

УДК 550.344.42

DOI: 10.34753/HS.2020.2.3.260

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ ЦУНАМИ

Г.И. Долгих, С.Г. Долгих

*Тихоокеанский океанологический институт им.
В.И. Ильичёва ДВО РАН, г. Владивосток, Россия*
dolgikh@poi.dvo.ru

Аннотация. Цунами являются одними из самых катастрофических природных явлений, приносящих колоссальные разрушения и уносящих большое число человеческих жизней. Причины возникновения цунами могут быть различными: подводные землетрясения, подводные оползни, извержения вулканов. Даже известны случаи возникновения цунами в результате обрушения в море больших оползней и обвалов. Изучением физики возникновения и развития цунами занимались с древности и продолжают заниматься учёные разных стран. Основное направление исследований связано с построением краткосрочного прогноза землетрясений. В настоящее время традиционные методы краткосрочного прогнозирования цунами основаны только на сейсмологической информации (магнитуде землетрясения, времени главного толчка и местоположении эпицентра). Магнитуда землетрясения, превышающая установленное пороговое значение, которое различается для разных цунамигенных зон, обычно приводит к выдаче предупреждения о цунами. Научная значимость и актуальность обозначенной проблемы очень высока, более того, она жизненно необходима для большинства населения планеты, живущего в прибрежных районах. Как показывает история последних десятилетий, особенно события 2004 и 2011 годов и последних лет, эффективность работы службы предупреждений о цунами далека от своего совершенства. Не предсказанные катастрофические цунами, плохая оценка энергии возникающих цунами, объявления ложных тревог приводят к большим экономическим и социальным потерям. Это связано, прежде всего, с отсутствием

DEFORMATIONAL FEATURES OF TSUNAMI

Grigory I. Dolgikh, Stanislav G. Dolgikh

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB
RAS, Vladivostok, Russia*
dolgikh@poi.dvo.ru

Abstract. Tsunamis are one of the most catastrophic phenomena, causing tremendous destruction and claiming a significant number of lives. The causes of tsunamis can be different: water-quake, underwater landslides and volcanic eruptions. Even cases of tsunami are known as a result of the collapse of a huge mass of rocks in the sea. Scientists from different countries since antiquity have been studying the physics of the occurrence and development of tsunamis. The main direction of research is related to the construction of a short-term forecast of earthquakes. Currently, the traditional method of short-term tsunami forecasting is based only on seismological information (earthquake magnitude, main shock time and epicenter location). An earthquake magnitude exceeding a predetermined threshold value that differs between tsunamigenic zones usually results to a tsunami warning. The scientific significance and relevance of this problem is very high, moreover, it is vital for the majority of the world's population living in coastal regions. As the history of recent decades, especially the events of 2004 and 2011, and even recent years, shows, the efficiency of the tsunami service, to put it mildly, is far from perfect. The misses of catastrophic tsunamis, poor estimation of the energy of the arising tsunamis, false alarms, lead to very sad consequences. This is primarily due to the lack of a reliable short-term tsunami forecast. The works of recent years, based on the use of a distributed network of GPS receivers, DART systems, satellite technologies, are aimed at solving this problem, the final results of which are not yet visible. We believe that solving the problem of short-term tsunami forecast based on remote registration of deformational processes occurring in the source area of the tsunami origin is the most promising area of

достоверного краткосрочного прогноза цунами. Работы последних лет, основанные на применении распределённой сети GPS-приёмников, системы DART, спутниковых технологий, направлены на решение данной проблемы, но итоговые результаты этих исследований пока не видны. Мы считаем, что решение задачи краткосрочного прогноза цунами, основанного на дистанционной регистрации деформационных процессов, происходящих в очаговой области места возникновения цунами, является самым перспективным направлением исследований.

Ключевые слова: цунами; землетрясение; краткосрочный прогноз; деформационные аномалии; лазерный деформограф; GPS-приёмник; система DART

Введение

Известно, что одним из самых опасных катастрофических явлений Земли является цунами, которое приносит значительный экономический ущерб и приводит к человеческим жертвам. В качестве характерного примера можно привести цунами, которое возникло 26 декабря 2004 года в Индийском океане и унесло жизни более 283 000 человек. Оно было вызвано мощным землетрясением с максимальным значением магнитуды около 9,3 [Stein, Okal, 2005]. От действия цунами страдают различные регионы планеты, но в наибольшей степени это касается Японии. Учитывая в какой степени Япония страдает от воздействия землетрясений и цунами, а также её высокое научно-техническое развитие, можно ожидать, что в данном регионе планеты будут сосредоточены передовые научно-технические разработки, направленные на прогноз возникновения и развития землетрясений и цунами.

Если проблема краткосрочного прогноза землетрясений далека от своего решения, то задача обнаружения момента возникновения цунами кажется вполне решаемой. На Японских островах и на прилегающих акваториях установлено большое количество сейсмостанций, GPS-приёмников (более 5 000), донных

research, which will be partially confirmed in this paper.

Keywords: tsunami; earthquake; short-term forecast; deformational anomalies; laser strainmeter; GPS receivers; DART systems

сейсмостанций и высокоточных измерителей уровня моря/океана. Но тем не менее, события 2011 года в ещё большей степени показали степень нерешённости проблемы краткосрочного прогноза цунами.

В настоящее время огромное количество научных работ посвящается физике возникновения и развития цунами, которые можно разделить на:

- 1) экспериментальные, с некоторым физическим объяснением наблюдаемых сигналов;
- 2) модельные, которых значительное большинство;
- 3) теоретические, которых меньшинство.

