



УДК 556.044

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ
РЕГИСТРАЦИЯ И ПРОГНОЗ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЛН
НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДОЕМОВ**

Диденкулова Екатерина Геннадьевна, к.ф.-м.н., научный сотрудник отдела нелинейных геофизических процессов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Диденкулова Ирина Игоревна, д.ф.-м.н., проф. РАН, старший научный сотрудник отдела нелинейных геофизических процессов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Зайцев Андрей Иванович, д.ф.-м.н., член-корр. РАН, директор

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН

693023, г. Южно-Сахалинск, ул. А.М. Горького, 25

Кокорина Анна Витальевна, к.ф.-м.н., научный сотрудник отдела нелинейных геофизических процессов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Пелиновский Ефим Наумович, д.ф.-м.н., проф., главный научный сотрудник отдела нелинейных геофизических процессов

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Слюняев Алексей Викторович, д.ф.-м.н., проф. РАН, заведующий сектором моделирования экстремальных волновых явлений в океане

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда
(проект № 22-17-00153) <https://rscf.ru/project/22-17-00153/>.*

Аннотация. Проводится прямое численное моделирование нерегулярных волн на поверхности воды в рамках исходных уравнений гидродинамики с целью получения вероятностного описания волнения, включая экстремальные волны, и построения новых способов прогноза ветрового волнения. Выполняется статистическая обработка данных измерений морских поверхностных волн у берегов острова Сахалин.

Ключевые слова: поверхностные волны, численное моделирование, натурные измерения, придонное давление, экстремальные волны.

Задача описания и прогноза волн, возникающих на поверхности воды под действием ветра (в первую очередь, конечно, речь идет о морских волнах, а также волнах на акваториях больших озер и водохранилищ), включает в себя как неразрешенные теоретические вопросы, так и ряд трудностей в практической плоскости. К первым относятся приближения, предположения и ограничения спектральных моделей волновой энергии, используемых сегодня для прогноза волновой погоды. Благодаря растущим вычислительным возможностям современных компьютеров и новым «почти полным» математическим моделям гидродинамики становится возможным накапливать данные прямого численного моделирования стохастической эволюции волн, достаточные для статистического описания редких экстремальных событий. В таком случае вычислительные эксперименты рассматриваются как доступная альтернатива натурным и лабораторным измерениям. Получаемые при этом результаты обладают статистической однородностью и не страдают от инструментальных ошибок.

Одна из наиболее востребованных характеристик ветровых волн – вероятностное распределение высот волн. В рамках доминирующего представления о ветровых волнах как линейной суперпозиции случайных синусоидальных гармоник они представляют собой случайный гауссов процесс, а вероятность превышения высотой волны заданного значения описывается распределением Рэлея с единственным управляющим параметром – отношением высоты волны к некоторому среднему значению (т.н. значительной или значимой высоты волны). Актуальным вопросом океанографии является адекватность такой теоретической модели при описании очень редких экстремальных волновых явлений – со временем повторяемости от десятков до 10 тысяч лет. Ряд исследований говорит о значительно более высокой вероятности появления таких редких волн, этот эффект получил название «волн-убийц» и является предметом активных исследований как теоретиков, так и инженеров [1,2].

Можно сказать, что путь решения проблемы «волн-убийц» лежит через поиск эффектов, не учитываемых современными прогностическими моделями [2]. Одним из методов подтверждения теоретических идей является упомянутое выше прямое численное моделирование ансамблей нерегулярных волн, выполняемое нашей группой [3]. Для задания начальных условий используются суперпозиции синусоидальных волн с заданными спектрами и случайными фазами. Эволюция каждой реализации нерегулярных волн в течение около 20 минут или более рассчитывается в рамках исходных уравнений гидродинамики для потенциальных потоков (собственная реализация алгоритма High Order Spectral Method). Далее данные о взволнованной поверхности используются для статистической обработки: с усреднением по ансамблю и площади, но с учетом изменения во времени.

На рис. 1 приведено два примера поверхностей по окончании расчета для модельного углового спектра \cos^2 с относительно узким разбросом направлений волн $\Delta\Theta = 12^\circ$ (слева) и более типичным для моря (более широким) разбросом по направлениям $\Delta\Theta = 62^\circ$ (справа). Размер вычислительной области на этих примерах примерно 8 км на 8 км (соответствует 50×50 длин волн). По результатам проведенного моделирования было обнаружено, что в случаях значительной средней нелинейности волн и относительно узкого углового спектра в полях волн на поверхности глубоких бассейнов самопроизвольным образом возникают долгоживущие волновые группы, обладающие специфическими вероятностными свойствами. В частности, они увеличивают вероятность появления неожиданно высоких волн и играют роль «пятен волновой энергии», на фоне которых возникает большинство волн большой амплитуды.

