

К 80-летию ПОБЕДЫ В ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЕ

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Акустика и оборона Отечества*

О.В. Руденко

Дан краткий обзор основных достижений в области прикладной акустики, служивших нуждам обороны в период Великой Отечественной войны, и их последующее развитие. Обзор условно разделён на три части: 1) подводный звук, 2) воздушная акустика и 3) приложения к медицине. В каждой части даны исторические сведения о направлениях важнейших разработок военных лет, а также об их развитии после Победы. Указаны физические явления, лежащие в основе технических решений, подчёркнута акустическая специфика.

Ключевые слова: гидролокатор, подводный звук, шумопеленгаторы, судовая и авиационная акустика, параметрический излучатель, подводные лодки, минное и торпедное оружие, пеленгация, самолёты, медицинский ультразвук

PACS numbers: 07.64.+z, 43.30.+m, 87.50.Y–

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.05.039976>

Содержание

1. Введение (1268).
 2. Специфика акустики (1268).
 3. Подводный звук (1270).
 4. Воздушная акустика (1275).
 5. Медицинские приложения (1277).
 6. Заключение (1279).
- Список литературы (1280).

1. Введение

Коротко о содержании трёх основных разделов.

Подводный звук. Первые идеи и работы Константина Васильевича Шиловского и Поля Ланжевена (Paul Langevin). Использование пьезоэффекта в гидролокации. Первая мировая война, потери в подводных сражениях. Размагничивание кораблей (Анатолий Петрович Александров, Игорь Васильевич Курчатов) и переход от магнитного взрывателя мин к акустическому (Рудольф Хёлль) (Rudolf Hell). Сверхдальнее распространение звука в океане, открытие подводного звукового канала (Морис Эвинг (Maurice Ewing), Леонид Максимович Бреховских,

Лазарь Давидович Розенберг). Появление атомного флота и противолодочных подводных ракет. Векторные приёмники звука. Передача сигналов по каналу воздух – вода. Нелинейные явления и параметрические антенны.

Воздушная акустика. Пассивные акустические средства обнаружения самолётов (в эпоху до появления радиолокации, 1917 – 1940 гг.). Станции орудийной наводки. Сильный звук в воздушной среде. Действие мощных излучателей и волн звукового удара. "Адский косильщик" Владимира Михайловича Мясищева. Работы по созданию сверхзвуковых пассажирских самолётов нового поколения и направленной передачи звуковых сигналов пучком интенсивного ультразвука (УЗ).

Медицинские приложения. Развитие ультразвуковой диагностики начиная с 1942 г. до появления современных сонографов (приборов УЗИ). Интенсивный УЗ в послевоенные годы. Первые шаги акустической хирургии (братья Фрэнк и Билл Фрай (Frank and Bill Fry), Андрей Константинович Буров). Современное использование нелинейного УЗ. Радиационное давление, эластография. Тепловое, силовое и ударно-волновое воздействие.

2. Специфика акустики

Сообщение на сессии ОФН РАН было адаптировано к интересам физической аудитории. Поэтому казалось логичным напомнить физикам о специфике акустики, понимаемой в широком смысле. Её первая особенность — разнообразие тематики и "разбросанность" по всем естественно-научным отделениям РАН. На долю фи-

О.В. Руденко

- (1) Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы 1, стр. 2, 119991 Москва, Российская Федерация
 - (2) Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, 119991 Москва, Российская Федерация
 - (3) Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская 10, 123995 Москва, Российская Федерация
- E-mail: rudenko@acs366.phys.msu.ru

Статья поступила 31 июля 2025 г.

* Обзор написан на основе доклада, представленного на Научной сессии Отделения физических наук Российской академии наук (ОФН РАН) "К 80-летию Великой Победы: вклад отечественных физиков" 14 мая 2025 г. (см. УФН 195 (12) ii (2025)).

зики традиционно приходится только порядка 20 % всех акустических проблем.

Акустикой занимаются в Отделении наук о Земле (волны в атмосфере, океане, геофизических структурах), Отделении энергетики, машиностроения, механики и процессов управления (техническая акустика, шумы и вибрации, судовая и авиационная акустика, промышленная диагностика), Отделении математических наук (моделирование, численные методы, математическая физика, обратные задачи), Отделениях биологических и физиологических наук (волны в живых системах и тканях, воздействие на организмы), Отделении медицинских наук (акустическая диагностика, терапия и хирургия), Отделении нанотехнологий и информационных технологий (обработка и передача сообщений, информатика), Отделении химии и наук о материалах (воздействие на реакции, технологии, формирование структур, метаматериалы). Есть ещё разделы, в которых изучают образование и восприятие речи, акустику эхолоцирующих животных, архитектурную акустику, акустику музыкальных инструментов, электроакустику и массу других важных проблем, лежащих обычно в стороне от физических наук.

То же можно сказать и о формальных названиях специальностей выдающихся учёных, работавших в области акустики. Вот данные о некоторых академиках [1].

Виктор Анатольевич Акуличев (механика, океанология), Николай Павлович Алёшин (металлургия и конструкционные материалы, в том числе технология сварки металлов, диагностика материалов), Николай Николаевич Андреев (акустика), Леонид Максимович Бреховских (океанология), Фёдор Васильевич Бункин (физика), Андрей Викторович Гапонов-Грехов (физика), Георгий Сергеевич Голицын (физика атмосферы), Юрий Васильевич Гуляев (элементная база, материалы вычислительной техники и диагностика), Григорий Иванович Долгих (океанология), Юрий Николаевич Кульчин (нанотехнологии), Евгений Анатольевич Мареев (физика атмосферы), Владимир Елифёрьевич Накоряков (теплофизика), Роберт Искандерович Нигматулин (механика), Сергей Аполлонович Никитов (вычислительные, локационные, телекоммуникационные системы и элементная база), Владимир Григорьевич Пешехонов (процессы управления), Владислав Иванович Пустовойт (автоматизация, в том числе научное приборостроение), Александр Александрович Харкевич (механика и процессы управления).

Укажем на другие особенности акустики, о которых часто забывают.

Акустические задачи выделяются гигантским диапазоном: от 10^{-13} см (капельная модель ядра) до межгалактических масштабов (формирование структур галактик).

Рисунок 1 иллюстрирует динамику атомного ядра в рамках простейшей капельной модели. Моды малых акустических колебаний сферической капли (верхние фрагменты на рис. 1) рассчитал Джон Уильям Стретт (лорд Рэлей) [2]. С увеличением амплитуды колебания становятся нелинейными (нижние фрагменты). Сфера принимает вид "гантели" и разрывается на две части. Сильно нелинейные акустические колебания капельного ядра могут возбуждаться попаданием в тяжёлое ядро нейтрона. При этом происходит деление ядра, размножение нейтронов и цепная реакция — ядерный взрыв.

Рисунок 2 иллюстрирует противоположный случай очень больших масштабов. Как известно, акустические

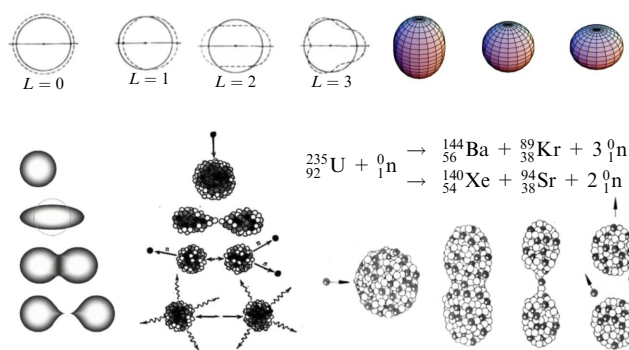


Рис. 1. Акустические колебания в рамках капельной модели ядра.

волны были ответственны за формирование структуры Вселенной после Большого взрыва [3]. На рисунке 2а изображена карта анизотропии реликтового излучения, соответствующая распределению барионного вещества. Распределение сформировалось под действием акустических волн плотности, возникших в ранней Вселенной, когда она была заполнена горячей плазмой.

На рисунке 2б изображены сгустки межзвёздного вещества, сформированные потоками частиц. Образуются ячеистые структуры галактик. Процесс описывается 3D уравнением Бюргерса — основным уравнением нелинейной акустики. Это модифицированная модель Зельдовича (Сергея Николаевича Гурбатова — Александра Ивановича Саичева — Сергея Фёдоровича Шандарина) [4]. На языке волновой физики сгустки материи соответствуют ударным фронтам.

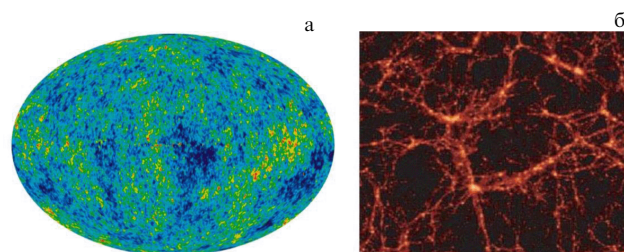


Рис. 2. (а) Распределение плотности вещества во Вселенной, сформированное упругими волнами; (б) формирование фронтов (ударных волн) в приближении Якова Борисовича Зельдовича.

Ещё одной особенностью является уникальная проникающая способность акустических волн. Звук распространяется под водой на тысячи км, проникает сквозь Землю и тело человека. На рисунке 3а изображена трасса дальнего распространения звука в Индийском океане — от берегов Австралии до архипелага Чагос. Измерения проводились сотрудниками кафедры акустики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ). На рисунке 3б показан результат акустического зондирования до глубин 15 км грязевого вулкана Шуго [5]. Структура ядра Земли (наличие твёрдого внутреннего и жидкого внешнего ядра) тоже установлена акустическими методами (рис 3в). Позднее эта структура была уточнена на основе новых сейсмических данных [6].