Можно утверждать, что генеральное направление работ, посвящённых проблеме цунами, связано с регистрацией цунами на стадии их возникновения и выполнения дальнейших модельных расчётов.

В работе [Titov et al., 2016] сформулированы основные направления выполнения данных исследований. Раннее предупреждение о цунами зависит от быстрого определения потенциальной опасности цунами в режиме реального времени, до того, как волны пересекут береговые линии.

Энергия цунами может характеризовать разрушительный потенциал генерируемых волн.

Недавно были предложены два независимых подхода для определения энергии источника цунами: один основан на данных Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (далее – DART) во время распространения цунами, а другой основан на наземной прибрежной системе глобального позиционирования (далее – GPS) при генерации цунами.

Основополагающими инструментальными средствами в настоящее время большинством исследователей признаны системы DART и GPS-приёмники.

Подход GPS учитывает динамический процесс землетрясения, подход инверсии DART обеспечивает фактическую оценку энергии распространяющихся волн цунами. Оба подхода приводят к согласованным энергетическим шкалам для раннего изучения цунами.

На основе этих многообещающих результатов в работе [Titov et al., 2016] изучен подход к определению энергии источника цунами в реальном времени, объединяющий эти два метода. На первой стадии определяется источник цунами по глобальной сети GPS сразу после землетрясения с целью раннего предупреждения в ближней зоне. Затем по ближайшим измерениям DART уточняется энергия цунами с целью повышения точности прогнозов или отмены тревоги. Комбинация этих двух сетей реального времени может предложить привлекательную возможность для раннего определения угрозы цунами с целью спасения большего числа человеческих жизней и ранней отмены предупреждений о цунами с целью недопущения ложных тревог об угрозе цунами.

За последнее десятилетие количество датчиков в открытом океане, способных анализировать информацию о проходящем цунами, неуклонно увеличивалось, особенно благодаря национальным кабельным сетям и международным системам: таким как системы DART.

Полученная информация анализируется с целью предупреждения цунами. Большинство текущих предупреждений о цунами направлены на районы средней и дальней зоны. В работе [Williamson, Newman, 2018] проанализированы

регионы, окружающие четыре сейсмически активные зоны субдукции (Японию, Чили и Яву), на предмет их потенциала в плане возможности использования для раннего предупреждения о местных цунами с использованием таких систем. Основные выводы работы заключаются в том, что хотя некоторые регионы плохо подходят для этого типа раннего предупреждения (например, береговая линия Чили), другие регионы (такие как Ява, Индонезия) могут включать прямые наблюдения цунами в свои прогнозы с достаточной заблаговременностью, позволяющей принимать своевременные меры для эффективного реагирования на угрозу цунами.

Следует отметить, что невозможно учесть все типы цунамигенных явлений на море в этих местах. Землетрясение на Суматре 26 декабря 2004 г. ($M_w=9,2-9,3$) вызвало самое смертоносное цунами в истории. Однако в течение первого часа сейсмическими методами не была установлена настоящая опасность крупного цунами в океане.

В работе [Blewitt et al., 2006] показано, что истинный размер землетрясения и потенциал цунами можно определить с помощью глобальной системы позиционирования (GPS) уже через 15 минут после начала данного землетрясения, отслеживая среднее смещение поверхности Земли, связанное с приходом сейсмических волн. В течение нескольких минут смещение >10 мм обнаруживается даже в Индии, что согласуется с результатами, полученными с использованием данных, полученных после события. Эти смещения подразумевают $M_w=9,0\pm0,1$, что указывает на высокий потенциал цунами. В работе утверждается, что существующая инфраструктура GPS может быть использована как эффективная компонента систем предупреждения о цунами.

В работах [Song, Han, 2011; Gusman et al., 2012; Xu, Song, 2013; Tang et al., 2016] также обосновывается перспективность использования GPS-систем и распределённых систем типа DART для раннего предупреждения цунами.

В работе [Song et al., 2005] анализируются данные о цунами и вызвавшего его землетрясения по данным цифровой сейсмометрии и спутниковой радиолокационной альтиметрии.

Оба метода независимо записали данное событие. Сейсмические данные затем использовались для оценки параметров разлома землетрясения, а трёхмерная модель общей циркуляции океана (OGCM) использовалась для моделирования волн цунами, наблюдаемых со спутников. В работе показано, что эти два набора данных обеспечат информацию об источнике цунами с помощью независимых методик инверсии сейсмических волн и моделирования океана. Анализ этих двух независимых результатов говорит, что функция скольжения является наиболее важным условием, определяющим мощность цунами, а геометрия и скорость разрушения тектонической плоскости определяют пространственные закономерности цунами.

Несмотря на последние инновационные разработки, авторы работы [Korolev, 2011] считают, что краткосрочный прогноз цунами и эффективное предупреждение о цунами – ключевая проблема службы цунами. В настоящее время традиционный метод краткосрочного прогнозирования цунами основан только на сейсмологической информации (магнитуде землетрясения, времени главного толчка и местоположении эпицентра). Магнитуда землетрясения, превышающая установленное пороговое значение, которое различается для разных цунамигенных зон, обычно приводит к выдаче предупреждения о цунами. Такой подход, основанный на «магнитудно-географическом принципе», прост и довольно эффективен: по крайней мере он обеспечивает небольшое количество пропусков цунами.

