

## Глава 2

### Составляющие и Эволюция системы DART

## VERSION 1

## PRINT OUT ON NPODECO.RU

При написании главы по составляющим и эволюции системы DART, ее последующих модификаций на основе опубликованных источников, мы использовали материалы PMEL (NOAA, Seattle) и другие ресурсы. Печатные труды авторов, сосредоточенные в PMEL по DART, превосходят по объему и научному качеству материалы других научных групп или промышленных компаний, так или иначе вовлеченных в разработку автономных систем измерений открытого океана по цунами. Как отмечалось ранее, отсчетным временем публикаций по теме создания автономных датчиков уровня открытого моря автором принята середина 1960-ых годов. Для системы DART - 1980 год, когда часть группы Гейлорда Миллера, после его безвременной кончины, а также трагического исчезновения Боба Харви в 1978 г. вместе со всем экипажем и судном *Holahola*, переехала из штата Гавайи в штат Вашингтон, г. Сиэтл и приняла участие в разработке донных станций гидростатического давления (Bottom Pressure Recorders - BPR).

Основой технологии DART является высокоточное измерение гидростатического давления или высоты столба жидкости над датчиком с заданной дискретностью. Здесь мы не заостряем внимание на истории отбора датчика давления для задачи измерений уровня открытого океана, которая приведена в предыдущей главе.

Здесь и далее, под измерениями открытого океана понимаются исследования на глубинах, превышающих 1000 метров (Yilmaz et al., 2004). С начала работ по измерению уровня вод открытого океана и по тематике цунами исследователи последовательно испытывали различные датчики, представляющие собой модификации трубок Бурдона, вибротроны, емкостные датчики, сильфоны или на основе кристаллов кремния.

Основными требованиями к сенсорам для измерений на глубокой воде стали безусловная стабильность их характеристик и необходимость минимального разрешения по давлению до  $2 \times 10^{-7}$  полной шкалы (Bernard, Milburn, 1985), что соответствует способности прибора зафиксировать изменение высоты 6 километрового столба морской воды на величину порядка одного миллиметра.

Среди производителей высокоточных датчиков гидростатического давления для наблюдений длинных волн в открытом океане, включая цунами, отраслевым стандартом стала продукция Paroscientific Inc.\* ([www.paroscientific.com](http://www.paroscientific.com)), модель 410K-101. Вторым, менее известным производителем датчиков для цунами является компания Druck (вошла в состав GE Measurements and Control с 2002 г.), с моделью 8000 Series High Accuracy Resonant Pressure Sensor (<http://www.ge-mcs.com/en/pressure-and-level/transducerstransmitters/rps-dps-8000.html>). Последняя применялась консорциумом германских исследовательских организаций на акваториях Юго-Восточной Азии с 2005 г., но, как отмечалось ранее, результаты консорциума по измерениям уровня открытого моря неизвестны, а сами немецкие исследователи отказались от измерений гидростатического давления открытого океана (<http://www.deutsche-meeresforschung.de/en/gitews>), перейдя на принципиально другой технический сегмент наземного базирования по предупреждению цунами (GPS Shield).

Т.о. донная станция измерения гидростатического давления (BPR) является основой системы DART. BPR DART оснащены размыкателями для всплытия и могут использоваться вновь после техобслуживания, в то время как BPR следующих поколений DART - ETD и G4, рассчитаны на более долгий период эксплуатации (до 4 лет) и являются теряемой компонентой системы.

Следующая составляющая DART – подводная двунаправленная коммуникация сигналами между поверхностным буюм и донной станцией (BPR) обеспечивается гидроакустическим (ГА) низкочастотным модемом. Для этой цели в системе DART применяется Benthos Transducer AT-421 LF (Teledyne Benthos), устанавливаемый на BPR и на поверхностном буюе. Описываемая часть DART становится важнейшим составным звеном для приложений реального времени.

С целью улучшения качества передаваемого сигнала по гидроакустическому каналу связи от донной станции (BPR) до поверхностного буюа, в последних моделях стали применяться гидроакустические модемы диапазона MF, 15-20 кГц вместо применявшегося ранее диапазона LF, 9-14 кГц.

В отличие от высокоточных датчиков давления, выбор которых ограничен практически двумя моделями, среди производителей ГА модемов есть широкий выбор продукции. Например, в результате сравнительных испытаний IFREMER в 2007-2009 гг. (Blandin et al., 2010 personal communication), проверены 13 типов ГА модемов. Так, сравнение на полигоне в Средиземном море для ГА модемов проходило по 3 параметрам: скорости передачи данных, потребляемой энергии, количеству ошибок с учетом внешнего фонового шума на поверхности. В результате проведенных тестов, Benthos Teledyne уступил другим моделям, например – ГА модему S2CR 12/24 компании Evologics ([www.evologics.de](http://www.evologics.de)).

Спутниковый сегмент передачи данных в системе DART – третья составляющая - обеспечивается через телефонный канал спутниковой группировки Iridium на базе приемопередающего устройства Motorola 9522 L-band. До использования Iridium, передача данных с океана на берег обеспечивалась геостационарными спутниками GOES и Inmarsat. Inmarsat применяется для систем цунами других производителей, например Fugro Oceanor (Норвегия) и KDM (German Marine Research Consortium). Последняя группа компаний исключила из своей первоначальной концепции применение автономных измерителей уровня открытого океана вместе со спутниковым сегментом (<http://www.gitews.de/en/concept/>).

Ранее, с конца 80-ых гг., PMEL успешно испытала компоновку поверхностного буя со спутниковой передачей данных на серии буйковых станций (ТАО) в экваториальной части Тихом океане, а также в Чили, где отрабатывались близкие к задаче раннего предупреждения цунами решения по трансляции информации о цунамигенных землетрясениях через спутниковые каналы с океана в квазиреальном времени (Bernard et al., 1988; Bernard et al., 1991). Поверхностные буи с мачтой, использованные в работах по проекту ТАО, стали основой первых DART в виде буюв тороидальной формы. Затем они изменялись по своей форме на стандартные водоизмещающие буи с иономерным наполнителем (STB буи) с захватом для спуско-подъемных операций из воды «чайное ушко». Несколько позже форма буюв снова модифицирована, но, теперь уже для менее габаритных поверхностных моделей - ETD (DART-III) и G4 (DART-IV), имеющих пирамидальную форму и малоприметных на воде.