Нижние фрагменты рис. 3 представляют акустическую визуализацию лица младенца в утробе матери (рис. 3г), а также результат диагностики трещины внут-

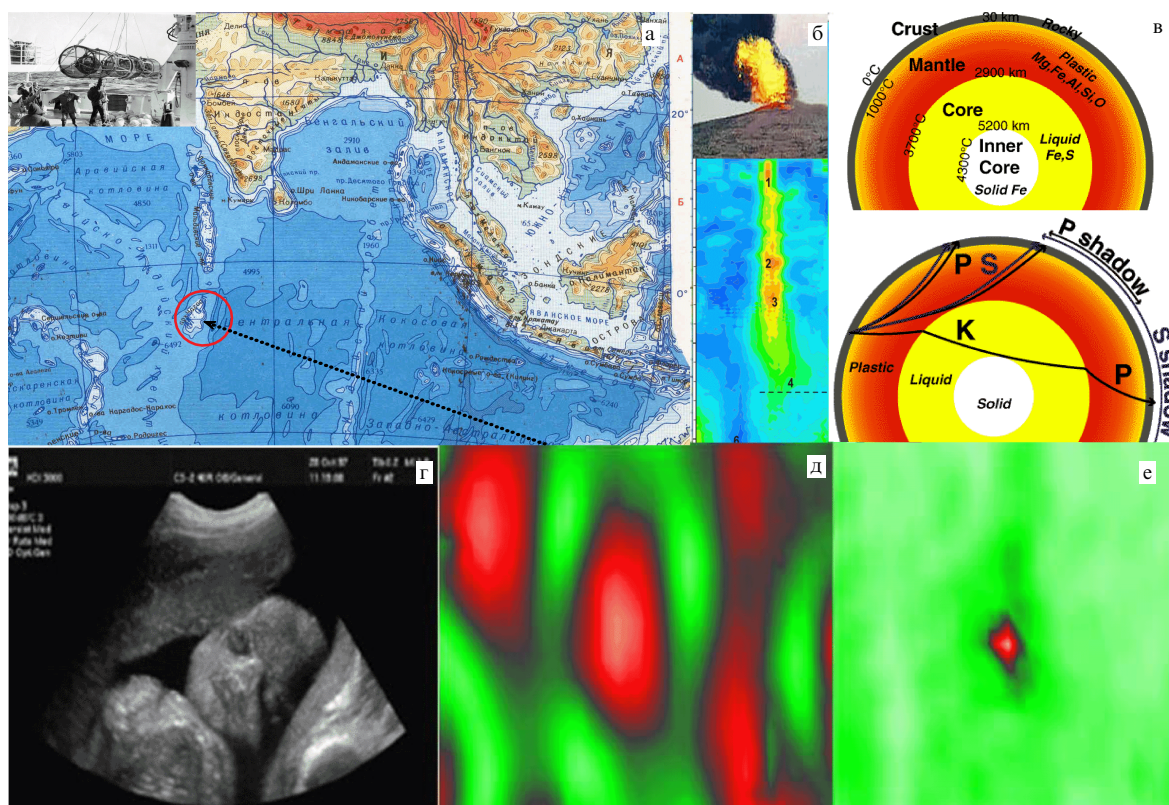


Рис. 3. Примеры уникальной проникающей способности акустических волн. (а) Трасса дальнего распространения звука в Индийском океане. (б) Глубинный разрез грязевого вулкана. (в) Разрез Земли: выделены твёрдое внутреннее и жидкое внешнее ядро, мантия, земная кора. В сейсмике приняты обозначения: P — продольная волна в мантии или земной коре, S — сдвиговая волна в мантии или земной коре, K — это волна во внешнем ядре. Нижний ряд: (г) лицо младенца в утробе матери, (д) рельеф колебаний пластины, (е) нелинейный отклик внутренней трещины.

ри колеблющейся пластины (картина "паразитных" изгибов поверхности на основной частоте (рис. 3д) и саму трещину при регистрации седьмой гармоники (рис. 3е)).

Подводя итог, нужно отметить, что акустика ориентирована в основном на приложения. Доля фундаментальных исследований в ней невелика. Она мало занимается изучением свойств материи, пространства — времени и Вселенной. Однако акустика заметно повлияла на работы, которые принято считать фундаментальными. Можно указать эффекты, известные акустикам задолго до того, как их авторы получили признание в других разделах физики. Это, конечно, излучение при сверхзвуковом движении тела, описанное Доплером в 1847 г. (см. [7]) и удостоенное внимания за слабый оптический аналог — эффект Сергея Ивановича Вавилова — Павла Алексеевича Черенкова [8] (Нобелевская премия по физике, 1958 г. — Игорь Евгеньевич Тамм, Илья Михайлович Франк, Павел Алексеевич Черенков). Акустический эффект гораздо сильнее оптического; ударная "волна Маха" от сверхзвукового самолёта, летящего на малой высоте, может использоваться как оружие (см. раздел 4).

Артур Эшкин (Arthur Ashkin) в 1987 г. создал "лазерный пинцет" для удержания и перемещения молекул, пересадил бактерии и вирусы из одного образца в другой [9] (Нобелевская премия по физике, 2018 г.). Основой является давление света, наблюдавшееся Петром Николаевичем Лебедевым в 1899 г. Однако мало кто обращал внимание на очевидный факт: давление звука в 100000 раз сильнее. Поэтому его наблюдал ещё Майкл Фарадей (Michael Faraday) в 1831 г. (см. [10]), а "ультра-

звуковой пинцет" уже существовал задолго до А. Эшкина (Роберт Апфель (Robert Apfel), см. [11]). Вторая сила, действующая в лазерном (акустическом) пинцете, пропорциональна градиенту плотности энергии, усреднённой по быстрому осцилляциям. В физике СВЧ-волн она известна как сила Андрея Викторовича Гапонова-Грехова — Михаила Адольфовича Миллера [12].

Переходное излучение электромагнитных волн, предсказанное Виталием Лазаревичем Гинзбургом и Ильёй Михайловичем Франком в 1945 г. [8], в акустике обсуждается реже, чем в оптике. Однако акустический эффект и в этом случае гораздо сильнее оптического. Его наблюдал (слышал) каждый пассажир поезда, движущегося по мосту с периодически расположенными фермами, или при поездке в автомобиле мимо череды колонн или других конструкций, создающих сильные неоднородности границ.

Это любопытные примеры. Полный перечень "приоритетных" акустических явлений — не цель этой заметки.

3. Подводный звук

Русский инженер Константин Васильевич Шиловский (рис. 4) в 1912 г. высказал идею прибора, основанного на посылке ультразвукового (УЗ) луча и его отражении препятствием [13]. Шиловский придумал эхолокатор для предотвращения столкновения судна с плавающими льдинами. Вспомним: столкновение "Титаника" с айсбергом произошло именно в 1912 г. Во время Первой

мировой войны возникла необходимость использовать локатор для обнаружения немецких подводных лодок, потопивших несколько английских крейсеров и лайнер "Лузитания" (1200 погибших). Шиловский, живший тогда уже за границей, направил правительству Франции такое письмо: "Если взять совершенно плоскую пластину размером 1 м на 1,5 м, полностью погружённую в воду, и заставить её колебаться с частотой до 100 кГц, то она начнёт излучать в воду поток механической энергии, которую мы можем назвать "ультразвуковой". Всё то, что известно про распространение звука в воде, приводит нас к заключению, что коэффициент поглощения звуковой энергии в воде будет очень мал, намного меньше, чем для света, и как следствие, данная энергия будет распространяться под водой со скоростью звука на очень большие расстояния... Таким образом, есть возможность... излучать... лучи "механического света", ...освещая мрак под водой, рассеивая его и ища там то, что надо найти: мины, подводные лодки и пр."

Идею Константин Васильевич Шиловский осуществил в 1916 г. вместе с П. Ланжевром (см. рис. 4). Она заключалась в том, чтобы возбудить цилиндрический слюдяной конденсатор высокочастотным звуковым генератором, создающим неслышимые УЗ-колебания.

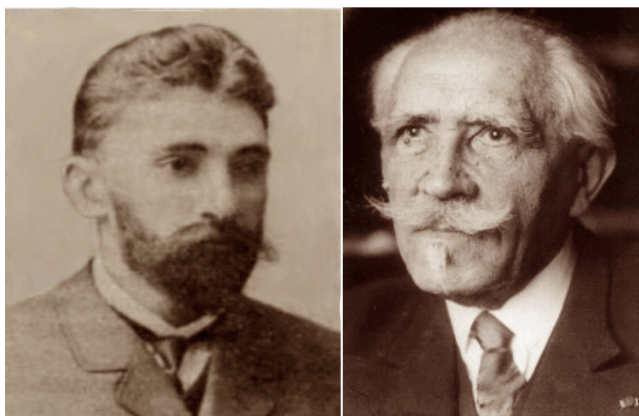


Рис. 4. Константин Васильевич Шиловский и Поль Ланжевен.

В 1917 г. Поль Ланжевен обратил внимание на возможности пьезоэлектрического эффекта, открытого Жаком и Пьером Кюри (Jacques and Pierre Curie) в 1880 г., чтобы сделать передатчики и приёмники для применения

под водой. Он использовал кварцевый приёмник, электроламповый усилитель и в 1918 г. изготовил преобразователь на основе слоёв сталь–кварц–сталь. С его помощью расстояние передачи сигнала было увеличено до 8 км.

