

# ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОКЕАНЕ

Физика волновых процессов в природных средах относится к числу важнейших научных направлений в области радиофизики и является одним из профильных направлений работ ИПФ РАН. Естественным поэтому является интерес сотрудников Отделения к исследованию динамики верхнего слоя океана, которая отличается исключительным разнообразием нелинейных волновых явлений. Достигнутый в Отделении прогресс в этих исследованиях в значительной степени обеспечен как фундаментальными результатами по **общей теории нелинейных волн**, положенными в основу разработки физических и численных моделей волновых явлений в океане, так и созданием мощной экспериментальной базы, включающей уникальные установки и измерительные комплексы для выполнения **лабораторных и натурных экспериментов**.

Хорошо известно, что в океане могут распространяться волны различной природы с разнообразными дисперсионными и нелинейными свойствами. Наиболее популярными и важными объектами исследований являются **волны на поверхности океана** самых разных пространственных масштабов (ветровые, капиллярные, волны цунами), **внутренние волны** (специфический тип волн, характерный для океана как вертикально-стратифицированной среды), а также **взаимодействие внутренних и поверхностных волн**. Кроме того, верхний слой океана является типичным примером открытой неравновесной среды, в которой возможно как нарастание волновых возмущений (обусловленное наличием течений и приповерхностного ветра), так и их естественное затухание (обусловленное передачей энергии в мелкомасштабные движения). Анализ этих явлений связан с исследованием вопросов **взаимодействия волн с потоками и турбулентностью**. Многие из полученных в Отделении результатов по всей этой проблематике получили широкую известность и признание в мировом сообществе.

Исследование волновых процессов в верхнем слое океана имеет большое значение не только с фундаментальной точки зрения, но и как научная основа для развития методов **дистанционной диагностики океана** и разработки перспективных технических средств диагностики, прежде всего, радиолокационных и оптических. Это направление также составляет важную часть работ Отделения в области гидрофизики.

Таким образом, обширный круг проблем, связанных с нелинейной динамикой верхнего слоя океана, природными механизмами генерации, эволюции и взаимодействия волн различной природы в океане, а также разработкой методов и средств дистанционной диагностики океана является предметом теоретических и экспериментальных исследований сотрудников Отделения. Эти исследования выполняются в рамках ряда национальных и международных научных программ, в числе которых программа Президиума РАН «Математические методы нелинейной динамики», программа ОФН РАН «Проблемы радиофизики», федеральные программы: ФЦП «Мировой океан» и ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 годы, конкурсные программы РФФИ и Европейского космического агентства.



**Л.С. Долин**  
зав. отделом, к.ф.-м.н.



**Ю.И. Троицкая,**  
зав. отделом, д.ф.-м.н.



**Е.Н. Пелиновский**  
г.н.с., д.ф.-м.н.



**Е.И. Якубович**  
г.н.с., д.ф.-м.н.



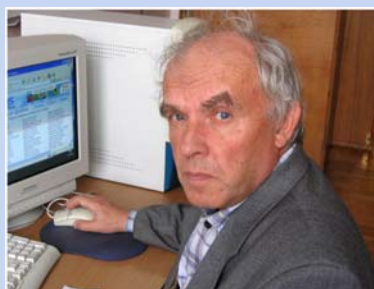
**В.В. Баханов**  
зав. лабораторией, к.ф.-м.н.



**С.А. Ермаков**  
зав. лабораторией, к.ф.-м.н.



**А.А. Абрашкин**  
в.н.с., д.ф.-м.н.



**С.Н. Власов**  
в.н.с., д.ф.-м.н.



**К.А. Горшков**  
в.н.с., к.ф.-м.н.



**О.А. Дружинин**  
с.н.с., д.ф.-м.н.



**М.Б. Каневский**  
в.н.с., д.ф.-м.н.



**Т.Г. Талипова**  
с.н.с., д.ф.-м.н.

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ: ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

Основными направлениями исследований Отделения в области общей теории нелинейных волновых процессов являются:

- распространение волновых пакетов и пучков в нелинейных диспергирующих средах;
- динамика солитонов и ансамблей солитонов;
- вихревые течения в жидкости.

Исследования по этим направлениям проводятся с момента образования ИПФ РАН на основе фундаментальных результатов, полученных в НИРФИ в 1960-е и 1970-е годы. Идейными вдохновителями этих работ были В.И. Таланов, Л.А. Островский и Е.И. Якубович. К настоящему времени в Отделении оформились несколько научных групп их сотрудников и учеников, активно работающих в рамках этих и смежных направлений теории.

Представления о пучках и пакетах волн естественным образом возникают при анализе работы квазиоптических резонаторов, лазеров и многомодовых волноводов, распространения волн на поверхности жидкости и т.д. Пучки и пакеты волн обычно описываются параболическим уравнением с мнимым коэффициентом диффузии (нелинейным уравнением Шредингера). В 1997 году вышла в свет монография [1], в которой обобщен многолетний опыт авторов по изучению *самофокусировки волн*. На основе метода параболического уравнения изучены различные нелинейные механизмы, приводящие к самофокусировке, а также описаны различные ее проявления – неустойчивость плоских волн, существование однородных волновых каналов и автомодельных пучков, образование областей с аномально большими амплитудами поля и уширение спектров импульсов. При самофокусировке волн с аномальной дисперсией групповой скорости имеет место распределенный во времени коллапс: поглощение энергии волнового сгустка происходит на стадии, наступающей после возникновения особенности в его центре [2].

Для описания коротких (порядка нескольких длин волн) пакетов в нелинейных средах предложено обобщенное параболическое уравнение – нелинейное уравнение Шредингера третьего порядка. Оно включает дополнительные члены, описывающие нелинейную дисперсию и линейную дисперсию третьего порядка. В рамках этого приближения найдены скалярные и векторные солитоны огибающей. Показано, что такого рода волновые пакеты могут использоваться в качестве базовых импульсов в волоконно-оптических линиях связи. Доказана их устойчивость, а также изучено взаимодействие найденных солитонов [3,4].

*Взаимодействие солитонов* играет определяющую роль в процессе эволюции самых разнообразных волновых возмущений. Наиболее важным достижением в этом направлении явилось установление глубокой аналогии между взаимодействием солитонов и столкновением классических частиц. Такой подход к описанию динамики ансамблей солитонов как частиц дал возможность классифицировать возможные типы взаимодействия уединенных волн по критерию “притяжение – отталкивание”, сформулировать необходимые условия существования связанных состояний солитонов и получить общие представления о возможных типах движений в бесконечных цепочках солитонов.



В последние годы приближенный подход подвергся значительной модернизации, сохраняющей представление о солитонах как целостных образованиях (частицах) и, вместе с тем, учитывающей фактор их волновой природы – конечную скорость передачи возмущений при взаимодействии, деформацию их формы, различного рода задержки и т.д. [5]. В результате сформировалась практически полная качественная картина распространения и рассеяния уединенных волн.

Приближенный метод, разработанный первоначально для солитонов, с успехом используется при описании взаимодействия локализованных образований совершенно иной природы – *гидродинамических вихрей*. На его основе удалось построить асимптотическую теорию возмущений для описания эволюции двумерных вихревых областей [6] и проанализировать характерные типы движения вихревых пар под действием различных возмущающих факторов (стратификация, течения и т.д.). Наиболее типичным для вихревых пар является движение с отражением; при этом в стратифицированной жидкости возможна локализация вихревых структур плотностным каналом. Струйное течение, в свою очередь, стабилизирует вихревую дорожку Кармана.

Другой подход к изучению вихревых течений, предложенный и развиваемый в Отделении, связан с использованием лагранжевых переменных. В рамках лагранжевого подхода найден класс *точных решений* уравнений гидродинамики, описывающий нестационарные, неоднородно завихренные, плоские течения, в которых отдельные жидкие частицы движутся по эпициклоидам или гипоциклоидам [7]. В силу этого свойства течения названы птолемеевскими. Дано описание динамики одиночной вихревой области в окружающем потенциальном течении (птолемеевский вихрь), обобщающее классическое решение для вихря Кирхгофа. Предложена матричная формулировка уравнений гидродинамики идеальной жидкости в форме Лагранжа [8]. На основе матричного подхода построено пространственное обобщение класса птолемеевских течений. Движение частиц жидкости в таких потоках является суммой трех круговых вращений с различными амплитудами, частотами и пространственной ориентацией. В отдельном цикле работ на основе лагранжева формализма построена слабонелинейная теория вихревых волн на поверхности жидкости [9]. Детально изучены характеристики стационарных вихревых возмущений на поверхности сдвигового потока, пространственных вихревых волн, стоячих вихревых волн и волнового пакета, распространяющегося в слабозавихренной жидкости.

