

## ТЕХНИЧЕСКИЕ, АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОХОТСКОГО МОРЯ

© 2024 г. А.И. Зайцев<sup>a,\*</sup>, Г.И. Долгих<sup>b,\*\*</sup>, С.Г. Долгих<sup>b,\*\*\*</sup>, Е.Н. Пелиновский<sup>c,\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН,  
Южно-Сахалинск, Россия

<sup>b</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>c</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

\*E-mail: aizaytsev@mail.ru

\*\*E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

\*\*\*E-mail: sdolgikh@poi.dvo.ru

\*\*\*\*E-mail: pelinovsky@ipfran.ru

Поступила в редакцию 06.06.2024 г.

После доработки 28.06.2024 г.

Принята к публикации 20.07.2024 г.

В статье представлены измерительные системы, которые используются для мониторинга природных процессов в южной части Охотского моря. Архитектура приборов позволяет организовать регистрацию измерений и передачу данных о волнах (в том числе аномально больших) в режиме реального времени. Впервые в этом регионе организованы наблюдения за ледовой обстановкой с помощью радиолокационной станции. Исследования проводятся научным стационаром “мыс Свободный”, где установлены лазерно-интерференционные приборы для регистрации вариаций колебаний и волн в геосферах. При обработке натуральных данных были обнаружены деформационные аномалии, характерные для цунамигенных землетрясений, изучены закономерности трансформации колебаний и волн различных периодов при переходе из одной геосферы в другую.

*Ключевые слова:* морские поверхностные волны, аномальные волны, цунами, лазерный деформограф, Охотское море, лёд в море, радиолокационная станция.

DOI: 10.31857/S0869587324080071, EDN: FCLDKZ

Инструментальные наблюдения поверхностных волн в Охотском море направлены на обеспечение безопасности работы прибрежной инфраструктуры, включающей порты, буровые установки и нефтяные платформы по добыче нефти и газа в шельфовой зоне. Развитие экономики Дальнего Востока диктует жёсткие требования к качеству оперативной и статистической информации о волновых режимах в исследуемых регионах, что невозможно без длительных высокоточных наблюдений, численного моделирования и развития систем мониторинга. Имеющиеся в распоряжении Специального кон-

структорского бюро средств автоматизации морских исследований (СКБ САМИ) ДВО РАН приборы отвечают международным стандартам, а его специалисты обладают большим опытом проведения экспериментальных исследований и обработки получаемых данных с использованием современных методов и физической интерпретации результатов. В состав СКБ САМИ ДВО РАН входят научные и конструкторские подразделения, опытно-экспериментальное производство, а также гидрофизические стационары на побережьях о. Итуруп и о. Сахалин (мыс Свободный, озеро Птичьё). Это

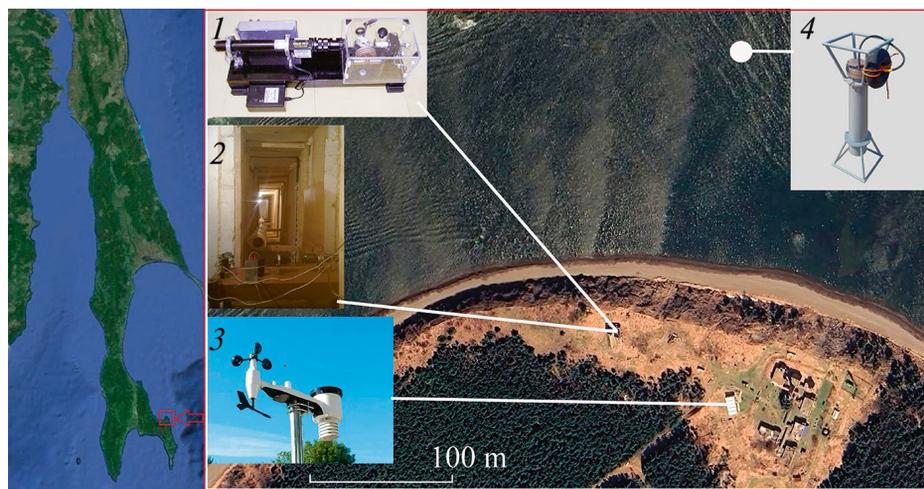
ЗАЙЦЕВ Андрей Иванович – член-корреспондент РАН, директор СКБ САМИ ДВО РАН. ДОЛГИХ Григорий Иванович – академик РАН, директор ТОИ ДВО РАН. ДОЛГИХ Станислав Григорьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ТОИ ДВО РАН. ПЕЛИНОВСКИЙ Ефим Наумович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ИПФ РАН.

позволяет осуществлять полный комплекс морских научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, включая изготовление и испытание новых образцов специальной морской техники и автоматизированных систем сбора телеметрической информации о состоянии моря и атмосферы.

СКБ САМИ на протяжении многих лет ведёт экспериментальные исследования волновых процессов в Охотском море. В них принимает участие Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, в котором разработан ряд приборов для мониторинга основных параметров геосфер на основе современных лазерно-интерференционных методов. В первую очередь, к ним относятся лазерные деформографы различной длины и ориентации, лазерные нанобарографы, лазерные измерители вариаций давления гидросферы и лазерные гидрофоны. С их помощью регистрируются вариации микродеформаций верхнего слоя земной коры, давления атмосферы и гидросферы в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью на уровне фоновых колебаний. Все лазерно-интерференционные приборы установлены на полигоне СКБ САМИ на мысе Свободный (о. Сахалин). Они позволяют вести измерения одновременно во всех геосферах, что открывает возможности комплексного изучения процессов и их происхождения, регистрации волновых процессов на стадии зарождения, оценки энергии, передаваемой из одной геосферы в другую, исследования трансформации волн между геосферами. Описание существующих измерительных комплексов и некоторых результатов, полученных с их помощью, представлено ниже.

