

ИЗ ИСТОРИИ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ В СССР: 1950–1970-е гг.

ВЛАДИСЛАВ ПЕТРОВИЧ КУЗНЕЦОВ

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Россия, 117997, Москва, Нахимовский просп., д. 36
E-mail: vladkuz@ocean.ru

Период 1950–1970-х гг. оказался чрезвычайно плодотворным в истории изучения нелинейных волновых процессов. Главной причиной этого стало создание мощных радио, оптических и акустических источников излучения. В статье кратко рассмотрено развитие в СССР в упомянутый период исследований по нелинейной акустике, в том числе наиболее важные достижения в разработке теории и создании параметрических антенн. Отмечен вклад в эти работы таких ученых, как Н. Н. Андреев, Р. В. Хохлов, О. В. Руденко, В. А. Красильников, В. А. Зверев, В. И. Тимошенко и др.

Ключевые слова: история, нелинейные волновые процессы, нелинейная акустика, параметрические антенны, школа нелинейной акустики МГУ.

DOI: 10.31857/S020596060001815-8

**FROM THE HISTORY OF NONLINEAR ACOUSTICS
IN THE USSR: 1950s–1970s**

VLADISLAV PETROVICH KUZNETSOV

P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
Nakhimovskii prosp., 36, Moscow, 117997, Russia
E-mail: vladkuz@ocean.ru

The period from the 1950s to the 1970s proved to be extremely fruitful in the history of studies of nonlinear wave processes. This was largely due to the creation of powerful radio, optical and acoustic emitters. The paper briefly reviews the development of studies on nonlinear acoustics in the USSR during the said period, including the most significant achievements in the development of theory and creation of parametric arrays. The contribution of scientists such as N. N. Andreev, R. V. Khokhlov, O. V. Rudenko, V. A. Krasilnikov, V. A. Zverev, V. I. Timoshenko, etc. is acknowledged.

Keywords: history, nonlinear wave processes, nonlinear acoustics, parametric arrays, Moscow University school of nonlinear acoustics.

В истории изучения нелинейных волновых процессов относительно короткий период 1950–1970-х гг. оказался необычайно плодотворным. Главной причиной этого стало создание мощных источников излучения в радиофизике, оптике и акустике. В данной статье будут рассмотрены некоторые основные вопросы истории развития нелинейной акустики в СССР в указанный период, а также наиболее важные достижения в теории и разработке параметрических антенн и их применении в ряде областей. Подробное изложение всей истории нелинейной акустики в настоящее время уже невозможно из-за огромного объема материала, однако мы можем вспомнить основных создателей, экспериментаторов и теоретиков нелинейной акустики и отдать им должное независимо от того, живы они или нет.

Инициатором исследований по нелинейной акустике в Советском Союзе был академик Николай Николаевич Андреев (1880–1970). В 1955 г. он опубликовал в первом номере «Акустического журнала» статью, которая и положила начало советским исследованиям в этой области¹. В ней он впервые указал на кинематическую нелинейность, которая появляется при эйлеровом описании нелинейного процесса и применил потенциал скорости, подчеркивая отсутствие в среде вихревой компоненты.

В 1957 г. Л. Коважный и Боа-Те Чу провели анализ возможных нелинейных взаимодействий в акустике и гидродинамике². Линеаризованные ими уравнения гидродинамики показывают, что в вязкой теплопроводящей сжимаемой среде возможны три моды возмущений: вихревая, потенциальная и энтропии. В однородной среде, где возбуждена лишь одна звуковая мода, выбор функции для описания состояния волны достаточно произволен. Иначе обстоит дело в среде, где помимо потенциальной возбуждены еще вихревая и энтропийная моды. В этом случае выбор должен диктоваться условием максимального разделения нормальных мод. Учитывая, что понятие потенциального и вихревого движений жидкости являются чисто кинематическими характеристиками потока, полностью разделить вихревую и потенциальную моды математически строго обосновано можно представив полное поле скоростей в безграничной среде в виде суммы вихревой и потенциальной компонент³. Поэтому выбор какой-либо термодинамической величины (например, давления) для описания состояния звуковой волны в турбулентной среде не удовлетворяет условию максимального разделения мод, так как в турбулентной несжимаемой среде имеются пульсации давления, не связанные с изменением объема среды. Для описания звукового поля в турбулентной среде можно выбрать и скалярный потенциал скорости, также удовлетворяющий условию максимального разделения мод⁴. Кроме

¹ Андреев Н. Н. О некоторых величинах второго порядка в акустике // Акустический журнал. 1955. Т. 1. № 1. С. 3–11.