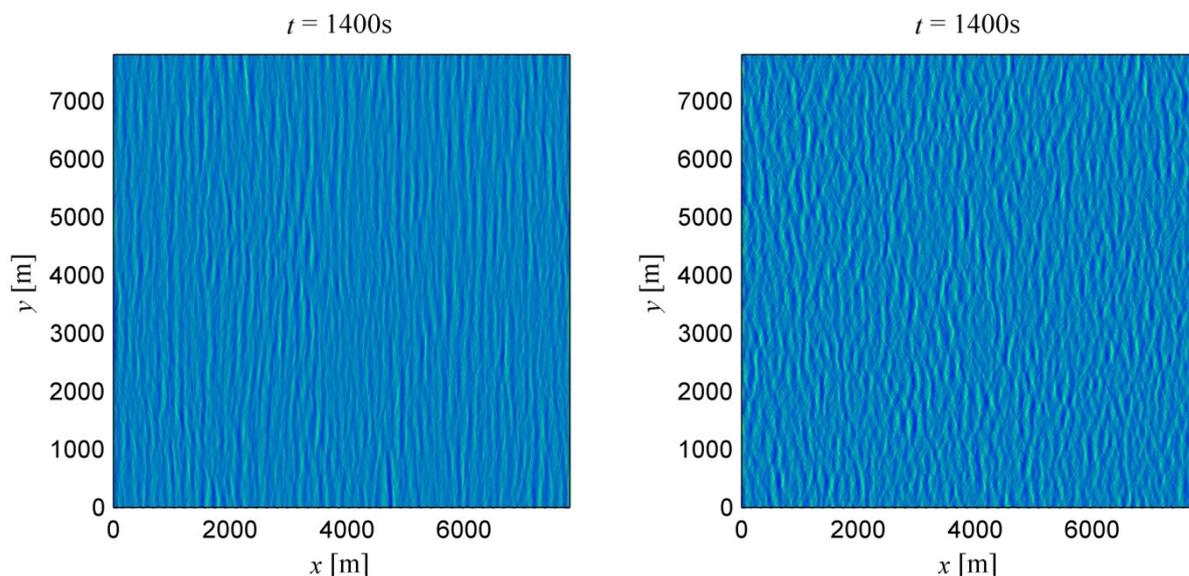


Рис.1. Вид взволнованной поверхности по окончании численного расчета для ширины углового спектра $\Delta\theta = 12^\circ$ (слева) и $\Delta\theta = 62^\circ$ (справа).

Несмотря на очевидное удобство использования численного моделирования, его результаты относятся к теоретическим и должны валидироваться на основе экспериментальных данных. В рамках выполняемого проекта РФФ нами обрабатываются данные долговременных измерений волнения морской поверхности донными станциями, проводимых СКБ САМИ ДВО РАН последние примерно 15 лет у о-ва Сахалин. Место получения большей части записей – залив Мордвинова Охотского моря у восточного берега южной части о-ва Сахалин – показано на рис. 2, оно соответствует глубине примерно 10 м. Смещение поверхности регистрируется автономными датчиками вариаций давления, которые опускаются на дно в начале кампании и поднимаются при помощи водолаза по окончании измерений. Длительность измерений может составлять несколько месяцев, включая зимние периоды, когда поверхность воды покрыта льдом. Для реконструкции смещения взволнованной поверхности по измерению давления на дне использовались гидростатическая теория и линейная теория для диспергирующих волн на поверхности бассейна постоянной глубины.