**Лазерно-интерференционный комплекс на мысе Свободный.** Создание лазерно-интерференционного комплекса в южной части о. Сахалин началась

в 2010 г. с разработки мобильного, а затем и стационарного горизонтального лазерного деформографа неравноплечего типа. Прибор создан на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона с длиной измерительного плеча 10,5 м и ориентацией “север–юг”. Лазерный деформограф позволяет регистрировать вариации микродеформаций верхнего слоя земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 0,3 нм [1]. С целью исключения влияния температурных вариаций на показания прибора он размещён в подземном термоизолированном помещении на глубине около 2 м. В 2012 г. к лазерному деформографу были добавлены лазерный нанобарограф для измерения вариаций атмосферного давления и лазерный гидрофон для измерения вариаций давления гидросферы, а впоследствии и метеостанция для измерения основных метеопараметров. Все эти измерительные системы представлены на рисунке 1. Лазерный нанобарограф создан также на основе равноплечего интерферометра Майкельсона, где в качестве чувствительного элемента используется блок анероидных коробок, что позволяет вести измерения в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа. Этот прибор тоже размещён в подземном термоизолированном помещении. Лазерный гидрофон, созданный на основе равноплечего интерферометра Майкельсона, регистрирует изменения давления гидросферы в том же частотном диапазоне с точностью 50 мкПа [2]. Метеостанция ведёт круглосуточное наблюдение за изменениями основных параметров атмосферы, таких как температура, влажность, атмосферное давление, направление и скорость ветра. Данные со всех приборов поступают по кабельным линиям в лабораторное помещение, где после предварительной обработки сохраняются в базе экспериментальных данных.



**Рис. 1.** Состав научного стационара “мыс Свободный”:

1 – лазерный нанобарограф; 2 – лазерный деформограф горизонтального типа; 3 – метеостанция; 4 – лазерный гидрофон

Задача лазерно-интерференционного комплекса — изучение наиболее энергоёмких процессов Земли, происходящих на границе раздела системы “атмосфера—гидросфера—литосфера”, часть которых носит катастрофический характер (штормы, цунами, землетрясения). Для исследования закономерностей возникновения и развития этих процессов необходима аппаратура, позволяющая измерять основные параметры геосфер на уровне фоновых колебаний в широком частотном диапазоне. С помощью этих комплексов изучены закономерности трансформации гидроакустических и сейсмоакустических сигналов на границе “вода—дно”, оценён вклад атмосферных процессов в уровень микродеформаций верхнего слоя земной коры, выявлены закономерности трансформации морского волнения в упругие колебания широкого диапазона частот. Благодаря применению лазерно-интерференционных приборов обнаружены такие природные явления, как “голос моря” при движении тропических циклонов и тайфунов (рис. 2) [3], деформационные аномалии, характерные для цунамигенных землетрясений [4, 5], метеоцунами и волны-убийцы [6] на записях лазерных измерителей вариаций давления гидросферы.

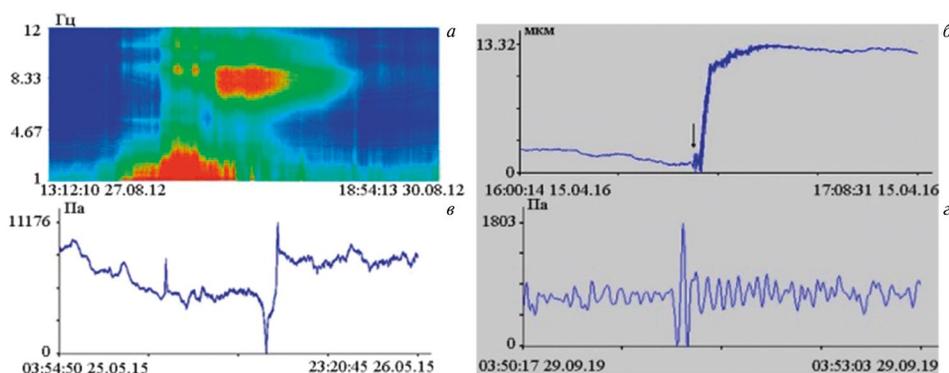
**Измерительные станции наблюдений поверхностных волн в Охотском море.** Учитывая российский [7–9] и мировой [10] опыт измерения поверхностных волн, конструкторами СКБ САМИ ДВО РАН разработан и испытан прибор “Волнограф” для измерения поверхностного волнения (рис. 3 а). Он фиксирует донное давление, которое пересчитывается в колебания морской поверхности. Станция имеет три канала регистрируемых параметров, независимый автономный источник питания, блоки электроники для усиления принимаемого сигнала и записи данных на энергонезависимую память, интерфейс управления и фиксирования времени.

Конструкция волнографа позволяет записывать колебания давления на глубинах до 100 м. Спек-

тральный состав гидродинамического давления зависит от глубины, на которой измеряют давление. С её увеличением поверхностные волны заметно затухают и максимум спектра смещается в сторону низких частот, то есть более длинных волн (измерения проводились в прибрежной зоне Сахалина и Курил).