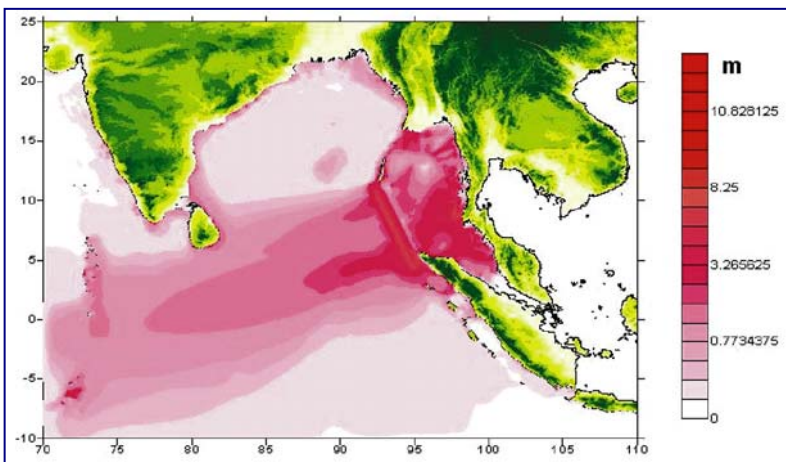
### ИЗБРАННЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Власов С.Н., Таланов В.И. *Самофокусировка волн*. – Ниж. Новгород: ИПФ РАН, 1997. 220 с.
- [2] Власов С.Н., Пискунова Л.В., Таланов В.И. Трехмерный волновой коллапс в модели нелинейного уравнения Шредингера // *ЖЭТФ*, 1989, т. 95, № 6, с. 1945-1950.
- [3] Громов Е.М., Таланов В.И. Нелинейная динамика коротких цугов волн в диспергирующих средах // *ЖЭТФ*, 1996, т. 110, № 1, № 7, с. 137-149.
- [4] Громов Е.М., Тютин В.В. Короткие солитоны огибающей. Изотропные и анизотропные среды // *Изв. вузов. Радиофизика*, 2003, т. 46, № 5-6, с. 429-442.
- [5] Gorshkov K.A., Ostrovsky L.A., Soustova I.A. Perturbation theory for kinks and application for multisoliton interaction in hydrodynamics // *Physical Review E*, 2003, vol. 69, pp. 1-10.
- [6] Gorshkov K.A., Ostrovsky L.A., Soustova I.A. Perturbation theory for Rankine vortices // *J. Fluid Mech.*, 2000, vol. 404, pp. 1-25.
- [7] Абрашкин А.А., Якубович Е.И. О плоских вихревых течениях идеальной жидкости // *ДАН СССР*, 1984, т. 276, № 1, с. 76-78.
- [8] Yakubovich E.I., Zenkovich D.A. Matrix approach to Lagrangian fluid dynamics // *J. Fluid Mech.*, 2001, vol. 443, pp. 167-196.
- [9] Абрашкин А.А. Пространственные волны Гуйона // *Изв. РАН. МЖГ*, 1996, № 4, с. 125-130.

## ВОЛНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА

Ряд важных результатов был получен в Отделении при исследовании наиболее известного и доступного для наблюдения типа природных волн – поверхностных волн. Универсальные методы теории нелинейных колебаний и волн, развитые в нижегородской школе радиофизики, оказались эффективными при описании поверхностных волн самых различных диапазонов – от капиллярной ряби (длина волны составляет несколько миллиметров) до волн цунами (длиной несколько десятков километров).

Самые длинные поверхностные волны в открытом океане – *цунами* – имеют, как правило, сейсмическое происхождение. В группе, возглавляемой проф. Е.Н. Пелиновским, успешно развиваются методы адекватной оценки цунами–риска, основанные на численном моделировании уже прошедших и прогнозируемых событий в рамках нелинейной теории волн на воде и методов экстремальной статистики. Выполненное моделирование ряда цунами последних лет, включая два катастрофических цунами, возникших в результате извержения вулкана Кракатау (27.08.1883) [1] и землетрясения в Индонезии (26.12.2004), позволили рассчитать высоты прибрежной волны и оценить цунами–риск для соответствующих акваторий Мирового океана.

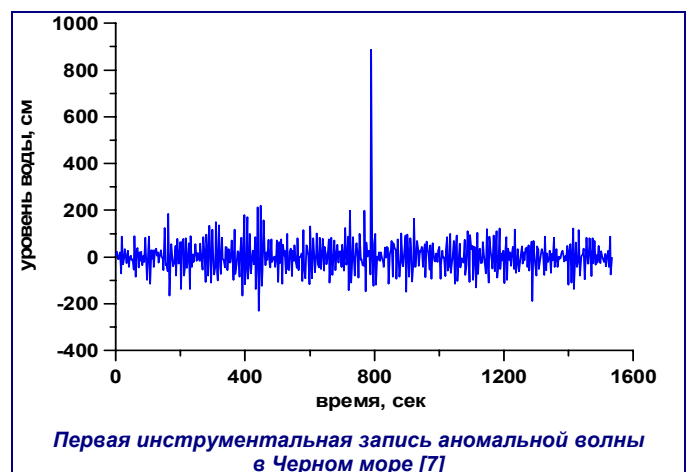


*Пример численного моделирования диаграммы распространения волны цунами в Индийском океане после землетрясения 26.12.2004.*

Хорошее совпадение с имеющимися данными наблюдений показало практическую пригодность развитой модели и ее эффективность для подготовки прогноза цунами–риска для конкретных акваторий. На ее основе выполнено предварительное районирование степени цунами–

риска для морей России (Японское, Черное и Каспийские моря) [2,3]. Проведена также реконструкция локального цунами на Волге, случившегося в результате гигантского оползня в районе Нижнего Новгорода в 1597 г. [4].

В последнее время одной из актуальных проблем физической океанологии стали *аномальные поверхностные волны* – длинные ветровые волны аномально большой амплитуды (в два и более раз превышающие средний уровень). Такие волны, внезапно появляющиеся на морской поверхности и так же быстро исчезающие, представляют значительную опасность для судоходства, нефтяных платформ и получили образное название волн-убийц [5].



*Первая инструментальная запись аномальной волны в Черном море [7]*

Группой проф. Е.Н. Пелиновского развиваются теоретические модели формирования таких аномальных волн на поверхности океана, связанные эффектами собственной динамики ветровых волн [5,6]. Эти модели включают в себя дисперсионное сжатие волновых пакетов ветровых волн, их геометрическое фокусировку, нелинейную модуляционную неустойчивость и другие волновые эффекты. Разработанная теория применена для анализа и объяснения первой инструментальной записи волны-убийцы в Черном море [7]. Уникальная волна зарегистрирована стационарным буем у побережья г. Геленджик в 2001 году и превысила высоту фонового волнения в 3,9 раза (см. рисунок). Показано, что ее формирование является результатом наложения группы интенсивных волн, образующих долгоживущий нелинейный волновой пакет (солитон), и пространственно-временной фокусировки частотно-модулированного цуга волн (по результатам численного моделирования, характерное время жизни такого образования составляет всего 4-5 сек, за которые волна пробегает около 20 м).

### ИЗБРАННЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

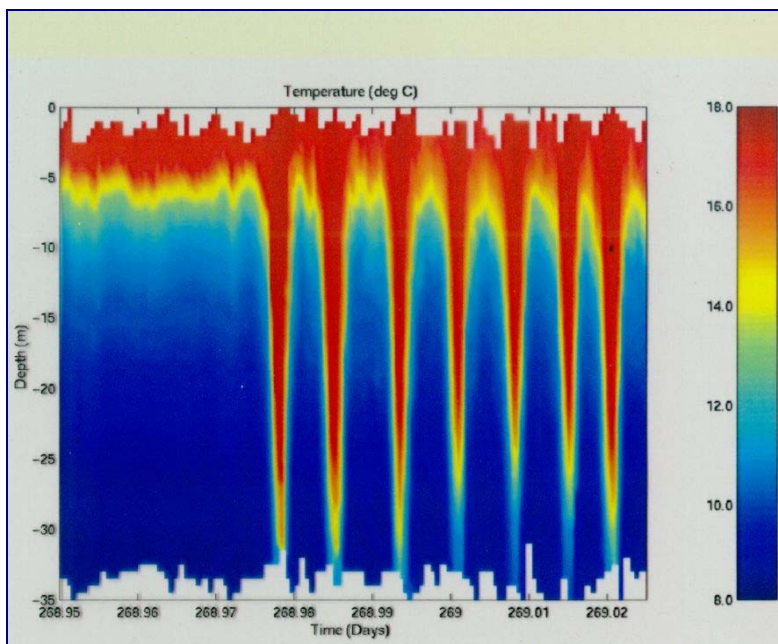
- [1] Choi B.H., Pelinovsky E., Kim K.O., Lee J.S. Simulation of the trans-oceanic tsunami propagation due to the 1883 Krakatau volcanic eruption // *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, vol. 3, № 5, 321-332.
- [2] Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Чой Б., Ли J.S. Сравнительная оценка цунами опасности япономорского побережья России на основе численного моделирования // *Океанология*, 2004, т. 44, № 2, 179-188.
- [3] Yalciner A., Pelinovsky E., Talipova T., Kurkin A., Kozelkov A., Zaitsev A. Tsunamis in the Black Sea: comparison of the historical, instrumental and numerical data // *J. Geophys. Research*, 2004, vol. 109, № C12, C12023 10.1029/2003JC002113.
- [4] Диденкулова И.И., Зайцев А.И., Красильщиков А.А., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Ялчинер А.Ш. Нижегородское цунами 1597 года на реке Волга // *Известия АИИ РФ. Серия: Прикладная математика и механика*, 2003, т. 4, 170-180.
- [5] Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. *Волны-убийцы: факты, теория и моделирование*. – Нижний Новгород, Изд. ННГУ, 2004. 157 с.
- [6] Пелиновский Е.Н., Слюняев А.В., Талипова Т.Г., Хариф К. Нелинейное параболическое уравнение и экстремальные волны на морской поверхности // *Изв. вузов. Радиофизика*, 2003, т. 46, № 7, с. 499-512.
- [7] Дивинский Б.В., Левин Б.В., Лопатухин Л.И., Пелиновский Е.Н., Слюняев А.В. Аномально высокая волна в Черном море: наблюдения и моделирование // *Доклады РАН*, 2004, т. 395, № 5, с. 690-695.

### ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В ОКЕАНЕ

Другой важнейший тип волн, во многом определяющий динамику нелинейных процессов в верхнем слое океана – внутренние волны (ВВ). Как и поверхностные ветровые волны, эти волны имеют гравитационную природу: они формируются в области наибольших градиентов вертикально-неоднородного профиля плотности океанической воды – в области пикноклина. Основную роль в формировании пикноклина играет стратификация глубинного профиля температуры. Это важное обстоятельство было положено в основу создания масштабной лабораторной модели верхнего слоя океана, реализованной в **Большом термостратифицированном бассейне ИПФ РАН** (см. ниже).