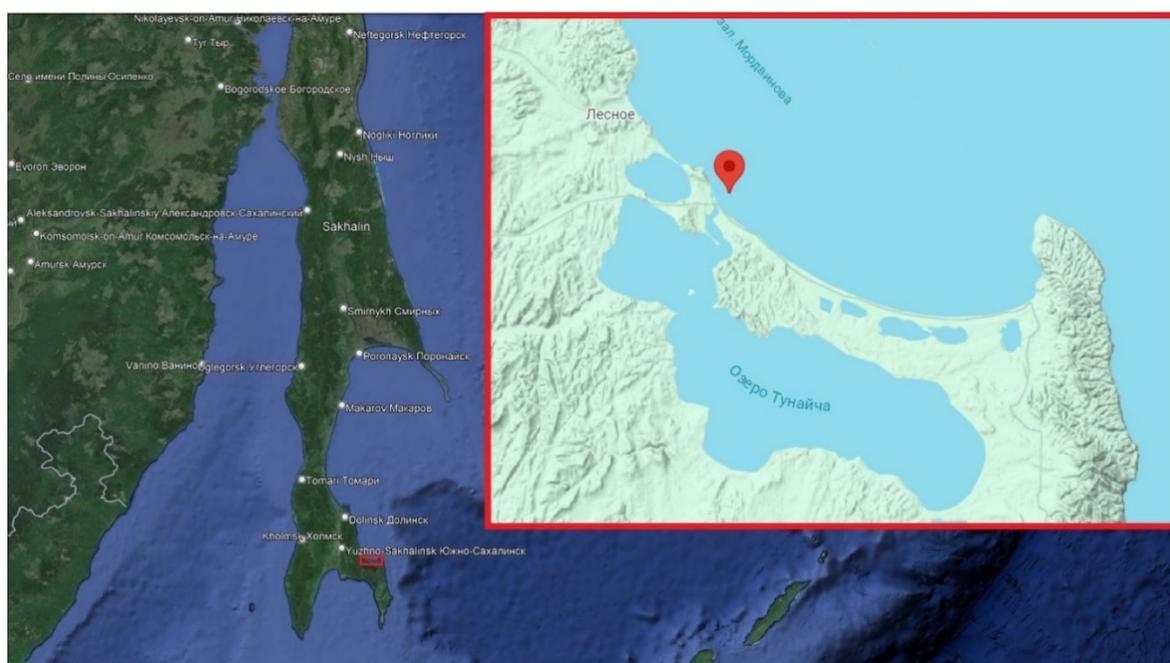


Рис.2. Место проведения измерений.

По результатам обработки натуральных данных были построены диаграммы частот реализации разных условий волнения, распределения вероятностей волн, других статистических характеристик [4,5]. Было показано в натурном эксперименте, что одновременные измерения тремя синхронизированными датчиками давления позволяют восстановить пространственный спектр волн [6]. Интересно отметить, что за счет приливов и вариаций периодов волн измерение всего в одной точке позволяет получить данные, соответствующие довольно широкому диапазону параметра безразмерной глубины, когда реализуются физически разные условия распространения волн.

На рис. 3 линиями уровня построены равновероятные волновые условия согласно данным измерений – на плоскости параметров безразмерной глубины kh и характерной крутизны волн $2\sigma k$, где k – волновое число, h – глубина и σ – среднеквадратичное смещение поверхности. Заливкой отмечены условия, для которых проводилось сопоставительное прямое численное моделирование нерегулярных волн. Особый интерес представляют ситуации интенсивного волнения, когда нелинейность волн может приводить к значительному изменению их вероятностных свойств. Из-за эффектов обрушения, которые использованная численная схема не способна описывать явно, часть области параметров не может быть смоделирована достоверно. Подходящие для моделирования условия обозначены на рисунке кружками: крупными красными для широкого углового спектра и мелкими черными для небольшого разброса волн по направлениям.