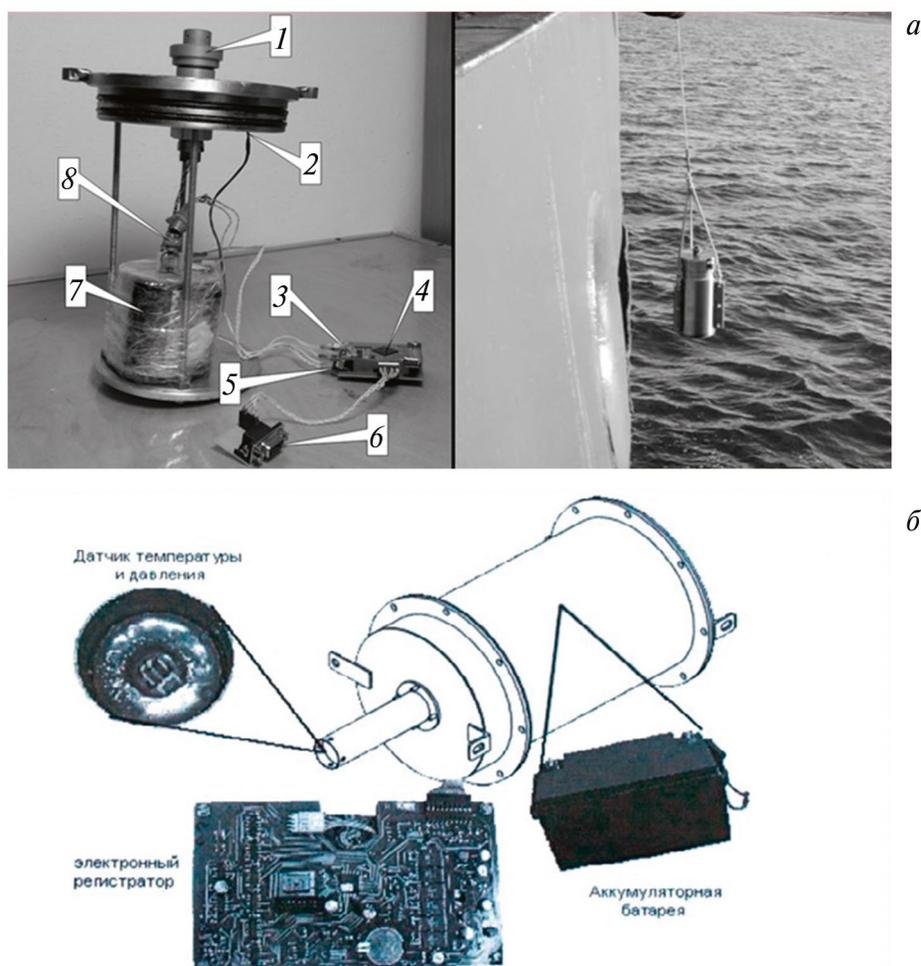
Ещё один прибор для регистрации поверхностного волнения — выполненный в корпусе из нержавеющей стали автономный донный регистратор придонного давления АРВ-К12 (рис. 3 б), произведённый в КБ г. Углич Ярославской области и используемый в исследованиях СКБ САМИ. В качестве первичных преобразователей физических величин используются кварцевые резонаторы. Диапазон измерения давления на глубинах до 100 м, точность по давлению 0.06%, диапазон рабочих температур от  $-4$  до  $40^{\circ}\text{C}$ , автономность работы донного регистратора составляет около 6 месяцев, дискретность измерений 1 сек. Эти приборы использовались для регистрации Симуширского цунами 2006 г., Невельского цунами 2007 г. [11, 12], а также для регистрации длинных волн на Курильских островах [13].

Для хранения и обработки полученных данных разработана и реализована система хранения гидрологических данных, позволяющая их структурировать и упорядочивать. Удобный доступ с помощью пользовательского интерфейса существенно упрощает работу с ними. Ещё одно преимущество системы состоит в том, что доступ к данным возможен с любого компьютера и из любой точки мира, при этом не требуется дополнительного программного обеспечения. Система позволяет пользователю получать данные с любой дискретностью в виде текстового файла с выбранными их рядами. Подобный подход предоставляет пользователю абсолютную свободу в выборе программного инструмента для дальнейшей работы.



**Рис. 2.** Фрагменты записей и динамическая спектрограмма лазерно-интерференционных приборов:

*а* — динамическая спектрограмма записи “голоса моря” лазерным деформографом; *б* — фрагмент записи лазерным деформографом деформационной аномалии; *в*, *г* — фрагменты записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы при формировании метеоцунами и волны-убийцы



**Рис. 3.** Автономный регистратор поверхностного волнения “Волнограф” (а)

1 – канал гидростатического давления, 2 – канал температуры, 3 – энергонезависимая память (SD-карта), 4 – контроллер управления и сбора данных, 5 – блок электроники, 6 – COM порт со скоростью обмена 115 200 бод, 7 – литиевые батареи +3.2 В, 8 – разъём для включения станции в работу;

(б) автономный регистратор придонного давления (АРВ-К12), разработанный КБ г. Углич

**Организация натуральных наблюдений поверхностного волнения и мониторинг льда в прибрежной зоне о. Сахалин с помощью радиолокационной станции.** В мае–июне 2016 г. на побережье о. Сахалин (станция “мыс Свободный”) были проведены испытания опытного образца автономного мобильного робототехнического комплекса (АМРК). В качестве района для проведения экспериментальных исследований с установленным комплектом оборудования выбрали береговую линию как район с большой перспективой использования. Важным аспектом при оценке возможностей движения АМРК по выбранному маршруту стал предварительный учёт данных о грунтовых поверхностях береговых линий (рис. 4). Используемое навигационное оборудование фирмы Orient Systems (ОС-103) представляет собой GNSS-приёмник на базе двух плат ComNav K508, поставляемый в комплекте с антенной АТ330. Приёмник снабжён ударопоглощающими резино-

выми бамперами, герметизированными портами, он пылевлагодонепроницаем.

Радиолокационная станция (РЛС) используется для измерения поверхностного морского волнения. Верификация натуральных данных, полученных с её помощью, выполнялась с помощью автономного регистратора давления, а их интерпретация – с помощью метеорологического комплекса WXT500. Комплекс позволяет получить данные температуры, влажности, атмосферного давления, скорости и направления ветра. Благодаря сопоставлению основных метеорологических характеристик с данными РЛС и регистратора давления удалось получить достоверную информацию о поверхностном ветровом волнении [14, 15].