Среди наиболее важных и широко известных результатов, полученных в области исследования ВВ еще в 70-80-е годы – асимптотическая теория распространения ВВ и новое эволюционное уравнение ВВ для вращающегося океана (уравнение Островского); исследование генерации ВВ сдвиговыми потоками в рамках концепции волн отрицательной энергии; изучение механизмов затухания ВВ на турбулентности. Результатом этих исследований явилось построение схемы энергетического баланса ВВ в верхнем слое океана.

В настоящее время исследования нелинейных ВВ сосредоточены на теоретическом моделировании ВВ большой интенсивности и эволюции интенсивных пакетов и солитонов ВВ на океаническом шельфе. Значительное место в текущих исследованиях занимает численное моделирование динамики ВВ в условиях переменной батиметрии и изменчивости других океанологических параметров, позволяющее делать реалистичный прогноз эволюции ВВ в прибрежных акваториях.



*Распад длинной приливной волны на последовательность импульсов – солитонов интенсивных внутренних волн (по данным эксперимента COPE на шельфе Атлантического побережья США, 1995 г.). На рисунке приведены положения изотерм на расстоянии 28 км от берега. Последующая эволюция последовательности солитонов (положения их максимумов) была реконструирована в рамках предложенной теории с высокой точностью на трассе длиной 20 км [Gorshkov K.A., Ostrovsky L.A., Soustova I.A, Irisov V.G. // Phys. Rev. E, 2004, v. 69, pp. 1-10].*

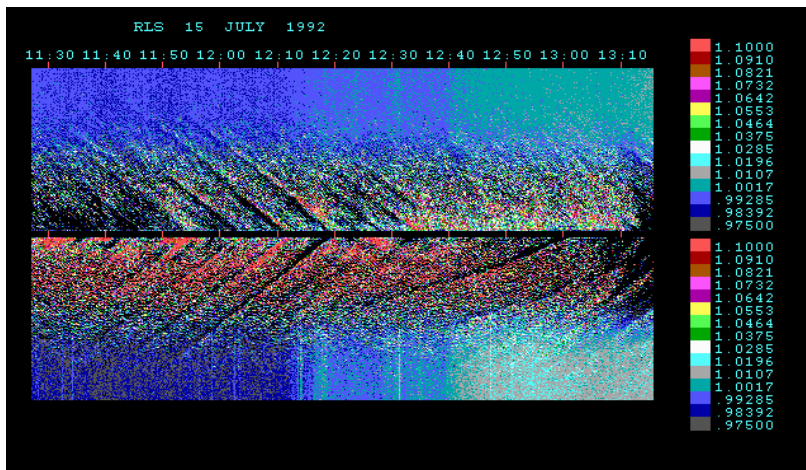
## Воздействие внутренних волн на поверхностные ветровые волны

Среди исследований в области гидрофизики значительное место занимает изучение взаимодействия волн различных пространственных и временных масштабов. *Взаимодействие поверхностных и внутренних волн* – один из наиболее интересных и богатых на эффекты примеров такого взаимодействия в природных условиях. Исследования по этой проблеме, проводящиеся в ИПФ РАН с момента его основания, обусловлены принципиальной возможностью использования подобных эффектов в целях развития методов дистанционной (радиолокационной, оптической) диагностики глубинных процессов по наблюдениям картины поверхностных волн. Традиционные контактные средства регистрации параметров ВВ трудоемки, дороги и не позволяют получать необходимую информацию на достаточно больших акваториях. Следствием этого является, в частности, ограниченность имеющихся фактических сведений о генерации и эволюции ВВ в реальном океане.

В результате теоретических и экспериментальных исследований было показано, что физические механизмы воздействия ВВ на ветровое волнение существенно различны в разных диапазонах ветровых волн. Например, в диапазоне метровых и дециметровых волн определяющую роль играет механизм, связанный с непосредственным влиянием переменного подповерхностного течения, создаваемого ВВ, на кинематику поверхностных волн.



Соответствующая модель изменения характеристик поля ветровых волн под действием ВВ, развитая под руководством акад. В.И. Таланова, получила название *кинематической модели* и широко известна среди специалистов [1-3]. В высокочастотной части спектра поверхностного волнения (сантиметровая и миллиметровая рябь) основную роль играют другие эффекты – модуляция коэффициента затухания поверхностных волн вследствие перераспределения под действием ВВ пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ) [4] и влияние на характеристики ветрового волнения изменения турбулентности приповерхностного слоя в присутствии ВВ. В последнее время появились экспериментальные данные, указывающие на существенную роль *каскадных механизмов* воздействия ВВ на короткие (сантиметровые) ветровые волны: течение, создаваемое на поверхности внутренней волной, трансформирует дециметровые волны, а они, в свою очередь, воздействуют на сантиметровую рябь [5,6]. Кроме того, неоднородное поле течений, созданное ВВ, вызывает изменчивость поля скорости ветра над водной поверхностью, что приводит к модуляции инкремента коротких ветровых волн [7,8].



**Радиолокационное изображение цуга внутренних волн на поверхности океана (по результатам российско-американского эксперимента JUSREX в северо-западной части Атлантического океана)**

Фундаментальные результаты теоретических и экспериментальных исследований физических механизмов воздействия ВВ и неоднородных течений на ветровые волны были положены в основу разработки и практического использования радиофизических методов и средств *дистанционной диагностики* верхнего слоя океана (см. следующий раздел).

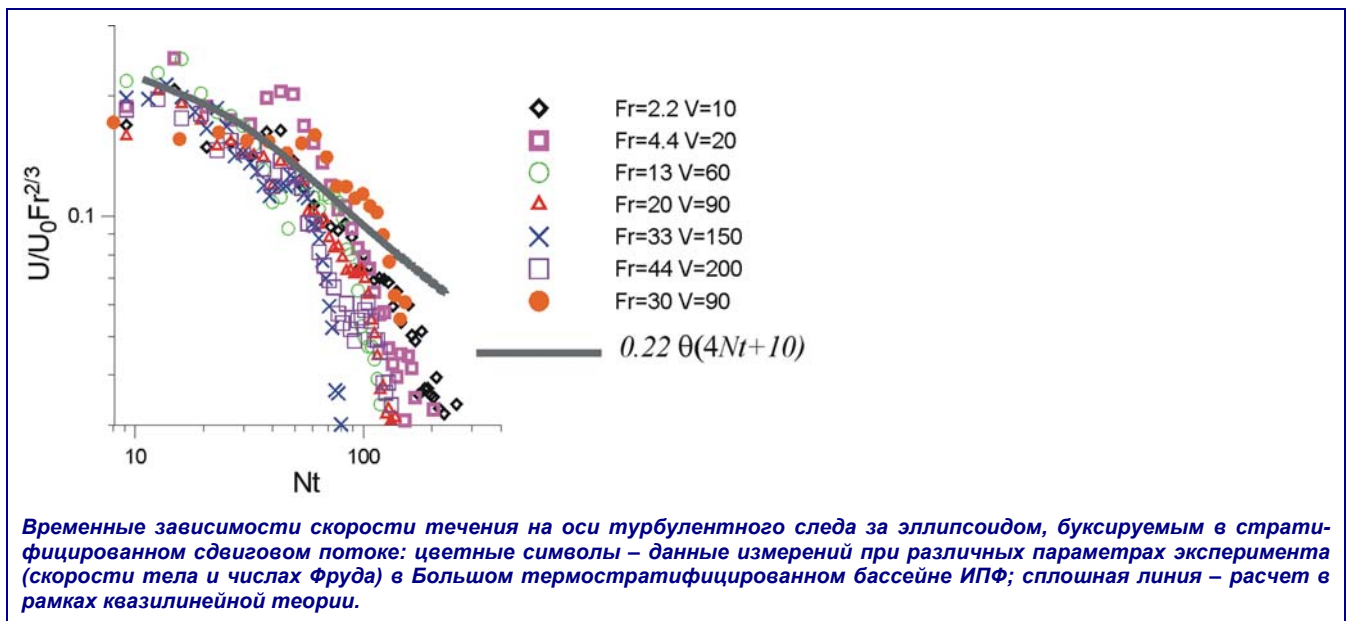
### ИЗБРАННЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Басович А.Я., Таланов В.И. О трансформации коротких поверхностных волн на неоднородных течениях // *Известия АН СССР. ФАО*, 1977, т. 13, №7, с. 766-773.
- [2] Басович А.Я., Баханов В.В., Таланов В.И. Влияние интенсивных внутренних волн на ветровое волнение (кинематическая модель) // *Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность*. – Горький: ИПФ АН СССР, 1982, с. 8-30.
- [3] Баханов В.В., Таланов В.И. Трансформация нелинейных поверхностных волн в поле неоднородных течений // *Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование* / Под ред. Е.Н. Пелиновского, В.И. Таланова. – Ниж. Новгород: ИПФ РАН, 1999, том 1, с. 81-106.
- [4] Ермаков С.А., Салашин С.Г. Об эффекте сильной модуляции капиллярно-гравитационной ряби внутренними волнами // *Доклады РАН*, 1994, т. 337, № 1, с. 108-111.
- [5] Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Щегольков Ю.Б. Лабораторное исследование сильной модуляции радиолокационных сигналов при наличии длинных волн на воде с поверхностно-активной пленкой // *Изв. вузов. Радиофизика*, 2002, т. XLV, № 12, с. 1025-1042.
- [6] Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Зуйкова Э.М., Кияшко С.В. Об эффекте изменения доплеровских сдвигов частоты радиолокационных сигналов в присутствии пленок на морской поверхности // *Доклады РАН*, 2003, т. 388, № 1, с. 109-112.
- [7] Yu.I. Troitskaya. Modulation of the growth rate of short surface capillary-gravity wind waves by a long wave // *J. Fluid Mech.*, 1994, vol. 273, p. 169-187.
- [8] Горшков К.А., Долина И.С., Соустова И.А. Троицкая Ю.И. Модуляция коротких ветровых волн в присутствии интенсивных внутренних волн. Эффект модуляции инкремента // *Известия РАН. ФАО*, 2003, т. 39, № 5, с. 661-672.



