

II Всероссийская научная конференция
«ВОЛНЫ ЦУНАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ»
посвященная 90-летию со дня рождения
Сергея Леонидовича Соловьева
16-17 ноября 2020 года

**ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ ЦУНАМИ ПО ДАННЫМ
БЛИЖАЙШИХ К ОЧАГУ ГЛУБОКОВОДНЫХ СТАНЦИЙ,
СОДЕРЖАЩИМ ШУМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

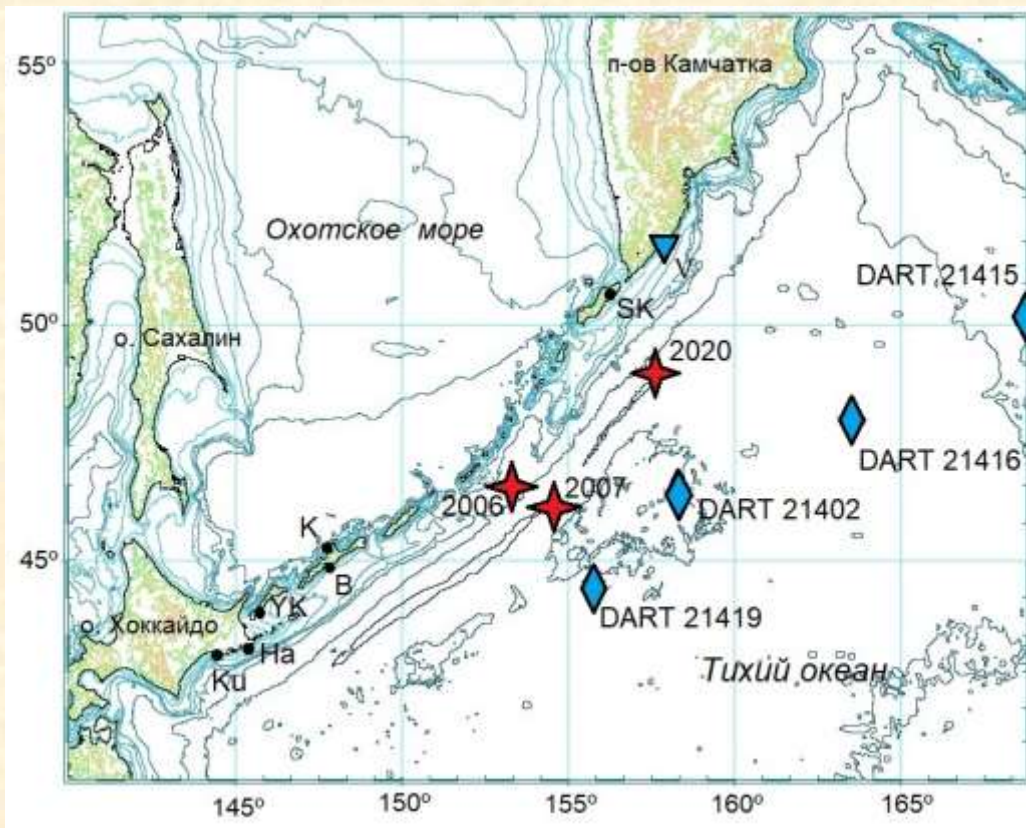
Ю.П. Королёв



*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН
Южно-Сахалинск*

ВВЕДЕНИЕ

13:49 сахалинского времени (ниже указывается сахалинское время, разница составляет +11 час с UTC и +8 час с московским временем) 25 марта 2020 г.: произошло землетрясение магнитудой 7.3 с эпицентром в 220 км восточнее о. Онекотан. Землетрясение вызвало слабое цунами. Это цунами по наименованию ближайшего острова можно называть Онекотанским цунами 2020 г. по аналогии с наименованием Симуширское цунами 2006 г.



13:57: Тихоокеанский Центр предупреждения о цунами выпустил бюллетень с предупреждением об опасных волнах цунами для побережья в пределах 1000 км от эпицентра землетрясения.

14:00: ИОЦ "Южно-Сахалинск" СФ ФИЦ ЕГС РАН была объявлена тревога цунами по Северо-Курильскому району.

14:16: Японское Метеорологическое Агентство в также предупредило о возможных разрушительных волнах цунами на Курильских островах с амплитудой 1 – 3 метра.

14:30: Эвакуация населения в безопасную зону завершена. Эвакуировано около 400 человек.

15:04: Ожидаемый подход цунами к Северо-Курильску.



Согласно визуальным наблюдениям в 1.2 км южнее порта Северо-Курильск первая волна пришла через 1 час после начала землетрясения. На фоне штормового волнения высота цунами оценивалась в 50 см.