При ветровом волнении небольшой высоты на экране кругового обзора РЛС практически не наблюдаются эхосигналы, отражённые от морской поверхности. При сильном ветровом волнении ре-



Рис. 4. Фрагменты проведения экспериментальных исследований

гистрируются чёткие эхосигналы в виде ярко выраженных импульсов, соответствующих отдельным цугам волн. На рисунке 5 приведён пример работы РЛС во время трёхбалльного шторма. С левой стороны показан эхосигнал, справа — зависимость высоты волны от расстояния до регистратора. При анализе данных выяснилось, что значение отражённого радиосигнала падает с расстоянием вплоть до точки измерения: чем дальше от берега, тем высоты волн меньше, что согласуется с известными данными об усилении волн на мелководье. Волны большой высоты наблюдаются на расстоянии порядка 500 м от берега.

РЛС используется также с целью мониторинга и изучения дрейфа льда [16]. Для этого в зимне-весенний период в заливе Мордвинова на юго-восточном побережье о. Сахалин был проведён ряд экспериментов. Для интерпретации натуральных данных РЛС используется программно-аппаратный комплекс на базе процессора Sigma S6. РЛС в комплекте с этой системой часто применяются для наблюдения за ледовой обстановкой в непосредственной близости от места установки РЛС. Sigma S6 получает радиолокационный сигнал от РЛС, и за счёт

расширенных возможностей его обработки на базе встроенного специализированного программного обеспечения (фильтрация, подавление шумов и т.д.) значительно повышается достоверность и качество получаемой информации. Пример работы комплекса представлен на рисунке 6. Получена информация о скорости и направлении движения льда, характерном размере льдин [16]. Судя по данным измерений, наблюдается характерное движение в юго-восточном направлении, что подтверждает генеральное направление течений в данном регионе со средней скоростью 5 см/с. По натурным данным высоты торосов на дрейфующем льду их средняя величина возрастает от 0.5 до 1.3 м. Максимальная высота в январе — 1.5 м, в апреле — 5.0 м.

**Регистрация штормов и аномально больших волн вблизи южного побережья о. Сахалин.** Измерительными станциями гидростатического давления проводятся непрерывные измерения поверхностного волнения в районе научного стационара “мыс Свободный”. Для контроля методики обработки этих данных, было проведено сравнение с данными спутниковой альтиметрии, обновляемыми в режиме реального времени в открытом доступе [17].

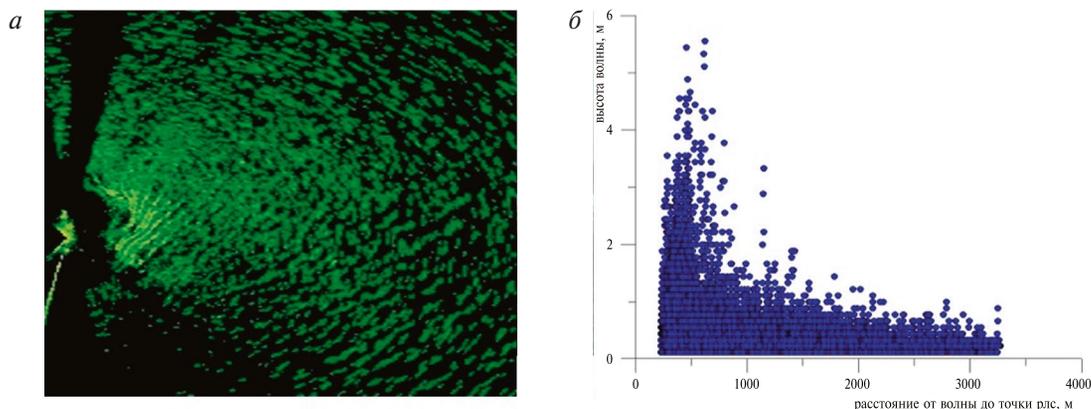


Рис. 5. Фиксация волнения в Охотском море во время трёхбалльного шторма (а), зависимость высоты волны от расстояния до точки постановки РЛС (б)

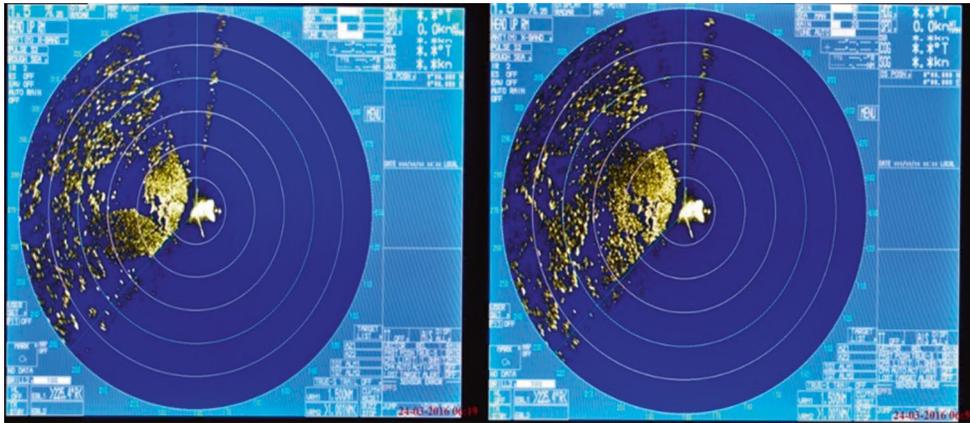


Рис. 6. Вид монитора РИС после обработки радар-процессором

На рисунке 7 представлены графики значительной высоты волн, полученные с помощью спутниковой альтиметрии и в наших измерениях.

В соответствии с нашей методикой [18], процедуру предварительной коррекции прошли все анализируемые в работе записи. Нами разработан программный комплекс, состоящий из набора вычислительных программ, реализованных в C++, и скриптов на языке Matlab для отображения и анализа результатов вычислений, особенно вычислений высот и периодов волн.

В соответствии с описанной выше методикой скорректированы данные, полученные в результате эксперимента в районе мыса Свободный с октября 2011 г. по май 2020 г. Измеренные данные уровня моря за 2011–2012 гг., рассчитанного по ним с учётом гидростатической поправки, отличаются от тех, которые получены при сравнительном анализе без её учёта.

