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (5)$$

Деление на два нужно потому, что волна проходит путь до границы и обратно. В мягких тканях на каждый сантиметр глубины приходится около 13 мкс задержки. Яркость точки на экране зависит от амплитуды эха, поэтому границы с большим различием Z выглядят ярче.

Материалы и методы

Справочные данные (плотность и скорость звука в тканях) и формулы взяты из научных публикаций и монографий по физике медицинского ультразвука [3, 4, 8, 9]. Дополнительный поиск проводили в Google Scholar по запросам «acoustic impedance soft tissue», «ultrasound reflection coefficient tissue interface», «физические основы ультразвуковой диагностики».

Для подготовки кода виртуальной лаборатории и чернового текста работы по заданной структуре использовали ИИ-ассистента Claude: ему описали, какие формулы нужны, какие среды выбрать и какие графики построить. Чтобы не полагаться на ИИ слепо, результаты кода сравнили с независимым расчётом и проверили физическими условиями, а текст и данные перечитали и сверили с литературой.

© Central Asian Scientific Journal, 2026

Лаборатория представляет собой один файл lab.html, который открывается в любом браузере без установки программ; её онлайн-версия размещена на GitHub Pages [12]: https://vlad-prorok.github.io/Ultrasound-lab/. HTML задаёт интерфейс (вкладки, ползунок, выпадающие списки, таблицы), JavaScript выполняет расчёты и рисует графики на элементе canvas. Расчётная часть отделена от интерфейса и состоит из четырёх коротких функций: длина волны (1), акустическое сопротивление (2), коэффициент отражения (3) и коэффициент прохождения (4).

Параметры сред приведены в таблице 1. Это усреднённые справочные значения; в реальных тканях они зависят от состава и температуры.

Таблица 1 – Параметры сред, использованные в модели

Среда	Плотность ρ, кг/м³	Скорость звука v, м/с	Сопротивление Z, МРейл
Воздух	1,2	343	0,000412
Жировая ткань	928	1450	1,3456
Вода	998	1482	1,4790
Мягкие ткани	1060	1540	1,6324
Кровь	1060	1570	1,6642
Мышцы	1070	1580	1,6906
Кость	1900	4080	7,7520

В эксперименте 1 частоту ползунком меняли в диапазоне 0,5–20 МГц; для расчёта взяли семь значений (1; 2; 3,5; 5; 7,5; 10 и 15 МГц) и скорость 1540 м/с для мягких тканей (для сравнения – воду и кость). В эксперименте 2 выбирали пары сред и считали R и T. Проверка модели состояла из двух частей. Первая: значения из JavaScript-кода сравнили с независимым расчётом на Python, написанным отдельно. Вторая: проверили физические условия – сумма R + T равна 1, R не зависит от порядка сред, при $Z_1 = Z_2$ отражение равно нулю.

Результаты и обсуждение

Оба эксперимента можно воспроизвести в интерактивном виде в онлайн-лаборатории [12]: https://vlad-prorok.github.io/Ultrasound-lab/. Вкладка «Эксперимент 1. λ(f)» позволяет менять частоту ползунком, выбирать среду и записывать точки в таблицу, вкладка «Эксперимент 2. Отражение» – выбирать пары сред и смотреть R и T. Читатель может сам проверить значения из таблиц 2 и 3.

Эксперимент 1. Зависимость длины волны от частоты

Результаты расчёта длины волны в трёх средах приведены в таблице 2, график – на рисунке 1.

Таблица 2 – Длина ультразвуковой волны λ, мм

f, МГц	Мягкие ткани (1540 м/с)	Вода (1482 м/с)	Кость (4080 м/с)
1,0	1,540	1,482	4,080
2,0	0,770	0,741	2,040
3,5	0,440	0,423	1,166
5,0	0,308	0,296	0,816
7,5	0,205	0,198	0,544
10,0	0,154	0,148	0,408
15,0	0,103	0,099	0,272