Во время Первой мировой войны подводные лодки начали обнаруживать с помощью пассивных шумопеленгаторов. В дальнейшем появились гидролокаторы, работавшие в активном режиме. Эффективность боевого применения подводных лодок иллюстрируют такие цифры. Надводными кораблями в Первую мировую войну было потоплено 217 судов, а подводными лодками — около 6 тыс. Этот факт мотивировал как массовое строительство подводных кораблей, так и создание более совершенной гидроакустической аппаратуры.

Во время Второй мировой войны были разработаны: торпеды с акустическим наведением, акустические морские мины и сканирующий гидролокатор. Всего Германия потеряла 781 подводную лодку.

В СССР к началу войны из 213 подводных лодок 176 были вооружены шумопеленгаторами типа "Марс". Часть из них оснащалась также станциями подводной связи "Вега" и "Сириус" и английскими гидролокаторами "Дракон". Станциями звукоподводной связи, эхолотами и гидролокаторами оснащались также надводные корабли [14]. Совершенствование аппаратуры и тактических приёмов её использования позволило перейти к скрытным бесперископным атакам. Первую осуществила в 1943 г. лодка М-171 (командир Г.Д. Коваленко, акустик А.М. Лебедев). В 1945 г. экипаж С-13 (командир Александр Иванович Маринеско, акустик И.М. Шпанцев) уничтожил лайнер "Вильгельм Густлов" и транспорт "Генерал фон Штойбен" общим водоизмещением 40000 т [14]. Героический опыт подводников был использован при создании более совершенной техники в послевоенные годы.

В начале войны Германия активно использовала донные магнитные мины. Неконтактное взрывное устройство срабатывало при появлении в зоне чувствительности вражеского корабля. Оно реагировало на искажение магнитного поля Земли на удалении до 35 м от мины. Англичане боролись за освобождение от мин входов в свои порты, активно используя траление. Они разобрались в устройстве мин и научились "обманывать" магнитный взрыватель. В СССР пошли по пути размагничивания корпусов кораблей. Соответствующие методы были разработаны Анатолием Петровичем Александровым и Игорем Васильевичем Курчатовым.

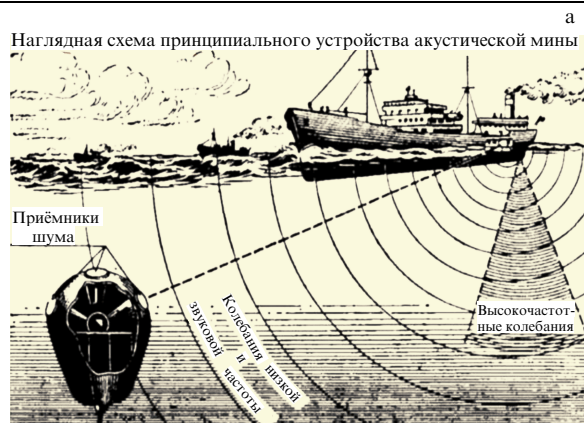


Рис. 5. Схема срабатывания акустической мины (а) и траление магнитных мин в устье Темзы (б).

Магнитное взрывное устройство постепенно теряло свою эффективность. Поэтому немецкие инженеры изобрели новый акустический взрыватель (Рудольф Хёлль (Rudolf Hell), 1901–2002 гг.), реагирующий на шум винтов корабля. Устройство срабатывало, если шум имел частоту около 200 Гц и нарастал вдвое в течение 3,5 с. Именно такой шум создаёт военный корабль большого водоизмещения. На мелкие суда мина не реагировала. Взрыватель в акустических минах с помощью гидрофона преобразовывал шумы в электрические импульсы, которые приводили к взрыву в момент прохождения над ней корабля. Кроме мин, которые "слышат" корабль, немцы применяли и комбинированные магнитно-акустические мины для повышения надёжности взрывателя [15].

Союзникам удалось разгадать детали немецких конструкций и создать не менее совершенные образцы акустических вооружений.

За весь период Второй мировой войны флотами воюющих государств было поставлено 675 тыс. мин, на которых подрывалось и затонуло около 4000 кораблей и 8000 получило серьёзные повреждения.

Значительные потери транспортам и конвоям союзников нанесли торпеды с акустической системой наведения. В отличие от мин, они могли использовать бортовые гидролокаторы как в пассивном, так и в активном режиме. Вначале эффективность нового оружия была очень высокой. Однако с помощью наших моряков, захвативших образцы немецких торпед, британцы смогли создать простые имитаторы шума. Эти устройства резко ухудшили результаты боевого использования акустических торпед.

В 1945 г. Морису Эвингу (Maurice Ewing) удалось зарегистрировать звук небольшого взрыва на расстоянии более 3000 км. Распространение происходило в подводном звуковом канале (ПЗК, рис. 6). Вскоре после войны Леонид Максимович Бреховских и Лазарь Давидович Розенберг, анализируя сигналы от подводных взрывов, обнаружили ПЗК в Тихом океане [16].

Нужно отметить, что по наукоёмкости акустические системы Германии и Англии опережали разработки СССР в годы войны. В послевоенные годы отечественные гидроакустические вооружения начали быстро совершенствоваться. За работы в области военных приложений акустики присуждены десятки Сталинских, Ленинских и Государственных премий СССР (всего было порядка 200 лауреатов). История отечественной гидроакустики (на примере работ концерна "Океанприбор") подробно описана в книге [17].

После окончания Великой Отечественной войны начали детально изучать источники шума надводных и

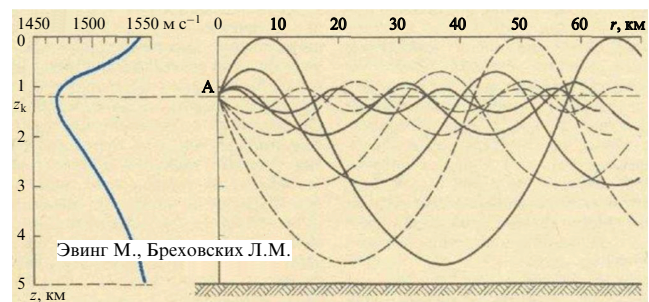


Рис. 6. Глубинный профиль скорости звука (с минимумом на оси) в подводном звуковом канале и ход лучей от источника, расположенного на оси волновода (см., например, обзор Бреховских Л.М. "Распространение звуковых и инфразвуковых волн в природных волноводах на большие расстояния" *УФН* 70 351 (1960)).

подводных кораблей, разрабатывать средства звукоизоляции и активного гашения шума. Особое внимание было уделено акустической тишине атомных подводных лодок — основы триады стратегических вооружений. Именно стратегические подводные ракетноносцы благодаря своей скрытности обеспечивали все эти годы мирное развитие Отечества.

Например, были предложены винты специального вида с серповидными лопастями и насечками на них, создающими мелкий масштаб и быстрое затухание срывающихся вихрей. Специальные меры приняты для предотвращения кавитационной эрозии. Пузырьки газа, формирующие кумулятивные высокоскоростные (порядка км/час) струйки воды, не только разрушают винт, но и создают сильные акустические поля (рис. 7).

Корпус подлодки облицовывают специальными резиновыми пластинами, поглощающими как внешние звуки гидролокатора, так и идущие изнутри шумы. Гидроакустические пластины крепятся на лёгкий корпус подлодки снаружи с помощью герметика, фиксируются специальными винтами и покрываются защитной краской. Вес пластины порядка 80 кг, при этом для одной субмарины требуется до нескольких тысяч таких изделий.

Отметим появление подводных ракет как развитие торпедного оружия. История их создания и принятия на вооружение — важное событие для обороны Отечества. Дело в том, что в США в начале 1950-х годов появился скоростной атомный подводный флот, борьба с которым с помощью обычных торпед оказалась затруднительной. Паритета удалось достичь именно благодаря высоким скоростям наших подводных ракет.

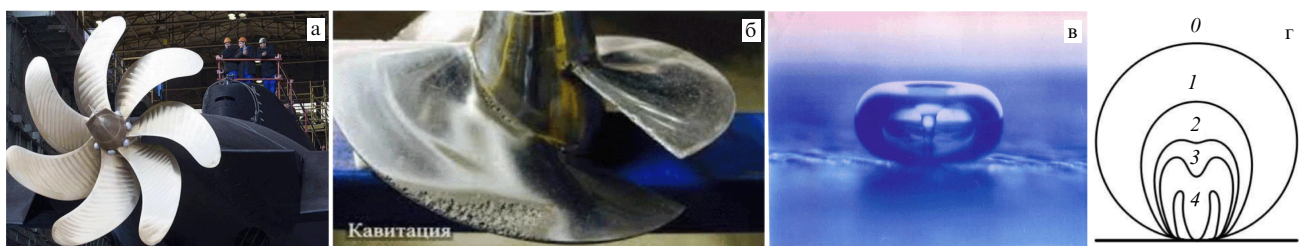


Рис. 7. (а) Форма гребных винтов, (б) кавитационная эрозия лопастей, (в) фотография (L. Crum) схлопывающегося пузырька с образованием высокоскоростной кумулятивной струйки, (г) динамика схлопывания.



Рис. 8. (а) Подвеска реактивной торпеды РАТ-52 (на вооружении с 1953 года) на Ил-28Т (Фото — Г.С. Шутлов, <http://www.bellabs.ru/Fotab/>). Журнал *Авиация и космонавтика* № 10 (2006). (б) В музее концерна "Морское подводное оружие — Гидроприбор". Стоят: Леонид Евгеньевич Собисевич, Олег Владимирович Руденко, Сергей Николаевич Гурбатов на фоне РАТ-52 (Фото — А.Л. Сосибевич). (в) Книга "Физические проблемы и история создания акустических систем наведения", изданная в 2011 году (научные редакторы: Александр Васильевич Минаев, Юрий Михайлович Романовский, Олег Владимирович Руденко) [18].