Предварительный анализ колебаний обнаруживает множество сильных штормов в период наблюдений с ноября по декабрь 2011 г. Наиболее сильный

шторм отмечался в конце декабря – начале января с амплитудой ветрового волнения до 9 м. Рассчитанный по этим колебаниям график значительных высот волн (по нему также можно отметить высокую штормовую активность и связанные с этим относительно большие высоты волн) в целом характерен для данного региона.

Одна из интересных отличительных особенностей полученных записей состоит в том, что на них присутствуют участки, на которых датчик регистрировал волнение моря, покрытого льдом. Подобные эффекты отмечались и ранее [19], но для Охотского моря они получены впервые. Таким образом, у нас есть возможность отследить изменение различных характеристик (спектральных, статистических) волнения не только во время изменения режима волнения, но и при установлении ледового покрова. Для оценки изменения спектральных характеристик во времени по всей записи был построен текущий спектр. На записи удалось зарегистрировать два наиболее сильных шторма: 24 декабря 2011 г. и 5 января 2012 г. Во время этих событий заметно существенное усиление не только ветровых волн

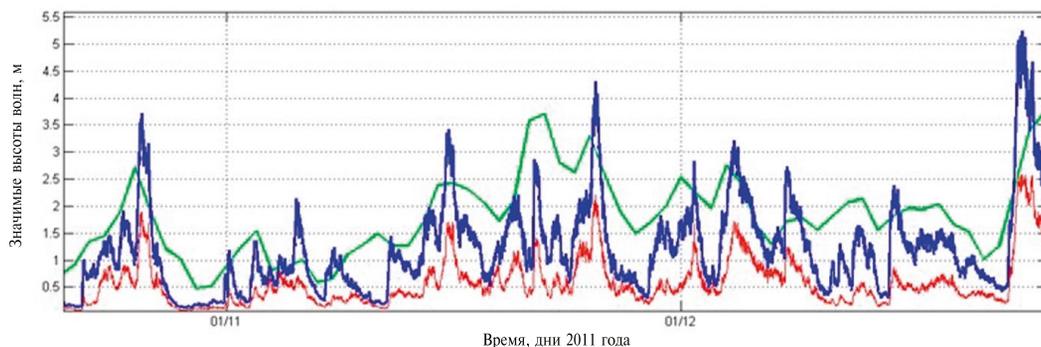


Рис. 7. Значительные высоты волн по натурным данным, полученным в районе мыса Свободный в 2011–2012 гг.; обработка данных с использованием гидростатической формулы (красная линия), с использованием частотной коррекции (синяя), данные спутниковой альтиметрии (зелёная линия)

Примечание: полноцветная версия рисунков к статье доступна в электронной версии “Вестника РАН”.

и волн зыби, но и энергии в области инфрагравитационных волн. Стоит особо отметить резкое изменение спектра волн после штормов. Так, 7 января 2012 г. энергия в области ветровых волн, высокочастотной и среднечастотной зыби резко падала, что, очевидно, связано с влиянием ледового покрова моря на волнение. Вероятно, лёд был подогнан к берегу сильными штормами. 22 и 29 января на спектре отмечались интересные усиления в области зыби (с периодами 15–18 сек.), зародившейся, по-видимому, ещё в Тихом океане, поскольку такие большие её периоды не характерны для зыби, образующейся в Охотском море.

В последнее время накопилось много свидетельств появления необычных волн на поверхности моря как в открытой части, так и вблизи берега (в литературе их называют волнами-убийцами). Некоторые натурные данные, и визуальные, и инструментальные, приводятся в опубликованных книгах, статьях и каталогах [20–23], теоретические модели волн-убийц развиваются в Институте прикладной физики РАН и других академических организациях. Основным признаком этих волн является их внезапно большая высота и крутизна [20]. На практике чаще всего пользуются амплитудным критерием выделения anomalно высоких волн:

$$H/H_s > 2, \quad (1)$$

где  $H$  – высота anomalно высокой волны,  $H_s$  – значительная высота волн.

Свидетельств наблюдений волн-убийц в морях, окружающих Россию, весьма немного. Нами выполнен поиск anomalно больших волн, так называемых волн-убийц, в прибрежной зоне Охотского моря. Измерения проводились в районе мысов Анива и Свободный в южной части острова Сахалин. Первые записи проявлений anomalно больших волн (волн-убийц) вблизи побережья Сахалина приведены в работе [24]. Там же содержатся свидетельства очевидцев. Всего на анализируемой записи за 70 дней наблюдения волнения в безлёдный период было выделено около 200 волн, подпадающих под определение амплитудного критерия (рис. 8). Согласно теории, основанной на представлении ветрового волнения узкополосным гауссовым случайным процессом [20], волны-убийцы в среднем встречаются раз в 10 ч в заданном месте (с превышением в 2 раза) так что наши оценки, основанные на анализе натурных данных, оказываются близкими к теоретическим.