17:57: отмена тревоги цунами (через 3 часа после прихода волны).

Отсутствие инструментальных измерений уровня моря в Северо-Курильске, как и на всех Курильских островах, не позволяет ни подтвердить высоту цунами 50 см, ни получать достоверную информацию о цунами вообще.

Тревога цунами оказалась фактически ложной как по прогнозу сахалинской службы предупреждения, так и по прогнозам Тихоокеанского центра предупреждения о цунами и Японского метеорологического агенства.

Аналогичные ситуации имели место в 2006 и 2007 гг. (Симуширские цунами 2006 и 2007 гг.). Объявлялись тревоги цунами по магнитудному критерию на побережьях всех Курильских островов, произведена эвакуация населения в безопасные места. Цунами на заселенных островах не представляли опасности. Тревоги оказались фактически ложными.

При сильных цунами остановка производства, эвакуация персонала, населения из опасных зон являются оправданными. В то же время при слабых, как в 2006, 2007 и 2020 гг., эти мероприятия сопровождаются неоправданным ущербом, связанным с остановкой производства, излишним стрессом для населения. К тому же длительность тревожного режима зачастую излишне велика. Частые ложные тревоги порождают негативное к ним отношение, недоверие. Игнорирование сигналов тревоги во время сильнейшего цунами Тохоку 2011 г. в Японии послужило отчасти причиной большого количества жертв.

Согласно современным представлениям, службы предупреждения о цунами должны объявлять не только обоснованные общие тревоги, но и дифференцированные по степени опасности для конкретных участков побережий. Идеально тревога цунами должна объявляться с разумной заблаговременностью только в тех пунктах, в которых цунами представляет реальную опасность, и сопровождаться информацией о временах прихода первой волны, максимальной волны, их амплитудах, а также об ожидаемом времени окончания цунами (отбой тревоги цунами) [[Korolev, 2011](#)]. Именно эти характеристики цунами перечислены в определении прогноза цунами, сформулированном Межправительственной океанографической комиссией (МОК) ЮНЕСКО в 2013 г. [[Intergovernmental Oceanographic Commission, 2016](#)]. На основании магнитудно-географического критерия такой детальный прогноз невозможен.

Очевидно, что в случаях локальных цунами (при землетрясениях в районе Курило-Камчатской впадины) оперативность, заблаговременность прогноза зависят от близости станций к очагу цунами.

Данные таких станций могут содержать наложенные на полезный сигнал шумы сейсмического происхождения, обусловленные прохождением по дну океана поверхностных волн (Рэлеевские волны). Разделить полезный сигнал и шум в такой ситуации, по-видимому, невозможно.

Это обстоятельство может стать препятствием для получения адекватного прогноза. В условиях оперативного режима требуется за короткое время оценить степень опасности цунами, не вдаваясь в проблему разделения сигналов.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы являлось исследование возможности оперативного прогноза локальных цунами по данным ближайших к очагам действующих или виртуальных станций измерения уровня океана, содержащим неустранимые шумы сейсмического происхождения.

Рассмотрены все известные события в северной и северо-западной частях Тихого океана, во время которых либо производилась регистрация, либо возможно восстановление (реконструкция) формы цунами вблизи очага.

Реконструкция данных виртуальных станций и расчет формы цунами выполнялись способом оперативного прогноза цунами [[Korolev, 2011](#)].