Т.о., четвертая составляющая DART представляет собой собственно буйковую систему: якорь, многокомпонентный составной трос и поверхностный буй с аппаратурой связи - ГА, спутниковой, GPS и процессором, вспомогательными метеодатчиками (как опции) и иной полезной нагрузкой .

Многокомпонентные троса DART-II и последующих модификаций системы - ETD, G4 отличаются. Первые относятся к пружинящим (taut line), вторые – к

линиям постоянной длины (slack line), не меняющие свою длину от нагрузки.

Касательно спутникового канала передачи данных с океана следует отметить, что Россия, в случае принятия решения о развитии и развертывании своей океанской группировки автономных платформ для различного рода геофизических и прикладных задач, с учетом широты морей, омывающих страну и задач открытого океана, будет ограничена использованием спутниковой группировки Иридиум и Инмарсатом (для задач реального времени) или Аргос-3, 4 (квазиреальное время). Поэтому, развитие отечественных автономных платформ в океанах и морях, настоятельно потребует создания собственной российской группировки спутников для передачи данных в реальном времени.

Такому направлению постепенного развития собственной основы мониторинга параметров окружающей среды в виде спутниковой группировки для передачи сигналов и данных в реальном времени Правительству РФ необходимо уделить особое внимание в самое ближайшее время.

Пятой компонентой системы DART является ее программное обеспечение (ПО). В предлагаемой книге мы его не приводим, т. к. тема требует отдельного специального ознакомления и анализа. Здесь же отметим, что ПО BPR обладает две важнейшими особенностями - программным алгоритмом выделения сигнала цунами из рутинных наблюдений давления ([http://nctr.pmel.noaa.gov/tda\\_documentation.html](http://nctr.pmel.noaa.gov/tda_documentation.html), contact: Н.О. Mofjeld [harold.mofjeld@noaa.gov](mailto:harold.mofjeld@noaa.gov)), а также возможностью дистанционного изменения параметров измерений BPR и всей системы DART с берега в период постановки и последующего мониторинга цунами. Новизна программных разработок ранней диагностики сигнала цунами настоящего времени сводится к отделению сейсмических волн от волн цунами в поколениях BPR в модели DART-IV (G4), что дает возможность точного и своевременного определения параметров очага цунами (по нескольким станциям) DART и в ближней зоне и открывает широкие перспективы применения систем DART или аналогичных для непрерывного мониторинга цунами.

\* Компания Paroscientific Inc. создана в 1972 г. Джеромом М. Паросом после десятилетнего периода его собственных разработок цифровых датчиков деформации. Основу технологии Paroscientific представляет кварцевый кристаллический резонатор, изменяющий частоту от приложенного воздействия. Учет температуры кварцевого резонатора обеспечивает компенсацию расчетного давления, чем и достигается высокая точность в широких диапазонах. Доступны более 30 полномасштабных шкал измерений - от долей атмосферы до нескольких тысяч атмосфер (3 psia - 40000 psia).

Абсолютные измерители, манометры, дифференциальные датчики представлены разными моделями, включая интеллектуальные датчики, датчики глубины, портативные стандарты, системы уровня воды и метеорологические измерительные системы. Снабжаемая к датчикам Paroscientific электроника имеет двусторонние цифровые интерфейсы, которые позволяют настроить частоту дискретизации, разрешение технических единиц и другие эксплуатационные параметры. Продукция Paroscientific под брендом Digiquartz® успешно используется в таких различных областях, как гидрология, аэрокосмическая отрасль, метеорология, океанография, управление технологическими процессами, добыча энергоносителей и лабораторное оборудование (подробности см. [www.paroscientific.com](http://www.paroscientific.com)).

Эволюция системы DART и связанные с ней события сведены в табличную форму (Табл.1). Далее следуют библиографические источники в тезисном виде, которые затрагивают обсуждаемое в Главе 2.

Таблица 1  
Эволюция DART и связанные события 1965-2014 гг.

| № п/п | Период                 | Описание   | Район исследований   | Источник  |
|-------|------------------------|--|--|---|
| 1.    | 1965 – начало 1980 гг. | Автономные регистраторы уровня моря различных модификаций как прототипы. Переход от аналоговой схемотехники к цифровой. Постепенное совершенствование глубоководных датчиков давления (модели Borg-Warner, Hewlett-Packard, Paroscientific и др.) , а также систем всплытия. | Западное побережье США, Экваториальная Пацифика, залив Аляска, Атлантика, Антарктика | Eyries (1965), Snodgrass(1968), Filloux(1969), Vitoucek, Miller (1970) Cartwright (1972), Harvey et al. (1976) Curtis, G.D., H.G. Loomis (1980) |
| 1.A   | 1972 - 1979            | Подготовка и проведение двух экспедиций СССР-США по цунами (1975 и 1978 гг.). Глубоководные автономные регистраторы с вибрационно-частотным сенсором гидростатического давления модели 8150 Borg-Warner Corp.  | Западная часть Тихого океана   | Лаппо, Соловьев (1976), Харви, Витусек, Шинмото (1977), Куликов и др. (1979)  |
| 1.B   | 1979                   | Первая регистрация цунами автономным прибором в открытом океане.   | Восточная часть Тихого океана  | Filloux (1982)  |