² 2. Chu, Boa-Teh, Kovásznay, L. S. G. Non-Linear Interactions in a Viscous Heat-Conducting Compressible Gas // Journal of Fluid Mechanics. 1958. Vol. 3. No. 5. P. 494–514; Кузнецов В. П. Нелинейная акустика в океанологии. М.: Физматлит, 2010.

³ Кузнецов. Нелинейная акустика в океанологии...

⁴ Андреев. О некоторых величинах второго порядка...; Кузнецов. Нелинейная акустика в океанологии...

того, только для скалярного потенциала скорости удалось написать замкнутое нелинейное волновое уравнение во втором приближении по величине возмущений и величине кинетических коэффициентов вязкости и теплопроводности, описывающее распространение звуковых волн конечной амплитуды в диссипативных однородных средах ⁵.

Огромный вклад в теорию и практику нелинейных волновых процессов внес академик Рем Викторович Хохлов (1926–1977) ⁶. Разработанные им теоретические методы и физические идеи, полученные им вместе с сотрудниками и учениками конкретные результаты стали прорывными в области нелинейной оптики, нелинейной акустики, радиофизики и др. Хохлов разработал оригинальный метод анализа поэтапного радикального упрощения так называемых укороченных уравнений, описывающих поведение нелинейных систем. Этот метод теперь принято называть методом Хохлова. В 1965 г. в МГУ была создана кафедра волновых процессов, которую возглавил Рем Викторович. В период наиболее активных исследований по нелинейной оптике проблемы нелинейной акустики постоянно оставались в круге научных интересов Хохлова. В это время он активно работал с учениками-акустиками С. И. Солуяном, Е. А. Заболотской, В. В. Канером, Н. И. Пушкиной, В. П. Кузнецовым, О. В. Руденко и др., тогда был создан математический аппарат современной нелинейной акустики и выполнены значительные работы в этой области ⁷. В предположении медленности изменения профиля волны вдоль и поперек оси пучка (метод Хохлова) Заболотской и Хохлову удалось понизить порядок гиперболического нелинейного уравнения акустики до параболического (ХЗ) ⁸. Это уравнение стало одним из базовых для нелинейной акустики и особенно значимым для расчета и конструирования параметрических антенн. Как пишет в своей работе, посвященной 40-летию этого уравнения, ученик Хохлова ныне академик РАН Олег Владимирович Руденко:

Определенно можно утверждать только то, что начало исследований нелинейных волновых пучков на основе уравнений типа ХЗ было инициировано и начато в СССР. Лишь спустя несколько лет эти работы были поддержаны и

⁵ Кузнецов В. П. Уравнения нелинейной акустики // Акустический журнал. 1970. Т. 16. № 4. С. 548–553.

⁶ О нем см.: Девяткова Л. Академик Хохлов – ректор Московского университета. М.: Изд-во МГУ, 2005.

⁷ Заболотская Е. А., Хохлов Р. В. Квазиплоские волны в нелинейной акустике ограниченных пучков // Акустический журнал. 1969. Т. 15. № 1. С. 40–47; Руденко О. В., Солуян С. И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975; Руденко О. В., Солуян С. И., Хохлов Р. В. Проблемы теории нелинейной акустики // Акустический журнал. 1974. Т. 20. № 3. С. 449–457; Бахвалов Н. С., Жилейкин Я. М., Заболотская Е. А. Нелинейная теория звуковых пучков. М.: Наука, 1982; Наугольных К. А., Солуян С. И., Хохлов Р. В. Сферические волны конечной амплитуды в вязкой теплопроводящей среде // Акустический журнал. 1963. Т. 9. № 1. С. 54–60; Наугольных К. А., Солуян С. И., Хохлов Р. В. Цилиндрические волны конечной амплитуды в диссипативной среде // Вестник МГУ. Серия: Физика. Астрономия. 1962. № 4. С. 65–71; Руденко О. В. К 40-летию уравнения Хохлова – Заболотской // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 4. С. 452–462.

