

Владимир Евгеньевич Захаров

(к 80-летию со дня рождения)

PACS number: 01.60. + q

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.08.038655>

1 августа 2019 г. исполнилось 80 лет выдающемуся физику-теоретику, академику РАН, Владимиру Евгеньевичу Захарову. Его имя неразрывно связано с рождением и развитием современной нелинейной физики и математики. Его достижения в этой области давно стали классическими и признаны всем мировым научным сообществом. Отражением этого является высочайший рейтинг его научных работ (его индекс цитирования более 42000).

В.Е. Захаров закончил физический факультет Новосибирского государственного университета (НГУ) в 1963 году. Он из замечательной плеяды первых выпускников НГУ, ученик академика Р.З. Сагдеева. Научная деятельность В.Е. началась в знаменитом Институте Будкера — Институте ядерной физики Сибирского отделения АН СССР. С 1974 г. он работает в Институте теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН. С 1992 г., на протяжении более чем 10 лет, он был директором этого института. С 2004 г. В.Е. работает в Физическом институте имени П.Н. Лебедева РАН, руководит лабораторией математической физики.

В.Е. внёс существенный вклад практически во все области современной физики: в нелинейную теорию плазмы, гидродинамику, физику твёрдого тела, нелинейную оптику, океанологию, общую теорию относительности, теорию поля, а также в математическую физику. Пионерские результаты в теории интегрируемых систем, связанные с развитием метода обратной задачи рассеяния — жемчужины математической физики XX века, принесли ему признание не только физиков-теоретиков, но и математиков.

Главный вклад В.Е. в науку связан с развитием трёх важнейших направлений нелинейной физики и математики: теории волновых коллапсов, теории солитонов и теории волновой турбулентности.

Предсказание коллапса ленгмюровских волн в плазме как нового физического явления и созданная В.Е. теория являются одним из его выдающихся достижений в области нелинейной физики плазмы. Существовавшая до работы В.Е. 1972 года теория ленгмюровской турбулентности, основанная на приближении случайных фаз, предсказывала образование ленгмюровского конденсата при $k = 0$, что никак не могло объяснить многочисленные экспериментальные факты. В.Е. установил, что такой сценарий развития плазменной турбулентности является невозможным в силу так называемой модуляционной неустойчивости конденсата. Коллапс ленгмюровских волн, как нелинейная стадия развития этой неустойчивости, приводит к сжатию ленгмюровских пакетов до размеров нескольких дебаевских радиусов, что сопровождается генерацией быстрых электронов. В основе теории ленгмюровского коллапса лежит метод усреднения, позволивший вывести уравнения взаимодействия ленгмюровских и ионных колебаний в плазме (в частности, взаимодействия высокочастотных и низкочастотных волн звукового типа), которые сейчас называются уравнениями Захарова. Эта работа кардинально изменила представления о плазменной турбулентности, а также о механизмах диссипации высокочастотной волновой турбулентности при коллективных методах нагрева плазмы, таких как нагрев электронными пучками или высокочастотным электромагнитным полем. Эти работы оказали существенное влияние на развитие нелинейных исследований не только в физике плазмы, но также в нелинейной оптике и гидрофизике, связанной с турбулентностью морского волнения.

Создание теории волновых коллапсов, начиная с работ В.Е. по теории ленгмюровского коллапса, самофокусировке света в двумерной и трёхмерной геометрии и кончая исследованиями взаимодействия коллапсов и слабой волновой турбулентности, а также влияния плазменных коллапсов на спектры частиц, является его фундаментальным вкладом в физику нелинейно-волновых процессов. Сам термин "волновой коллапс" был введён в работах В.Е. и сейчас широко используется в научном сообществе. Согласно концепции, сформулированной в работах В.Е. и его учеников, физическая реализация



Владимир Евгеньевич Захаров

волнового коллапса либо солитонов критически зависит от ограниченности или неограниченности снизу гамильтониана волновой системы. Случай ограниченного гамильтониана позволил открыть устойчивые солитоны, в то время как неограниченность стала служить одним из критериев волнового коллапса. Именно таким образом были найдены устойчивые трёхмерные ионнозвуковые солитоны в замагниченной плазме как решения уравнения Захарова — Кузнецова.