|    |                    |  |   |   |
|----|--------------------|--|---|---|
| 2. | 1980 -<br>1987 гг. | Прототипы<br>глубоководного BPR и<br>системы<br>предупреждения<br>цунами через<br>спутниковый канал.<br>Три требования по<br>глубоководному<br>измерению цунами: 1)<br>программа наблюдений<br>цунами, 2)<br>моделирование и<br>приложения, связанные<br>с краевыми эффектами,<br>3) цунамигенная<br>идентификация<br>землетрясений.<br>Разработка прототипов<br>мелководного BPR.<br>Тороидальные буи ТАО<br>со спутниковой<br>передачей данных | Северо-<br>Восточная<br>Пацифика<br>Морское<br>побережье<br>США<br>Гавайи,<br>западное<br>побережье<br>США,<br>экваториальная<br>область Тихого<br>океана | Bernard, E.N.<br>(1983)<br>Bernard et al.<br>(1984) |
| 3. | 1985 -<br>1988 гг. | Проект THRUST,<br>первый сегмент<br>космической связи в<br>реальном времени,<br>численное<br>моделирование цунами  | Чили,<br>Вальпараисо  | Bernard, Behn,<br>and Milburn<br>1988               |
| 4. | 1986 -<br>1991 гг. | Прототипы BPR-A,<br>BPR-B, BPR-C, BPR-D  | Северо-<br>Восточная<br>Пацифика  | Eble, Gonzalez<br>1991<br>Rabinovich,<br>Eble, 2016 |
| 5. | 1995               | DART первый<br>прототип  | Свал глубин<br>Вашингтон-<br>Орегон,<br>Тихий океан   | Meinig et al.,<br>2005                              |
| 6. | 1998               | DART-I (автономная<br>система реального<br>времени с системой<br>передачи данных океан<br>– берег)   | Тихий океан,<br>залив Аляска  | González et al.,<br>1998                            |
| 7. | 2009               | DART-II (автономная<br>система реального<br>времени с системой   | Тихий,<br>Атлантический,<br>Индийский   | Spillane et al.,<br>2009                            |

|    |                           |  |  |   |
|----|---------------------------|--|--|---|
|    |                           | передачи данных океан – берег – океан)   | океаны                                 |   |
| 8. | 2011 - по настоящее время | DART – III (ETD), DART – IV (G4), передача лицензии на производство от PMEL в SAIC | Тихий, Индийский, Атлантический океаны | Lawson et al., 2011, Paros et al., 2011 |

Кроме сводки табличных данных, автор выделил несколько литературных источников, резюме которых по времени дает некоторое представление об эволюции DART и размещается здесь в хронологическом порядке.

## Тезисы важнейших библиографических источников к Главе 2

**1980 год.** Малогабаритный, автономный регистратор уровня воды для цунами. Curtis, G.D., and H.G. Loomis (1980)

Относительно недорогое устройство, которое будет записывать ход по времени уровня воды в прибрежной месте во время события цунами находится в стадии разработки. Прибор представляет собой трубку примерно 2 см на 20 см, прикрепленной на заранее выбранном месте в мелкой воде при прохождении цунами. Система записи включает в себя полупроводниковый датчик давления, аналого-цифровой преобразователь, часы, полупроводниковая память для хранения данных и батареи. В приборе нет никаких движущихся частей. Предварительные технические характеристики: 1 и 10 метровые диапазоны; разрешение 0,5% (от полного диапазона); 30 секундная выборка данных; емкость памяти 10 часов записи данных. При извлечении после события, прибор открывается в лаборатории и сохраненные данные считываются на карточный самописец, чтобы получить обычную запись мареографа, или используется непосредственно для анализа компьютером. Обсуждены недостатки конструктивных параметров, стоимость, электронных и физических характеристик и факторы установки.

**1983 год.** План по исследованию цунами для Соединенных Штатов. Bernard, E.N. (1983)

Как ответ на определение узких мест в научных исследований в области цунами, группа ученых и представителей государственных органов разработали внятный план исследований для решения этих проблем. План разработан, чтобы способствовать такому курсу действий, который будет концентрировать научные исследования по прогнозированию цунами и оценке прибрежных опасностей. Представлен краткий обзор состояния исследований цунами и определены потребности в приоритетных исследованиях. Три области наивысшей необходимости: 1) программа наблюдений цунами, 2) моделирование и разработки, связанные с краевыми

Г.А.Кантаков 2017 (с) Эволюция и опыт измерений цунами в северо-западной части Тихого океана 37  
Глава 2 Составляющие и Эволюция системы DART



эффектами и 3) цунамигенная идентификация землетрясений. Менее приоритетные области включают в себя создание базы данных по цунами и разработку программ подготовки к чрезвычайным ситуациям.

**1984 год.** Региональные оповещения о цунами с помощью спутников.

Bernard, E.N., G.T. Nebenstreit, J.F. Lander, and P.F. Krumpe (1984)

Это исследование показывает, что спутниковая технология имеет потенциальные приложения к проблеме обеспечения ранней информации для предупреждения о цунами в развивающихся странах Тихого океана, не имеющих свои собственные региональные сети предупреждения. Разработана простая концептуальная модель, которая показывает, как эти технологии могут быть интегрированы в «систему» раннего обнаружения. Основные элементами являются существующие приборы, подключенные к устройствам спутниковой связи для быстрого сбора и анализа данных и быстрого распространения информации.

**1986 год.** Региональная Система Предупреждения Цунами (THRUST).

Bernard, E.N., and R.R. Behn (1985)

Национальное Океаническое и Атмосферное Управление (NOAA) приступило к 3-летнему проекту цунами «Снижение Опасности Цунами с Использованием Системной Технологии» (THRUST), создание региональной системы предупреждения о цунами как пилотный проект. THRUST, который финансируется Агентством по международному развитию (AID) и разработан PMEL для государства Чили с использованием существующих приборной базы, подключенной к спутниковой связи для создания системы раннего предупреждения. Все подготовительные работы завершены, в том числе карта опасности, численное моделирование и создание оперативного аварийного плана. Инструментальная разработка завершена, стендовые испытания планируются начать летом 1985 года.

**1987 год.** Программа сбора глубоководных измерений цунами в Северной Пацифике. González, F.I., E.N. Bernard, and H.V. Milburn (1987)

Измерения цунами глубокого океана необходимы для обеспечения граничных условий открытого моря для тестирования численных моделей в ретроспективных исследованиях, а также для улучшения нашего понимания генерации и распространения волн цунами. Jacob (1984) выявил часть Алеутской впадины, которая включает группу островов Шумагина в качестве «сейсмической калитки» (Shumagin Gap); он рассчитал оценки, которые показывают, что большая вероятность возникновения землетрясений ( $M > 7,8$ )

значительно выше в этом регионе, чем в любом другом по США. Поскольку цунамигенные землетрясения вдоль большей части сейсмически активной Алеутской впадины ставят под угрозу Гавайи и западное побережье США, и из-за возможности большого землетрясения в районе Shumagin Gap и ожиданий сильного цунами, этот регион стал центром программы для долгосрочного мониторинга в Тихом океане, выполняемый PMEL NOAA.