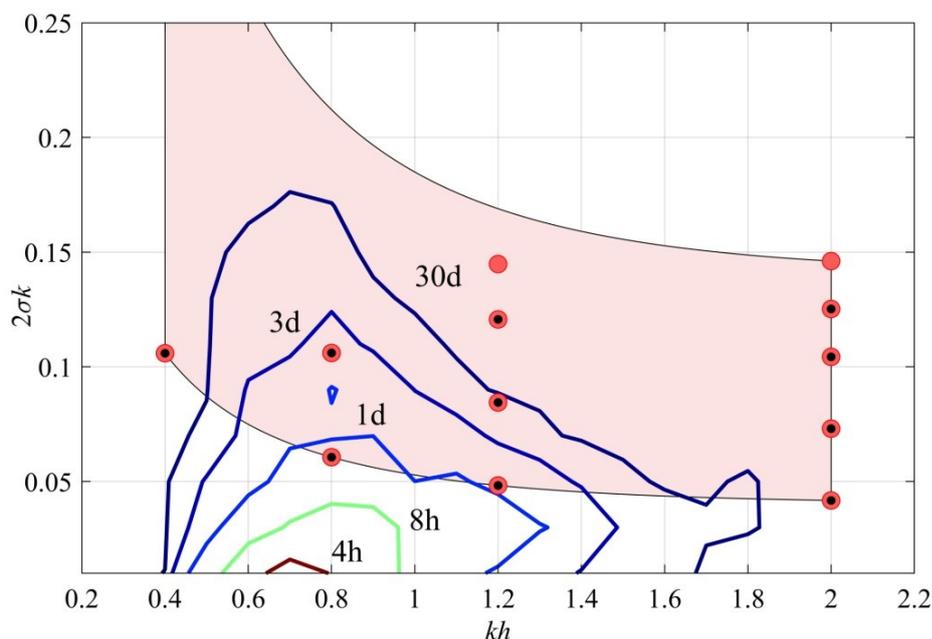


Рис.3. Распределение частот повторяемости волновых условий на плоскости безразмерных параметров локальной глубины и крутизны волн по данным измерений (линиями уровня: 4 часа, 8 часов, 1 день, 3 дня, 1 месяц), область параметров, использованных для проведения численного моделирования (заливка) и условия численного моделирования, когда эффект обрушения был незначительным (значки: мелкие кружки для $\Delta\theta = 12^\circ$ и крупные кружки для $\Delta\theta = 62^\circ$).

На материале имеющихся натуральных данных удалось показать [5,7], что с ростом степени нелинейности волн и с ростом ширины спектра вероятность возникновения очень высоких волн снижается. Были предложены параметры нелинейности и ширины спектра, по отношению к которым этот эффект оказывается наиболее выраженным. В целом, можно заключить, что в условиях неглубокой воды вероятность больших высот волн по данным натуральных измерений оценивается ниже распределения Рэля; увеличение параметров нелинейности и ширины спектра усиливает это отличие.

Наличие значительного количества натуральных данных позволяет, в том числе, попробовать проследить сезонные зависимости. Для таких характеристик как средняя

высота волн и характерный период волн эффект сезонности оказывается очень значительным. В летний сезон преобладают данные с небольшими значениями высот волн; распределения для периодов волн в разные времена года отличаются нетривиальным образом. В то же время параметры AI отношения наиболее высокой волны за 20-минутный интервал к значению характерной высоты волн за этот интервал распределены в разные времена года практически идентично, как показано на рис. 4, что говорит об универсальности физики волн.