Отметим первые данные наблюдений anomalно больших волн у оконечности мыса Анива на южном побережье острова Сахалин [24]. Они получены на основе анализа долговременных записей уровня моря за июнь–сентябрь 2009 г., зафиксированных с помощью донной станции (глубина постановки 12 м). За время наблюдений зарегистрировано 394 anomalно больших волн, высота которых

в 2 и более раза превышает значительную высоту волны. Из них 6 случаев, когда превышение достигает 2.5 раз. В этих шести событиях два раза волна-убийца имела вид одиночного гребня, в других случаях – знакопеременной волны или цуга волн. Частота наблюдения anomalно больших волн, в зависимости от их амплитуды, описывается пуассоновским распределением, как это и следует из теории экстремальной статистики. Волны-убийцы встречаются в этом районе в среднем дважды в день [25], что близко к оценке, которая следует из теории для узкополосного “гауссова” моря. Были приведены также данные наблюдений anomalно больших волн у оконечности мыса Свободный на южном побережье острова Сахалин. Они получены исходя из анализа долговременных записей уровня моря за ноябрь–май 2011–2012 гг., зафиксированных донной станцией (глубина постановки 16 м). По крайней мере, две anomalно большие волны (до 6 м), зарегистрированные 24 и 25 декабря 2011 г., совпали во времени с движением циклона (рис. 9). Его характеристики приведены на сайте Российской метеорологической службы: “В течение нескольких дней на Охотском море сохраняется штормовая погода. Ветер северной четверти усиливался до 17–22 м/с, в порывах до 25 м/с; высота волн до 4 м. Виной всему стал циклон, который 16 декабря приблизился к Камчатке. Сильный ветер охватил не только побережье Камчатки, но практически всю акваторию Охотского моря” [26]. Стоит отметить, что при прохождении этого циклона 18 декабря в центральной части Охотского моря в 200 км от Сахалина потерпела крушение плавучая буровая платформа “Кольская”.

**Технические, аппаратные и программные решения для мониторинга и оповещения о цунами.** Лазерно-интерференционные комплексы, расположенные в научных стационарах “мыс Свободный” (побережье Охотского моря) и “мыс Шульца” (побережье Японского моря) позволяют регистри-

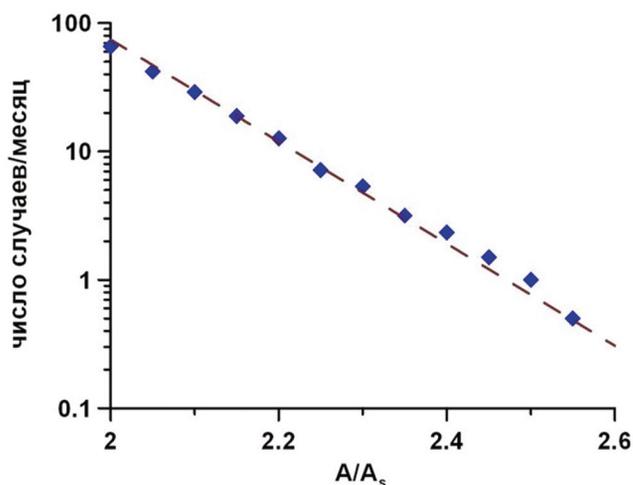
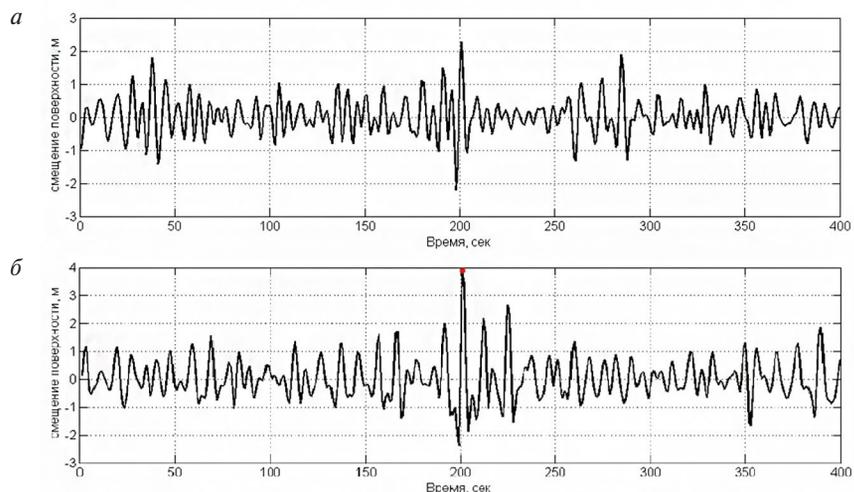


Рис. 8. Частота наблюдения волн-убийц в южной части Охотского моря

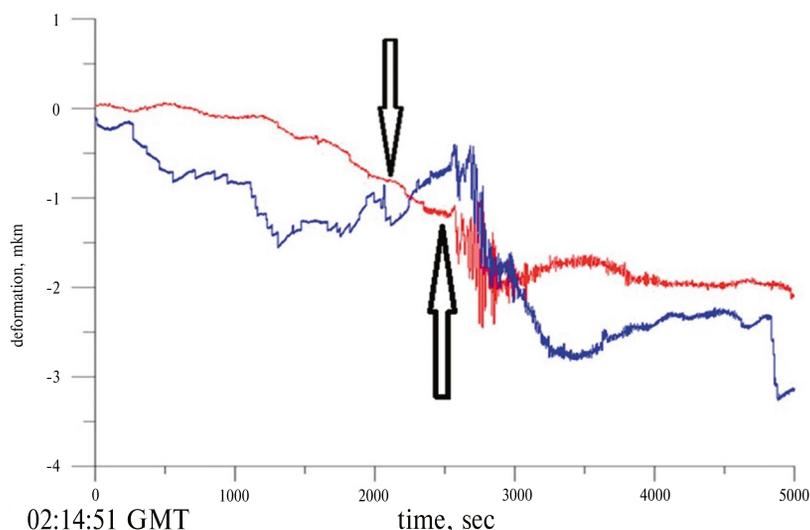


**Рис. 9.** Примеры аномально больших волн (волн-убийц), зарегистрированных у мыса Свободный:  
*а* – 8 декабря 2011 г., высота 4.48 м ( $H/H_s = 2.43$ ); *б* – 24 декабря 2011 г., высота 6.23 м ( $H/H_s = 2.29$ )

ровать цунами. Из-за физического свойства скорости движения волн по упругим поверхностям такой комплекс в основном делает это значительно быстрее, чем традиционная система раннего оповещения о цунами в Тихом океане, работа которой зависит от информации, поступающей с глубоководных станций DART [27].