**1988 год.** Обзор системы предупреждения цунами. Bernard, E.N., R.R. Behn, and H.V. Milburn (1988)

Разработана пилотная (100 км) система предупреждения о цунами, доставляющая предупреждения о цунами информацию в течение 2 минут после начала землетрясения. Система THRUST установлена в Вальпараисо, Чили, с целью оценки ее значимости для смягчения рисков цунами в странах, не имеющих собственных систем предупреждения цунами. Система со спутниковой связью состоит из программы готовности к признакам цунами, сбора данных в режиме реального времени и средств распространения информации. Для разработки программы готовности, выполнена экспертиза последних высот волн цунами, дополненная результатами численного моделирования потенциальных цунами, что стало основой для плана эвакуации в чрезвычайных ситуациях частей Вальпараисо. Инструменты, используемые для сбора геофизических данных включают в себя акселерометр для измерения интенсивности землетрясения и гидростатический измеритель давления воды для измерения активности цунами. Как только порог ускорения превышает, передается сигнал спутнику GOES для автоматической трансляции предупреждающего сообщения. Приемники в Вальпараисо и в других местах приема в зоне прямой видимости GOES (Гонолулу, Гавайи, Сиэтл, Вашингтон, и Боулдер, штат Колорадо) постоянно следят за спутником для получения предупреждающего сообщения и действуют по предписанию при приеме такого сообщения. Стоимость оборудования для основных направлений THRUST составляет около 15 000 US\$, за исключением развертывания. Оценка по испытанию в течение 1 года реального времени прохождения сигнала оборудования показала среднее время связи 1,6 минуты от срабатывания акселерометра до печатного сообщения в месте приема и коэффициента надежности оборудования, превышающего 90%. THRUST является примером системного подхода по управлению смягчением последствий в результате опасных природных явлений, который сочетает новые технологии с существующими операциями в интересах затрагиваемого населения.

**1990 год.** О частотной модуляции двух цунами по глубоководным записям PacTOP. González and Kulikov (1990)

Глубоководные формы сигналов цунами, измеренные донными регистраторами давления РасТОР 30 ноября 1987 года и 6 марта 1988 показывают амплитуду и частотную модуляцию. Анализ временной эволюции спектральной энергии позволяет предположить, что частотная дисперсия, как и предсказано классической линейной теорией волн является важным процессом, определяющим эволюцию таких сигналов.

**1991 год.** Глубоководные наблюдения давления у дна в северо-восточной Пацифике. Eble, M.C., and F.I. González (1991)

Применены высокоточные датчики Paroscientific модели 410K-017 для измерения донного давления в северо-восточной Пацифике как части долговременной программы. В общем, чувствительность прибора составляет менее 1 мм для осцилляций уровня моря порядка нескольких минут; на практике, однако, чувствительность датчика лимитируется долговременным дрейфом и фоновым шумом. Данные записывались в цифровом виде при частоте 64 значения за час, но выбранные интервалы записей можно варьировать от 4 до 128 значений в час. Программа исследований сосредоточена на сборе данных по 5 станциям в северо-восточной Пацифике, начиная с 1986 г. С начала наблюдений зарегистрированы разные явления в широком диапазоне временной шкалы, включая приливы и поверхностные сейсмические волны и цунами, сгенерированные тремя землетрясениями в заливе Аляска.

**1991 год.** Улучшенная спутниковая система предупреждения. Bernard, E.N., and H.V. Milburn (1991)

Быстропротекающие стихийные бедствия унесли более 2,8 млн жизней во всем мире за последние 20 лет. Эта категория включает в себя такие события, как землетрясения, оползни, ураганы, торнадо, наводнения, извержения вулканов, лесные пожары и цунами. Эффективное смягчение последствий стихийных бедствий особенно трудно в таких случаях, так как время, отведенное для выдачи предупреждений может быть очень коротким или даже отсутствует. Общий подход к смягчению последствий этих стихийных бедствий была продемонстрирована в 1988 году, который включал предсобытийное экстренное планирование, оценку опасности в реальном времени и быстрое предупреждение через спутниковым линиям связи. В этой статье мы сообщаем о улучшении этой спутниковой системой связи аварийного оповещения, которое позволяет снизить время отклика с 87 до 17 с и расширяет охват вещанием от 40% до 62% площади своего покрытия.

**1993 год.** Наблюденная дисперсия цунами в глубоком океане. González, F.I., and Ye.A. Kulikov (1993)

Амплитудная и частотная модуляции цунами, наблюдаемые по записям датчика давления 6 марта 1988 год в заливе Аляска, показаны как возникшие в результате дисперсии и предсказанные линейной теорией волн. Простая модель волны созданная для сравнения с данными совпадает с важной количественной характеристикой подвижки участка дна, предсказанной сейсмической моделью деформации на плоскости разлома, т.е. существованием диполя западного прогиба и восточного поднятия.

**1994 год.** Способности США по измерению цунами. González, F.I., T. Mero, and D. Castel (1994)

Достижения в области теории и численного моделирования цунами намного превысили наши наблюдательные возможности и нехватка высококачественных полевых наблюдений стала серьезным препятствием для дальнейшего улучшения нашего понимания возникновения, распространения и заплесков цунами. В настоящее время существует три дополнительные меры по оценке США цунами в Тихоокеанском бассейне: (1) NOAA / ПМЕЛ проект по донным станциям в глубоком океане, (2) информационная программа сети Прибрежных Данных данных мелководных уровнемеров и (3) NOAA / NOS Next Generation система измерения уровня воды мареографами в портах и бухтах.