Пропуски катастрофических цунами, неверная оценка энергии возникающих цунами, объявления ложных тревог приводят к очень печальным последствиям. Это связано прежде всего с отсутствием достоверного краткосрочного прогноза цунами.

Работы последних лет, основанные на применении распределённой сети GPS-приёмников, системы DART, спутниковых технологий, направлены на решение данной проблемы, но итоговые результаты пока не видны.

Но на наш взгляд наиболее перспективен метод краткосрочного прогноза цунами, основанный на инструментальных методах [Долгих и др., 1998; Долгих и др., 2002; Долгих, 2011], и применённый для оценки цунамиопасности Суматранского землетрясения 2004 года [Долгих и др., 2007а; Долгих и др., 2007б].

Деформационный метод регистрации признаков цунами

Разработка новых технологий краткосрочного прогноза опасных гидродинамических процессов Земли (волны цунами, «волны-убийцы» и др.), их пеленгации и идентификации на стадии зарождения и развития имеет громадное значение.

На данный момент практически нет достаточно надёжных методов регистрации возникновения опасных гидродинамических процессов Земли, что привело к катастрофическим событиям последних лет.

В качестве характерного примера можно привести два события, которые связаны с землетрясениями, произошедшими в земной коре под морским дном. В декабре 2004 года произошло мощное землетрясение в Индийском океане, в результате чего образовалось цунами, унёсшее жизни более 283 000 человек [Stein, Okal, 2005]. При этом не была объявлена тревога в связи с образованием цунами. В январе 2007 года произошло мощное землетрясение в Тихом океане. Была объявлена опасность цунами на Курильских островах и на острове Хоккайдо, но цунами не было.

Данные примеры говорят о том, что службы предупреждения, связанные с опасностью возникновения цунами, работают неэффективно. Если в первом случае погибло много людей и был нанесён большой экономический и социально-политический ущерб, то во втором случае был нанесён большой экономический ущерб хозяйствующим объектам, расположенным в зоне, где была объявлена тревога: в связи с прекращением их функционирования и проведением противоцунамиопасных

мероприятий и эвакуацией людей из предполагаемых районов затопления.

Деформационные аномалии, вызывающие цунами, возникают при различных геодинамических процессах. Подавляющее их большинство связано с землетрясениями.

Сами землетрясения всего лишь вызывают сотрясения океанского дна в диапазоне периодов от нескольких секунд до нескольких десятков секунд и не могут вызвать цунами. А деформационные аномалии, вызванные землетрясениями, находятся в крайне левом частотном диапазоне и не могут быть зарегистрированы любыми, даже широкополосными сейсмографами.

В связи с тем, что гидрологические установки находятся на небольшом расстоянии от места выхода цунами на шельф и времени недостаточно для эффективного проведения противоцунамиопасных мероприятий, они тоже являются неэффективными.

Наиболее эффективными для регистрации цунами являются установки, способные регистрировать деформационные подвижки, приводящие к возникновению волны. Скорость распространения деформационной подвижки в упругой среде на порядок больше скорости распространения цунами. Наиболее перспективными для их регистрации и пеленгации являются лазерные деформографы благодаря своим основным характеристикам: точность измерения микросмещений земной коры – 0,1 нм и меньше, частотный диапазон – от 0 (условно) до 1000 Гц,

динамический диапазон – практически неограничен при измерении естественных процессов инфразвукового диапазона.

Изучение записей лазерного деформографа, установленного на мысе Шульца Приморского края России, позволило обнаружить не только характерные для землетрясений колебания, определяемые длиной разрыва в очаге землетрясения, но и выделить аномальный деформационный сигнал, который характеризует смещение морского дна в месте возникновения цунами, которое и привело к образованию цунами (рисунок 1).

Можно отметить, что по записи любого широкополосного сейсмографа/велосиметра невозможно обнаружить этот деформационный сигнал.

В качестве характерного примера можно привести запись широкополосного сейсмографа, расположенного на одной из сейсмостанций Японии (рисунок 2). Как видно из данного рисунка, ни по записи, ни по динамической спектрограмме невозможно определить степень цунамиопасности происшедшего землетрясения. Более того, можно заметить, что длительность деформационной аномалии, которая в данном случае равна около 21 мин (рисунок 1), связана с длительностью деформационных подвижек дна океана в месте образования цунами, а величина деформационной аномалии, которая значительно больше величины суточного прилива в месте расположения лазерного деформографа, связана с величиной смещений морского/океанического дна.

