

**Отзыв официального оппонента на докторскую диссертацию  
Слюняева Алексея Викторовича  
«Аномально высокие морские волны. Физические механизмы и моделирование».**

Прежде всего, о теме диссертации. Она является крайне актуальной. Аномально высокие морские волны, внезапно возникающие на фоне относительно спокойного моря, были давно известны мореплавателям. Упоминание о них содержится в записках Колумба. Однако, предмет серьезного систематического научного исследования они стали относительно недавно, немногим более тридцати лет назад, когда стали появляться не только сообщения о непонятных катастрофах судов в результате встречи с «волнами-убийцами», но также надежные и детальные экспериментальные записи поведения морской поверхности при появлении таких волн. К тому же, по мере развития нелинейной оптики, стало ясно, что экстремальные волны не есть явление, специфическое для физической океанологии. Они наблюдаются в линиях оптической передачи информации и могут служить причиной разрушения таких линий. Сегодня ясно, что это явление имеет общезначимое значение. Оно представляет собой самопроизвольную концентрацию волновой энергии в малой области и, очевидным образом, сходно с явлением самофокусировки, однако, принципиально отличается от нее тем, что это явление, в главном приближении, одномерное, тогда как самофокусировка в нелинейной оптике осуществляется в пространствах двух или трех измерений. Таким образом, сходство явления образования экстремальных волн с самофокусировкой более «идеологическое», чем строго обоснованное.

Тем не менее, для физика, желающего построить теорию возникновения экстремальных волн, первым желанием является привлечь для этого нелинейное уравнение Шредингера (НУШ). И если мы посмотрим на литературу, мы убедимся, что не менее восьмидесяти процентов авторов используют именно НУШ – строят новые решения этого уравнения или используют уже известные решения для интерпретации экспериментальных фактов. По мере увеличения числа таких публикаций, все более остро стоит вопрос о том, насколько все-таки хорошо НУШ описывает важнейшие явления образования экстремально больших волн. Ясно, что ответ на этот вопрос требует большого и кропотливого труда, требующего при этом максимум добросовестности и самокритики. И этот труд был проделан А.В. Слюняевым. Читая его диссертацию, я не раз был впечатлен и объемом проделанной им работы, и тем высоким уровнем, на котором эта работа была проведена.

Диссертация начинается с краткого введения, в котором, тем не менее, сформулировано главное. Это есть тезис о том, что появление аномально высоких морских волн есть результат развития модуляционной неустойчивости спектров ветрового волнения, возникающей в том случае, когда эти спектры являются достаточно узкими по частоте. Этот тезис, с моей точки зрения бесспорный, проходит через всю диссертацию, что называется «красной нитью».

Изложение основного содержания диссертации начинается в главе 1. Здесь автор стартует с описания наиболее известных случаев разрушения больших океанских судов волнами-убийцами, сопровождая это эффектными фотографиями, и тут же переходит на твердую научную почву, задавая естественный вопрос: насколько появление этих волн-убийц было связано с погодными условиями – штормами и

ураганами? И, анализируя статистику кораблекрушений во всем Мировом океане, приходит к неожиданному и очень важному выводу: аномально высокие морские волны могут возникать и при довольно спокойной погоде. Этот вывод очень важен, поскольку исключает второстепенные факторы, которые могут помешать построению адекватной теории. Далее диссертант подробно анализирует проблему инструментального измерения экстремальных волн в океане, подчеркивает трудность этих измерений. Тем не менее, уже имеющихся данных достаточно, чтобы утверждать: частота возникновения достаточно высоких волн, превышающих дисперсию возвышения поверхности более чем в четыре-пять раз, намного превышает частоту, предсказываемую линейной теорией. Поэтому построение существенно-нелинейной теории является абсолютно необходимым. Далее, диссертант обозначает основную трудность экспериментального изучения экстремальных волн: как определить «время жизни» такой волны? Это невозможно сделать, производя измерения в фиксированной точке пространства или фотографируя эту волну из космоса. Ответ могут дать эксперименты в волновых бассейнах или тщательное численное моделирование. Об этом – основная часть диссертации.

Во второй главе ставится главный для теоретика вопрос: как построить адекватную аналитическую модель для описания экстремальных волн? Нелинейное уравнение Шредингера – лежит на поверхности, но уже давно было выведено уравнение Дисте, его уточняющее. Диссертант справедливо посчитал, что точность уравнения Дисте также является недостаточной и проделал немалый труд, чтобы вывести следующее к нему приближение по узости спектра. По моему мнению, этот трудоемкий вывод содержит некоторую погрешность. Так, формула (2.2.65) должна быть уточнена учетом следующего порядка по нелинейности. Но возможно это просто описка, так как численное моделирование, проведенное в рамках уточненных уравнений, приводит ко вполне разумным результатам. Следует заметить, что вывод уточненных уравнений Дисте можно было бы заметно упростить, используя гамильтоновский формализм. Тогда и конечные уравнения имели бы гамильтонову структуру, и это позволило бы контролировать их точность. Впрочем, этот вопрос мы с диссертантом обсудили, и высказанное мной замечание следует рассматривать только как рекомендацию для дальнейшей работы. На положительную оценку диссертации оно не влияет.

Далее, во второй главе автор проделал тщательную работу по сравнению точных решений НУШ с наблюдаемыми экспериментальными данными и убедительно доказал, что точные решения этой простой и вполне интегрируемой модели описывают экспериментальные данные лучше, чем можно было ожидать.