На рисунке 8 изображена реактивная торпеда РАТ-52 конструкции Григория Яковлевича Диллона. Проблема возникла с её акустическим наведением на цель в условиях сильного шума реактивных двигателей. В решении приняли активное участие сотрудники физического факультета МГУ. Результаты описаны в книге [18]. Основные авторы — выпускник кафедры акустики, один из руководителей оборонного ведомства Александр Васильевич Минаев и профессор Юрий Михайлович Романовский, который с коллегами участвовал не только в разработке аппаратуры, но и в пусках этих ракет. Большой вклад в развитие систем наведения в дальнейшем внёс профессор МГУ Валентин Андреевич Буров. Он не только сконструировал, но и сделал прототип бортового устройства (Государственная премия 1980 г.).

Конечно, огромную роль в создании вооружений для защиты Отечества сыграли не только наши учёные, но и, прежде всего, инженеры, технологи и конструкторы аппаратуры. Выше было сказано, что акустика "распределена" по отделениям РАН. Кроме того, существует большое число КБ и заводов — производителей специальной техники. Это совершенно необходимо, поскольку только узкий специалист, знающий историю создания конкретных устройств и детали технических решений, способен к осуществлению правильной модернизации. Однако в ряде случаев необходимо создавать аппаратуру, работающую на основе "новых" (не использовавшихся ранее) физических явлений. И здесь без учёных не обойтись. Учёные исходят из "первых принципов" и могут предлагать совершенно новые решения. Приведу несколько примеров.

Физикам хорошо известен Институт прикладной физики РАН им. А.В. Гапонова-Грехова (Нижний Новгород). На последних выборах в РАН (2025 г.) по отделению Физических наук из этого института были избраны в чле-

ны-корреспонденты четыре "молодых" учёных (на 11 вакантных мест). В академики избрали двух человек. Это гораздо больше, чем из какого-либо другого из ведущих институтов России. Однако многие думают, что этот институт знаменит работами по сверхмощным лазерам и приборам СВЧ (гиротроны). Мало кто помнит, что он был организован в 1977 г. для решения акустических задач, связанных с активной гидролокацией для дальнего обнаружения подводных лодок. Институт сильно продвинулся, чего не удалось сделать техническим центрам. Здесь созданы (при участии сотрудников Института общей физики РАН) эффективные низкочастотные (70–600 Гц) гидроакустические излучатели (рис. 9) для работы на расстояниях в сотни км.

Другой пример — нелинейные "параметрические" излучатели (ПИ) звука (см. рис. 9). ПИ состоит из обычного источника интенсивных высокочастотных волн "накачки" и протяжённого участка нелинейной среды. Этот "столб" воды может быть длиной в десятки и сотни метров. В нём возбуждается низкочастотная слабо затухающая волна и формируется её диаграмма направленности. С помощью ПИ на частотах в несколько кГц удаётся создать очень узкие диаграммы шириной $2^\circ - 5^\circ$ при размерах излучателя порядка десятков см. Для сравнения: обычные источники для этого должны иметь апертуру диаметром порядка 10 м. Гидроакустические ПИ используются для калибровки многокомпонентных антенн; для профилирования дна и осадочных слоёв, обнаружения предметов под дном; для снятия частотной характеристики цели и классификации объектов; для акустической связи на мелководных акваториях в условиях донной и поверхностной реверберации; в доплеровских лагах для абсолютного измерения скорости судна. Много сделано учёными кафедры акустики МГУ и Таганрогского радиотехнического института [19].

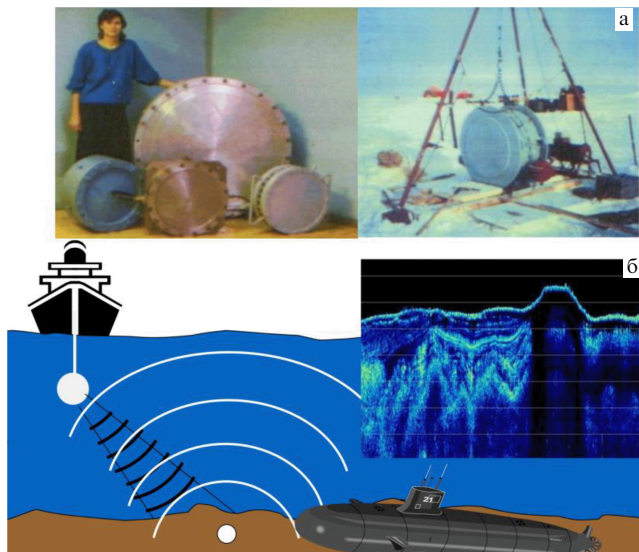


Рис. 9. Примеры новых проблем, потребовавших участия физиков. Низкочастотный излучатель (а) и нелинейный "параметрический" гидролокатор (профилирование осадочных слоёв (б)).

Третий пример — высокоскоростные подводные ракеты новых поколений. Принцип, предложенный учёными, использует явление "суперкавитации". Ракета летит под водой в газовом пузыре со скоростью самолёта.

Четвёртый пример — векторные приёмники звука. Они имеют уникальную способность определять направление на источник "в одной точке". Старинные приёмники акустического давления представляли собой длинную трубку, на концы которой надеты резиновые груши — приёмники колебаний. Акустик ("слушач"), в уши которого по двум волноводам поступали сигналы от груш, вращал трубку до положения, когда разность фаз двух сигналов обращалась в нуль. Нормаль к оси трубки при этом указывала направление прихода волны.

Схема векторного приёмника показана на рис. 10. Акустическая волна воздействует на сферу, колебания которой могут происходить только вдоль направляющих стержней. В одномерном случае амплитуда колебания пропорциональна косинусу угла между волновым вектором и направлением стержня. В трёхмерном случае колебания могут происходить вдоль трёх координат. Три косинуса указывают направление прихода волны. Реальные приёмники имеют, конечно, другую конструкцию. Сергей Николаевич Ржевкин, в частности, рассмотрел колебания малой сферы и показал, что колебательную скорость можно измерить, размещая внутри неё устройство типа сейсмометра [20]. Идеи, возникшие в группе, руководимой Сергеем Николаевичем Ржевкиным, были подхвачены, развиты и доведены до технической реализации в ряде образцов, принятых на вооружение, сотрудниками ЦНИИ "Гидроприбор" (ныне Концерн "Морское подводное оружие — Гидроприбор"). Большой вклад в их создание внесли также сотрудники ВНИИФТРИ (Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений) и ряда других организаций.

Векторные приёмники сегодня производятся во многих странах. Они используются, например, в наиболее распространённых моделях радиогидроакустических буев. Буй плавает на поверхности моря, принимает гидроакустический сигнал от подводного объекта и передаёт его по радиоканалу на самолёт или спутник. Такие буи массово сбрасываются с самолёта или выпускаются на поверхность моря из-под воды. Они недороги и хорошо соответствуют принципам современной войны.

Помимо радиогидроакустических буев, для реализации канала связи воздух-вода используется оптоакустический эффект (рис. 11). Лазерный луч вызывает несильное, но быстрое нагревание тонкого поверхностного слоя воды. Слой расширяется, возбуждая в воде акустическую волну.

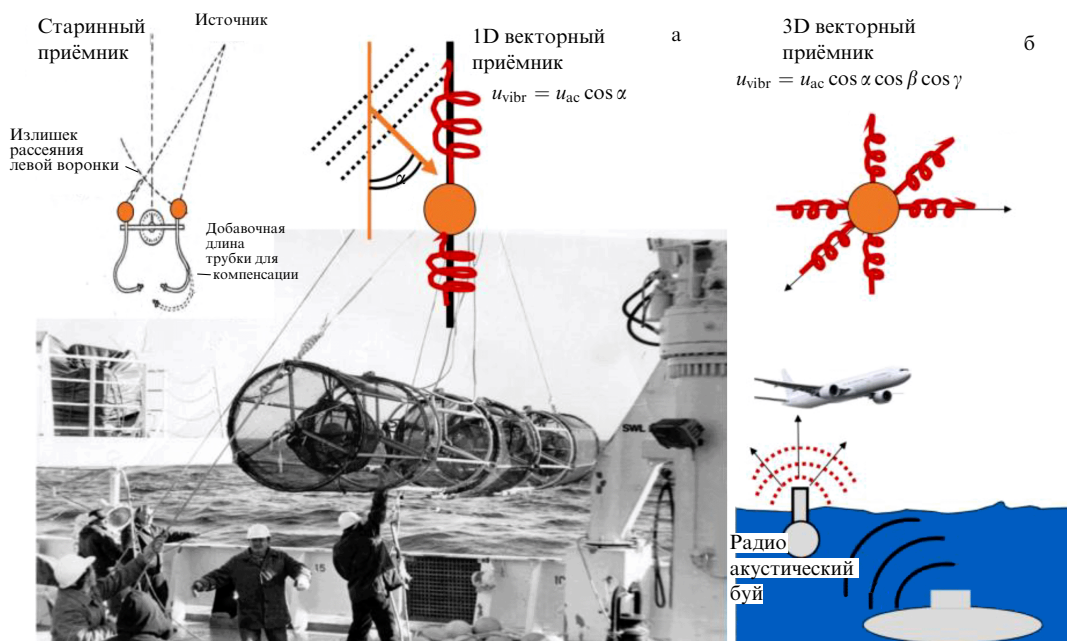


Рис. 10. Векторные приёмники. Схема работы, опускаемая многоэлементная антенна и гидро-радиобуй.