⁸ Кузнецов. Уравнение нелинейной акустики...; Заболотская, Хохлов. Квазиплоские волны в нелинейной акустике...

получили развитие в США и Европе. Приоритет отечественных ученых связан с тем, что у нас занимались этим люди с физическим образованием и широким научным кругозором, а не узкие специалисты-инженеры⁹.

Такая точка зрения находит подтверждение и в хронологии наиболее значимых открытий в области акустики, размещенной на сайте Американского акустического общества¹⁰, выдержки из которой приводятся ниже¹¹.

Хохлов неоднократно подчеркивал, что нелинейная акустика, представляющая ранее в основном академический интерес, постепенно превращается в практически важную область с многочисленными приложениями к гидроакустике, физике твердого тела, авиационной акустике, акустике волноводов и др. Он исследовал такие явления, как ударные волны, параметрическое усиление и генерация звука, нелинейная дифракция ограниченных звуковых пучков, акустические течения, акустическая турбулентность и статистические явления в источниках мощного излучения.

С. А. Ахманов пишет, что работы по статистической нелинейной акустике были начаты в середине 1970-х гг.¹² Однако уже в 1966 г. Рем Викторович предложил автору этих строк заняться этой проблемой, и в 1969 г. вышла первая статья на эту тему¹³. Эти задачи связаны с нелинейной эволюцией широких сплошных спектров, близкие по постановке к задачам теории слабой турбулентности. В этих работах на примере задачи о простой волне было показано, что характер зависимости в высокочастотной области спектра является универсальным и не зависит от природы сил, вынуждающих турбулентное движение, в то же время спектр низкочастотного шума определяется крупномасштабными возмущениями. В указанных статьях было получено точное решение в спектральной форме уравнения простой волны. В дальнейшем эта

⁹ Руденко. К 40-летию уравнения Хохлова – Заболотской...

¹⁰ См.: <http://tspaasa.org/timeline/>.

¹¹ 1952: Лайтхилл начинает изучение аэроакустики.

1953: Лайтхилл, Бачелор, Обухов, Монин и др. определяют сечение рассеяния звуковых волн турбулентностью.

1950: Зарембо и Красильников выполняют эксперименты с нелинейной акустикой в твердых телах.

1959: Малюжинец получает параболическое уравнение для акустических пучков.

1959–1962: Зверев и Калачев разрабатывают излучатели и приемники на основе нелинейного взаимодействия звука в звуке (в США – параметрические антенны) (выполняются параллельно с работой Вестервельта в США, но рассекречены и опубликованы позднее – в 1970 г.).

1963: Вестервельт публикует теорию параметрических преобразователей.

1969: Хохлов и Заболотская разрабатывают модельное уравнение для нелинейных акустических волн.

1971: Заболотская, Хохлов и Кузнецов разработали уравнение для нелинейных акустических волн с диссипацией, теперь называемое уравнением ХЗК.

1972: Островский, Соустова и Сутин разрабатывают параметрические генераторы звука в резонаторе с водой; позже в металлическом резонаторе, 1978 г.

¹² Ахманов С. А. Метод Хохлова в теории нелинейных волн // Успехи физических наук. 1986. Т. 149. № 3. С. 361–390.

¹³ Кузнецов В. П. Случайные акустические поля в нелинейных средах // Акустический журнал. 1969. Т. 15. № 4. С. 554–559. См. также: Кузнецов В. П. О спектрах интенсивных шумов // Акустический журнал. 1970. Т. 16. № 1. С. 155–156.

проблема была исследована в многочисленных работах О. В. Руденко и В. Е. Захарова¹⁴.

Хохлов подготовил более 50 докторов и кандидатов наук, которые внесли большой вклад в развитие отечественной и мировой науки. Многие из них стали известными учеными. В широкой области нелинейной физики и акустики ведущим ученым стал академик РАН Олег Владимирович Руденко.