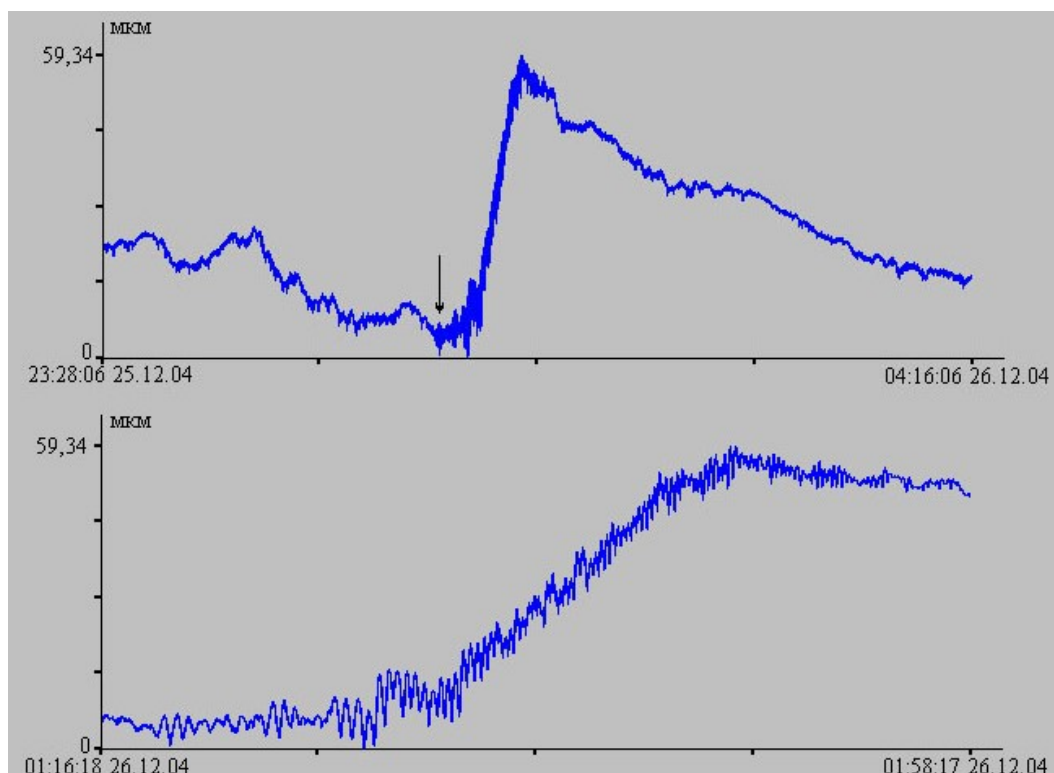


Рисунок 1. Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа за декабрь 2004 года. Запись индонезийского цунамигенного землетрясения (верхний) и выделенный участок записи землетрясения (нижний)

Figure 1. Capture sample of 52.5-meter laser strainmeter in December 2004. Indonesian tsunamigenic earthquake record (top) and highlighted section of earthquake record (bottom)

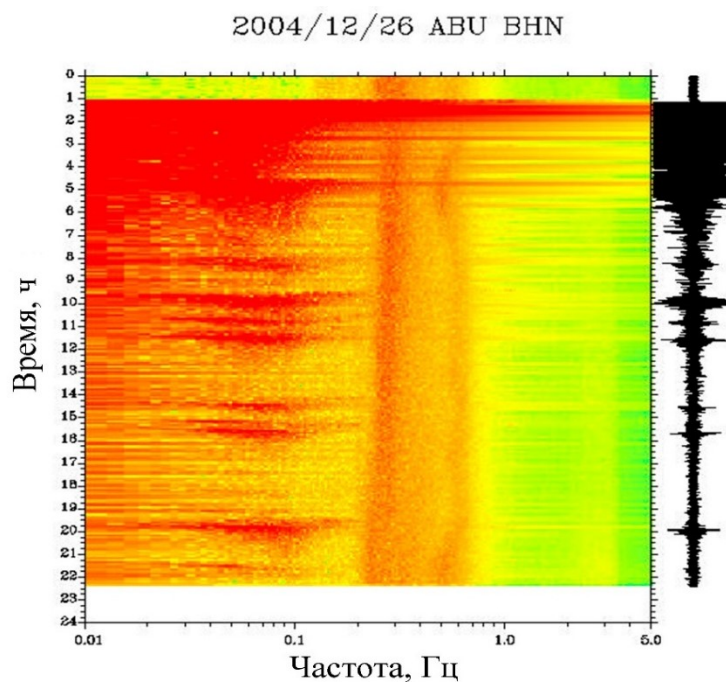


Рисунок 2. Запись широкополосного сейсмографа (правый) и динамическая спектрограмма записи широкополосного сейсмографа (левый)

Figure 2. Recording of a broadband seismograph (right) and dynamic spectrogram of a broadband seismograph record (left)

Обработка и анализ других записей лазерного деформографа

С момента начала работы лазерного деформографа горизонтального типа с ориентацией север-юг и с длиной измерительного плеча 52,5 м, установленного на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», в точке с координатами 42,58°N, 131,157°E, был получен большой объем данных в широком диапазоне частот искусственного и естественного происхождения.

Общий вид записей землетрясений отличается от искусственных сигналов импульсного характера. Существенные отличия наблюдаются при анализе спектрограмм. Частоты, характерные для землетрясений и взрывов, определяются размером разрыва в гипоцентре землетрясений и зоной локализации взрывов.

Проанализируем записи лазерного деформографа при регистрации сигналов, связанных с некоторыми цунамигенными землетрясениями.

5 сентября 2004 года на южном побережье острова Хонсю (Япония), произошло два мощных землетрясения. Первое землетрясение с

магнитудой 7,2 произошло в 10:07:07 в точке с координатами 33,14°N, 136,62°E, на расстоянии около 75 км к востоку от острова Хонсю, на глубине 20 км от уровня моря. Второе землетрясение с магнитудой 7,5 произошло в 14:57:16. Его гипоцентр находился в точке с координатами 33,19°N, 137,05°E, на расстоянии около 130 км к востоку от южной части острова Хонсю, на глубине 10 км от уровня моря.

Землетрясения с магнитудой около 5 были зарегистрированы на южном побережье острова Хонсю после второго сильного землетрясения.