**1996 год.** Передача данных о цунами в глубоком океане в реальном времени. Milburn, H.B., A.I. Nakamura, and F.I. González (1996)

Архивная база данных за 100 лет показывает, что в среднем в год происходят в Тихом океане пять цунами и что в течение этого периода цунами погибло более 50 000 человек. В настоящее время в США прибрежные сообщества получают предупреждения, основанные на береговых сейсмических данных и информации от прибрежных станций наблюдения за уровнем моря. Преобладает уровень 75% ложных тревог и он является неприемлемым. Прямое измерение цунами в открытом океане с последующей передачей данных в центр в реальном времени может улучшить оценку опасности цунами. Цунами были отмечены в глубоком океане в рамках исследовательской программы; кроме того, недавно состоялась и успешно завершена демонстрация системы в режиме, близком к реальному времени. Поверхностная станция выставлена в океане с акустическим модемом и донным регистратором давления на глубине 2600 м. Данные по давлению собраны с морского дна с помощью акустического модема и переданы по телеметрии на берег через спутник. Постановка цепи аналогичных станций в Тихом океане находится в стадии рассмотрения.

**1998 год.** Глубоководная оценка и сообщение о цунами (DART): Краткое описание и доклад о состоянии. González, F.I., H.M. Milburn, E.N. Bernard, and J. Newman (1998)

Как часть Национальной Программы по Смягчению Опасности от Цунами США, Тихоокеанской Лабораторией Морской Окружающей Среды Национальной Океанической и Атмосферной Администрации (PMEL NOAA) выполняется проект DART для развития способности в реальном времени выявлять цунами в глубоком океане. Системы используют показания давления донных регистраторов (BPR), способных измерить и выявить цунами с амплитудой, по минимальной оценке - 1 см на 6000 м глубины воды. Данные передаются через акустический модем на поверхностный буй, который транслирует информацию через спутниковые каналы на земную станцию. Концепция апробирована в нескольких постановках прототипов системы и обеспечила длительные периоды передачи данных. Конструктивные усовершенствования в следующем поколении систем позволят снизить высокие потери данных по другим периодам испытаний. Планируется сеть из шести буев в северной части Тихого океана и экваториальной области, предназначенной на предупреждении опасности для прибрежного населения США. По мере зрелости предложенной технологии следует рассмотреть координацию международных усилий по созданию дополнительных станций, для непосредственной пользы другим странам Азиатско-Тихоокеанского региона.

**1998 год.** Численное моделирование набегания приливной волны на берег. Titov, V.V., and C.E. Synolakis (1998)

Представлено численное решение нелинейных волновых уравнений для мелкой воды в качестве  $2 + 1$  (на берег и вдольберегового направлений распространения, а также времени), без факторов трения или искусственной вязкости. В моделях используется метод расщепления для создания двух задач  $1 + 1$  распространения волны - одна на берег, вторая вдоль берега. Обе решаются в характерной форме с использованием метода частных производных. Алгоритм для береговой линии реализуется на основе обобщения предшествующего  $1 + 1$  алгоритма, с использованием кода VTCS-2. Модель проверена с помощью крупномасштабных лабораторных данных по одиночной волне, набегающей на остров конической формы. Метод применялся для моделирования ряда цунами - 1993 Окусири, Япония, 1994 Курильские острова, Россия, и в 1996 году Чимботе, Перу. Установлено, что модель может корректно воспроизводить поток на сушу и даже экстремальные события, такие как 30-м высота набегания и скорости затопления в 20 м / с, полученные во время полевых исследований. Полученные результаты свидетельствуют о том, что необходимо

батиметрическое и топографическое разрешения не менее 150 м для адекватных прогнозов, в то время как пространственное разрешение, по крайней мере, 50 м необходимо для моделирования экстремальных событий, вопреки интуитивным ожиданиям того, что длинные волны не будут взаимодействовать с морфологическими особенностями на таких малых масштабах.

**2001 год.** Развитие и эффективность системы Глубоководной оценки и сообщения о цунами (DART) с 1997 по 2001. Meinig, C., M.C. Eble, and S.E. Stalin (2001)

В рамках мер по снижению воздействия о цунами национальной программы США, продолжается выполняться проект DART постоянными усилиями ПМЕЛ с целью разработки и внедрения возможности раннего обнаружения цунами в открытом океане и сообщения о нем в близком к реальному времени. Система DART состоит из донной установки, способной обнаруживать цунами в виде небольших, как 1 ~ см, и поверхностного буя для коммуникаций в реальном времени. Для передачи данных с морского дна к поверхностному бую используется акустический модем. Затем данные передаются через геостационарный эксплуатационный экологический спутник NOAA (GOES) по спутниковой связи на наземные станции, которые демодулируют сигналы для немедленного распространения информации в центры предупреждения цунами и ПМЕЛ. Страница контроля качества DART доступна для публики в режиме реального времени через World Wide Web ([http://tsunami.pmel.noaa.gov/dartqc/WaveWatcher\\*](http://tsunami.pmel.noaa.gov/dartqc/WaveWatcher*)). Общий дизайн системы остался таким же, как и в 1996 году, но многие технические проблемы в процессе развития пришлось преодолевать. Поверхностные буи содержат резервные наборы электроники для повышения надежности и передачи данных, донная станция позволяет работать до 2 лет после ее установки, для уменьшения затрат и эксплуатационных усилий по поддержанию океанической сети. Концепция системы DART от начала и до конца была доказана многочисленными постановками, начиная с июля 1997 года и продолжается до настоящего момента работой пятью станциями DART. Будут обсуждены показатели эффективности работы – такие как общее количество принятых данных, тестовые передачи по расписанию, трансляция переключений на цунами, пропуски данных и отказы систем. Собранные материалы продемонстрировали, что в течение последних 5 лет, в результате проекта DART успешно разработан и испытан прототип системы, которая приведет непосредственно к оперативной части DART-сети по всему Тихому океану.