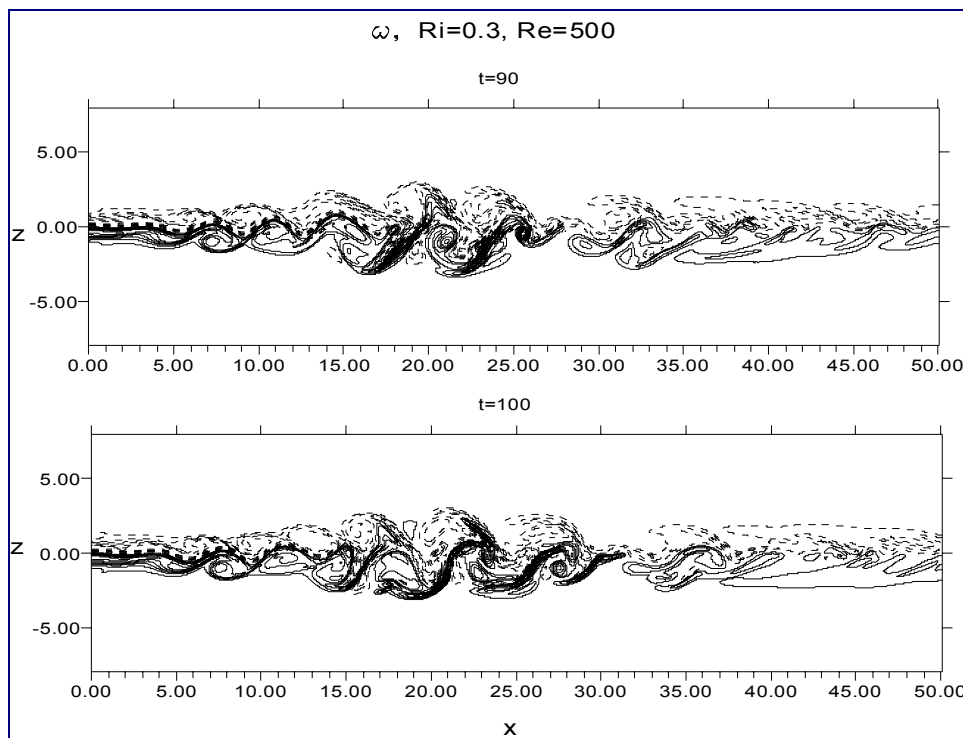
## Взаимодействие внутренних волн с потоками и турбулентностью

Вопросы взаимодействия волн различной природы с неоднородными течениями традиционно занимают важное место в тематике гидрофизических исследований Отделения. Здесь особый интерес представляет нелинейное взаимодействие внутренних волн с потоками в окрестности т.н. резонансных уровней – критических слоев, где фазовая скорость волн совпадает со скоростью потока. При этом возможно как нарастание волн за счет энергообмена с потоком, так и их затухание. Такое взаимодействие может вызвать существенную перестройку течения за счет обратного воздействия волны на течение в результате резонансного обмена импульсом. Развита недавно Ю.И. Троицкой квазилинейная модель турбулентного следа за телом, буксируемым в стратифицированной жидкости при больших числах Рейнольдса и Фруда, основана на теоретическом описании такого взаимодействия в квазилинейном приближении. Показано, что основным механизмом эволюции следа является развитие гидродинамической неустойчивости возбуждаемого телом струйного течения. Численные и лабораторные эксперименты подтвердили адекватность модели и следующие из нее результаты по эволюции поля скорости в следе: средние параметры следа (форма профиля средней скорости, скорость на оси следа, его поперечный размер) определяются из модели с точностью до единиц процентов. Кроме того, модель качественно хорошо воспроизводит основные особенности эволюции спектра возмущений: рост их характерного масштаба во времени и изменение энергии возмущений [1].



Помимо развития теоретических моделей и экспериментальных исследований взаимодействия ВВ с течениями, исключительную важность представляет *прямое численное моделирование* гидродинамических процессов. Фактически, такое моделирование дает возможность проведения корректных численных экспериментов, при постановке которых не используются упрощенные теоретические модели, асимптотические соотношения характерных масштабов и т.д. В связи с быстрым развитием современных компьютеров и появлением в ИПФ РАН кластера параллельных вычислений реализация прямых численных схем гидродинамики стала возможной и показала свою высокую эффективность.

Методом прямого численного моделирования исследованы различные сценарии генерации ВВ в пикноклине под действием сдвиговых потоков [2]. В частности, исследована конфигурация течения «сдвиговой поток над пикноклином» (точка перегиба профиля скорости потока располагается над горизонтом залегания пикноклина). Показано, что развитие сдвиговой неустойчивости и формирование вихрей в слое смешения сопровождается генерацией ВВ в области пикноклина, указаны случаи наиболее эффективной генерации ВВ. Кроме того, проведено прямое численное моделирование динамики турбулентной струи в пикноклине (максимум скорости струи располагается на горизонте залегания пикноклина, диаметр струи равен его ширине, значения чисел Рейнольдса и Фруда струи близки к типичным значениям этих параметров в области дальнего следа, реализуемых в лабораторном эксперименте). Результаты показали существенно разный характер развития течения на разных стадиях (на разных временах эволюции). Результаты численных экспериментов находятся в хорошем согласии с данными лабораторных экспериментов на Большом термостратифицированном бассейне ИПФ РАН.



*Прямое численное моделирование эволюции турбулентной струи в пикноклине: изолинии завихренности в моменты времени  $t = 90$  и  $t = 100$  при  $Ri = 0.3$ . Отрицательные значения завихренности соответствуют штриховым линиям. Интервал изолиний равен 0.2.*

### ИЗБРАННЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Баландина Г.Н., Папко В.В., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Эволюция дальнего турбулентного следа за телом, буксируемым в стратифицированной жидкости при больших числах Рейнольдса и Фруда // *Известия РАН. ФАО*, 2004, т. 40, № 1, с. 118-133.
- [2] Дружинин О.А. Коллапс и автомодельность турбулентной струи в пикноклине // *Известия РАН. ФАО*, 2003, т. 39, № 5, с. 629-641.

## ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ПОВЕРХНОСТИ И ВЕРХНЕГО СЛОЯ ОКЕАНА

Направление фундаментальных и прикладных исследований, связанное с развитием *радиофизических методов и средств* дистанционной диагностики динамических процессов в верхнем слое океана, составляет важнейшую часть работ Отделения в области гидрофизики. По существу, эта направление охватывает две взаимодополняющих проблемы. Первая из них – исследование физических механизмов отображения процессов, происходящих в приповерхностном слое океана, на его поверхности. Разработка таких механизмов позволяет определить те динамические характеристики ветрового волнения, которые могут служить диагностическими признаками глубинных процессов для систем дистанционного наблюдения. Вторая проблема – разработка и исследование собственно методов дистанционной диагностики океана и их эффективное применение в экспериментальных гидрофизических исследованиях, включая *радиолокационные* и *оптические* методы.

Выполняемые исследования носят комплексный характер и включают также разработку специальной измерительной аппаратуры. Большую роль в успешном развитии этого направления в Отделении играют эксперименты на крупных гидрофизических установках – **Большом термостратифицированном бассейне** и **Кольцевом ветроволновом бассейне** (см. след. раздел). В ходе выполнения этих работ апробируются как физические модели исследуемых явлений, так и измерительные методики и аппаратура. Сочетание теоретических разработок с адекватным физическим моделированием в условиях лаборатории и затем с натурными экспериментами составляет важную отличительную черту данного направления исследований.

Исследования по дистанционной диагностике океана выполняются в рамках национальных и международных научных программ, включая целевую программу ОФН РАН «Проблемы радиофизики», ФЦП «Мировой океан» и ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 годы, программы Европейского космического агентства. Научное сотрудничество по этому направлению установлено с университетами Гамбурга (Германия), Лиссабона (Португалия), Океанографическим центром в Саутгемптоне (Великобритания), Научно-исследовательским центром им. Нансена (Норвегия).

## РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Современные методы радиолокационной диагностики океана с авиационных и спутниковых носителей имеют очевидные преимущества перед контактными методами, обеспечивая возможность получения информации на достаточно больших акваториях. Развитие систем и методов радиолокационного зондирования морской поверхности сопровождается заметным повышением их информативности и оперативности получаемых данных по реконструкции характеристик как самой поверхности, так и приповерхностных физических процессов.

Работы Отделения по проблеме радиолокационной диагностики океана включают комплекс взаимосвязанных направлений, среди которых:

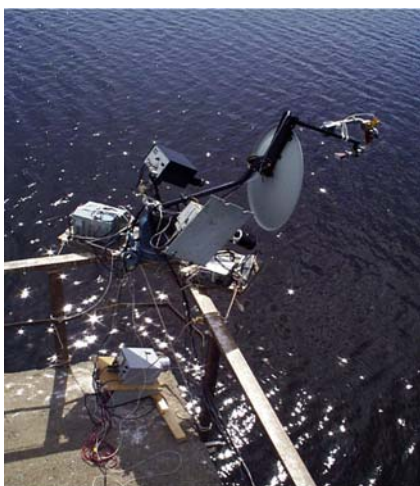
- разработка дистанционной и контактной измерительной аппаратуры для измерений ветрового волнения, гидрологических характеристик верхнего слоя океана, физических характеристик поверхностных пленок;
- натурные и лабораторные эксперименты по изучению изменчивости характеристик ветровых волн в полях внутренних волн, течений, поверхностных пленок, атмосферных фронтов и т.д. с использованием дистанционных и контактных средств измерений;
- развитие моделей отображения вариаций характеристик морской поверхности и верхнего слоя океана в характеристиках радиолокационных и оптических сигналов.