Создание теории колмогоровских спектров волновой турбулентности, называемых теперь спектрами Колмогорова — Захарова, — одно из главных достижений В.Е. в теории турбулентности. Это спектры степенного типа, соответствующие постоянному потоку энергии или числа квазичастиц. Они представляют собой точные решения кинетических уравнений для волн, которые находятся с помощью специальных конформных преобразований, называемых преобразованиями Захарова. Эти спектры описывают перекачку волн в коротковолновую область (прямой каскад) либо в область больших масштабов (обратный каскад). Созданная В.Е. теория колмогоровских спектров волновой турбулентности, проявляющихся при морском волнении, звуковой турбулентности и возбуждении плазменных колебаний, стала крупным вкладом в океанологию и физику плазмы, в существенной мере определившим их современный облик. За выдающийся вклад в теорию турбулентности, в частности за предсказание

обратного каскада, в 2003 году В.Е. Захаров был удостоен Международной медали Дирака.

В.Е. Захаров — один из основоположников математической теории солитонов, основанной на применении тонких математических методов интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с помощью формализма обратной задачи рассеяния. Метод обратной задачи рассеяния был сформулирован В.Е. с соавторами как теория интегрируемых систем с бесконечным числом степеней свободы. В своей пионерской работе 1972 г. совместно с А.Б. Шабатом им было проинтегрировано нелинейное уравнение Шрёдингера, одно из наиболее универсальных уравнений нелинейных волн. Это уравнение имеет широкий спектр применения: оно описывает в нелинейных диэлектриках и плазме самофокусировку и самомодуляцию света, при сверхнизких температурах динамику бозе-эйнштейновских газовых конденсатов, поведение морского волнения, распространение оптических импульсов в световолоконных линиях связи, применяется оно и как квантовая модель взаимодействующих точечных бозе-частиц. Математическая основа этой работы связана с решением обратной задачи для линейного оператора — оператора Захарова–Шабата, спектр которого остаётся во времени неизменным. Солитоны задаются положением дискретного спектра оператора Захарова–Шабата. По этой причине солитоны, как нелинейные когерентные локализованные структуры, оказываются структурно устойчивыми — их форма остаётся неизменной как при рассеянии на солитонах, так и на несолитонных возмущениях.

Эта теория открыла возможности применения оптических солитонов в световолоконных линиях связи в качестве бита информации. Благодаря работам В.Е. и представителей его школы это направление в последнее время получило интенсивное развитие и многочисленные приложения в новейших методах и технологиях телекоммуникаций. В настоящее время ведутся интенсивные работы по созданию будущих поколений световолоконных линий на основе непосредственного кодирования спектра оператора Захарова–Шабата, которые получили название когерентных коммуникаций.

Определяющее воздействие на современное состояние теории нелинейных волн и солитонов оказал метод одевания Захарова–Шабата 1974–1979 гг. В основе этого метода, разработанного в рамках теории интегрируемых систем, лежит способ построения солитонных и любых других решений нелинейных уравнений путём деформации произвольного затравочного решения. Другой подход, предложенный и развиваемый В.Е. совместно с его учениками, основан на решении нелокальной спектральной задачи Римана и его модификациях. Венцом этой деятельности стало решение В.Е. классической проблемы описания ортогональных криволинейных систем координат в евклидовом пространстве произвольной размерности, которая была поставлена ещё в начале XIX в. и связана с именами великих математиков Римана, Бианки и др. Развитие этих методов показало свою эффективность в решении ряда задач теории поля, гравитации, нелинейной оптики и гидродинамики. Совместно с В.А. Белинским в 1978 г. им решена важная общерелятивистская проблема интегрирования уравнений Эйнштейна для двумерных метрик, что позволило производить классификацию их решений с помощью спектральных методов, использующих переменные спектральные параметры. В частности, простейшее решение в виде чёрной дыры представляет собой аналог солитонного решения. С помощью метода обратной задачи рассеяния совместно с учениками им была полностью решена задача о суперфлуоресценции, в частности, найдены асимптотические состояния — распространяющиеся по инверсно-заселённой двухуровневой среде усиливающие импульсы, аналоги предвестника для устойчивых сред. На развитие метода обратной задачи рассеяния принципиальное влияние оказала работа В.Е. 1981 года по интегрированию уравнений Бенни, описывающих распространение волн на мелкой воде с учётом непотенциальности поля скорости. В этой работе впервые был указан способ, каким образом могут быть исследованы многомерные системы гидродинамического типа. В последние годы В.Е. сформулировал новое направление в теории классических интегрируемых систем — интегрируемая турбулентность — направление, которое сейчас интенсивно развивается как в численных экспериментах, так и в экспериментах по распространению некогерентных волн в световолоконной оптике.