На рисунке 3 приведена карта-схема расположения эпицентров двух сильных землетрясений (красный круг) и череды землетрясений с магнитудой около 5 (оранжевые круги). Оба сильных землетрясения были зарегистрированы лазерным деформографом.

Расстояние от эпицентров землетрясений до лазерного деформографа составляет около 1162 км. На рисунке 4 (верхний) приведена запись первого нецунамигенного землетрясения. Сигнал от землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом в 10:13:46 5 сентября 2004 года.

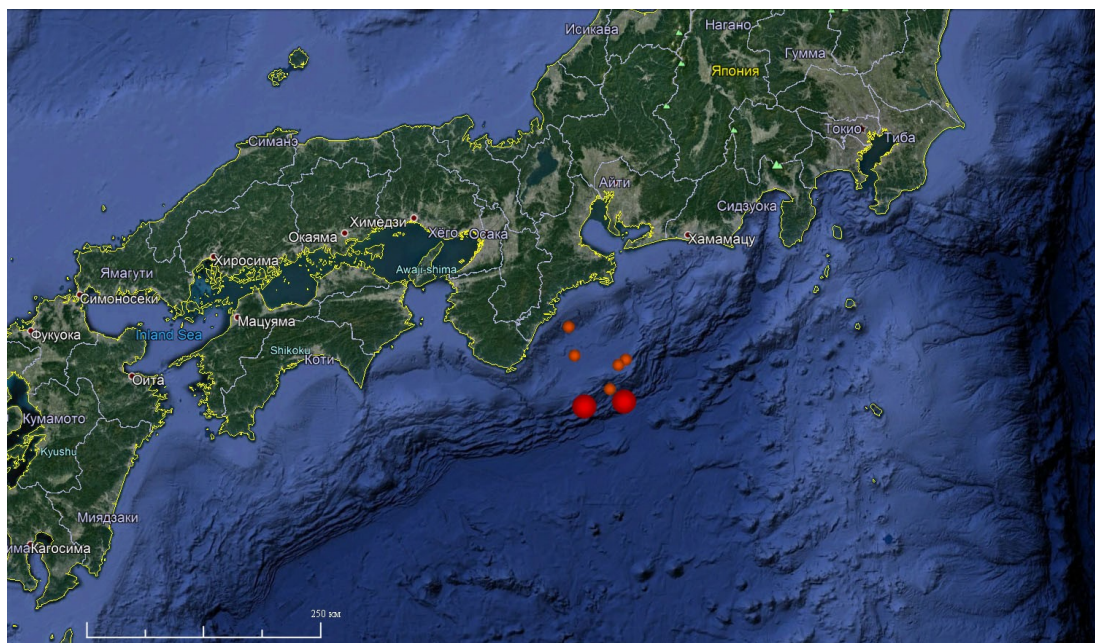


Рисунок 3. Карта-схема расположения эпицентров землетрясений в районе южного побережья острова Хонсю 5 сентября 2004 г.

Figure 3. Sketch map of earthquake epicenters location in the area of the southern coast of Honshu on September 5, 2004

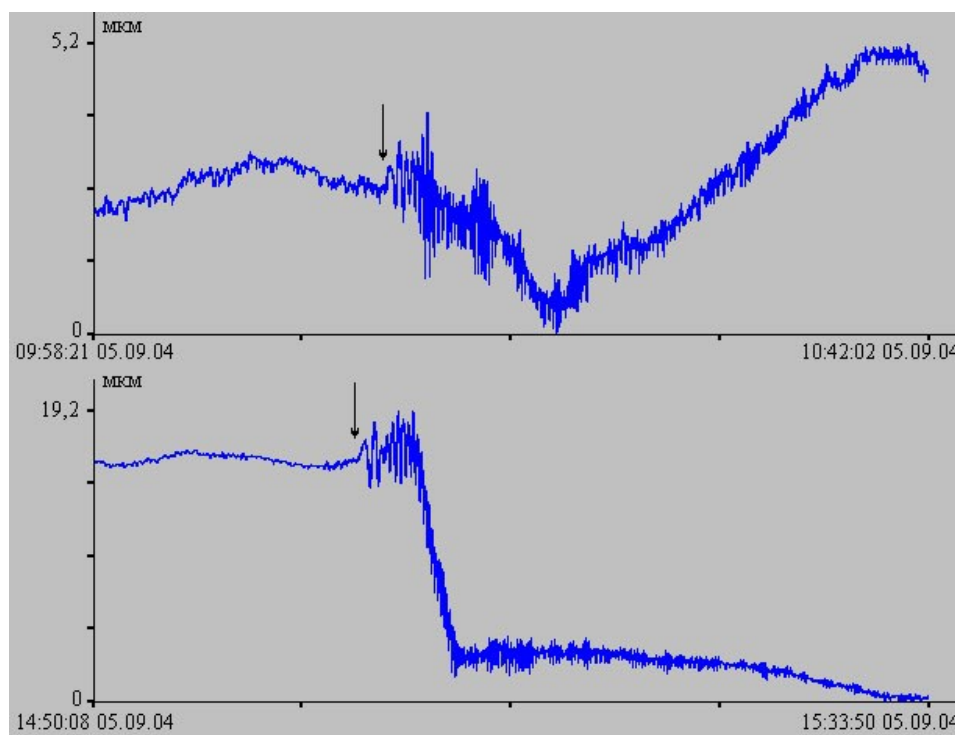


Рисунок 4. Фрагмент записи 52,5-метрового лазерного деформографа за сентябрь 2004 года. Запись нецунамигенного землетрясения (верхний) и запись цунамигенного землетрясения (нижний) на южном побережье острова Хонсю