\*устаревш., см. <http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml> - прим. автора

**2003 год.** Переход сети Глубоководной оценки и сообщения о цунами (DART) – технологический трансфер от исследований НОАА к операциям НОАА. Taft, B., C. Meinig, L. Bernard, C. Teng, S. Stalin, K. O'Neil, M. Eble, and C. Demers (2003)

Сеть сбора данных с помощью глубоководной оценки и сообщения о цунами (DART) создана для поддержки Национальной Программы Смягчения Опасности Цунами (NTHMP). Каждая станция DART представляет заякоренный поверхностный буй и донную станцию (BPR), которая отслеживает и передает высоту столба воды. Передача измерений высот на поверхностный буй происходит через акустический модем, который, в свою очередь, передает данные на наземные приемники через геостационарной эксплуатационный экологический спутник (GOES) NOAA. Затем данные распространяются в NDBC для обработки, контроля качества и отображения данных, а также PMEL для диагностики и научных приложений, а также национальным метеорологическим службам (NWS) - двум центрам предупреждения о цунами на Аляске и Гавайских островах для обеспечения предупреждения руководства для прибрежного населения. Данные отображаются и доступны для загрузки из URL веб-сайта NDBC: [www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml](http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml). Ответственность за операции с системами DART передается из исследовательской лаборатории (ПМЕЛ) к соответствующим операционному центру (NDBC). Эта статья дает краткий обзор системы DART с последующими деталями процесса перехода.

**2005 год.** Измерения цунами глубокого океана, мониторинг и отчетность: Описание и раскрытие информации о NOAA DART II. Meinig, C., S.E. Stalin, A.I. Nakamura, H.B. Milburn (2005)

Быстрые, точные прогнозы о цунами являются важным компонентом эффективной системы предупреждения о цунами. Центры о предупреждении цунами, принимающие решения, должны оценить опасность для прибрежного населения посредством моментального сбора и интерпретации данных о землетрясении и уровне моря. Ставки высоки: пропущенный сигнал может опустошить целые регионы, а ошибочная эвакуация стоит дорого, опасна и подрывает доверие о системе предупреждения. Технология прогнозирования цунами разрабатываемая в NOAA / ПМЕЛ основана на апробированном подходе, который используется во многих других прогностических системах, то есть, интеграция измерений (DART) и моделирование в режиме реального времени (MOST). Мониторинг в режиме реального времени и измерение уровня моря глубокого океана в настоящее время производится на семи станциях сети DART (глубоководная оценка и сообщения о цунами). DART II является системой нового поколения, которая будет иметь дополнительные функции и возможности для помощи прогнозированию центрам предупреждения о цунами. Она обладает, кроме автоматического алгоритма распознавания цунами, двунаправленной

Г.А.Кантаков 2017 (с) Эволюция и опыт измерений цунами в северо-западной части Тихого океана 44  
Глава 2 Составляющие и Эволюция системы DART

системой коммуникаций через спутниковую группировку Иридиум, позволяющей менять параметры измерений непосредственно в точке постановки станции. В результате разрушающего воздействия цунами 26 декабря 2004 г. на Суматре и значения сети DART, ряд станций будет увеличен до 39 к середине 2007 года.

**2006 год.** Цунами: научные рубежи, смягчение, прогноз и последствия политики. Bernard, E.N., H.O. Mofjeld, V.V. Titov, C.E. Synolakis, and F.I. González (2006)

Цунами постоянно присутствует как угроза жизни и имуществу на побережьях большинства океанов мира. Цунами 26 декабря 2004 года на Суматре напомнило миру, что мы должны быть более активными в разработке способов уменьшить их воздействие на наше глобальное общество. Эта статья представляет собой обзор состояния знаний о цунами, рассказывает о некоторых трудностях, с которыми сталкиваются достижения в этой области и определяет некоторые перспективные границы, ведущие к глобальной системе предупреждения. Предлагаемый обзор используется для разработки руководящих принципов и правил для развития науки прогнозирования, программ смягчения последствий бедствий и разработке государственной политики для реализации глобальной системы. Большая часть информации по смягчению и прогнозирования опирается на разработки и достижения совместного регионального/федерального партнерства США, которые сформировались для уменьшения опасности цунами вдоль американских береговых линий - Национальной программы по смягчению опасности цунами. Благодаря интеграции оценки опасности, руководствам по предупреждению и смягчению их последствий, программа создает дорожную карту с набором инструментов, чтобы сделать сообщества более устойчивыми к воздействию локальных и удаленных цунами. Среди инструментов находятся средства прогнозирования, образовательные программы, системы раннего предупреждения и разработка руководства для цунами-устойчивых общин. Информация о международном сотрудничестве взята из Глобальной системы систем наблюдения Земли (ГЕОСС). ГЕОСС обеспечивает международную основу для гарантирования международной сопоставимости и совместимости быстрого обмена данными и информацией.

**2007 год.** MTSU: Извлечение сейсмических моментов из записей цунаметров.

Мы описываем новую шкалу магнитуды, MTSU, что позволит количественно оценить сейсмический момент  $M_0$  землетрясения на основе записей его цунами на удалении, датчиками давления на океанском дне («цунаметры»), установленными в бассейнах океанов, вдали от континентальных или островных берегов, которые, как известно, имеют существенное искажающее влияние на нелинейность амплитуды волны цунами. Предлагаемая формула для MTSU имеет следующие вид:



$MTSU = \log_{10} M_0 - 20 = \log_{10} X(\omega) + CDTSU + CSTSU + C_0$ ,  
 где  $X(\omega)$  - спектральная амплитуда цунами, CDTSU коррекция расстояния, CSTSU коррекция источника, непосредственно адаптированная из величины магнитуды мантии  $M_m$ , для сейсмических поверхностных волн, определенных Okal и Talandier. Как и  $M_m$ , поправки полностью теоретически и основаны на представлении о волне цунами в составляющих по нормальям относительно Земли. Даже аддитивная составляющая  $C_0$  дается теоретически, может зависеть от характера записи (амплитуда цунами на поверхности или избыточное давление у дна океана) и ее размерности. MTSU сочетает в себе мощь теоретически разработанного алгоритма, с надежностью измерения величины магнитуды, которая не принимает во внимание такие параметры, как фокальная геометрия и точная глубина, которые могут быть не доступны при оперативной работе в рамках предупреждения о цунами. Мы проверяем эффективность концепции на моделировании Великого Алеутского цунами 1946 года по двум виртуальным датчикам, а затем пробуем алгоритм по 24 записям 7 цунами на измерениях цунаметров DART с 1994 по 2003 гг. Мы обнаруживаем, что MTSU, как правило, воспроизводит сейсмический момент  $M_0$  в пределах 0,2 логарифмических единиц, даже при неблагоприятных условиях, таких как чрезмерное глубина очага и отражения волны цунами вокруг континентальных плит. Наконец, мы применяем алгоритм к спутниковым данным JASON, полученным в Бенгальском заливе по цунами на Суматре в 2004 г., после преобразования траектории во временную серию с помощью простой предназначенной процедуры. Результаты на удивление хороши, и большинство оценок момента находится над уровнем  $10^{29}$  дин-см, таким образом, определяя источник как исключительно сильное землетрясение.