На меня произвела большое впечатление третья глава диссертации. Здесь диссертант проводит моделирование экстремальных волн, точно решая уравнения Эйлера для потенциальных течений идеальной несжимаемой жидкости со свободной поверхностью. В настоящее время известны, по крайней мере, три метода решения этой задачи, и диссертант великолепно владеет двумя из них – методом конформного преобразования и методом, которому он дает название HOSM, и который представляет собой псевдоспектральный код высокого порядка. Он проводит сравнение результатов, полученных этими двумя методами, и они, как и следовало ожидать, практически совпадают. Более того, он сравнивает эти результаты с обширными данными лабораторных экспериментов, проведенных на самом большом в Европе «водяном танке» в Ганновере. Эксперименты в бассейнах, вообще, очень важны для изучения природы экстремальных волн, поскольку в этих экспериментах, несмотря на

ограниченность длины даже самых больших бассейнов, удастся проследить «полный цикл жизни» экстремальных волн и ответить на самый важный вопрос: как долго они могут существовать? Тут следует вернуться к простейшей модели, то есть к НУШ, и отметить, что теория НУШ может предложить два альтернативных сценария развития экстремальных волн. Популярным сценарием, восходящим к известной работе Перегринна 1983 является «гомоклинический», согласно которому аномально высокие волны представляют собой изолированные локализованные явления, спонтанно возникающие на фоне среднего волнения и тут же исчезающие. Несмотря на всю красоту решения Перегринна, если принять эту точку зрения, то трудно объяснить: почему волны-убийцы столь широко распространены? Альтернативный сценарий, который также согласуется с НУШ, состоит в том, что экстремальные волны возникают группами и представляют собой сравнительно долгоживущие образования – «бризеры», состоящие из небольшого числа аномально высоких волн. Моряки говорят, что волны-убийцы – это «три сестры», но число волн в бризере может быть и больше.

Эксперименты, проделанные диссертантом, и отлично подтвержденные численными расчетами, определенно говорят в пользу «бризерного» сценария генерации экстремальных волн, тем более что время жизни бризера на порядок больше, чем время жизни «инстантона» Перегринна. Еще одним важным результатом третьей главы является сравнительная оценка применимости модели НУШ и уточненной модели Дисте. Несмотря на то, что модель НУШ качественно неплохо описывает возникновение экстремальных волн, для волн большой крутизны (а они более всего и интересны) улучшенная модель Дисте дает результаты, сохраняющие применимость на гораздо больших временах. Так что труд, потраченный на ее вывод, был не напрасным.

Необходимо подчеркнуть, что в главе 3 описывались экстремальные волны, как в численных, так и в лабораторных экспериментах генерируемые специально заданными условиями. Физиков же интересует больше всего вопрос: как экстремальные волны возникают из стохастических волновых полей в природе? Какова вероятность их возникновения при данной форме спектра ветрового волнения? Хотя убедительный ответ на этот вопрос – дело будущего, в диссертации А.В. Спюняева уже достигнут некоторый прогресс и ясно очерчен путь, на котором этот прогресс может быть достигнут. Определенную роль будут играть лабораторные эксперименты. Результаты многих из них приведены, но диссертант признает, что размеры имеющихся бассейнов недостаточны, чтобы делать окончательные выводы. Поэтому центральную роль будут играть численные эксперименты в рамках динамических моделей, например, в рамках уточненной модели Дисте. Тут имеется принципиальная трудность, о которой диссертант говорит, хотя и недостаточно отчетливо. Проблема состоит в правильном выборе начальных условий. Они должны быть случайными, но какова должна быть их статистика? Естественно сделать ее гауссовой, однако, это будет не совсем то, что есть в природе. Поэтому первое время численная схема будет приводить искусственно созданное гауссово поле к более реальному, имеющему ненулевые тройные корреляторы и эксцесс, отличный от гауссова. Диссертант говорит об этом, как о «достижении равновесия». Это выражение употребить можно, но детальное разъяснение этого пункта было бы полезным. Далее, автор говорит об «индексе Бенджамена-Фейра», что вполне правильно. Однако определение этого индекса является недостаточно прозрачным, следовало бы дать точное определение в терминах интегральных характеристик энергетического спектра волнения, которыми автор, как мне кажется, недостаточно активно оперирует. Тем не менее, в главе 4 получены важные результаты. Очень интересным является вывод о том, что хотя экстремальные

волны рождаются группами, внутри этих групп потом происходит эволюция, которая может вести к формированию разных «портретов» экстремальных волн – гребней или «дыр в океане». Данный вопрос требует дополнительного изучения, но начало уже положено.

Пятая глава, посвященная возникновению экстремальных волн на струйных течениях, является во всех отношениях пионерской. Здесь особенно важно наблюдение о том, что между модами, «захваченными» струйным течением, возможны трехволновые взаимодействия. Развитие этой главы могло бы стать темой еще одной диссертации, однако и без нее материала для докторской диссертации в работе А.В. Слюняева более чем достаточно.

Диссертация снабжена очень обильной библиографией, хотя кое-что пропущено, что неминуемо при попытке охватить такое обширное поле научного знания. Приведенные выше замечания также не влияют на общую оценку диссертации, которая, безусловно, является положительной.

Диссертация А.В. Слюняева удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» с избытком, а ее автор давно заслуживает ученой степени доктора физико-математических наук по специальности «физика атмосферы и гидросферы».

26 января, 2016

Захаров Владимир Евгеньевич,  
Доктор физико-математических наук,  
Академик РАН,  
Заведующий сектором математической физики,  
Физический Институт им. П.Н. Лебедева,  
Москва, Ленинский пр. 53,  
Телефон: 499-132-6751  
e-mail: zakharov@math.arizona.edu

Подпись В.Е. Захарова  
ЗА В Е Р Я Ю.

Ученый секретарь ФИАН  
к.ф.-м.н. М.М. Цвентух