Figure 4. Capture sample of 52.5-meter laser strainmeter in September 2004. Record of non-tsunamigenic earthquake (top) and record of tsunamigenic earthquake (bottom) on the south of the west coast of Honshu

Учитывая время распространения колебаний от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа, скорость их распространения примерно равна 2 909 м/с. На рисунке 4 (нижний) приведена запись второго цунамигенного землетрясения. Сигнал от землетрясения был зарегистрирован лазерным деформографом в 15:03:52 5 сентября 2004 года. Расстояние от эпицентра землетрясения до лазерного деформографа составляет около 1 152 км. Учитывая время распространения колебаний от эпицентра землетрясения до места установки лазерного деформографа, скорость их распространения примерно равна 2 909 м/с.

25 марта 2020 года в 02:49 GMT (05:49 по московскому времени) к востоку от Курильских островов в районе острова Парамушир произошло сильное землетрясение магнитудой $M=7,5$, эпицентр землетрясения и контуры

интенсивности по 12-балльной шкале MSK-64 показаны на рисунке 5. Оно вызвало цунами на ряде островов Курильской гряды. Землетрясение и скачок деформаций, связанный с перемещениями морского дна в центре формирования цунами, были зафиксированы лазерным деформографом, который находился на расстоянии почти 2 150 км от эпицентра (Курильский остров Парамушир).

На рисунке 6 показана обработанная запись лазерного деформографа.

Для выделения вариаций деформаций земной коры, вызванных цунамигенным землетрясением, из данных лазерного деформографа были вычтены вариации микродеформаций земной коры, вызванные колебаниями атмосферного давления. По наблюдаемому скачку деформации можно было говорить о возможной опасности цунами.

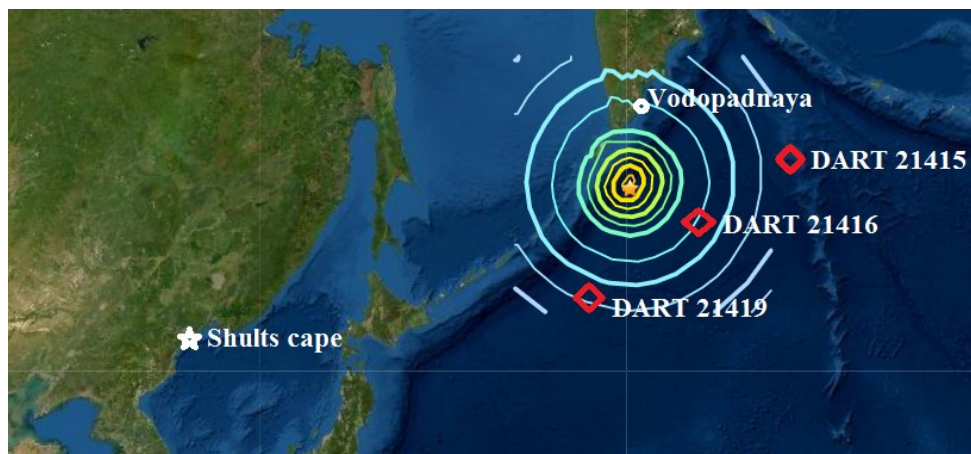


Рисунок 5. Эпицентр землетрясения 25 марта 2020 года с контурами интенсивности

Figure 5. Earthquake epicenter on March 25, 2020 with intensity circuits

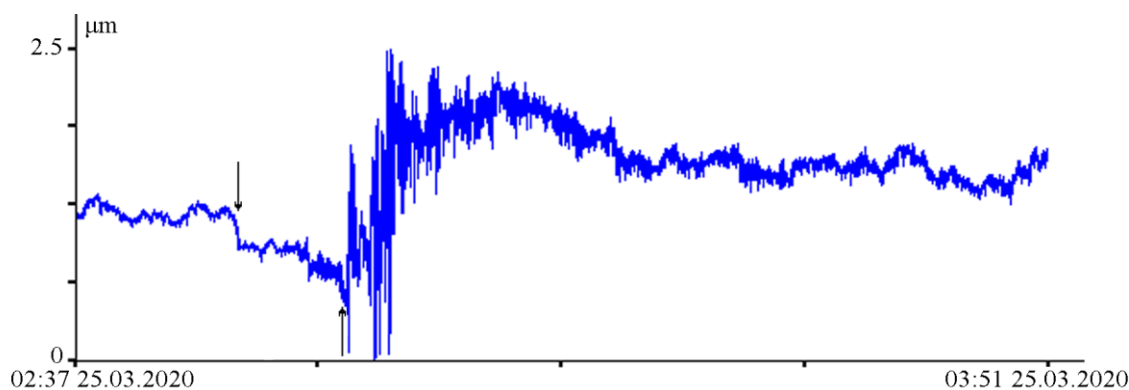


Рисунок 6. Участок записи лазерного деформографа. Стрелка вниз показывает начало землетрясения, стрелка вверх показывает начало деформационной аномалии. Землетрясение 25 марта 2020 г.

Figure 6. Section of the laser strainmeter recording. Down arrow shows the earthquake beginning, up arrow shows the deformational anomaly beginning. Earthquake on March 25, 2020

На записи лазерного деформографа землетрясение было зафиксировано в 02:53 GMT, а через 4 минуты было зафиксировано начало деформационной аномалии, вызвавшей цунами, то есть уже через 15 минут после начала землетрясения можно было говорить о возникновении цунами.