© Central Asian Scientific Journal, 2026

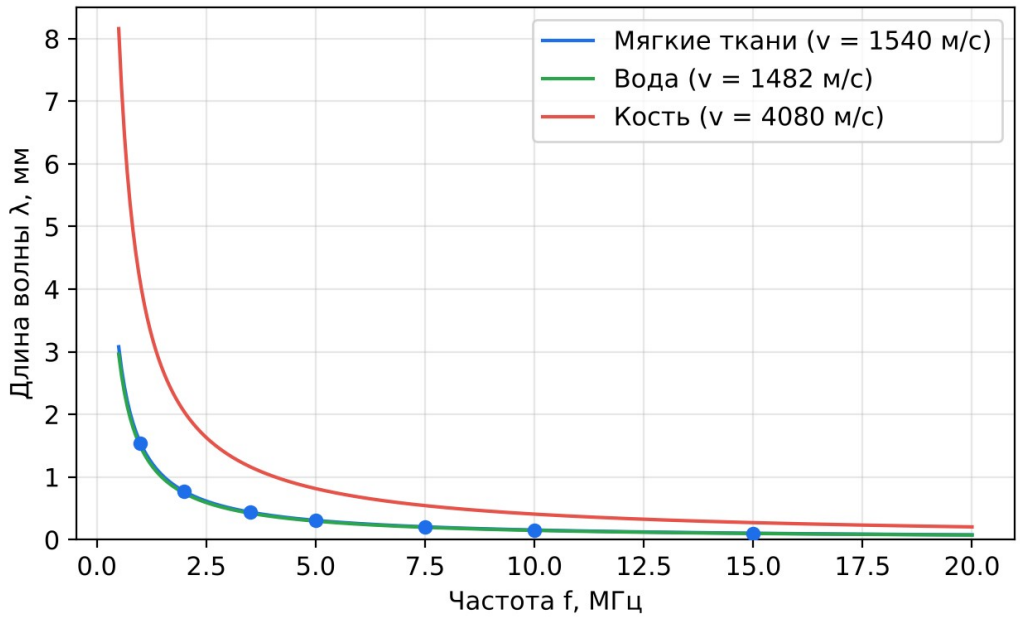


Рисунок 1 - Зависимость длины волны от частоты в разных средах

Зависимость обратно пропорциональная: при увеличении частоты в 15 раз (с 1 до 15 МГц) длина волны в мягких тканях уменьшилась во столько же раз – с 1,54 до 0,10 мм. Произведение λ·f остаётся постоянным и равно скорости звука. В кости при той же частоте волна примерно в 2,6 раза длиннее, так как там звук распространяется быстрее. Для типичной частоты 3,5 МГц, используемой при исследовании брюшной полости, λ = 0,44 мм.

Эксперимент 2. Отражение ультразвука на границе двух сред

Сравнили шесть пар сред; результаты расчёта приведены в таблице 3, графики – на рисунках 2 и 3.

Таблица 3 – Отражение и прохождение ультразвука на границе сред

Пара сред	Z_1, МРейл	Z_2, МРейл	R, %	T, %
Мягкие ткани → Воздух	1,6324	0,000412	99,9	0,101
Мягкие ткани → Кость	1,6324	7,7520	42,5	57,5
Жировая ткань → Мышцы	1,3456	1,6906	1,29	98,7
Вода → Мягкие ткани	1,4790	1,6324	0,243	99,76
Мягкие ткани → Мышцы	1,6324	1,6906	0,0307	99,969
Мягкие ткани → Кровь	1,6324	1,6642	0,00931	99,991