Одним из основоположников школы нелинейной акустики в МГУ является Владимир Александрович Красильников (1912–2000). Он воспитал более 30 докторов и кандидатов наук, среди которых были Л. К. Зарембо, В. А. Буров, О. Ю. Сердобольская, В. Е. Лямов, В. И. Павлов, В. В. Крылов и др. Вместе с сотрудниками и учениками Красильников впервые экспериментально обнаружил образование пилообразной формы волны в маловязких жидкостях и нелинейное поглощение ультразвуковых и гиперзвуковых волн. Ему принадлежит первое прямое обнаружение гармоник плоской продольной акустической волны в твердых телах даже при небольших интенсивностях звука, возникающих из-за нелинейности закона Гука в изотропном теле. Рассеяние звука на звуке в твердых телах при нелинейном взаимодействии продольных и сдвиговых волн было обнаружено на кафедре акустики МГУ под руководством Красильникова. Перу Владимира Александровича принадлежат более 200 статей и книг, в том числе «Введение в нелинейную акустику» (совместно с Л. К. Зарембо)¹⁵, первая в мировой литературе монография по нелинейной акустике, сыгравшая исключительно важную роль в развитии этого направления. Известен факт о влиянии ранних экспериментальных работ Красильникова на развитие исследований нелинейных волновых процессов в средах с дисперсией¹⁶.

В 1987 г. кафедру акустики МГУ возглавил талантливый ученик Хохлова академик Олег Владимирович Руденко, внесший значительный вклад в развитие нелинейной физики, акустики и ряда прикладных направлений, обогативший науку крупными результатами в области физики нелинейных волн, лазерной физики, биомедицинской и подводной акустики и др.¹⁷ В 1975 г. Руденко вместе Солуяном написал монографию «Теоретические основы нелинейной акустики», в которой был систематически изложен математический аппарат нелинейной акустики, развитый Хохловым и его учениками, проанализированы основные идеи и результаты в этой области¹⁸. В 1977 г. эта книга вышла в США¹⁹.

¹⁴ Руденко О. В. Взаимодействия интенсивных шумовых волн // Успехи физических наук. 1986. Т. 149. № 3. С. 413–447; Захаров В. Е., Сагдеев Р. З. О спектре акустической турбулентности // Доклады АН СССР. 1970. Т. 192. № 2. С. 297.

¹⁵ Красильников В. А., Зарембо Л. К. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966.

¹⁶ Памяти Владимира Александровича Красильникова (в связи с 90-летием со дня рождения) // Акустический журнал. 2003. Т. 49. № 4. С. 590–593; О научной школе профессора В. А. Красильникова // Известия АН. Серия физическая. 2000. Т. 64. № 12. С. 2322–2324; Красильников В. А., Крылов В. В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984; Красильников В. А., Кузнецов В. П. Распространение нелинейных звуковых волн в жидкости при кавитации // Акустический журнал. 1974. Т. 20. № 3. С. 473–477.

¹⁷ Олег Владимирович Руденко (к 60-летию со дня рождения) // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. № 12. С. 1385–1386.

¹⁸ Руденко, Солуян. Теоретические основы нелинейной акустики...

В 1950-х гг. активизация исследований по нелинейной акустике была обусловлена практическим вопросом: возможно ли «рассеяние звука на звуке»? Ответом на этот вопрос явилось исследование, которое стало началом осуществления и практического создания акустической параметрической излучающей и приемной антенны. Вопросы взаимодействия акустических волн в жидкостях интересовали ученых еще в начале 1950-х гг.²⁰ К этому времени в нескольких лабораториях в СССР и США были созданы мощные генераторы ультразвука, позволившие наблюдать сильные нелинейные эффекты в жидкостях и твердых телах. В 1955 г. уже было установлено, что взаимодействие звука со звуком при пересечении двух ограниченных пучков разной частоты физически реально²¹. В результате область взаимодействия этих пучков становится источником излучения на разностной и суммарной частотах пучков. Это и продемонстрировало возможность параметрического приема и излучения звука. Область излучения низкочастотного сигнала является «бестелесной» антенной, размеры которой много больше размеров высокочастотной антенны накачки, и она определяет высокую направленность излучения низкой частоты, что оказалось основным достоинством параметрического излучателя. Также значительным преимуществом такой антенны является широкополосность и отсутствие боковых лепестков диаграммы направленности²².