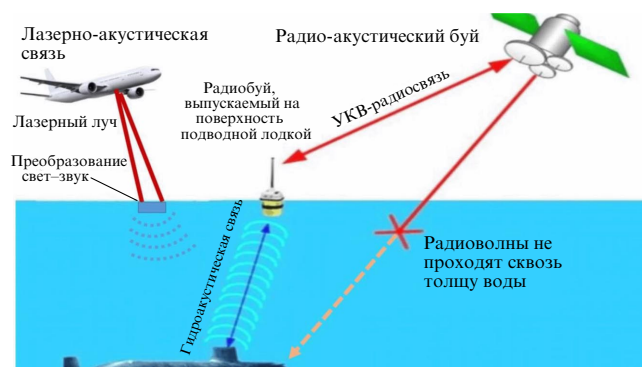


Рис. 11. Возможные схемы каналов связи между воздушными и подводными объектами (см., например, обзор Лямшев Л М "Опτικο-акустические источники звука" УФН 135 637 (1981)).

4. Воздушная акустика

Уже в первой мировой войне разведка артиллерийских позиций противника проводилась с помощью акустических измерений. При этом определялась локализация орудий, по координатам которых вёлся ответный огонь.

Во время Второй мировой войны для "звукометрической" разведки использовались специальные звуковые батареи. Они обычно содержали несколько микрофонов, регистрировавших моменты прихода звука выстрела. Измерения времён задержки позволяли рассчитать координаты орудия. Затем производился ответный выстрел; по звуку разрыва таким же способом корректировали точность прицеливания [21].

Акустические сонары начали использоваться с появлением первых самолётов; они получили широкое применение в Первой и Второй мировых войнах. В основе их конструкции лежали направленные приёмные антенны, от которых усиленный сигнал по волноводам передавался оператору-акустику (рис. 12, 13).

В дневное время суток и при отсутствии помех громкий звук мотора позволял обнаружить самолёт на удалении в несколько километров. Оптика (бинокли) уступала акустике и помогала лишь опознать самолёт (свой-чужой). В плохих погодных условиях результаты работы звукоулавливателя, конечно, ухудшались. Тем не менее ночью, а также при сильной об-



Рис. 12. Советский звукоулавливатель ЗТ-5 (1941 г.). Во время войны усовершенствован Юрием Михайловичем Сухаревским и Дмитрием Ивановичем Блохиным.

лачности и в тумане самолёты становились невидимыми; их удавалось обнаружить только по акустическому излучению.

В свою очередь, значительное влияние на чувствительность акустических средств оказывали помехи, связанные с ветром. При порывах ветра дальность обнаружения падала. Скорости ветра более 10 м с^{-1} делали обнаружение проблематичным. Кроме того, ветер создавал шумовые помехи в самом звукоприёмнике, что маскировало шум самолёта.

Помимо указанных недостатков, акустике мешала принципиальная физическая проблема — малая скорость звука в воздухе. Из-за этого звукоулавливатели наводили зенитки в точку, через которую скоростной самолёт уже пролетел. В таких условиях осветить прожекторами и поразить огнём цель было трудно. При типичных скоростях самолётов звуковое обнаружение давало лишь несколько минут на принятие защитных мер.

С приближением Второй мировой войны альтернативой акустическому обнаружению самолётов становятся радары. Радиолокационная система, как известно, состоит из генератора электромагнитных волн (обычно в радио- или СВЧ-диапазоне), приёмно-излучающей антенны, а также устройства обработки сигналов. В активном режиме локации радиоволны отражаются от объекта. Отражённый сигнал несёт информацию о местоположении и скорости движения цели.

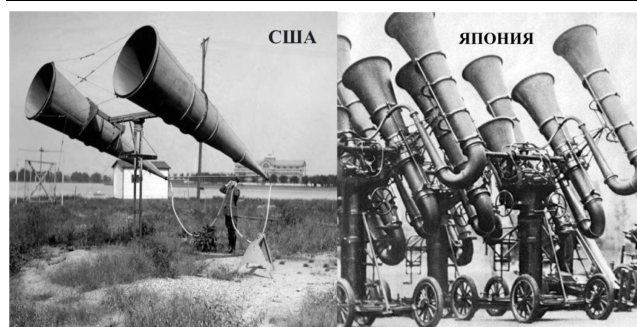


Рис. 13. Зарубежные образцы звукоулавливающих станций.

Радиолокаторы были созданы для военного использования перед началом и во время Второй мировой войны. Основным генератором стал магнетрон. Однако серийное производство радиолокаторов удалось наладить лишь после войны.

Таким образом, радары и сонары имеют свои достоинства и недостатки. В настоящее время акустическая техника почти вытеснена, но переживает второе рождение. Военная роль малозаметных и маловысотных целей (крылатые ракеты, беспилотники, вертолеты, небольшие самолёты) растёт, поэтому и разработка акустических систем будет всё более актуальной.

Описанное выше относилось к слабому (линейному) звуку в воздушной среде. В средствах массовой информации любят обсуждать тему "акустического оружия". Это не новая проблематика, но она до сих пор привлекает обывателя. Достаточно вспомнить "Иерихонские трубы", разрушившие крепостные стены, или роман Григория Адамова "Тайна двух океанов", где ультразвуковые пушки убивают кашалотов и пробивают канал для подводной лодки, попавшей в ледовый плен. Студенты, изучающие акустику, знают, что это невоз-

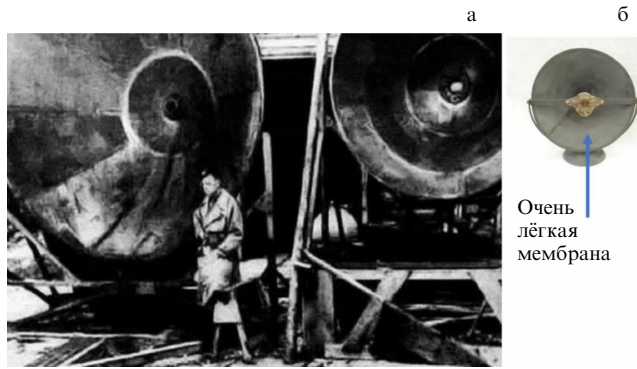


Рис. 14. Акустическая пушка (а) и старый громкоговоритель (б).

можно. Периодические акустические волны затухают тем сильнее, чем выше их интенсивность (это эффект насыщения). В результате на заметные расстояния нельзя передать энергию, достаточную для разрушения мишени. Это возможно лишь на дистанциях порядка десятков сантиметров.

Однако разговоры об акустическом оружии не лишены смысла. Такие системы должны периодически излучать одиночные импульсы (создавать последовательность микровзрывов). Дальше всех продвинулись немецкие инженеры. Во время войны в Германии был создан (в 1944 г.) излучатель "Schallkanone" (рис. 14), способный вызывать контузию. В фокусе параболического отражателя диаметром 3 м был установлен инжектор с системой зажигания, в которую подавались кислород и метан. Взрывчатая смесь поджигалась через равные интервалы времени, создавая непрерывный грохот нужной частоты. Известно, что для возбуждения интенсивного звука в воздухе необходимы большие амплитуды колебаний скорости (а не давления, как в конденсированной среде). Так, колеблющаяся мембрана старых громкоговорителей (рис. 14б) изготавливалась из бумаги. Немцы пошли дальше. В их акустической пушке роль очень лёгкой мембраны играл фронт ударной волны.

В настоящее время вновь обсуждается возможность создания новых сверхзвуковых пассажирских самолётов (взамен ТУ-144). Известно, что основной проблемой является неприемлемо высокий уровень звукового удара, вредно влияющего на людей и животных [7]. Напомним, что подъёмная сила на сверхзвуке создаётся "отдачей" на

фюзеляж и крылья самолёта излучаемой волны. Если как-то удастся подавить звуковой удар, самолёт не полетит. Примером может служить аэродинамический профиль "Adolf Busemann biplane", при обтекании которого удар не возникает, но подъёмной силы нет.

Известно, что излучение акустической волны падает при удлинении самолёта обратно пропорционально четвёртой степени его длины. Сильно удлинить профиль за счёт "иглы" обтекателя не удастся. Возникают изгибные колебания (флаттер) и обтекатель обламывается. Рем Викторович Хохлов изучил вопрос об удлинении профиля за счёт интенсивного лазерного луча, направленного вперёд [22]. К сожалению, поглощение в атмосфере излучения существующих лазеров недостаточно сильное для эффективного удлинения профиля. Изменение аэродинамики тоже мало что даст — повышенный расход топлива, видимо, ухудшит и без того высокую затратность сверхзвуковой авиации.

Зато обратное явление — увеличение "силы" звукового удара — технически вполне реализуемо. Впервые идея пришла в голову авиаконструктору Владимиру Михайловичу Мясичеву. Его сверхзвуковой аппарат "адский косильщик" (рис. 15) был предназначен для массового поражения пехоты противника при полёте на малых высотах. На высоте 50 м величина избыточного давления в ударной волне могла достигать $0,22 \text{ кГ см}^{-2}$. Уступ под фюзеляжем выпускался в боевом режиме. Однако такое акустическое оружие, видимо, не очень эффективно. Известно, что поражающее действие взрыва нелинейно зависит от тротилового эквивалента; часто считают, что как кубический корень. Это означает, что увеличение эквивалента в 27 раз усилит действие взрыва всего в 3 раза. Поэтому вместо гигантского М-25 разумно использовать эскадрилью небольших сверхзвуковых истребителей, расположенных по схеме фазированной антенной решётки.