Для выполнения экспериментальных работ в Отделении разработан комплекс приборов и измерительных методик:

- Радиолокаторы диапазона длин волн 8.7 мм и 3.2 см, предназначенные для измерений (с борта судна или с платформ) интенсивности радиолокационного сигнала при обратном рассеянии мелкомасштабным ветровым волнением см-мм диапазонов длин волн, а также скоростей распространения ветровых волн (работают на вертикальной и горизонтальной поляризациях).
- Доплеровский радиолокатор (рабочая длина волны 3 см) с ножевой диаграммой направленности антенны, предназначенный для наблюдений морской поверхности в надир. Радиолокатор позволяет восстанавливать статистические характеристики взволнованной водной поверхности (дисперсии наклонов и орбитальных скоростей, коэффициент корреляции между наклонами и орбитальными скоростями) и определять направление распространения, среднюю длину и высоту длинных волн.
- Опытный образец блока приема и регистрации данных штатной судовой радиолокационной станции, регистрирующий радиолокационные панорамы морской поверхности.
- Оптические анализаторы спектра (ОСА) ветровых волн, работающие в условиях естественного света неба и позволяющие проводить относительные измерения спектра ветровых волн в широком диапазоне длин (от 0.5 см до 1 м), а также скорости распространения волн.
- Методика взятия проб органических пленок и пленок нефтепродуктов на морской поверхности и аппаратура для последующих лабораторных измерений физических характеристик пленок (коэффициента поверхностного натяжения и вязкоупругости).
- Струнные волнографы для контактных измерений параметров ветрового волнения (высот и спектров ветровых волн с частотами до 10-15 Гц).

Кроме этого, в натуральных экспериментах широко используется стандартное оборудование: малогабаритные метеостанции WS-2300 для измерений направления и скорости ветра, температуры и влажности воздуха; GPS-навигаторы; цифровая видео- и фотоаппаратура для регистрации панорам морской поверхности. Вся перечисленная аппаратура и методики измерений многократно использовались в морских экспедициях при работе как с борта НИС, так и океанографических платформ.



*Бортовой комплекс диагностической аппаратуры: радиолокаторы с рабочими длинами волн 3.2 см (справа) и 8.7 мм (внизу), оптические анализаторы спектра (в центре)*



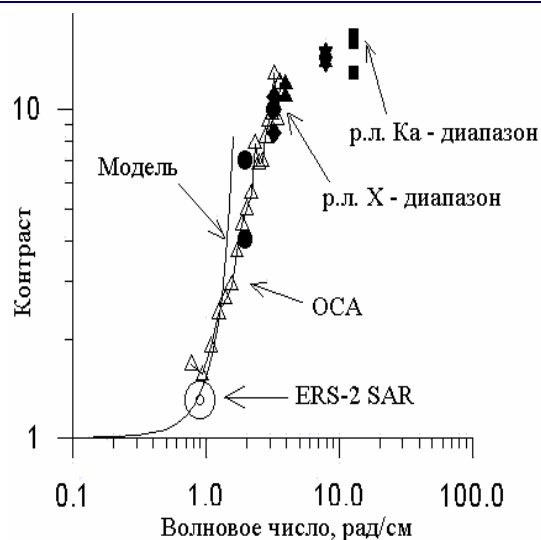
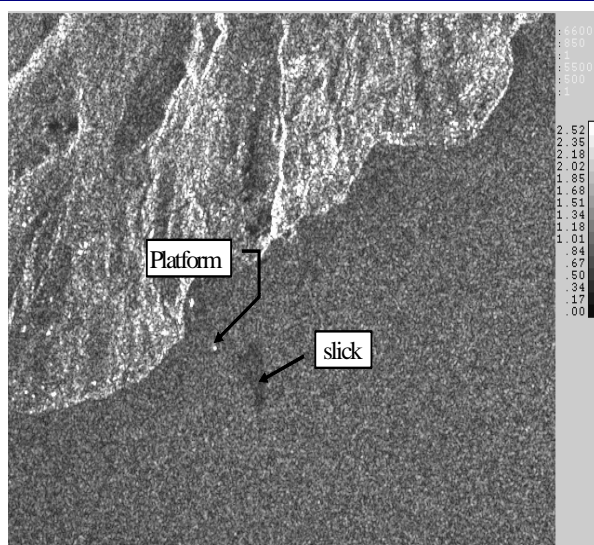
*Радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны*

## Дистанционная диагностика пленок на морской поверхности

Исследование изменчивости поля ветровых волн под воздействием пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ) и развитие на этой основе дистанционных методов диагностики пленок имеет большое прикладное значение с точки зрения экологического мониторинга морских акваторий и внутренних водоемов.

Группой С.А. Ермакова выполнен обширный цикл натурных исследований характеристик морских пленок ПАВ, в том числе подспутниковые эксперименты в кооперации с Европейским космическим агентством [1-3]. Исследованы упругость и коэффициент поверхностного натяжения пленок различных искусственных ПАВ, которые используются как «тестовые» при проведении экспериментов по дистанционному зондированию пленок на акватории. На этой основе выполнены комплексные натурные эксперименты по дистанционной диагностике пленок ПАВ (органических и нефтяных) радиолокационными и оптическими средствами. Ниже приведены результаты одного из таких экспериментов, проводившихся с океанографической платформы на Черном море с целью верификации данных измерений параметров пленок с помощью спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). В этом эксперименте измерялась степень гашения мелкомасштабных ветровых волн в тестовом (специально приготовленном) масляном пятне с использованием двух радиоскаттерометров (на длине волны 3 см и 8.7 мм, или X- и Ka-диапазонов соответственно) и оптических анализаторов спектра синхронно с радиолокационной съемкой поверхности с европейского спутника ERS-2. В результате получено хорошее согласие контрастов в РСА-изображении с данными измерений с платформы и с развитой теоретической моделью с учетом результатов измерений физических характеристик масляной пленки.

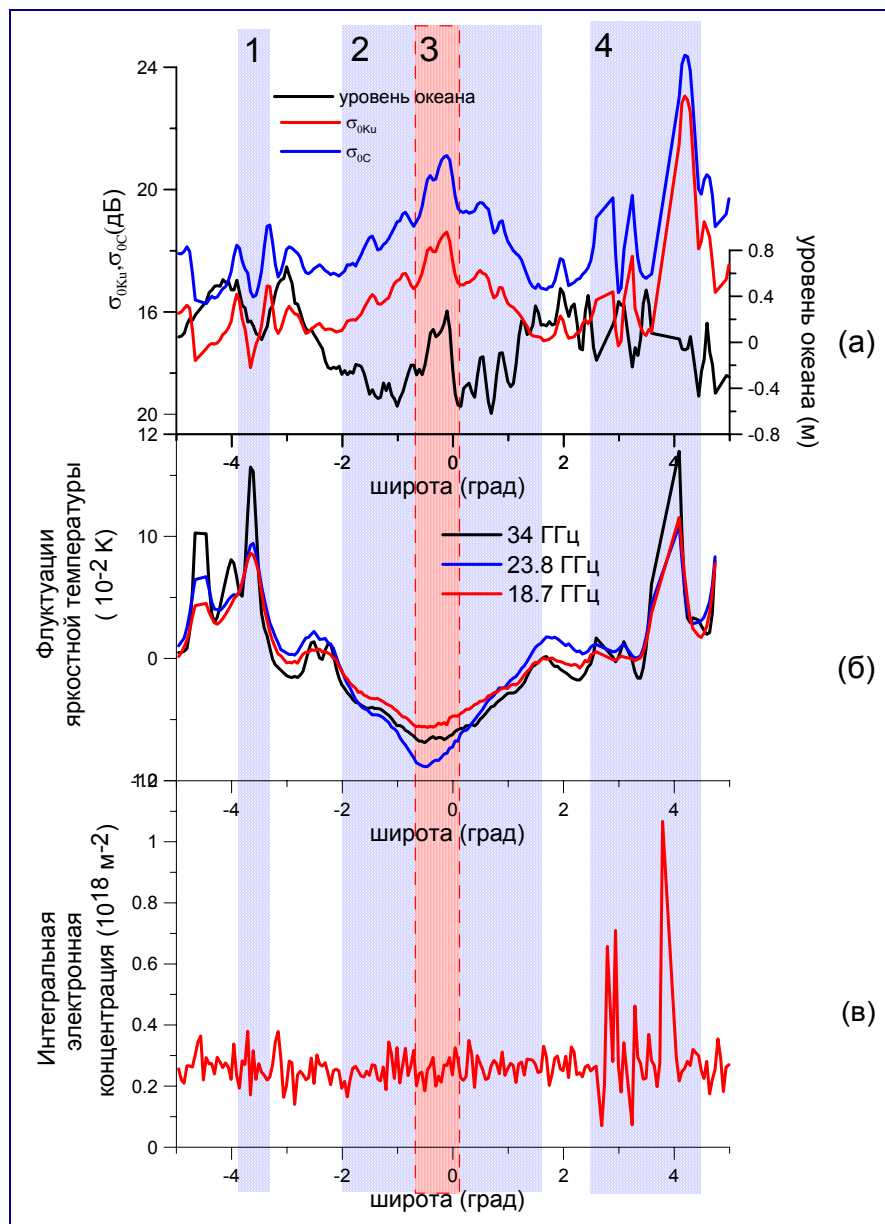
Полученные результаты представляют значительный интерес для разработки методов дистанционного экологического мониторинга морских акваторий, позволяющих регистрировать не только сам факт появления пленок ПАВ на поверхности, но и идентифицировать их происхождение.



*РСА-изображение масляного пятна (данные спутника ERS-2, слева) и степень гашения (контраст) по измерениям различными дистанционными средствами в подспутниковом эксперименте с океанографической платформы на Черном море (справа)*

## Радиолокационные спутниковые наблюдения волн цунами

В результате анализа данных спутниковых наблюдений катастрофического цунами в юго-восточной Азии, возникшего в результате землетрясения 26.12.2004, обнаружен эффект изменения сечения рассеяния радиолокационного сигнала, отраженного от морской поверхности, при прохождении волны цунами в открытой части Индийского океана. Этот эффект свидетельствует о возможности регистрации цунами в условиях открытого океана по данным радиолокационного зондирования. Предложен физический механизм воздействия цунами на характеристики мелкомасштабных ветровых волн, связанный с трансформацией поля ветра при наличии горизонтального поверхностного течения, обусловленного волной цунами [4].