Идею параметрической антенны впервые высказал и осуществил член-корреспондент РАН Виталий Анатольевич Зверев. Ее понял и оценил академик Анатолий Петрович Александров и немедленно выделил средства на реализацию такой антенны в натурных морских условиях. Антенна была изготовлена в 1961 г. еще до выхода в свет известной работы П. Вестервелта²³, в которой прозвучала идея осуществления такой антенны. В течение ряда лет велась дискуссия относительно приоритета создания приемных и излучающих параметрических антенн. Историю зарождения таких антенн подробно рассказал Зверев²⁴. В упомянутой выше хронологии развития акустики, приведенной на сайте Американского акустического общества, отмечена роль советских ученых В. А. Зверева и А. И. Калачева²⁵ в исследованиях нелинейного взаимодействия

¹⁹ Rudenko, O. V., Soluyan, S. I. Theoretical Foundations of Nonlinear Acoustics. New York: Consultants Bureau, 1977.

²⁰ Горелик А. Г., Зверев В. А. К вопросу о взаимодействии акустических волн // Акустический журнал. 1955. Т. 1. № 4. С. 339–342; Михайлов Г. Д. О взаимодействии ультразвуковых волн в жидкости // Доклады АН СССР. 1953. Т. 89. С. 663.

²¹ Горелик А. Г., Зверев В. А. К вопросу о взаимодействии акустических волн // Акустический журнал. 1955. Т. 1. № 4. С. 339–342.

²² Кузнецов. Нелинейная акустика в океанологии...; Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение. 1981.

²³ Westervelt, P. J. Parametric Acoustic Array // Journal of the Acoustical Society of America. 1963. Vol. 35. No. 4. P. 535–537.

²⁴ Зверев В. А. Как зарождалась идея параметрической акустической антенны // Акустический журнал. 1999. Т. 45. № 5. С. 685–692.

²⁵ Зверев В. А., Калачев А. И. Измерение взаимодействия звуковых волн // Акустический журнал. 1958. Т. 4. № 4. С. 321–324; Зверев В. А., Калачев А. И. Излучение звука из области пересечения двух звуковых пучков // Акустический журнал. 1969. Т. 15. № 3. С. 369–376.

акустических волн для реализации направленного низкочастотного излучения и приема звука, выполненных в 1959–1962 гг. Создание макетов, опытных и серийных образцов параметрических антенн, а также проведение широкомасштабных экспериментальных морских исследований с применением параметрической гидроакустической аппаратуры выполнял коллектив акустиков из Таганрогского радиотехнического института под руководством профессора Владимира Ивановича Тимошенко, а также акустиков-океанологов Института океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР под руководством академика Леонида Михайловича Бреховских. Уже первые испытания во втором рейсе научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» Института океанологии в 1981 г. показали отличные характеристики параметрических антенн для изучения гидрофизических свойств морской среды²⁶. Ведущие профессора этих институтов В. И. Тимошенко, Ю. Ю. Житковский, С. П. Тарасов, В. А. Воронин, В. П. Кузнецов и др. опубликовали ряд работ по нелинейной акустике, среди которых имеются как монографии физической направленности, так и работы, связанные с практическим использованием принципов нелинейной акустики в гидроакустике²⁷. В Таганроге были проведены три Всесоюзных конференции «Нелинейная гидроакустика» (1974, 1976, 1983) с демонстрацией параметрических приборов в Таганрогском заливе.

В 1985 г. группе ученых из МГУ Заболотской, Зарембо, Красильникову, Руденко и Хохлову, а также К. А. Наугольных и А. В. Римскому-Корсакову из Акустического института АН СССР и сотрудникам ИПФ АН СССР Звереву и Л. А. Островскому, а также Тимошенко из Таганрогского радиотехнического института, присуждена Государственная премия СССР в области науки за цикл работ «Разработка физических основ нелинейной акустики и ее приложений», опубликованных в 1955–1983 гг.

Признанием значительных достижений отечественных ученых явилось проведение Международных симпозиумов по нелинейной акустике в Москве (1975, 2002) и Новосибирске (1987).

References

- Akhmanov, S. A. (1986) Metod Khokhlova v teorii nelineinykh voln [Khokhlov's Method in the Theory of Nonlinear Waves], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 149, no. 3, pp. 361–390.
- Andreev, N. N. (1955) O nekotorykh velichinakh vtorogo poriadka v akustike [On Some Second-Order Quantities in Acoustics], *Akusticheskii zhurnal*, vol. 1, no. 1, pp. 3–11.
- Bakhvalov, N. S., Zhileikin, Ia. M., and Zabolotskaia, E. A. (1982) *Nelineinaiia teoriia zvukovykh puchkov* [Nonlinear Theory of Sound Beams]. Moskva: Nauka.
- Chu, Boa-Teh, and Kovásznyai, L. S. G. (1958) Non-Linear Interactions in a Viscous Heat-Conducting Compressible Gas, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 3, no. 5, pp. 494–514.