Укажем в заключение на параметрические громкоговорители, созданные по аналогии с гидроакустикой (см. раздел 3). Они используются в воздухе для направленного излучения сигналов в слышимом диапазоне частот с помощью небольших ультразвуковых излучателей. Возможно также создание индивидуальных приёмников (наушников), содержащих сильно нелинейные элементы. Направляя на такой приёмник модулированную ультразвуковую волну, можно реализовать "суфлирование" — скрытную



Рис. 15. "Адский косильщик" М-25 конструкции Владимира Михайловича Мясичева (а) и ударная волна от сверхзвукового истребителя, летящего на малой высоте (б).

передачу сообщений нужному человеку. Уже созданы такие экраны — "экскурсоводы" для музеев. Подходя к экспонату, человек получает аудиоинформацию о нём, причём она доступна лишь в малой области рядом с объектом [23].

5. Медицинские приложения

Военная акустика стимулировала развитие УЗ-техники и её использование в медицине. Австрийский психиатр Карл Теодор Дуссик (Karl Theodore Dussik) считается первым врачом, применившим ультразвук в диагностических целях. Он визуализировал опухоли головного мозга с помощью ультразвукового устройства в 1942 г. [24]. На его деятельность, по-видимому, оказал заметное влияние советский физик, член-корреспондент АН СССР Сергей Яковлевич Соколов. Он — создатель "звуковидения" [25], лауреат двух Сталинских премий (1942 г. — за изобретение метода ультразвуковой дефектоскопии и 1951 г. — за изобретение ультразвукового микроскопа и промышленное освоение методов акустической дефектоскопии).

Это были первые шаги. В послевоенные годы медицинская акустика начала бурно развиваться. По данным 1998 г. на мировом рынке по объёму продаж лидировала рентгеновская аппаратура. За ней шли магниторезонансные томографы (МРТ) и приборы ультразвуковой диагностики (УЗИ). Однако в прошедшие годы рентгеновские установки заметно сдали позиции (из-за возможного вреда здоровью), а УЗИ и МРТ вырвались вперед. Сегодня акустические приборы занимают ведущее место на мировом рынке как по объёму продаж, так и по числу произведённых изделий. Они заметно превосходят приборы лазерной и ядерной диагностики. Диагностические ультразвуковые сонографы имеются практически во всех медицинских учреждениях. Всё сказанное касалось диагностики. Если перейти к задачам терапии и хирургии, то здесь нужен интенсивный звук.

"Пионерами" в медицинском использовании интенсивных акустических волн считают американцев — братьев Фрай (Билл и Франк) (Fry brothers, Bill and Frank). В 1946 г. в Университете Иллинойса ими организована лаборатория биоакустики. Цель — создать ультразвуковую аппаратуру, разработать хирургические процедуры для мозга. До этого Фрэнк работал в Манхэттенском проекте, а Билл занимался теоретической физикой и созданием гидроакустических сонарных систем. В 1957 г.

хирург Мейерс вместе с братьями успешно провёл первую УЗ-операцию на головном мозге человека. Они лечили болезнь Паркинсона, разрушая с помощью УЗ определённые участки мозга.

Гораздо меньше известно об аналогичных работах нашего соотечественника, выдающегося инженера, члена-корреспондента Академии архитектуры Андрея Константиновича Бурова (это отец профессора В.А. Бурова). По оценкам многих людей, знакомых с его деятельностью, Андрея Константиновича Бурова можно поставить в один ряд с инженерными гениями масштаба Владимира Григорьевича Шухова. Вот кое-что из сделанного А.К. Буровым.

1. Андрей Константинович Буров (рис. 16) — основоположник индустриального панельного домостроительства (вместе с Ле Корбюзье), смысл которого — изготовление панелей на заводе, монтаж — на стройплощадке. Первое такое здание — это "ажурный" дом в Москве на пересечении Беговой улицы и Ленинградского проспекта. Он построен в 1939–1940 гг., задолго до начала массовой застройки "хрущёвками".



Рис. 16. Шарль-Эдуар Ле Корбюзье (Le Corbusier, слева), Сергей Михайлович Эйзенштейн (в центре) и Андрей Константинович Буров (справа), 1927 г.

2. А.К. Буров построил несколько известных зданий в Москве и был одним из авторов нового архитектурного стиля. Здания находятся в центре Москвы, их видят и сегодня (рис. 17).



Рис. 17. Некоторые из домов, построенных по проектам Андрея Константиновича Бурова. (а) Первый панельный дом в СССР — "ажурный" дом у метро "Динамо". (б) Дом в центре Москвы.

3. Буров, изобретая облегчённые строительные материалы, создал ряд новых композитов типа "фибергласс", армированных стекловолокнами.

4. Он изготовил (в 1947 г., в долазерную эпоху) оптические волокна для передачи изображений и технологию производства кварцевых нитей высокого оптического качества. Предложил кодировать изображения, разрезая жгут волокон и поворачивая его на некоторый угол. Об этих работах почти никто не знает, даже специалисты по волоконной оптике.

5. Буров создал УЗ-источники с рекордными (непревзойдёнными до сих пор) характеристиками [26].

6. При УЗ-облучении злокачественных опухолей А.К. Буров наблюдал исчезновение метастазов. Об этом тоже почти ничего не известно. Информация получена из записей и фотографий А.К. Букова, а также рассказов его сотрудников, доживших до начала 2000-х гг.

Эксперименты проводились в Лаборатории Анизотропных структур (ЛАС) АН СССР, созданной А.К. Буковым. Организация ЛАС обсуждалась на высшем уровне — на заседании Политбюро. Решение о создании лаборатории подписал лично Иосиф Виссарионович Сталин.

В ЛАС, просуществовавшей с 1950 до 1957 гг. (до смерти Букова) фактически зародились новые научные направления — нелинейная и биомедицинская акустика. В ЛАС работали известные сегодня учёные: Сергей Александрович Ахманов, Владимир Александрович Красильников, Лев Константинович Зарембо, выдающиеся врачи, биологи, инженеры. Юрий Исаакович Китайгородский сделал радиогенераторы мощностью 100 кВ в диапазоне 350 кГц–2 МГц. Преобразователями были пластины природного кварца диаметром до 12 см. Были достигнуты акустические интенсивности 500 Вт см^{-2} в параллельных несфокусированных пучках. Этот рекорд актуален до сих пор, поскольку используемая сегодня пьезокерамика трескается при таких нагрузках (рис. 18).

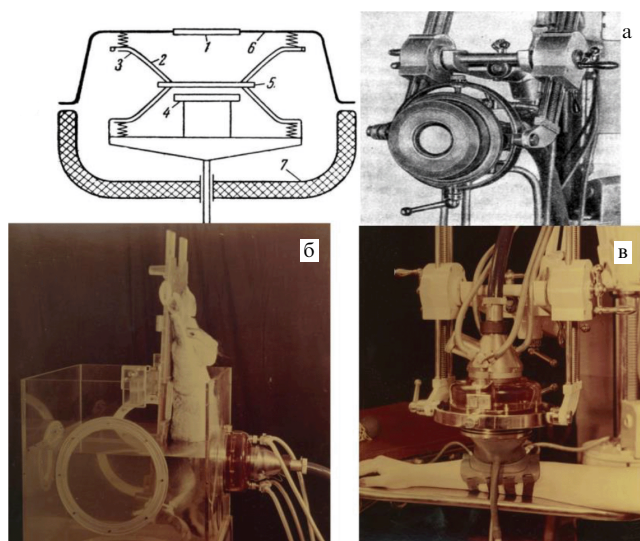


Рис. 18. Конструкция мощного ультразвукового излучателя (а). Облучение опухоли в яичке кролика (б) и на руке человека (в).

Клинические испытания производились совместно с будущим академиком Николаем Николаевичем Блохиным в Институте экспериментальной патологии и тера-

пии рака (преобразованном позднее в Онкологический центр). Добровольцами были 12 больных меланомой на терминальной стадии. Полное исчезновение метастазов наблюдалось у половины пациентов, остальные умерли. Результат многократно превышал вероятность спонтанного самоизлечения (рис. 19).

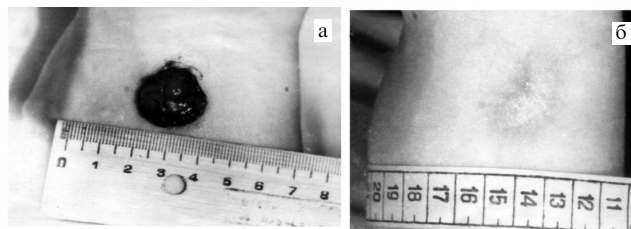


Рис. 19. Первичная меланобластома на руке больного до (а) и после (б) облучения интенсивным ультразвуком.

Возможное объяснение эффекта дано в работе [27]. Оно связано как с физикой, так и с биологией. Наш молекулярный биолог Алексей Матвеевич Оловников установил важную роль фермента теломеразы в развитии иммунного отклика на злокачественные клетки. Известно, что нормальные клетки могут делиться от 50–70 раз (молодой организм) до 20–30 раз (возраст порядка 70 лет). При каждом делении длина теломерных окончаний ДНК уменьшается. После достижения "Hayflick limit" клетка дряхлеет, перестаёт делиться и погибает. Напротив, раковые клетки "бессмертны", поскольку в них окончания ДНК защищены особыми белковыми структурами — теломерами. Синтез теломерных структур идёт под действием теломеразы, а в нормальных клетках этот фермент неактивен.