25 марта 2020 г. сильное землетрясение с магнитудой 7.5 случилось вблизи острова Парамушир (Курильские острова). Оно вызвало слабое цунами на Камчатке и Курильских островах. Данные о регистрации землетрясения и цунами были записаны на трёх буях системы ДАРТ. Те же два события зарегистрировал лазерный деформограф, установленный

на морской экспериментальной базе ТОИ ДВО РАН “Мыс Шульца”, на расстоянии почти 2150 км от эпицентра (Японское море, вблизи г. Владивосток). Запись сигнала представлена на рисунке 10; она получена с помощью двух лазерных деформографов, один из которых ориентирован с запада на восток с длиной измерительного плеча 17.5 м (верхняя линия), а другой ориентирован с севера на юг с длиной 52.5 м (нижняя линия). По опыту регистрации предшествовавших землетрясений и цунами [4] уже через несколько минут после регистрации можно было говорить о возможной опасности цунами. Прибор зарегистрировал аномально быстрые колебания спустя 15 мин. после землетрясения, что прибли-



**Рис. 10.** Запись сигнала лазерных деформографов. Стрелкой вниз показано время землетрясения, стрелкой вверх – регистрация цунами

зительно на 30 мин. раньше, чем по информации от глубоководных станций DART.

Мы проанализировали инструментальные данные по регистрации землетрясения и цунами. В рамках теории мелкой воды, используя авторскую разработку [28], выполнено численное моделирование цунами 25 марта 2020 г. Сравнение с записями цунами на глубоководных станциях ДАРТ показало очень хорошее согласие. В то же время согласие с инструментальной записью события на юго-востоке Камчатки оказалось не очень хорошим, поскольку в это время на море бушевал шторм, и штормовые волны были сопоставимы с волнами цунами. Тем не менее приход первой волны цунами неплохо воспроизводится в численном моделировании.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-17-00121. <https://rscf.ru/project/22-17-00121/>

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Dolgikh G.I. Principles of the designing single-coordinate laser strainmeters // *Technical Physics Letters*. 2011, vol. 37(3), pp. 204–206.
2. Dolgikh G., Budrin S., Dolgikh S., Plotnikov A. Supersensitive Detector of Hydrosphere Pressure Variations // 2020, vol. 20(23), article number 6998. doi:10.3390/s20236998
3. Dolgikh G.I., Chupin V.A., Gusev E.S., Timoshina G.A. Cyclonic process of the “voice of the sea” microseism generation and its remote monitoring // *Remote Sens*. 2021, 13, 3452. <https://doi.org/10.3390/rs13173452>
4. Dolgikh G., Dolgikh S. Deformation Anomalies Accompanying Tsunami Origination // *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, vol. 9(10), article number 1144. <https://doi.org/10.3390/jmse9101144>
5. Dolgikh G., Dolgikh S. Deformation Anomalies Accompanying Tsunami Origins near the Japanese Islands // *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, vol. 11(11), article number 2137. <https://doi.org/10.3390/jmse11112137>
6. Dolgikh G., Dolgikh S., Chupin V. et al. Registration of Nonlinear Hydrophysical Disturbances – Rogue Waves in Full-Scale Conditions // *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, vol. 10(12), article number 1997. <https://doi.org/10.3390/jmse10121997>
7. Кабатченко И.М., Косьян Р.Д., Красицкий В.П. и др. Опыт эксплуатации волнографа-мареографа ВМ-04 // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 1. С. 150–155.  
*Kabatchenko I.M., Kos'yan R.D., Krasitskii V.P. et al.* Operating experience with a ВМ-04 wave-tide gauge // *Oceanology*. 2007, vol. 47, no 1, pp. 135–140.
8. Кузнецов К.И., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Ковалёв П.Д. Особенности характеристик ветрового волнения у юго-восточного побережья о. Сахалин по измерениям придонного давления // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50. № 2. С. 242–250.  
*Kuznetsov K.I., Kovalev P.D., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N.* Features of wind waves at the southeastern coast of Sakhalin according to bottom pressure measurements // *Izvestiya of the RAS. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014, vol. 50, no. 2, pp. 213–220.
9. Лухнов А.О., Чернов А.Г., Куркин А.А., Полухина О.Е. Проблемы создания аппаратно-программного комплекса для исследования гидродинамики шельфовой зоны // *Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова*. 2006. Т. 18. С. 120–123.  
*Lukhnov A.O., Chernov A.G., Kurkin A.A., Polukhina O.E.* Problems of creating a hardware and software complex for studying the hydrodynamics of the shelf zone // *Proceedings of the Academy of Engineering Sciences named after A.M. Prokhorov*. 2006, vol. 18, pp. 120–123.
10. <https://www.aanderaa.com>
11. Зайцев А.И., Ковалёв Д.П., Куркин А.А. и др. Цунами на Сахалине 2 августа 2007 года: мареографные данные и численное моделирование // *Тихоокеанская геология*. 2009. Т. 28. № 5. С. 30–35.  
*Zaitsev A.I., Kurkin A.A., Chernov A.G. et al.* The tsunami on Sakhalin on August 2, 2007: mareograph evidence and numerical simulation // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2009, vol. 3, no. 5, pp. 437–442.
12. Зайцев А.И., Ковалёв Д.П., Куркин А.А. и др. Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование // *Доклады академии наук*. 2008. Т. 421. № 2. С. 249–252.  
*Zaitsev A.I., Kurkin A.A., Chernov A.G. et al.* The Nevelsk tsunamion August 2, 2007: Instrumental data numerical modeling // *Doklady Earth Sciences*. 2008, vol. 421, no. 1, pp. 867–870.
13. Левин Б.В., Чернов А.Г., Шевченко Г.В. и др. Первые результаты регистрации длинных волн в диапазоне периодов цунами в районе Курильской гряды на разнесенной сети станций // *Доклады Академии наук*. 2009. Т. 427. № 2. С. 239–244.  
*Levin B.V., Chernov A.G., Shevchenko G.V. et al.* The first results of long wave registration in the range of tsunami periods in the region of Kuril ridge on a distributed station network // *Doklady Earth Sciences*. 2009, vol. 427, no. 1, pp. 874–879.
14. Куркин А.А., Зезюлин Д.В., Макаров В.С. и др. Исследования прибрежных районов Охотского моря с использованием наземного мобильного робота // *Экологические системы и приборы*. 2016. № 8. С. 11–17.  
*Kurkin A.A., Zezyulin D.V., Makarov V.S. et al.* Studies of coastal areas of the Sea of Okhotsk using