²⁶ Кузнецов. Нелинейная акустика в океанологии...; Воронин В. А., Кузнецов В. П., Мордвинов Б. Г., Тарасов С. П., Тимошенко В. И. Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2007.

²⁷ Новиков, Руденко, Тимошенко. Нелинейная гидроакустика...; Воронин, Кузнецов, Мордвинов, Тарасов, Тимошенко. Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана...; Новиков Б. К., Тимошенко В. И. Параметрические антенны в гидролокации. Л.: Судостроение, 1990.

- Deviatkova, L. (2005) *Akademik Khokhlov – rektor Moskovskogo universiteta [Academician Khokhlov, Rector of Moscow University]*. Moskva: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta.
- Gorelik, A. G., and Zverev, V. A. (1955) K voprosu o vzaimodeistvii akusticheskikh voln [On the Interaction of Acoustic Waves], *Akusticheskii zhurnal*, vol. 1, no. 4, pp. 339–342.
- Gurbatov, S. N., Rudenko, O. V., and Saichev, A. I. (2008) *Volny i struktury v nelineinykh sredakh bez dispersii [Waves and Structures in Nonlinear Media That Has no Dispersion]*. Moskva: Fizmatlit.
- Krasil'nikov, V. A., and Krylov, V. V. (1984) *Vvedenie v fizicheskuiu akustiku [Introduction to Physical Acoustics]*. Moskva: Nauka.
- Krasil'nikov, V. A., and Kuznetsov V. P. (1974) Rasprostraneniye nelineinykh zvukovykh voln v zhidkosti pri kavitatsii [Nonlinear Sound Wave Propagation in Liquids with Cavitation], *Akusticheskii zhurnal*, vol. 20, no. 3, pp. 473–477.
- Krasil'nikov, V. A., and Zarembo, L. K. (1966) *Vvedenie v nelineinuiu akustiku [Introduction to Nonlinear Acoustics]*. Moskva: Nauka.
- Kuznetsov, V. P. (1969) Sluchainnye akusticheskie polia v nelineinykh sredakh [Random Acoustic Fields in Nonlinear Media], *Akusticheskii zhurnal*, vol. 15, no. 4, pp. 554–559.
- Kuznetsov, V. P. (1970) O spektrakh intensivnykh шумов [On the Intense Noise Spectra], *Akusticheskii zhurnal*, vol. 16, no. 1, pp. 155–156.
- Kuznetsov, V. P. (1970) Uravneniia nelineinoi akustiki [Nonlinear Acoustics Equations], *Akusticheskii zhurnal*, vol. 16, no. 4, pp. 548–553.
- Kuznetsov, V. P. (2010) *Nelineinaia akustika v okeanologii [Nonlinear Acoustics in Oceanology]*. Moskva: Fizmatlit.
- Mikhailov, G. D. (1953) O vzaimodeistvii ul'trazvukovykh voln v zhidkosti [On the Interaction of Ultrasonic Waves in Liquids], *Doklady AN SSSR*, vol. 89, p. 663.
- Naugol'nykh, K. A., Soluian, S. I., and Khokhlov, R. V. (1962) Tsilindricheskie volny konechnoi amplitudy v dissipativnoi srede [Cylindrical Waves of Finite Amplitude in Dissipative Medium], *Vestnik MGU, seriia: Fizika. Astronomiia*, no. 4, pp. 65–71.
- Naugol'nykh, K. A., Soluian, S. I., and Khokhlov, R. V. (1963) Sfericheskie volny konechnoi amplitudy v viazkoj teploprovodiashchei srede [Spherical Waves of Finite Amplitude in a Heat-Conducting Viscous Medium], *Akusticheskii zhurnal*, vol. 9, no. 1, pp. 54–60.
- Novikov, B. K., Rudenko, O. V., and Timoshenko, V. I. (1981) *Nelineinaia gidroakustika [Nonlinear Hydroacoustics]*. Leningrad: Sudostroenie.
- Novikov, B. K., and Timoshenko, V. I. (1990) *Parametricheskie anteny v gidrolokatsii [Parametric Arrays in Hydrolocation]*. Leningrad: Sudostroenie.
- O nauchnoi shkole professora V. A. Krasil'nikova [On Professor V. A. Krasil'nikov's Scientific School] (2000), *Izvestiia AN, seriia fizicheskaya*, vol. 64, no. 12, pp. 2322–2324.
- Oleg Vladimirovich Rudenko (K 60-letiiu so dnia rozhdeniia) [Oleg Vladimirovich Rudenko (Towards the 60th Anniversary of Birth)] (2007), *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 177, no. 12, pp. 1385–1386.
- Pamiat Vladimir Aleksandrovicha Krasil'nikova (v sviazi s 90-letiem so dnia rozhdeniia) [In Memoriam Vladimir Aleksandrovich Krasil'nikov (In Connection with the 90th Anniversary of Birth)] (2003), *Akusticheskii zhurnal*, vol. 49, no. 4, pp. 590–593.
- Rudenko, O. V. (1986) Vzaimodeistviia intensivnykh shumovykh voln [Interactions of Intense Noise Waves], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 149, no. 3, pp. 413–447.
- Rudenko, O. V. (2010) K 40-letiiu uravneniia Khokhlova – Zabolotskoi [Towards the 40th Anniversary of the Khokhlov – Zabolotskaya Equation], *Akusticheskii zhurnal*, vol. 56, no. 4, pp. 452 – 462.
- Rudenko, O. V., and Soluian, S. I. (1975) *Teoreticheskie osnovy nelineinoi akustiki [Theoretical Foundations of Nonlinear Acoustics]*. Moskva: Nauka.
- Rudenko, O. V., and Soluyan, S. I. *Theoretical Foundations of Nonlinear Acoustics*. New York: Consultants Bureau, 1977.
- Rudenko, O. V., Soluian, S. I., and Khokhlov, R. V. (1974) Problemy teorii nelineinoi akustiki [Problems in Nonlinear Acoustics Theory], *Akusticheskii zhurnal*, vol. 20, no. 3, pp. 449–457.
- Voronin, V. A., Kuznetsov, V. P., Mordvinov, B. G., Tarasov, S. P., and Timoshenko, V. I. (2007) *Nelineinye i parametricheskie protsessy v akustike okeana [Nonlinear and Parametric Processes in Oceanic Acoustics]*. Rostov-na-Donu: Rostizdat.
- Westervelt, P. J. (1963) Parametric Acoustic Array, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 35, no. 4, pp. 535–537.