Авторы [27] предположили, что теломераза выбрасывается из злокачественных клеток после их нетеплового разрушения чередой слабых ударных волн нелинейного ультразвука. Освобождённый фермент стимулирует иммунный ответ. Т-лимфоциты уничтожают злокачественные клетки. В пользу этой гипотезы свидетельствует эффективность автовакцины, испытанной в ЛАС в 1956 г. Гомогенизированная и облучённая нелинейным УЗ опухолевая масса центрифугировалась, и жидкая фракция вводилась тому же больному животному. Через несколько дней злокачественный процесс подавлялся в 40–80% случаев. Однако, если вводилась твёрдая (осадочная) фракция, то рост опухоли, напротив, усиливался. Гистологические исследования облучённых клеток показали, что изменения в клетках были сильно выражены, когда источник был расположен на расстоянии порядка 2–3 длин образования разрыва в УЗ-волне [27]. Именно такой режим облучения был использован в работах А.К. Букова.

Итак, Алексей Матвеевич Оловников в 1971 г. объяснил "Hayflick limit" — конечное число делений, которое может испытывать клетка. Указал на роль фермента теломеразы, предотвращающего укорочение теломерных окончаний хромосом при каждой репликации. Уместно привести высказывание самого Хейфлика: "Проницательное предположение Оловникова получило экспериментальное подтверждение" в работах Кэрла Грейдера (Carolyn Widney Greider) и Элизабет Блэкбёрн (Elizabeth Helen Blackburn), которые за это получили в 2009 г. Нобелевскую премию по физиологии и медицине.

По мнению академика Владимира Петровича Скулачёва, "Это очень несправедливо...". В "утешение" Оловникову дали Демидовскую премию.

Механизмы воздействия интенсивных акустических волн на биоткани весьма разнообразны. Среди них — неинвазивное разрушение биоконкрементов ударными импульсами. Проблема создания отечественных литотриптеров была поставлена в 1983 г. в связи с опасностью возникновения почечных колик у лётчиков и космонавтов, испытывающих значительные перегрузки. На ударных фронтах нелинейных волн формируются большие градиенты давления, способные разрушить контрастную мишень (камни, кости, лёгочную ткань).

Нелинейное поглощение на ударном фронте на порядок превышает обычное поглощение акустической волны; поэтому такое излучение может использоваться для быстрого нагрева ткани и создания больших радиационных сил. Неинвазивный нагрев ультразвуком способен спасти жизнь пациента после автомобильной аварии или на поле боя, когда нужно остановить внутреннее кровотечение, а срочная госпитализация невозможна; больше половины таких больных обычно погибает. Ультразвуковая абляция используется при операциях на простате. Интенсивно внедряется гистотрипсия — нетепловая технология абляции ткани, например, для уменьшения объёма опухоли.

Сильное радиационное давление помогает "вытолкнуть" осколки разрушенного камня из почечной лоханки и мочевыводящих путей. Модулированное радиационное давление используется также в новом диагностическом приборе — эластографе, уже нашедшем широкое использование в клинике. Эластограф измеряет наиболее информативный параметр для обнаружения опухолей, рубцов и

гематом — сдвиговый модуль упругости. Это далеко не полный перечень актуальных проблем военно-медицинской акустики.

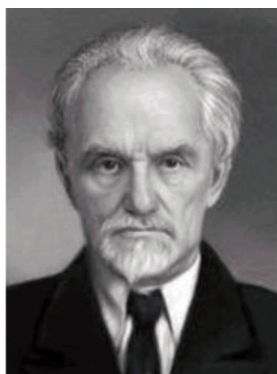
Заметим, что в 2001 г. было создано Международное общество терапевтического ультразвука (ISTU). Организация объединила физиков, биологов, медиков и инженеров, которые занимаются фокусированным ультразвуком высокой интенсивности (HIFU). Одно из направлений работы общества — ультразвуковая стимуляция иммунитета — фактически продолжает развитие описанных выше идей и результатов. Медицинские технологии, испытанные А.К. Буровым, используются в клинической практике в ряде зарубежных стран.

Развитие других приложений акустики, исторически связанных с деятельностью учёных и инженеров в военные годы, частично отражено в обзоре [28].

6. Заключение

Многие учёные, изучавшие фундаментальные физические проблемы, внесли существенный вклад в развитие прикладной акустики. Среди них — известные физики, академики Николай Николаевич Андреев, Леонид Максимович Бреховских, Владимир Иосифович Векслер, Евгений Львович Фейнберг, Александр Александрович Харкевич, члены-корреспонденты Дмитрий Иванович Блохинцев, Виталий Анатольевич Зверев, Сергей Яковлевич Соколов.

На рисунке 20 помещены портреты только некоторых выдающихся "акустических долгожителей". Это, во-первых, двое учёных, которых часто называют основоположниками советской акустики: академик Николай Ни-



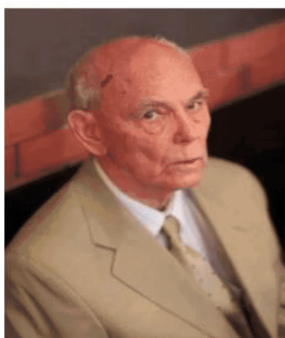
Николай Николаевич Андреев
(1880–1970)



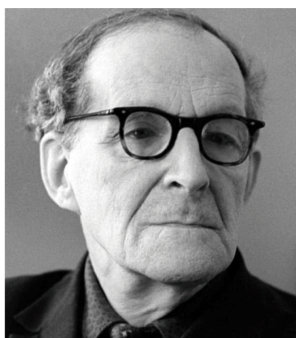
Сергей Николаевич Ржевкин
(1891–1981)



Юрий Михайлович Сухаревский
(1906–2004)



Виталий Анатольевич Зверев
(1924–2024)



Лев Сергеевич Термен
(1886–1993)



Владимир Александрович Красильников
(1912–2000)

Рис. 20. Некоторые выдающиеся долгожители отечественной акустики.

колаевич Андреев, создатель Акустического института [29], и Сергей Николаевич Ржевкин, создатель кафедры акустики МГУ [30]. Юрий Михайлович Сухаревский известен как выдающийся пианист, но в течение 50 лет он был также основным консультантом — конструктором подводных сонаров (Государственная премия СССР) [31]. На 90-летнем юбилее он произнёс запоминающуюся фразу: "Я 50 лет не мог ничего публиковать, и с юмором читал банальные статьи других авторов". Виталий Анатольевич Зверев [32] был известным специалистом в области радиофизики, акустики, радиолокации, голографии. Член-корреспондент РАН, Лауреат Государственной премии СССР. Изобрёл параметрический гидролокатор [33]. Лев Сергеевич Термен, видимо, наиболее известный акустик, человек удивительной биографии. Лауреат Сталинской премии. Из его открытых результатов всем известен первый в мире электромузыкальный инструмент — терменвокс [34]. Владимир Александрович Красильников — родоначальник нелинейной акустики. Лауреат Государственной премии, премий им. М.В. Ломоносова и Л.И. Мандельштама [35, 36].

Важнейшие результаты советских акустиков, полученные к середине 1940-х годов, описаны в обзоре [37]. Пример современных прикладных исследований в области гидроакустики связан с освоением шельфа Арктических морей [38] и созданием параметрических антенн большой апертуры [39].

Фамилии других учёных, а также многочисленных инженеров — конструкторов уникальных акустических систем, в рамках короткого обзора назвать невозможно. Их вклад в Победу неоценим. Кроме того, успехи в развитии отечественной науки и техники в послевоенные годы, без сомнения, во многом основаны на результатах самоотверженного труда многих наших соотечественников, направленного на решение оборонных задач в годы войны.

Информацию обо всех персонах, публиковавшихся в *Акустическом журнале*, можно найти на сайте www.akzh.ru, раздел Рубрики "03. Персоналии". Сайт создан под руководством В.Г. Шамаева и выложен в открытом доступе [40].

Автор признателен В.Б. Бычкову и А.С. Шурупу за полезные обсуждения.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-22-00106, <https://rscf.ru/project/25-22-00106/>.