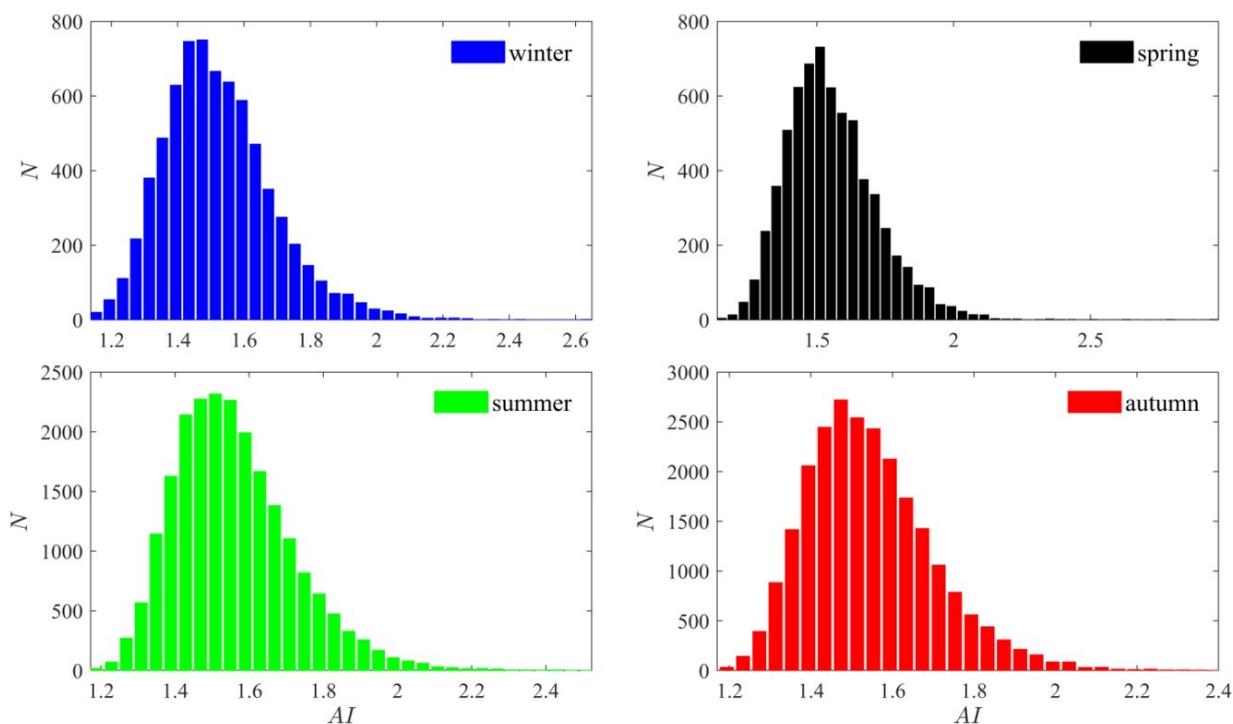


Рис. 4. Распределение индексов превышения высот волн AI по сезонам по данным натурных измерений. Число N отвечает за количество 20-минутных сегментов записей.

Наибольший выигрыш должно принести совместное использование данных натурных измерений и прямого численного моделирования. Моделирование позволяет проводить аккуратные эксперименты в контролируемых условиях, строить модельные распределения в зависимости от параметров и анализировать в том числе трудные для инструментальных измерений характеристики (например, поля скоростей). Сопоставление этих результатов с натурными данными позволяет определить области параметров, когда использованные приближения допустимы (такие как параметрический учет эффектов обрушений волн и вязкости; отличие движений от потенциальных и т.д.). Данные численного моделирования и натурных измерений используются нами также для проб новых подходов к прогнозу опасных волн: в частности, с использованием параметра модуляционной неустойчивости [2] и путем распознавания и отслеживания долгоживущих нелинейных волновых групп [8].

Список литературы:

1. Слюняев А. В., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы: мифы и реальность // Журнал «Природа». – 2021. – №. 10. – С. 10-25.
2. Слюняев А. В., Пелиновский Д. Е., Пелиновский Е. Н. Морские волны-убийцы: наблюдения, физика и математика // Успехи физических наук. – 2023. – Т. 193. – С. 155-181.
3. Слюняев А. В., Кокорина А. В. Численное моделирование «волн-убийц» на морской поверхности в рамках потенциальных уравнений Эйлера // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 56. – № 2. – С. 210-223.

4. Кокорина А. В., Слюняев А. В., Зайцев А. И., Диденкулова Е. Г., Москвитин А. А., Диденкулова И. И., Пелиновский Е. Н. Анализ данных долговременных измерений волн у о-ва Сахалин // Экологические системы и приборы. – 2022. – №. 12. – С. 45-54.
5. Слюняев А. В., Кокорина А. В., Зайцев А. И., Диденкулова Е. Г., Москвитин А. А., Диденкулов О. И., Пелиновский Е.Н. Зависимость вероятностных распределений высот волн от физических параметров по результатам измерений у о-ва Сахалин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2023. – Т. 16. – №. 3. – С. 18-29.
6. Кокорина А. В., Слюняев А. В., Зайцев А. И., Леоненков Р. В. Измерения направленных волн у о-ва Сахалин антенной донных станций // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2024. В печати.
7. Трегубов А. С., Кокорина А. В., Слюняев А. В., Диденкулова Е. Г., Зайцев А. И. Частотные спектры и распределения высот волн по результатам измерений у острова Сахалин // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – Направлено.
8. Slunyaev A. V. Soliton groups and extreme wave occurrence in simulated directional sea waves // Physics of fluids. – 2024. – V. 36. – P. 077101.

NUMERICAL SIMULATION, INSTRUMENTAL REGISTRATION AND FORECASTING OF INTENSE WAVES ON THE SURFACE OF WATER BASINS

Ekaterina G. Didenkulova, Irina I. Didenkulova, Andrey I. Zaytsev, Anna V. Kokorina,
Efim N. Pelinovsky, Alexey V. Slunyaev

Abstract. Direct numerical simulation of irregular waves on the water surface is carried out within the framework of the primitive equations of hydrodynamics in order to obtain the probabilistic wave description valid for extreme waves, and to construct new methods for forecasting wind waves. Statistical processing of measurement data of sea surface waves off the coast of Sakhalin Island is carried out.

Keywords: water waves, numerical simulation, in-situ measurements, bottom pressure, extreme waves.