- Zabolotskaia, E. A., and Khokhlov, R. V. (1969) Kvaziploskie volny v nelineinoi akustike ograniennykh puchkov [Quasi-Flat Waves in Nonlinear Acoustics of Bounded Beams], *Akusticheskii zhurnal*, vol. 15, no. 1, pp. 40–47.
- Zakharov, V. E., and Sagdeev, R. Z. (1970) O spektre akusticheskoi turbulentnosti [Spectrum of Acoustic Turbulence], *Doklady AN SSSR*, vol. 192, no. 2, pp. 297–300.
- Zverev, V. A. (1999) Kak zarozhdalas' ideia parametricheskoi akusticheskoi anteny [How the Idea of the Parametric Acoustic Array Was Born], *Akusticheskii zhurnal*, vol. 45, no. 5, pp. 685–692.
- Zverev, V. A., and Kalachev, A. I. (1958) Izmerenie vzaimodeistviia zvukovykh voln [Measurement of Sound Waves Interaction], *Akusticheskii zhurnal*, vol. 4, no. 4, pp. 321–324.
- Zverev, V. A., and Kalachev, A. I. (1969) Izluchenie zvuka iz oblasti peresecheniia dvukh zvukovykh puchkov [Sound Emission from the Intersection of Two Sound Beams], *Akusticheskii zhurnal*, vol. 15, no. 3, pp. 369–376.
- Zverev, V. A., and Kalachev, A. I. (1970) Moduliatsiia zvuka zvukom pri peresechenii akusticheskikh puchkov [Modulation of Sound by Sound in the Intersection of Acoustic Beams], *Akusticheskii zhurnal*, vol. 16, no. 2, pp. 245–251.