Заключение

Результаты ранее опубликованных исследований и результаты, представленные в данной статье, показывают, что возникновение цунами сопровождается возникновением деформационной аномалии, регистрируемой на записи лазерного деформографа.

По-видимому, после начала землетрясения в некоторый момент времени происходят движения участков морского дна, которые и

приводят к образованию цунами. Данные перемещения участков морского дна на записи лазерного деформографа отображаются в виде аномального деформационного сигнала (скачка деформации).

При дальнейшем анализе экспериментальных данных, полученных с помощью лазерных деформографов, будет изучена физика возникновения деформационных аномалий, связанных с генерацией цунами, и изучена зависимость их основных характеристик (амплитуда, скорость деформации, соотношение дисперсии и нелинейности и тому подобное) от особенностей подвижек морского/океанического дна (направления смещений, характера смещений, скорости смещений, объемов перемещающихся масс, деформационного градиента и тому подобное).

Литература

Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В. Двухкоординатный лазерный деформограф // Физика Земли. 1998. № 11. С. 76-81.

Долгих Г.И., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Фищенко В.К. Применение лазерных деформографов вертикальной и горизонтальной ориентаций в геофизических исследованиях переходных зон // Физика Земли. 2002. № 8. С. 69-73.

Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Регистрация деформационной аномалии цунамигенного землетрясения лазерным деформографом // Доклады Академии наук. 2007а. Т. 412. № 1. С. 104-106.

Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Деформационный метод определения цунамигенности землетрясений // Доклады Академии наук. 2007б. Т. 417. № 1. С. 109-112.

Долгих Г.И. Принципы построения однокоординатных лазерных деформографов // Письма в журнал технической физики. 2011. Т. 37. Вып. 5. С. 24-30.

Blewitt G., Kreemer C., Hammond W.C., Plag H.-P., Stein S., Okal E. Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems // Geophysical Research Letters. 2006. Vol. 33. Iss. 11. P. L11309. DOI: [10.1029/2006GL026145](https://doi.org/10.1029/2006GL026145).

Gusman A.R., Tanioka Y., Sakai S., Tsushima H. Source model of the great 2011 Tohoku earthquake estimated from tsunami waveforms and crustal deformation data // Earth and Planetary Science Letters. 2012. Vol. 341-344. P. 234-242. DOI: [10.1016/j.epsl.2012.06.006](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.06.006).

Korolev Yu.P. An approximate method of short-term tsunami forecast and the hind casting of some recent events // Natural Hazards and Earth System

References

Blewitt G., Kreemer C., Hammond W.C., Plag H.-P., Stein S., Okal E. Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems. *Geophysical Research Letters*, 2006, vol. 33, iss. 11, p. L11309. DOI: [10.1029/2006GL026145](https://doi.org/10.1029/2006GL026145).

Dolgikh G.I., Kovalev S.N., Koren' I.A., Ovcharenko V.V. A Two-Coordinate Laser Strainmeter. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 1998, vol. 34, no. 11, pp. 946-950. (Russ. ed.: Dolgikh G.I., Kovalev S.N., Koren' I.A., Ovcharenko V.V. Dvukhkoordinatnyi lazernyi deformograf. *Fizika Zemli*, 1998, no. 11, pp. 76-81).

Dolgikh G.I., Valentin D.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren' I.A., Ovcharenko V.V., Fishchenko V.K. Application of horizontally and vertically oriented strainmeters in geophysical studies of transitional zones. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2002, vol. 38, no. 8, pp. 686-689. (Russ. ed.: Dolgikh G.I., Valentin D.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren' I.A., Ovcharenko V.V., Fishchenko V.K. Primenenie lazernykh deformografov vertikal'noi i gorizonta'noi orientatsii v geofizicheskikh issledovaniyakh perekhodnykh zon. *Fizika Zemli*, 2002, no. 8, pp. 69-73).

Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren I.A., Ovcharenko V.V., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Recording of deformation anomaly of a tsunamigenous earthquake using a laser strainmeter. *Doklady Earth Sciences*, 2007а, vol. 412, no. 1, pp. 74-76. DOI: [10.1134/S1028334X07010163](https://doi.org/10.1134/S1028334X07010163) (Russ. ed.: Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren I.A., Ovcharenko V.V., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Registratsiya deformatsionnoi anomalii tsunamigenogo zemletryaseniya lazernym deformografom. *Doklady Akademii nauk*, 2007а, vol. 412, no. 1, pp. 104-106).

Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Ovcharenko V.V., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. A deformation method of tsunamigenic earthquakes definition. *Doklady Earth Sciences*, 2007b, vol. 417, no. 1, pp. 1261-1264.

Sciences. 2011. Vol. 11. Iss. 11. P. 3081-3091. DOI: [10.5194/nhess-11-3081-2011](https://doi.org/10.5194/nhess-11-3081-2011).

Song Y.T., Han S.C. Satellite observations defying the long-held tsunami genesis theory // *Remote Sensing of the Changing Oceans* / Tang D. (ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. P. 327-342. DOI: [10.1007/978-3-642-16541-2_17](https://doi.org/10.1007/978-3-642-16541-2_17).