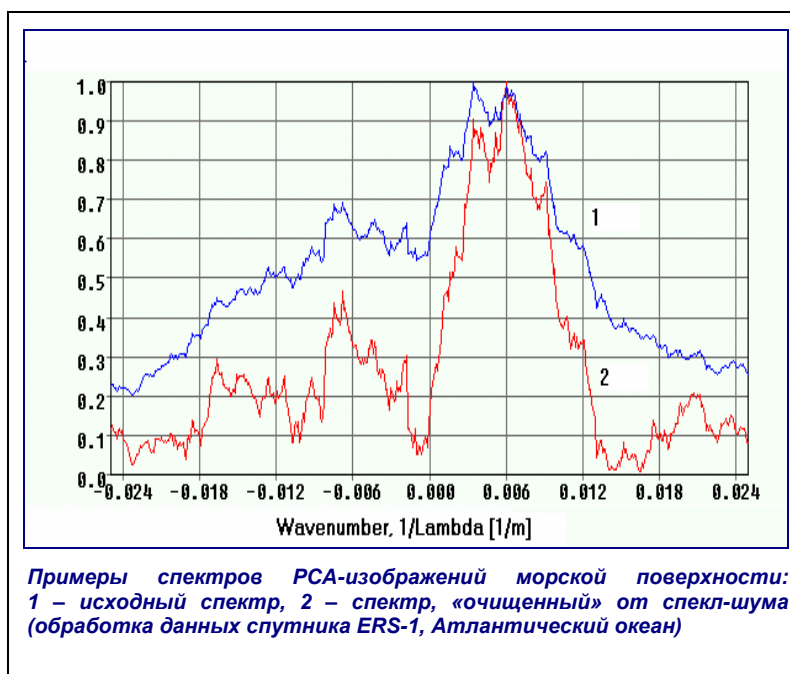


**Широтная зависимость некоторых геофизических параметров, полученных спутником Jason 1 (данные 26.12.2004): а) аномалия уровня океана и сечения обратного рассеяния в S- и Ku-диапазонах; б) отклонения яркостных температур на частотах 18.7 ГГц, 23.8 ГГц, и 34.0 ГГц; в) интегральная электронная концентрация в ионосфере. Контрастная полоса 3 соответствует прохождению головной волны цунами**



## Методы анализа радиолокационных изображений морской поверхности

Разработан новый алгоритм подавления спекл-шума в спектре РСА-изображения морской поверхности [5], открывающий новые возможности получения информации о процессах в верхнем слое океана, в частности, в целях диагностики внутренних волн и поверхностных сликов.



Предложен теоретически и апробирован (с использованием данных европейских спутников ERS-1, ERS-2) новый метод зондирования водной поверхности в нади́р (под малыми углами к нормали) с помощью доплеровского радиолокатора с асимметричной диаграммой направленности, который позволяет проводить панорамные измерения скорости приповерхностного ветра и статистических характеристик морского волнения [6,7].

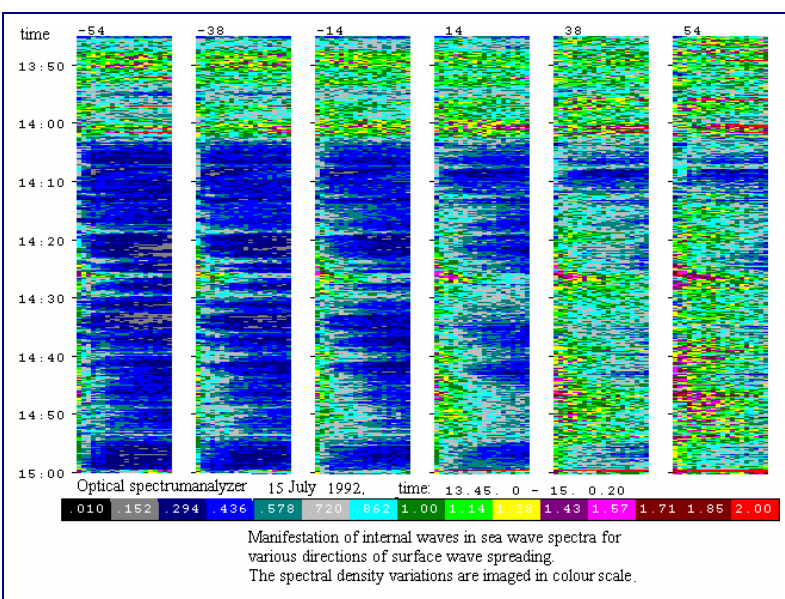
### ИЗБРАННЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Зуйкова Э.М., Щегольков Ю.Б. Модуляция радиолокационных сигналов длинными волнами при рассеянии на морской поверхности, покрытой пленками поверхностно-активных веществ // *Изв. РАН. ФАО*, 2004, №1, с. 102-111.
- [2] Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Зуйкова Э.М., Кияшко С.В., Щегольков Ю.Б. Об эффекте изменения доплеровских сдвигов частоты радиолокационных сигналов в присутствии органических пленок на морской поверхности // *Доклады РАН*, 2003, т.388, № 1, с. 109-112.
- [3] Da Silva J.C., Ermakov S.A., Robinson I.S., Jeans D.R.G., Kijashko S.V. Role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf. 1. Short-period internal waves // *J. Geophys. Res.*, 1998, vol. 103, № C4, pp. 8009-8031.
- [4] Троицкая Ю.И., Ермаков С.А. О регистрации цунами 26 декабря 2004 г. в открытом океане по вариациям радиолокационного сечения рассеяния // *Доклады РАН*, 2005, т. 402, № 5, с. 388-392.
- [5] Каневский М.Б. *Теория формирования радиолокационного изображения поверхности океана*. – Н. Новгород, ИПФ РАН, 2004. – 124 с.
- [6] V.Yu. Karaev, M.B. Kanevsky, G.N. Balandina, P.D. Cotton et al. On the problem of the near surface wind retrieval by radar altimeter: two-parametric algorithm // *Int. J. Remote Sensing*, 2002, vol. 23, № 16, pp. 3263-3283.
- [7] Караев В.Ю., Каневский М.Б., Баландина Г.Н., Мешков Е.М., Челленор П., Срокез М., Гомменджинджер К. Новые средства дистанционной диагностики поверхности Мирового океана: радиолокатор СВЧ-диапазона с ножевой диаграммой направленности антенны // *Исследование Земли из космоса*, 2004, № 2, с. 41-52.

## ОПТИКА ОКЕАНА И ПОДВОДНОЕ ВИДЕНИЕ

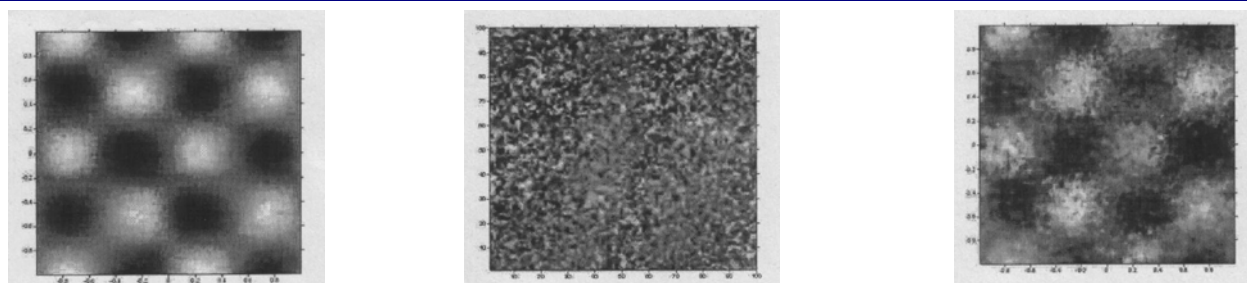
Гидрооптическая тематика унаследована ИПФ РАН от НИРФИ, где в 60-е годы была впервые создана система подводного лазерного наблюдения и с ее помощью выполнены пионерские эксперименты по локации и формированию изображений подводных объектов. Тогда же были получены фундаментальные результаты, составляющие основу современной теории инструментального видения в мутных средах: установлена взаимосвязь между теорией когерентности и энергетическим (яркостным) описанием светового поля; развито малоугловое приближение уравнения переноса излучения и на этой основе построены аналитические модели эволюции структуры лазерного пучка при его прохождении через среду с сильно анизотропным рассеянием; установлены закономерности влияния мутной среды на модулированные (высокочастотным сигналом) световые пучки; получены универсальные формулы для расчета характеристик изображения подводного объекта с учетом эффектов поглощения и многократного рассеяния света в воде, позволяющие оценивать потенциальные возможности систем подводного наблюдения различного типа (включая лазерные) и определять требования к их техническим параметрам.

Опыт этих исследований был использован в Отделении для развития *оптических методов диагностики верхнего слоя океана*, включая создание теории лазерной локации и видения подводных объектов с летательных аппаратов. В результате теоретических и экспериментальных исследований Л.С. Долиным, А.Г. Лучининым и их сотрудниками были разработаны модели обратного рассеяния лазерного импульса в водной среде, предложен и апробирован в морских экспедициях лидарный метод измерения показателя поглощения воды, продемонстрированы возможности регистрации внутренних волн и океанических фронтов с помощью лидаров. Исследования механизмов формирования изображений водной поверхности привели к созданию дистанционного оптического метода измерения спектрально-энергетических характеристик ветрового волнения и корабельного комплекса приборов, позволяющих регистрировать изменчивость спектров волнения в реальном масштабе времени. Этот комплекс совместно с радиолокационными средствами (см. предыдущий раздел) успешно используется в морских экспедициях для исследования механизмов изменчивости ветрового волнения под влиянием внутренних волн, неоднородных течений, пленок ПАВ и других физических факторов.