**2008 год.** Разработка сети цунаметров США для массивов DART в Тихом и Атлантическом океанах. Spillane, M.C., E. Gica, V.V. Titov, and H.O. Mofjeld (2008)

В марте 2008 года важной вехой в стремлении обеспечить адекватное предупреждение о распространения волн цунами в Тихом и Атлантическом океанах для США стало завершение развертывания 39 цунаметров ([www.noaa.gov/stories/2008/20080310\\_buoy.html](http://www.noaa.gov/stories/2008/20080310_buoy.html)). В сочетании с пятью дополнительными измерителями, развернутыми в сотрудничестве с другими странами (включая два в Индийском океане), эта сеть находится в постоянной работе двух центров по предупреждению цунами США на Гавайях и Аляске и поток данных бесплатно предоставляется международному сообществу в реальном времени. В то время, как появление значительного подводного землетрясения может быть обнаружено быстро, чтобы обеспечить основу для раннего предупреждения, не все такие события генерируют значительные волны. Однозначное количественное наблюдение прохождения волн цунами в глубоком океане помогает провести раннюю отмену предупреждения или, в соответствии с численными моделями,

Г.А.Кантаков 2017 (с) Эволюция и опыт измерений цунами в северо-западной части Тихого океана 46  
 Глава 2 Составляющие и Эволюция системы DART

прогноз многочасовых шлейфов потенциально разрушительных волн на угрожаемых участках. Собранные документы содержат соображения и методологию, используемые при выборе таких мест.

**2011 год.** Прорыв в подводной технологии для улучшения предупреждения о локальных цунами. Paros, J., E. Bernard, J. Delaney, C. Meinig, M. Spillane, P. Migliacio, L. Tang, W. Chadwick, T. Schaad, and S. Stalin (2011)

Последние достижения в области океанической измерительной техники по цунами в сочетании с прогнозом цунами моделей показали, что воздействие цунами могут быть предсказаны до достижения цунами берегов. Начиная с 2004 года, цунами последствия были предсказаны для 33 цунами, обнаруженных в глубоком океане примерно с 80% точностью, при сравнении с наблюдениями береговых мареографов и прогнозных оценок. В большинстве из этих цунами, прогноз основывался на наблюдениях, как правило, от 1000 км и более от эпицентра землетрясения. Нерешенной проблемой является прогноз цунами в ближней зоне, где сигнал цунами может быть зашумлен колебаниями землетрясения. Новое поколение датчиков давления, названное датчиками давления с нано-разрешением, помогут обеспечить высокое временное разрешение сигналов землетрясения и цунами без потери точности. Нано датчик давления обладает научно обоснованной способностью для раздела отдельных колебаний землетрясения и другого океанического шума от волн цунами, обеспечивая точные и ранние предупреждения о локальных цунами. Это исследование описывает эксперимент, начатый 30 июня 2010 года на кабельной обсерватории MARC в Монтерей, штат Калифорния, где сравнивались обычные датчики давления с датчиком нано-разрешения на глубине примерно 900 метров. Исследование включает примеры землетрясений, как местных, так и удаленных, обнаруженные с помощью датчика давления с нано-разрешением с момента его установки. Вейвлет-анализ использован для определения двух удаленных микро-цунами в конце 2010 года от событий 21 декабря, М 7.4 на острове Бонин и 25 декабря, М 7.3 рядом с Вануату, вызвавшие сигналы цунами 1-2 мм по амплитуде в Монтерей-Бей с периодами около 14 минут.

**2011 год.** От исследований к коммерческим операциям: следующее поколение легкого в постановке буя для оценки цунами (ETD). Lawson, R.A., D. Graham, S. Stalin, C. Meinig, D. Tagawa, N. Lawrence-Slavas, R. Hibbins, and B. Ingham (2011)

В настоящем документе рассматривается переход от научных исследований к коммерческой эксплуатации системы оценки цунами следующего поколения. За последние пять лет, Pacific Marine Environmental Laboratory НОАА (ПМЕЛ) разработала следующее поколение простого в установке буя цунами

- ETD стандарта DART®. Посредством передачи технологии и лицензионного соглашения, Science Applications International Corporation (SAIC) выпустил первую коммерческую систему ETD DART® на основе дизайна ПМЕЛ. SAIC ETD DART® был установлен к северо-востоку от Австралии в Коралловом море 27 августа 2010 года и сообщил о нескольких событиях небольшое цунами и цунами Хонсю с того времени. В соответствии с проектом, ETD DART® предлагает значительные преимущества по стоимости по сравнению со стандартными системами оценки цунами. Современные системы цунами буев требуют большого, специализированного корабля и несколько обученных техников для установки. ETD DART® предназначен для развертывания на малых и быстрых судах реагирования, или таких, как рыболовные, требуя меньше обученного персонала и только несколько минут времени для постановки. ETD состоит из модульной самораспаковывающегося буя, донной станции (BPR), и система троса / крепления. SAIC ETD DART был объявлен в операционное состояние и, в настоящее время важно, что есть новая технология для поддержки глобальной сети обнаружения цунами.