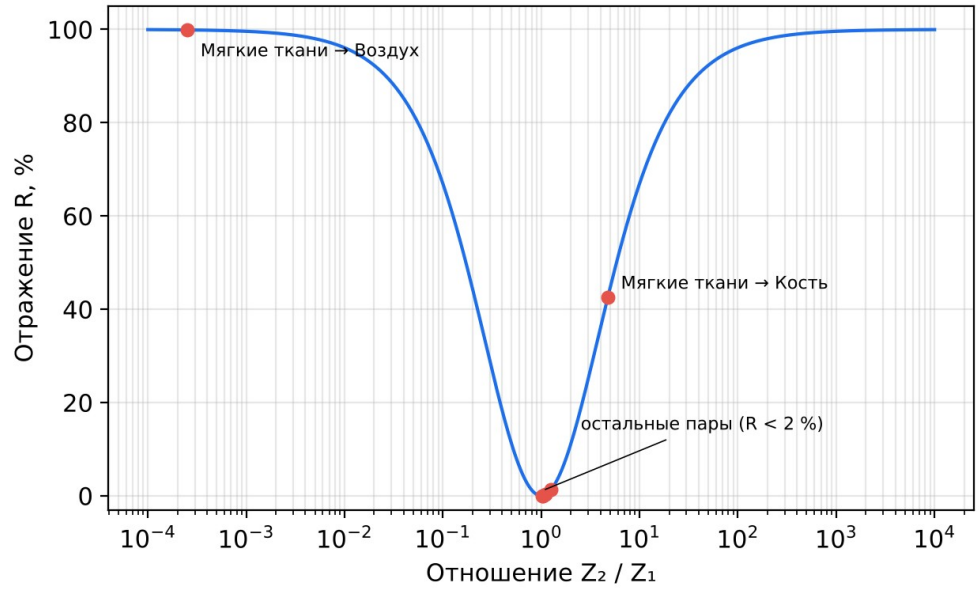


Рисунок 2 - Зависимость отражения R от отношения Z_2/Z_1

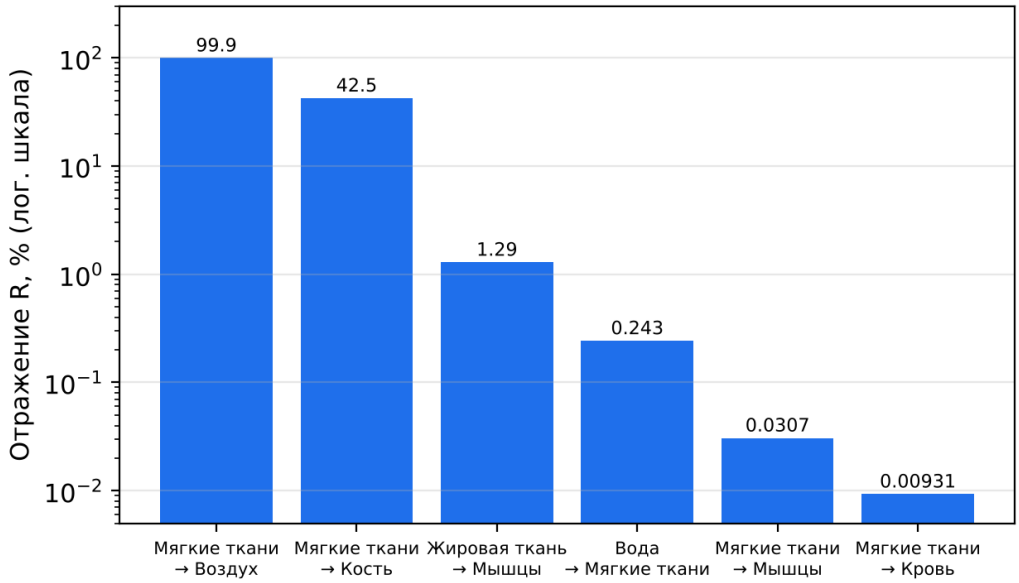


Рисунок 3 - Сравнение отражения для разных пар сред

Сильнее всего ультразвук отражается на границе «мягкие ткани – воздух»: R = 99,9 %, проходит лишь около 0,1 %. Это объясняет, зачем при УЗИ используют гель. На границе «мягкие ткани – кость» R = 42,5 %: за костью получается «акустическая тень», поэтому органы за костями плохо видны. Между жиром и мышцами отражается 1,29 %, между мягкими тканями и мышцами – 0,03 %, а между мягкими тканями и кровью – всего 0,009 %. Такие границы дают слабое эхо, но именно эти малые отражения и формируют изображение органов.

Проверка модели

Значения из лаборатории сравнили с независимым расчётом на Python (таблица 4).

Таблица 4 – Сравнение лаборатории с независимым расчётом (эксперимент 2)

Пара сред	R по расчёту, %	R из лаборатории, %	Расхождение, %
Мягкие ткани → Воздух	99,9	99,9	< 0,001

Пара сред	R по расчёту, %	R из лаборатории, %	Расхождение, %
Мягкие ткани → Кость	42,5	42,5	< 0,001
Жировая ткань → Мышцы	1,29	1,29	< 0,001
Вода → Мягкие ткани	0,243	0,243	< 0,001
Мягкие ткани → Мышцы	0,0307	0,0307	< 0,001
Мягкие ткани → Кровь	0,00931	0,00931	< 0,001

Для обоих экспериментов максимальное относительное расхождение оказалось меньше 0,001 %: числа совпали вплоть до погрешности округления. Физические условия тоже выполнились: сумма R + T равна 1 для всех пар сред, коэффициент не зависит от порядка сред, при одинаковых средах отражение равно нулю. Качественные выводы согласуются с учебной литературой по физике УЗИ [3, 4, 8]: граница ткань – воздух отражает практически всё, граница ткань – кость – значительную долю, границы между мягкими тканями – малую. Гипотеза подтвердилась. Следует учитывать, что такое сравнение проверяет лишь правильность реализации формул в коде; сами формулы и параметры сред мы сверяли с литературой.