*Поверхностные проявления внутренней волны, зарегистрированные оптическим измерителем двумерного пространственного спектра волнения (по данным натурного эксперимента)*

Значительный интерес представляет также теория стохастизации световых полей и оптических изображений под влиянием случайно-неровной границы раздела воздух–вода. Разработаны аналитические модели флуктуаций подводной освещенности и лидарного сигнала, приходящего из водной толщи при ее зондировании с воздушного носителя, методы расчета случайных реализаций и статистических характеристик изображений морского дна или подводного объекта, наблюдаемых через взволнованную поверхность моря. На этой основе развита оригинальная методика численного моделирования «мгновенных» и «накопленных» изображений, выявлены возможности увеличения глубины видимости дна в условиях естественного освещения за счет оптимизации процесса наблюдения. Показано, что искажения изображений, возникающие в результате преломления света на границе раздела (рефракционные искажения), могут быть частично или полностью устранены путем соответствующей обработки с использованием той информации о рельефе морской поверхности, которая содержится в ее изображении. В результате этих исследований предложены и апробированы (на модельных изображениях) алгоритмы коррекции рефракционных искажений.



*Примеры оптических изображений при наблюдении через морскую поверхность: изображение при наблюдении через плоскую границу раздела вода–воздух (слева); изображение при скорости ветра 5 м/с (в центре); восстановленное изображение (справа). Размер кадра 2 x 2 м, глубина объекта 10 м, элемент разрешения 2 см.*



Наряду с дистанционными средствами, в Отделении разрабатываются *контактные средства* измерений – погружаемые приборы, которые позволяют получать первичные данные об оптических характеристиках воды. Подобные приборы необходимы не только для контроля точности дистанционных измерений, но и для обеспечения работ по экологическому мониторингу водоемов.

*Прибор TURBIDO для измерения показателя рассеяния морской воды ( $\sigma$ ) на трех длинах волн (475, 525 и 590 нм) в широком диапазоне значений  $\sigma = 0.05 \text{ м}^{-1} \div 3 \text{ м}^{-1}$ .*

### ИЗБРАННЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Долин Л.С., Левин И.М. *Справочник по теории подводного видения*. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. 229 с.
- [2] Лучинин А.Г. Об основных принципах формирования изображения подводных объектов при наблюдении через взволнованную поверхность // *Изв. РАН. ФАО*, 1996, т. 32, № 2, с. 296-302.
- [3] Вебер В.Л., Лучинин А.Г. Влияние корреляционных эффектов на характеристики изображения дна водоема, наблюдаемого через взволнованную поверхность // *Изв. РАН. ФАО*, 2001, т. 37, № 2, с. 257-264.
- [4] Luchinin A.G. Ocean Optics – Air and Sea Interface. In: *Marcel Dekker Encyclopedia of Optical Engineering* DOI: 10.108/E-EOE 120009547, 2003.
- [5] Dolin L.S., Levin I.M. Underwater Optics. In: *Optics Encyclopedia*, vol. 5, Wiley -WCH, Berlin, 2003.
- [6] Долин Л.С., Лучинин А.Г., Турлаев Д.Г. Алгоритм восстановления изображений подводных объектов, искаженных поверхностным волнением // *Изв. РАН. ФАО*, 2004, т. 40, № 6, с. 856-864.



## ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ОКЕАНА

Физическое моделирование волновых процессов в реальном океане, выполняемое в контролируемых и воспроизводимых лабораторных условиях, имеет исключительную важность в силу объективных трудностей в организации полномасштабных морских экспедиций. Поэтому наравне с натурными экспериментами, значительную роль в успешном развитии гидрофизических исследований в Отделении играют лабораторные эксперименты и созданная при этом экспериментальная база, включающая оригинальные технические и инженерные разработки. Основную роль здесь играют два наиболее крупных гидрофизических стенда ИПФ РАН: **Большой термостратифицированный бассейн** и **Кольцевой ветроволновой стратифицированный бассейн**. Оба бассейны оснащены современной и разнообразной измерительной аппаратурой, которая позволяет исследовать широкий круг волновых явлений, определяющих динамику верхнего слоя океана в реальных условиях – генерацию и эволюцию внутренних волн, их взаимодействие с ветровыми волнами, течениями и турбулентностью, динамику ветровых волн в поле неоднородных течений и пленок ПАВ. Одной из важнейших целей работ на обоих бассейнах является лабораторная апробация развиваемых в ИПФ РАН методов и средств дистанционной диагностики океана (радиолокационных и оптических), которые играют основную роль в выполнении задач натурных исследований.

Таким образом, ведущиеся в Отделении работы по лабораторному моделированию волновых процессов в верхнем слое океана включает как масштабное физическое моделирование волновых явлений реального океана, так и апробацию дистанционных радиофизических методов и средств наблюдения этих явлений.

### БОЛЬШОЙ ТЕРМОСТРАТИФИЦИРОВАННЫЙ БАССЕЙН

Большой термостратифицированный опытовый бассейн (БТСБ) ИПФ РАН, введенный в эксплуатацию в 1991 г., позволяет осуществлять масштабное физическое моделирование гидрофизических процессов в верхнем стратифицированном слое реального океана. В его конструкции реализован разработанный под руководством акад. В.И. Таланова простой, эффективный и экологически чистый способ создания и поддержания устойчивой температурной стратификации, глубинный профиль которой воспроизводит характерный для океана профиль в масштабе  $\sim 1:100$ . Благодаря сочетанию параметров создаваемой в нём температурной стратификации, больших размеров и наличию развитого информационно-измерительного комплекса, Бассейн дает уникальные возможности для лабораторного моделирования различных динамических процессов в верхнем слое океана, прежде всего, процессов генерации и эволюции внутренних волн, их воздействия на ветровое волнение, процессов взаимодействия волн с течениями и турбулентностью [1-3].

Бассейн активно используется при проведении совместных исследований с рядом академических институтов: ИКИ РАН, ИФА РАН, ГЕОХИ РАН; на его базе выполнен ряд долгосрочных международных проектов с Ливерморской Национальной лабораторией США и Университетом Колорадо.

БТСБ ИПФ РАН включен в *«Перечень уникальных научно-исследовательских и экспериментальных установок национальной значимости»*.

Долгосрочные цели работ на БТСБ включают:

- исследование взаимодействия внутренних и поверхностных волн, взаимодействия внутренних и поверхностных волн с неоднородными течениями и турбулентностью;
- исследование процессов генерации внутренних волн погруженными движущимися телами и трансформации внутренних волн в области следа таких тел;
- экспериментальная апробация сквозных моделей отображения динамических процессов в толще океана в сигналах радиолокационной и оптической систем регистрации поверхностного волнения и развитие на этой основе радиофизических методов диагностики океана.

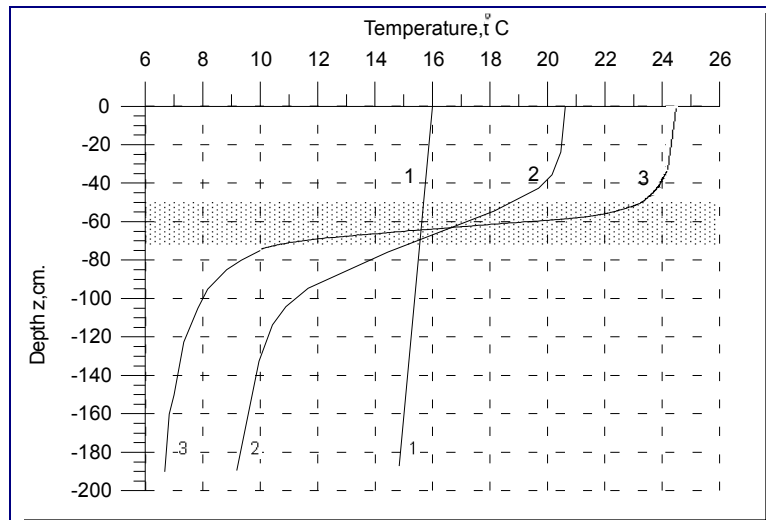
Размеры БТСБ: длина 20 м, ширина 4 м, глубина 2 м. Его главной отличительной особенностью является оригинальный способ создания температурной стратификации путём нагрева и охлаждения жидкости с помощью системы теплообменников, установленных вдоль боковых стенок бассейна. Применение холодильных машин, работающих в режиме теплового насоса, обеспечивает высокую эффективность такого способа.

Бассейн оборудован:

- системой создания и поддержания температурной стратификации, позволяющей создавать в течение суток работы устойчивый термоклин с полным перепадом температур до  $15^{\circ}\text{C}$  и глубиной залегания 60 см (см. рисунок);
- буксировочной тележкой, обеспечивающей перемещение моделей со скоростями 0.01 – 1 м/с (при погрешности последней не более 2%);
- системой волнопродукторов, генерирующих поверхностные волн (с длинами 0.1 – 1 м и высотой до 60 мм) и внутренние волны (с периодами 30 – 120 с);
- волногасителем поверхностных волн, коэффициент отражения от которого составляет не более -10 дБ в рабочем диапазоне длин волн;
- автоматизированным информационно-измерительным комплексом, включающим систему первичных преобразователей (датчиков температуры, скорости потока) и волнографов, 3-см и 8-мм радиоскаттерометры, оригинальную видеосистему регистрации наклонов уровня водной поверхности, систему сбора и обработки данных на базе АЦП и ПК со специально разработанным программным обеспечением.



*Большой термостратифицированный опытовый бассейн ИПФ РАН: общий вид*



**Профили температурной стратификации в БТСБ: 1 – первоначальный профиль; 2 – после 8 часов работы холодильных машин; 3 – после 20 часов работы (рабочий профиль стратификации).**

### ИЗБРАННЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Арабаджи В.В., Богатырев С.Д., Баханов В.В. и др. Лабораторное моделирование гидрофизических процессов в верхнем слое океана (Большой термостратифицированный бассейн ИПФ РАН) // *Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование: Сб. трудов* / Под ред. В.И. Таланова, Е.Н. Пелиновского. – Н. Новгород, ИПФ РАН, 1999, т. 2, с. 231-251.
- [2] Баханов В.В., Таланов В.И. Трансформация нелинейных поверхностных волн в поле неоднородных течений // *Там же*, т. 1, с. 81-106.
- [3] Баханов В.В., Власов С.Н., Казаков В.И., Кемарская О.Н., Копосова Е.В., Шишкина О.Д. Моделирование внутренних и поверхностных волн реального океана в Большом термостратифицированном опытовом бассейне ИПФ РАН // *Изв. вузов. Радиофизика*, 2003, т. 46, № 7, с. 537-554.