**2013 год.** Данные реального времени DART и их ретроспектива: отражение 10 летнего периода процессинга и поддержки исследований и операционной деятельности по цунами. Mungov, G., M. Eblé, and R. Bouchard (2013)

В начале 1980-х годов, Национальное управление океанических и атмосферных исследований Соединенных Штатов (NOAA) и Тихоокеанская Лаборатория Исследований Окружающей Морской Среды (PMEL) заложили основы современной сети цунамиметров, развернутой по всем океанам мира. Десятилетия технологических и научных достижений привели к надежной сети, обеспечивающей в настоящее время в режиме реального времени наблюдения глубоководных цунами и повседневному применению их в оперативных процедурах центрами предупреждения цунами по всему миру. Все аспекты сети, от научных исследований до эксплуатации, архивирования и распространения данных, выполняются совместно Национальным Центром Данных Буев (NDBC), PMEL и Национальным Центром Геофизических Данных (NGDC), под руководством Национальной службы погоды (NWS). NDBC управляет и выполняет все операционные действия, включая распределение данных реального времени публике. PMEL обеспечивает исследования для поддержки моделирования и улучшения работы сети для прогнозной задачи. NGDC отвечает за обработку, архивирование и распределение всех ретроспективных данных и интегрирует данные цунамиметрам DART® со своей глобальной исторической базы данных о цунами. Представлена роль каждого учреждения в сборе, обработке и распространении наблюдения давления у дна вместе с краткими описаниями процедур обработки данных. Обсуждаются конкретные примеры проблем и подходы для их решения. Кратко описаны новые веб-страницы, разработанные NGDC для доступа о событиях цунами и продемонстрированы

обработанные данные как для Тохоку 11 марта 2011 г. и Гаити 12 января 2010 г. событий цунами.

**2014 год.** Влияние измерений на глубоководных станциях ближней зоны по Японскому цунами 7 декабря 2012 для его прогноза. Bernard, E., Y. Wei, L. Tang, and V.V. Titov (2014)

После разрушительного 11 марта 2011 цунами, две глубоководные станции для оценки и отчетности о цунами (DART®) (DART® и логотип DART® являются зарегистрированными торговыми марками Национального управления океанических и атмосферных исследований, используются с разрешения) развернуты в японских водах Японским Метеорологическим Агентством (JMA). Через две недели после постановки, 7 декабря 2012 года, землетрясение у берегов Японии на Тихоокеанском побережье с магнитудой 7.3 вызвало цунами. Цунами зафиксировано на двух японских DART® через 11 мин после начала землетрясения, тем самым установлен рекорд самого быстрого обнаружения цунами станциями DART®. Полученные данные, наряду с записанными на других DART®, использованы для получения источника цунами с помощью прогноза цунами NOAA. Результаты нашего анализа показывают, что данные, предоставленные двумя DART® в ближнем поле могут не только повысить скорость прогноза, но и точность прогнозов на береговых японских мареографических станциях. Это исследование обеспечивает важные руководящие принципы для раннего выявления и прогнозирования местных цунами.

**2014 год.** Прогноз цунами по совместному наложению данных формы волн реального времени, сейсмических или GPS данных: Приложение к данным Цунами Тохоку 2011. Yong Wei, Andrew Newman, Gavin Hayes, Vasily Titov and Liujuan Tang (2014)

Корректная характеристика источника цунами в очаге его возникновения является наиболее критической компонентой в прогнозе цунами на современном этапе. Несмотря на трудности прямого оцифровывания, источник цунами можно смоделировать разнообразными методами, используя широкий спектр данных глубоководных цунамиметров, сейсмометров, GPS и прочих продвинутых измерителей, многие из которых работают в режиме реального времени или близком. Здесь мы оцениваем эффективность разных моделей разрушительного Японского цунами 11 марта 2011 года через сравнение модели и фактических данных для генерации, распространения и заплеска в этом районе Японии. Предлагаемое сравнительное исследование указывает на преимущества и ограничения разных измерений реального времени для определения потенциала использования для раннего предупреждения цунами в ближней и дальней зонах. Исследование подчеркивает критическую роль измерений на глубоководных станциях и быструю подстройку примерного источника

цунами для высокоточного прогноза. Мы показываем также, что эти данные измерений цунами сравнимы с другими геодезическими данными реального времени и могут обеспечить более глубокое понимание генерации цунами от землетрясений, как и не сейсмических процессов, таких как подводные оползни.

**2016 год.** Усвоение данных по цунами района Каскадия по данным наблюдений донных мареографов после землетрясения Хайда Гвайи 2012 года. Gusman, A. R., A. F. Sheehan, K. Satake, M. Heidarzadeh, I. E. Mulia, and T. Maeda (2016)

Использованы формы волн цунами, записанные на плотном полигоне донных мареографов на шельфе Орегона и Калифорнии по землетрясению 2012 г. Хайда Гвайи, Канада, с целью имитации работы двух разных методов прогнозирования в режиме реального времени. В первом методе, источник цунами сначала оценивается по инверсии регистрируемых волновых форм цунами. Во втором методе, данные массива усваиваются для воспроизводства волнового поля цунами. Эти оценки могут быть использованы для прогнозирования цунами на побережье. Плотный массив данных обеспечил критически важные данные для обоих методов для получения своевременного (> 30 мин) периода выполнения расчета с точностью в обеих выборках времени и амплитуды (> 94% доверия) для прогноза цунами. В режиме реального времени данные о цунами по плотным полигонам, также как и усвоение данных, могут быть проверены в качестве возможной системы предупреждения цунами нового поколения.

В целом, как показано настоящей главой, разработка составляющих и эволюция DART практически полностью пришлась на усилия единственной и целенаправленной группы PMEL и, только благодаря ей, собственно, и состоялись. Основные события в развитии и изменении DART показаны здесь в табличной форме, а также по хронологии библиографии значимых работ.

Вследствие безупречной научной составляющей разработок PMEL и их технической добротности, выбор Росгидрометом среди разнообразия поставщиков систем раннего предупреждения цунами обоснованно пришелся на SAIC, [www.saic.com](http://www.saic.com), – корпорацию, имеющей право разрабатывать собственную продукцию автономных измерителей цунами STB на основе лицензии PMEL NOAA. Речь идет о моделях DART, DART-II, ETD, G4. Информация по выбору компаний для поставок в Россию систем раннего предупреждения цунами и опыт их применения в северо-западной части Тихого океана дается далее.