Список литературы

1. Российская Академия наук. Список членов академии 1724 – 2009 (Сост. Б.В. Левшин и др.) (М.: Наука, 2009)
2. Рэлей Дж *Теория звука* Т. 2 (М.: Гостехиздат, 1955) Гл. 20, § 364; пер. с англ. яз.: Strutt J W (Baron Rayleigh) *The Theory of Sound* Vol. 2 (New York: Dover Publ., 1945)
3. Eisenstein D J "Dark energy and cosmic sound" *New Astron. Rev.* **49** (7–9) 360 (2005) DOI:10.1016/j.newar.2005.08.005
4. Гурбатов С Н, Саичев А И, Шандарин С Ф "Крупномасштабная структура Вселенной. Приближение Зельдовича и модель слипания" *УФН* **182** 233 (2012); Gurbatov S N, Saichev A I, Shandarin S F "Large-scale structure of the Universe. The Zeldovich approximation and the adhesion model" *Phys. Usp.* **55** 223 (2012) DOI:10.3367/UFNr.0182.201203a.0233
5. Собисевич А Л, Жостков Р А "О движении флюидонасыщенной грязебрекчии в выводящих структурах грязевых вулканов" *Геофизические исследования* **14** (4) 46 (2013)
6. Song X, Richards P G "Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core" *Nature* **382** 221 (1996)
7. Руденко О В, Маков Ю Н "Звуковой удар: от физики нелинейных волн до акустической экологии (обзор)" *Акустический журн.* **67** (1) 3 (2021); Rudenko O V, Makov Yu N "Sonic boom: from the physics of nonlinear waves to acoustic ecology (a review)" *Acoust. Phys.* **67** 1 (2021) DOI:10.1134/S1063771021010036
8. Гинзбург В Л "Излучение равномерно движущихся источников (эффект Вавилова – Черенкова, переходное излучение и некоторые другие явления)" *УФН* **166** (10) 1033 (1996); Ginzburg V L "Radiation by uniformly moving sources (Vavilov – Cherenkov effect, transition radiation, and other phenomena)" *Phys. Usp.* **39** 973 (1996)
9. Ashkin A "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure" *Phys. Rev. Lett.* **24** 156 (1970) DOI:10.1103/PhysRevLett.24.156
10. Sarvazyan A P, Rudenko O V, Nyborg W L "Biomedical applications of radiation force of ultrasound: Historical roots and physical basis (Invited Review)" *Ultrasound Med. Biol.* **36** (9) 1379 (2010)
11. Wilson T V "How acoustic levitation works" (2023), <https://science.howstuffworks.com/acoustic-levitation.htm>
12. Гапонов А В, Миллер М А "О потенциальных ямах для заряженных частиц в высокочастотном электромагнитном поле" *ЖЭТФ* **34** (1) 242 (1958); Gaponov A V, Miller M A "Potential wells for charged particles in a high-frequency electromagnetic field" *Sov. Phys. JETP* **7** 168 (1958)
13. Ключкин И И, Шошков Е Н *Константин Васильевич Шиловский. 1880 – 1958* (Отв. ред. В.В. Богородский) (Л.: Наука, 1984)
14. Тимошенко В И (Общ. ред.) *Гидроакустическая энциклопедия* (Таганрог: Изд-во Таганрогского гос. радиотехн. ун-та, 1999)
15. "Смерть под водой: как работают морские мины", <https://www.popmech.ru/weapon/7417-pod-vody-tikhaya-ugroza/>; <https://www.techinsider.ru/weapon/7417-udar-iz-pod-vody-tikhaya-ugroza/>
16. Вадов Р А "Открытие подводного звукового канала, экспериментальные исследования, региональные различия" *Акустический журн.* **53** (3) 313 (2007); Vadov R A "The discovery of the underwater sound channel, experimental studies, and regional differences" *Acoust. Phys.* **53** 268 (2007)
17. Александров Г А и др. (Авт.-сост.) *Концерн "Океанприбор". Исторический очерк* 2-е изд., испр. и доп. (СПб.: Наука, 2013)
18. Минаев А В, Романовский Ю М, Руденко О В (Научн. ред.) *Противолодочные подводные ракеты. Физические проблемы и история создания акустических систем наведения* (Отв. ред. М.А. Коршунов) (М.: Изд-во Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, 2011)
19. Новиков Б К, Руденко О В, Тимошенко В И *Нелинейная гидроакустика* (Л.: Судостроение, 1981); Novikov B K, Rudenko O V, Timoshenko V I *Nonlinear Underwater Acoustic* (New York: American Institute of Physics, 1987)
20. Ржевкин С Н "Некоторые следствия из теории дифракции звука на гибкой сфере" *Акустический журн.* **2** (4) 366 (1956)
21. Таланов А В *Звуковая разведка артиллерии* (М.: Военное изд-во Министерства вооруженных сил Союза ССР, 1948)
22. Белоконов В А, Руденко О В, Хохлов Р В "Аэродинамические явления при сверхзвуковом обтекании лазерного луча" *Акустический журн.* **23** (4) 632 (1977); Belokon V A, Rudenko O V, Khokhlov R V "Aerodynamic effects of supersonic flow past a laser beam" *Sov. Phys. Acoust.* **23** (4) 361 (1977)
23. Руденко О В "Нелинейный экран как элемент систем для звукопоглощения и преобразования частоты" *Акустический журн.* **62** (1) 38 (2016); Rudenko O V "A nonlinear screen as an element for sound absorption and frequency conversion systems" *Acoust. Phys.* **62** 46 (2016) DOI:10.1134/S106377101601005X
24. Dussik K T "Über die Möglichkeit, hochfrequente mechanische Schwingungen als diagnostisches Hilfsmittel zu verwerten" *Z. gesamte Neurologie Psychiatrie* **174** 153 (1942) DOI:10.1007/BF02877929
25. Иофе В К, Мясникова Е Н, Соколова Е С *Сергей Яковлевич Соколов (1897–1957)* (Л.: Наука, 1976)

26. Буров А К "Получение больших интенсивностей ультразвука в жидкости" *Акустический журн.* **4** (4) 315 (1958)
27. Буров В А, Дмитриева Н П, Руденко О В "Нелинейный ультразвук: разрушение микроскопических биоконплексов и нетепловое воздействие на злокачественную опухоль" *Докл. РАН* **383** (3) 401 (2002); Burov V A, Dmitrieva N P, Rudenko O V "Nonlinear ultrasound: breakdown of microscopic biological structures and nonthermal impact on a malignant tumor" *Dokl. Biochem. Biophys.* **383** 101 (2002)
28. Rudenko O V "Nonlinear acoustics in medicine: a review" *Phys. Wave Phenomena* **30** (2) 73 (2022) DOI:10.3103/S1541308X22020066
29. "Николай Николаевич Андреев (к 120-летию со дня рождения)" *Акустический журн.* **46** (5) 713 (2000); "Nikolai Nikolaevich Andreev (on the 120th anniversary of his birth)" *Acoust. Phys.* **46** 624 (2000)
30. "Сергей Николаевич Ржевкин" *Акустический журн.* **27** (5) 796 (1981)
31. Мазепов В И "Памяти Юрия Михайловича Сухаревского (8.09.1906–17.09.2004)" *Акустический журн.* **51** (5) 697 (2005); Mazepov V I "In memory of Yurii Mikhailovich Sukharevskii (September 8, 1906–September 17, 2004)" *Acoust. Phys.* **51** 601 (2005)
32. "Памяти Виталия Анатольевича Зверева (03.11.1924–06.03.2024)" *Акустический журн.* **70** (2) 297 (2024)
33. Зверев В А "Как зарождалась идея параметрической акустической антенны" *Акустический журн.* **45** (5) 685 (1999); Zverev V A "How the idea of a parametric acoustic array was conceived" *Acoust. Phys.* **45** 611 (1999)
34. Ковалева С К *Лев Термен. Феномен XX века* (М.: Бюро Квантум, 2008)
35. "Владимир Александрович Красильников (14.09.1912–17.03.2000)" *Акустический журн.* **46** (5) 716 (2000)
36. Зарембо Л К, Красильников В А "Некоторые вопросы распространения ультразвуковых волн конечной амплитуды в жидкостях" *УФН* **68** 687 (1959); Zarembo L K, Krasil'nikov V A "Some problems in the propagation of ultrasonic waves of finite amplitude in liquids" *Sov. Phys. Usp.* **2** 580 (1959)
37. Ржевкин С Н "Успехи советской акустики" *УФН* **34** 1 (1948)
38. Луньков А А, Григорьев В А, Петников В Г "Акустические характеристики морского дна и их влияние на дальнее распространение звука на арктическом шельфе" *УФН* **194** 184 (2024); Lunkov A A, Grigorev V A, Petnikov V G "Acoustic properties of the sea bottom and their effect on long-range sound propagation on the Arctic shelf" *Phys. Usp.* **67** 171 (2024)
39. Есипов И Б "Обзор достижений в области физической акустики в 2010 году, по материалам Научного совета РАН по акустике" *УФН* **181** 1228 (2011); Esipov I B "Developments in physical acoustics 2010: a review of materials from the Scientific Council on Acoustics of the Russian Academy of Sciences" *Phys. Usp.* **54** 1186 (2011)
40. Горшков А Б, Шамаев В Г "Новые возможности сайта архива Акустического журнала" *Акустический журн.* **70** (5) 801 (2024)

Acoustics and the Defense of the Fatherland*

O.V. Rudenko

(1) *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Leninskie gory 1, str. 2, 119991 Moscow, Russian Federation*

(2) *Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Vavilova 38, 119991 Moscow, Russian Federation*

(3) *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, ul. Bolshaya Gruzinskaya 10, 123995 Moscow, Russian Federation*

E-mail: rudenko@acs366.phys.msu.ru

This paper provides a brief overview of the main achievements in applied acoustics that served defense needs during the Great Patriotic War and their subsequent development. The review is arbitrarily divided into three sections: 1) underwater sound, 2) aerial acoustics, and 3) medical applications. Each section provides historical information on the most important developments during the war years, as well as related progress after Victory. The physical phenomena underlying these technical solutions are outlined, and the acoustic specificity is emphasized.

* This review is based on the report presented at the Scientific Session of the Physical Sciences Division of the Russian Academy of Sciences (PSD RAS) "On the 80th Anniversary of the Great Victory: Contribution of Russian Physicists" on May 14, 2025 (see *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **195** (12) ii (2025); *Physics–Uspekhi* **68** (12) (2025)).

Keywords: sonar, underwater sound, noise direction finders, marine and aviation acoustics, parametric transmitting arrays, submarines, mine and torpedo weapons, direction finding, aircraft, medical ultrasound

PACS numbers: **07.64.+z**, **43.30.+m**, 87.50.Y–

Bibliography — 40 references

Received 31 July 2025

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **195** (12) 1268–1281 (2025)

Physics–Uspekhi **68** (12) (2025)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.05.039976>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2025.05.039976>