### КОЛЬЦЕВОЙ ВЕТРОВОЛНОВОЙ СТРАТИФИЦИРОВАННЫЙ БАСЕЙН

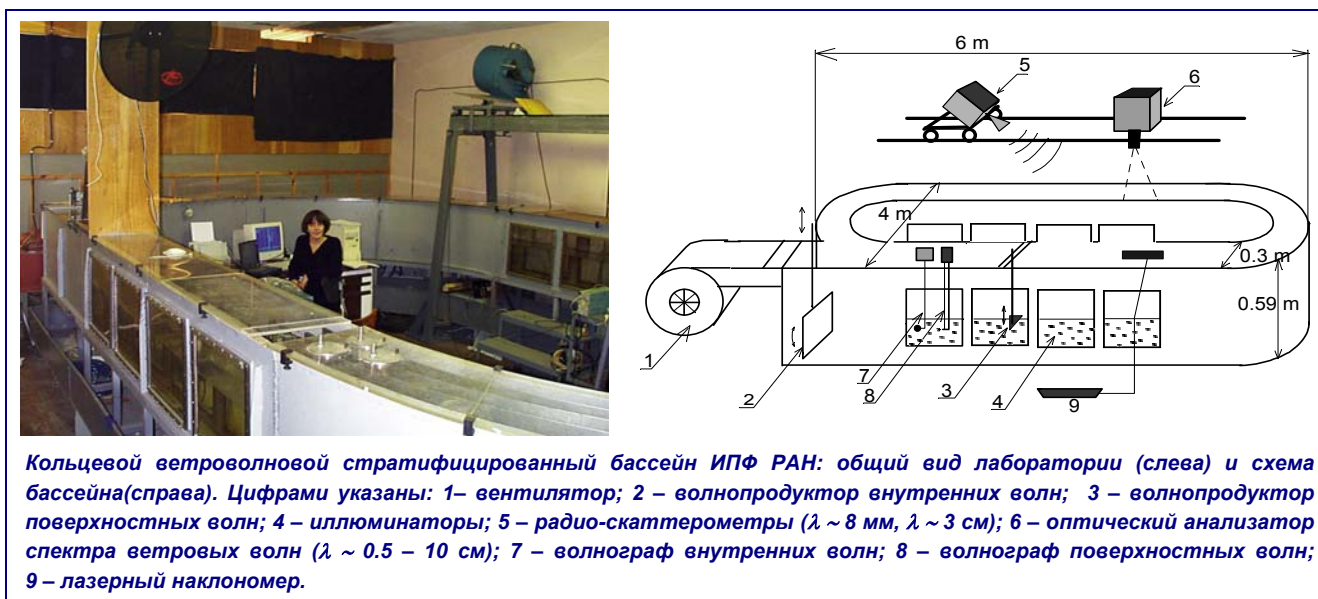
В 1992 г. в Отделении введен в эксплуатацию Кольцевой ветроволновой стратифицированный бассейн. Бассейн представляет собой замкнутый аэрогидроканал овальной формы (с большой и малой осями 6 м и 3 м соответственно, сечения гидроканала и аэроканала составляют  $0.3 \times 0.3 \text{ м}^2$ ). Аэроканал служит для генерации развитого ветрового волнения с помощью вентилятора. В гидроканале предусмотрено создание стратифицированных солевых растворов с заданным профилем плотности для генерации внутренних волн. Бассейн обладает широкими возможностями для физического моделирования ветровых волн на больших разгонах, экспериментального исследования изменчивости характеристик ветрового волнения под действием внутренних волн и пленок ПАВ.

Долгосрочные цели работ на Бассейне включают:

- исследование спектров коротких ветровых волн дистанционными (оптическими и радиолокационными) методами;
- исследование каскадных механизмов модуляции мелкомасштабных ветровых волн в поле длинноволновых возмущений (внутренних и длинных ветровых волн);
- исследование механизмов локализации пленок ПАВ в полях поверхностных течений, внутренних и гравитационно-капиллярных волн, физическое моделирование механизмов образования сликов на морской поверхности;
- развитие методов исследования физических характеристик ПАВ.

Бассейн оборудован:

- системой возбуждения поверхностных волн ветровым потоком с регулируемой скоростью (в диапазоне 0 – 4 м/с);
- системой создания плотностной стратификации;
- системой механических волнопродукторов для генерации монохроматических поверхностных и внутренних волн;
- измерительным комплексом, включающим разработанные в ИПФ РАН уникальные оптические анализаторы спектра поверхностных волн, радиоскаттерометры см- и мм-диапазонов, системой контактных датчиков волнения (струнных волнографов).



В течение последних лет на Бассейне выполнено моделирование физических механизмов воздействия внутренних волн на поверхностное ветровое волнение, включая кинематический, пленочный и каскадный механизмы (см. предыдущий раздел), исследовано влияние нелинейности ветровых волн на оптические и радиолокационные сигналы при дистанционном зондировании взволнованной поверхности, изучены эффекты влияния пленок ПАВ на изменчивость коротких ветровых волн [1,2]. Все эти результаты были положены в основу подготовки успешных натурных экспериментов в морских условиях.

### ИЗБРАННЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

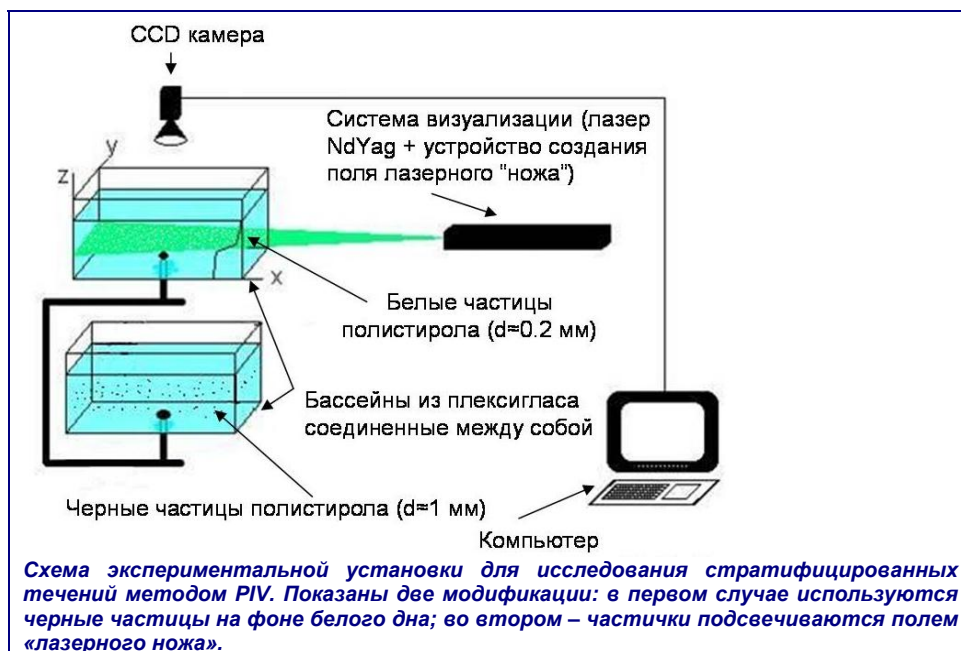
- [1] Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Щегольков Ю.Б. Лабораторные исследования кривизны гравитационно-капиллярных волн конечной амплитуды // *Изв. РАН. ФАО*, 1997, т. 33, № 3, с. 394-401.
- [2] Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Щегольков Ю.Б. Лабораторные исследования сильной модуляции радиолокационных сигналов при наличии длинных волн на воде с поверхностно-активной пленкой // *Изв. вузов. Радиофизика*, 2003, т. 46, № 12, с. 1025-1042.



## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В ТЕЧЕНИЯХ

В последние годы при проведении лабораторных исследований гидродинамических течений широко используются бесконтактные методы, основанные на визуализации течения путем добавления в них частиц нейтральной плавучести. Общее название этих методов, быстро развиваемых во всем мире: *Particle Image Velocimetry* (PIV). Движение частиц в жидкости, вызываемое исследуемым течением, снимается на цифровые видеокамеры, а затем обрабатывается на компьютере с помощью специальных программ. В зависимости от характеристик исследуемого течения применяются разные частицы, способы подсветки, алгоритмы обработки полученных изображений. Область применения этого перспективного метода достаточно широка: исследование течений за буксируемыми объектами, поля внутренних волн, акустических течений, струйных течений и т.д.

В созданных в Отделении лабораторных PIV-установках характерные размеры области течений изменяются в пределах от 1 до 100 см, а значения скоростей течений от  $10^{-1}$  до 50 см/с. Несколько крупных экспериментальных комплексов ИПФ РАН, включая Большой термостратифицированный бассейн, оснащены оборудованием для визуализации гидродинамических течений методом PIV.



### ИЗБРАННЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

- [1] Баландина Г.Н., Папко В.В., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Эволюция дальнего турбулентного следа за телом, буксируемом в стратифицированной жидкости при больших числах Рейнольдса и Фруда // *Изв. РАН. ФАО*, 2004, т. 40, №1, с. 118-133.
- [2] Ершов В.П., Касьянов Д.А., Родченков В.И., Сергеев Д.А. О количественных соотношениях в процессах массообмена при росте и растворении солевых кристаллов в акустическом поле // *Сб. трудов XVI сессии РАО*, 2005, т. 2, с. 73-76.