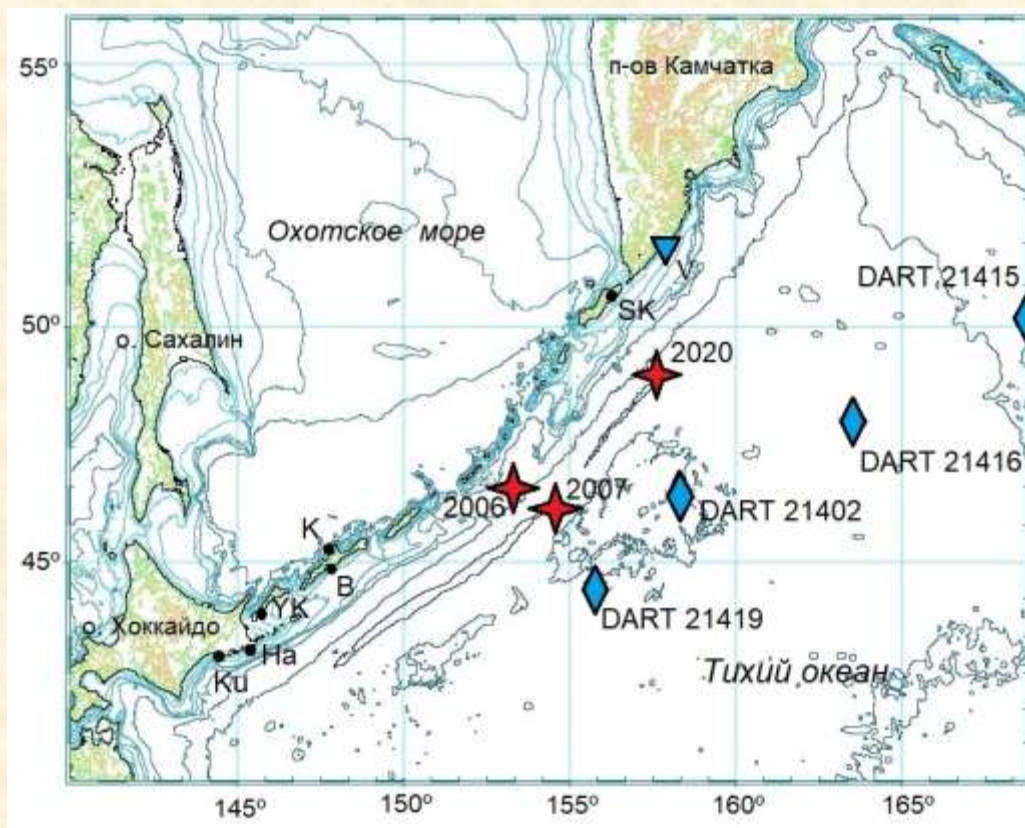
В численных экспериментах оценивались заблаговременность прогноза цунами, т.е. время между расчетным временем прихода цунами (первого гребня волны) в заданную точку и временем выполнения прогноза, и качество прогноза. За критерий качества прогноза принята возможность оценки степени опасности ожидаемого цунами в заданном пункте, достаточной для принятия решения об объявлении тревоги.

ПОСТАНОВКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

Онекотанское цунами 2020 г.

Онекотанское цунами 2020 г. зарегистрировано станциями системы DART 21415, 21416 и 21419. Ближайшей к очагу является станция DART 21416, пробег цунами до которой по вступлению первого гребня составил 30 мин. Ранее существовавшая российская станция DART 21402 ближе всего к очагу цунами. Оперативный прогноз цунами по данным этой станции мог быть получен раньше, чем по данным станции DART 21416.

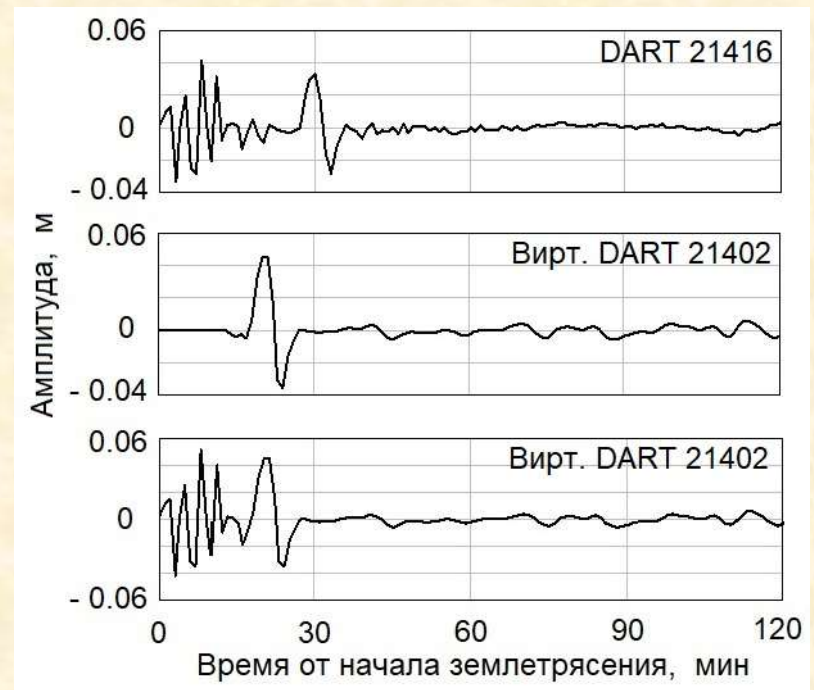
В качестве станции, по данным которой выполнялся прогноз, выбрана виртуальная станция в месте нахождения ранее функционировавшей российской станции DART 21402, положение которой является оптимальным с точки зрения заблаговременности прогноза цунами для побережья северных Курильских островов.