Song Y.T., Ji C., Fu L.-L., Zlotnicki V., Shum C. K., Yi Y., Hjorleifsdottir V. The 26 December 2004 Tsunami source estimated from satellite radar altimetry and seismic waves // *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32. Iss. 20. P. L20601. DOI: [10.1029/2005GL023683](https://doi.org/10.1029/2005GL023683).

Stein S., Okal E.A. Speed and size of the Sumatra earthquake // *Nature*. 2005. Vol. 434. No. 7033. P. 581-582. DOI: [10.1038/434581a](https://doi.org/10.1038/434581a).

Tang L., Titov V.V., Moore C., Wei Y. Real-time assessment of the 16 September 2015 Chile tsunami and implications for near-field forecast // *Pure and Applied Geophysics*. 2016. Vol. 173. Iss. 2. P. 369-387. DOI: [10.1007/s00024-015-1226-3](https://doi.org/10.1007/s00024-015-1226-3).

Titov V.V., Song Y.T., Tang L., Bernard E.N., Bar-Sever Y., Wei Y. Consistent estimates of tsunami energy show promise for improved early warning // *Pure and Applied Geophysics*. 2016. Vol. 173. Iss. 12. P. 3863-3880. DOI: [10.1007/s00024-016-1312-1](https://doi.org/10.1007/s00024-016-1312-1).

Williamson A.L., Newman A.V. Suitability of open-ocean instrumentation for use in near-field tsunami early warning along seismically active subduction zones // *Pure and Applied Geophysics*. 2018. Vol. 176. Iss. 7. P. 3247-3262. DOI: [10.1007/s00024-018-1898-6](https://doi.org/10.1007/s00024-018-1898-6).

Xu Z., Song Y.T. Combining the all-source Green's functions and the GPS-derived source for fast tsunami prediction-illustrated by the March 2011 Japan tsunami // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2013. Vol. 30. Iss. 7. P. 1542-1554. DOI: [10.1175/JTECH-D-12-00201.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00201.1).

DOI: [10.1134/S10283334X07080296](https://doi.org/10.1134/S10283334X07080296) (Russ. ed.: Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Ovcharenko V.V., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Deformatsionnyi metod opredeleniya tsunamigennosti zemletryasenii. *Doklady Akademii nauk*, 2007b, vol. 417, no. 1, pp. 109-112).

Dolgikh G.I. Principles of designing single-coordinate laser strainmeters. *Technical Physics Letters*, 2011, vol. 37, iss. 3, pp. 204-206. DOI: [10.1134/S1063785011030035](https://doi.org/10.1134/S1063785011030035) (Russ. ed.: Dolgikh G.I. Printsipy postroeniya odnokoordinatnykh lazernykh deformografy. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2011, vol. 37, iss. 5, pp. 24-30).

Gusman A.R., Tanioka Y., Sakai S., Tsushima H. Source model of the great 2011 Tohoku earthquake estimated from tsunami waveforms and crustal deformation data. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, vol. 341-344, pp. 234-242. DOI: [10.1016/j.epsl.2012.06.006](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.06.006).

Korolev Yu.P. An approximate method of short-term tsunami forecast and the hind casting of some recent events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, vol. 11, iss. 11, pp. 3081-3091. DOI: [10.5194/nhess-11-3081-2011](https://doi.org/10.5194/nhess-11-3081-2011).

Song Y.T., Han S.C. Satellite observations defying the long-held tsunami genesis theory. In Tang D. (ed.), *Remote Sensing of the Changing Oceans*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, pp. 327-342. DOI: [10.1007/978-3-642-16541-2_17](https://doi.org/10.1007/978-3-642-16541-2_17).

Song Y.T., Ji C., Fu L.-L., Zlotnicki V., Shum C. K., Yi Y., Hjorleifsdottir V. The 26 December 2004 Tsunami source estimated from satellite radar altimetry and seismic waves. *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, iss. 20, p. L20601. DOI: [10.1029/2005GL023683](https://doi.org/10.1029/2005GL023683).

Stein S., Okal E.A. Speed and size of the Sumatra earthquake. *Nature*, 2005, vol. 434, no. 7033, pp. 581-582. DOI: [10.1038/434581a](https://doi.org/10.1038/434581a).

Tang L., Titov V.V., Moore C., Wei Y. Real-time assessment of the 16 September 2015 Chile tsunami and implications for near-field forecast. *Pure and Applied Geophysics*, 2016, vol. 173, iss. 2, pp. 369-387. DOI: [10.1007/s00024-015-1226-3](https://doi.org/10.1007/s00024-015-1226-3).

Titov V.V., Song Y.T., Tang L., Bernard E.N., Bar-Sever Y., Wei Y. Consistent estimates of tsunami energy show promise for improved early warning. *Pure and Applied Geophysics*, 2016, vol. 173, iss. 12, pp. 3863-3880. DOI: [10.1007/s00024-016-1312-1](https://doi.org/10.1007/s00024-016-1312-1).

Williamson A.L., Newman A.V. Suitability of open-ocean instrumentation for use in near-field tsunami early warning along seismically active subduction zones. *Pure and Applied Geophysics*, 2018, vol. 176, iss. 7, pp. 3247–3262. DOI: [10.1007/s00024-018-1898-6](https://doi.org/10.1007/s00024-018-1898-6).

Xu Z., Song Y.T. Combining the all-source Green's functions and the GPS-derived source for fast tsunami prediction-illustrated by the March 2011 Japan tsunami. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, vol. 30, iss. 7, pp. 1542-1554. DOI: [10.1175/JTECH-D-12-00201.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00201.1).