- a land-based mobile robot // Ecological systems and devices. 2016, no. 8, pp. 11–17.
15. Zaytsev A., Zeziulin D., Belyakov V. et al. Coastal monitoring of the Okhotsk sea using an autonomous mobile robot. *Science of Tsunami Hazards*. 2017, vol. 36, no. 1, pp. 1–12.
  16. Аннелъ И.Л. Использование анализа данных наблюдений за дрейфом, ветром и барической обстановкой для определения сезонных изменений сил, действующих на ледяной покров // Проблемы Арктики и Антарктики. 1994. Вып. 67–68. С. 90–107.  
*Appel I.L.* Using the analysis of observational data on drift, wind and atmospheric conditions to determine seasonal changes in forces acting on the ice sheet // *Problems of the Arctic and Antarctic*. 1994, Iss. 67–68, pp. 90–107.
  17. <http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/wind-waves-products/index.html>
  18. Кузнецов К.И., Пелиновский Е.Н., Куркин А.А., Зайцев А.И. Восстановление поверхностных волн по измерениям вариаций давления на морском дне. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2013. № 3. С. 110–117.  
*Kuznetsov K.I., Pelinovsky E.N., Kurkin A.A., Zaitsev A.I.* Restoration of surface waves from measurements of pressure variations on the seabed. // *Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Natural Sciences*. 2013, no. 3, pp. 110–117.
  19. Fessel D., Marko J., Melling H. Wave measurements using upward looking in marginal and polar sea ice regimes // *ASL Environmental sciences*. 2002 <http://www.aslenv.com/reports/ASL%20Intl%20Waves%20Workshop.pdf>
  20. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. Нижний Новгород: НГТУ, 2004.  
*Kurkin A.A., Pelinovsky E.N.* Freak waves: facts, theory and modeling. Nizhny Novgorod: NSTU, 2004.
  21. Kharif C., Pelinovsky E. Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon // *European J Mechanics - B/Fluid*. 2003, vol. 22, no. 6, pp. 603–634.
  22. Kharif Ch., Pelinovsky E., Slunyaev A. *Rogue Waves in the Ocean*. Springer Link, 2009.
  23. Slunyaev A., Didenkulova I., Pelinovsky E. Rogue waters. // *Contemporary Physics*. 2011, vol. 52, no. 6, pp. 571–590.
  24. Зайцев А.И., Малашенко А.Е., Пелиновский Е.Н. Аномально большие волны вблизи южного побережья о. Сахалин. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. № 4. С. 35–42.  
*Zaitsev A.I., Malashenko A.E., Pelinovsky E.N.* Abnormally large waves near the southern coast of O. Sakhalin. // *Fundamental and applied hydrophysics*. 2011, vol. 4, no. 4, pp. 35–42.
  25. Слюняев А.В., Кокорина А.В., Зайцев А.И. и др. Зависимость вероятностных распределения высот волн от физических параметров по результатам измерений у острова Сахалин. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16. № 3. С. 18–29.  
*Slunyaev A.V., Kokorina A.V., Zaitsev A.I. et al.* Dependence of probabilistic distribution of wave heights on physical parameters based on measurement results near Sakhalin Island. // *Fundamental and applied hydrophysics*. 2023, vol. 16, no. 3, pp. 18–29.
  26. <http://sakhmeteo.ru/>
  27. <https://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/>
  28. Zaytsev A., Kurkin A., Pelinovsky E., Yalciner A.C. Numerical tsunami model NAMI-DANCE Science of Tsunami Hazards. 2019. Т. 38. № 4. С. 151–168.

## TECHNICAL, HARDWARE AND SOFTWARE SOLUTIONS FOR MONITORING NATURAL PROCESSES IN THE SOUTHERN PART OF THE SEA OF OKHOTSK

A.I. Zaytsev<sup>a,\*</sup>, G.I. Dolgikh<sup>b,\*\*</sup>, S.G Dolgikh<sup>b,\*\*\*</sup>, E.N. Pelinovsky<sup>c,\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>*Special Research Bureau of Automation of Marine Research FEB RAS,  
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

<sup>b</sup>*Pacific Oceanological Institute n.a. V.I. Ilyichev FEB RAS, Vladivostok, Russia*

<sup>c</sup>*Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhniy Novgorod, Russia*

\*E-mail: aizaytsev@mail.ru

\*\*E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

\*\*\*E-mail: sdolgikh@poi.dvo.ru

\*\*\*\*E-mail: pelinovsky@ipfran.ru

This paper presents measuring systems that are used to monitor natural processes in the southern part of the Sea of Okhotsk. The research is carried out at the scientific hospital "Svobodny Cape". The architecture of the devices is presented, which makes it possible to organize the registration of measurements and the transmission of wave data in real time. The results of recording abnormally large waves are obtained. Also, for the first time in this region, work was carried out to monitor the ice situation using radar. Laser interference devices have been installed at the Svobodny Cape scientific hospital to register variations of vibrations and waves flowing in geospheres. During the processing of full-scale data from laser interference devices, deformation anomalies characteristic of tsunamigenic earthquakes were detected, and patterns of transformation of vibrations and waves of different periods during the transition from one geosphere to another were studied.

*Keywords:* marine surface waves, laser deformograph, freak waves, tsunami Sea of Okhotsk, ice in the sea, radar station.