В.Е. совместно с коллегами (В.С. Львовым, С.С. Старобинцом и др.) является автором теории параметрического возбуждения волн когерентным источником — так называемой S-теории. В её основе лежит оригинальная идея об описании запорогового турбулентного состояния с помощью нормальных и аномальных парных корреляторов. Эта теория стала в некотором смысле аналогом теории БКШ для

сверхпроводимости. Важным её результатом явилось предсказание о сингулярности стационарных спектров турбулентности, подтверждённое в экспериментах по параметрическому возбуждению спиновых волн в ферромагнетиках. В процессе развития этих работ В.Е. с учениками построил теорию сингулярных спектров плазменной турбулентности, распределённых в виде струй или даже сосредоточенных в отдельных точках k-пространства, при индуцированном рассеянии электромагнитных волн в плазме.

В последние годы В.Е. получил ряд основополагающих результатов по теории коллапса, интегрируемости гидродинамики со свободной границей, развитию метода обратной задачи рассеяния. Наиболее важными достижениями являются созданная им с учениками теория возникновения морских волн-убийц — проблема, имеющая практически важное значение для судоходства и строительства морских платформ, а также теория спектров морского волнения для целей прогнозирования, основанная на аналитических исследованиях и прямом численном интегрировании сложных интегро-дифференциальных кинетических уравнений для волн. В последние годы основанная В.Е. область исследования волн-убийц бурно развивается, давая практические предсказания рисков для судоходства, а также для современных световолоконных линий связи.

Невозможно представить научную деятельность В.Е. без его школы. На протяжении всей своей научной деятельности В.Е. уделял и уделяет большое внимание своим ученикам, а также ученикам своих учеников. Эта большая плеяда талантливых учёных, воспитанная им, широко известна в мировом научном сообществе как "школа Захарова" — школа по нелинейной физике и математике. В настоящее время многие из его учеников плодотворно трудятся в различных странах мира.

Ему никогда не была безразлична судьба российской науки. Это касается его активных усилий по спасению науки в России как в начале постсоветского периода, так и сейчас. Ему принадлежала инициатива по организации стипендий выдающимся учёным России и поддержке научных школ, что было весьма существенно в 1990-е годы. В связи с реорганизацией РАН в 2014 году он был одним из организаторов клуба "1 июля" учёных РАН, несогласных с проводимой реформой РАН. Этот клуб, в котором В.Е. остаётся неформальным лидером, продолжает свою созидательную деятельность по вопросам организации науки в РАН, за возрождение российской науки. Следует отметить также его активную гражданскую позицию по борьбе со лженаукой.

Говоря о научно-организационной деятельности В.Е., прежде всего нужно отметить, что он на протяжении более чем 20 лет возглавляет научный совет РАН по проблеме "Нелинейная динамика". Владимир Евгеньевич — главный редактор журналов *East European Journal of Physics* (с 2004 г.), *Journal of Nonlinear Science* (1991–2001), редактор *Journal of Turbulence* (с 2001 г.), *Physics of Life* (с 2002 г.); *Physica D, Nonlinear Phenomena* (1980–1997), председатель оргкомитетов и программных комитетов самых престижных международных конференций, симпозиумов и научных школ по нелинейной физике. В 2010 году В.Е. был награждён научным мегагрантом Правительства РФ и открыл лабораторию нелинейных волновых процессов в Новосибирском государственном университете, а сейчас — в Сколково. В 1987 и 1993 гг. научные достижения В.Е. в области фундаментальных исследований нелинейных явлений физики отмечались Государственными премиями. Он избран в Европейскую академию наук, Американское математическое общество, Оптическое общество Америки, Американский геофизический союз.

Нам хотелось бы отметить его талант как поэта, получивший самую высокую оценку профессиональных поэтов и писателей. Эта другая ипостась В.Е. является продолжением его научного творчества. Он — известный поэт, член Союза российских писателей. Стихотворения и поэмы Владимира Евгеньевича, опубликованные в разные годы в журналах *Новый мир* и *Арион* и литературных сборниках, а также в его книгах, созвучны нашему времени. Последним его достижением явилось издание шеститомного собрания его поэтических сочинений.

Присущая В.Е. исключительная энергия, доброжелательность и порядочность привлекают к нему многих самых разных людей. Друзья, коллеги и ученики от всей души сердечно поздравляют Владимира Евгеньевича с юбилеем, желают крепкого здоровья, простого человеческого счастья, долгих лет жизни и всяческих успехов в многогранной деятельности на благо России и мировой науки.

А.В. Гуревич, Л.М. Зелёный, Е.А. Кузнецов,
Г.А. Месяц, А.В. Михайлов, С.Л. Мушер,
С.П. Новиков, В.А. Рубаков, А.М. Рубенчик,
Р.З. Сагдеев, Я.Г. Синай, В.Е. Фортков