Ограничения модели и применение на занятиях

Модель имеет ограничения: она рассматривает только перпендикулярное падение волны (при наклонном появляется преломление и формулы усложняются); не учитывает ослабление волны в тканях, которое в реальном УЗИ сильно влияет на глубину проникновения; использует усреднённые плотность и скорость звука, различающиеся у разных людей; не строит изображение, а показывает только физические величины.

Лабораторию можно использовать на уроке физики в разделе «Акустика» или на занятии по медицинской физике: например, учащиеся могут самостоятельно найти, какой частотой лучше исследовать щитовидную железу, а какой – глубокие органы, или объяснить, зачем при УЗИ нужен гель.

Заключение

Создана виртуальная лаборатория на HTML и JavaScript с применением ИИ и проведены два вычислительных эксперимента. Основные выводы:

Актуальность подхода. Анализ литературы показал, что введение элементов медицинской физики в старшие классы помогает преодолеть разрыв между интересом школьников к медицине и преподаванием физики, а компьютерное моделирование и ИИ делают сложные явления наглядными.

Результаты моделирования. Длина волны обратно пропорциональна частоте (в мягких тканях от 1,54 мм при 1 МГц до 0,10 мм при 15 МГц), а отражение определяется различием акустических сопротивлений: 99,9 % на границе ткань – воздух, 42,5 % на границе ткань – кость и менее 2 % между мягкими тканями. Это объясняет применение геля и «акустическую тень» за костью.

Проверка модели. Результаты лаборатории совпали с независимым расчётом (расхождение менее 0,001 %), физические условия выполнены. ИИ оказался полезным помощником при создании модели, но результаты необходимо проверять самостоятельно.

Гипотеза подтвердилась. В дальнейшем планируется добавить ослабление волны с глубиной, расчёт глубины по времени эха, наклонное падение волны, анимацию импульса и простую модель построения изображения, а также сравнить результаты с измерениями на реальном аппарате.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность А. С. Аманкуловой за поддержку и содействие в развитии проектной и исследовательской деятельности среди учащихся.

Список литературы:

1. Заяц А. В. Актуальность преподавания медицинской физики в школе для самоопределения школьников // Научные высказывания. – 2023. – С. 68.

2. Kambarbekova A., Ualikhanova B., Sarı M. An experimental evaluation of the effectiveness of integrating elements of medical physics into the school curriculum using artificial intelligence tools // Педагогика и методы обучения. – 2026. – № 2 (75). – С. 85–95.

3. Hill C. R., Bamber J. C., ter Haar G. R. Physical principles of medical ultrasonics. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2004.

4. Hoskins P. R., Martin K., Thrush A. Diagnostic ultrasound: physics and equipment. 3rd ed. Boca Raton : CRC Press, 2019.

5. Coban A. et al. AI support meets AR visualization for Alice and Bob: personalized learning based on individual ChatGPT feedback in an AR quantum cryptography experiment for physics lab courses // EPJ Quantum Technology. – 2025. – Vol. 12, No. 1. – P. 15.

6. Barakat C. S. et al. Developing an artificial intelligence-based representation of a virtual patient model for real-time diagnosis of acute respiratory distress syndrome // Diagnostics. – 2023. – Vol. 13, No. 12. – P. 2098.

7. Sharafutdinov K. et al. Computational simulation of virtual patients reduces dataset bias and improves machine learning-based detection of ARDS from noisy heterogeneous ICU datasets // IEEE Open Journal of Engineering in Medicine and Biology. – 2023. – Vol. 5. – P. 611–620.

8. Szabo T. L. Diagnostic ultrasound imaging: inside out. 2nd ed. Amsterdam : Academic Press, 2014.

9. Kinsler L. E., Frey A. R., Coppens A. B., Sanders J. V. Fundamentals of acoustics. 4th ed. New York : John Wiley & Sons, 2000.

10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика : в 10 т. Т. 6. Гидродинамика. 5-е изд. Москва : Физматлит, 2001.

11. Ремизов А. Н., Максина А. Г., Потапенко А. Я. Медицинская и биологическая физика. Москва : Дрофа, 2003.

12. Виртуальная лаборатория: физические основы УЗИ [Электронный ресурс]. URL: https://vlad-prorok.github.io/Ultrasound-lab/ (дата обращения: 24.11.2026).

13. Колесниченко Ю. Ю., Колесниченко О. Ю. Разработка алгоритма машинного зрения Uzgraph для ультразвуковых диагностических изображений: трехмерный векторный анализ.

© Central Asian Scientific Journal, 2026