Для моделирования процесса оперативного прогнозирования Онекотанского цунами 2020 г. выполнена реконструкция формы цунами в точке нахождения станции DART 21402 по фактической записи «чистого» цунами (от 21 до 36 мин) станции DART 21416.

К рассчитанным формам цунами добавлены шумовые составляющие записей станции DART 21416 длительностью 21 мин от момента начала землетрясения. При расчете этих составляющих учтено изменение амплитуды волны Рэлея за счет цилиндрической расходимости с расстоянием от эпицентра до точки регистрации.

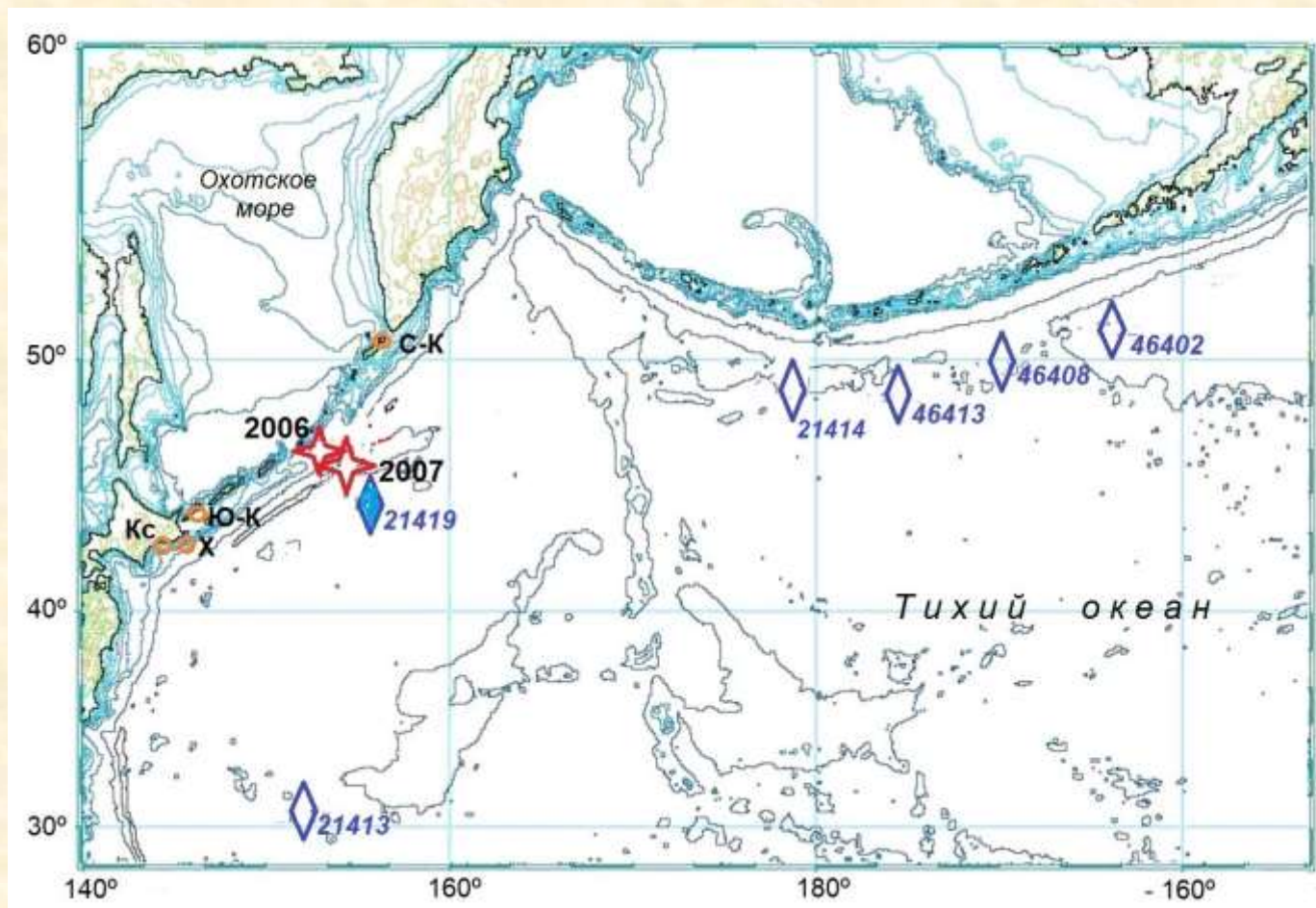
Прогноз цунами 2020 г. на Курильских островах выполнялся по реконструированной записи станции DART 21402 длительностью 28 мин от момента начала землетрясения.



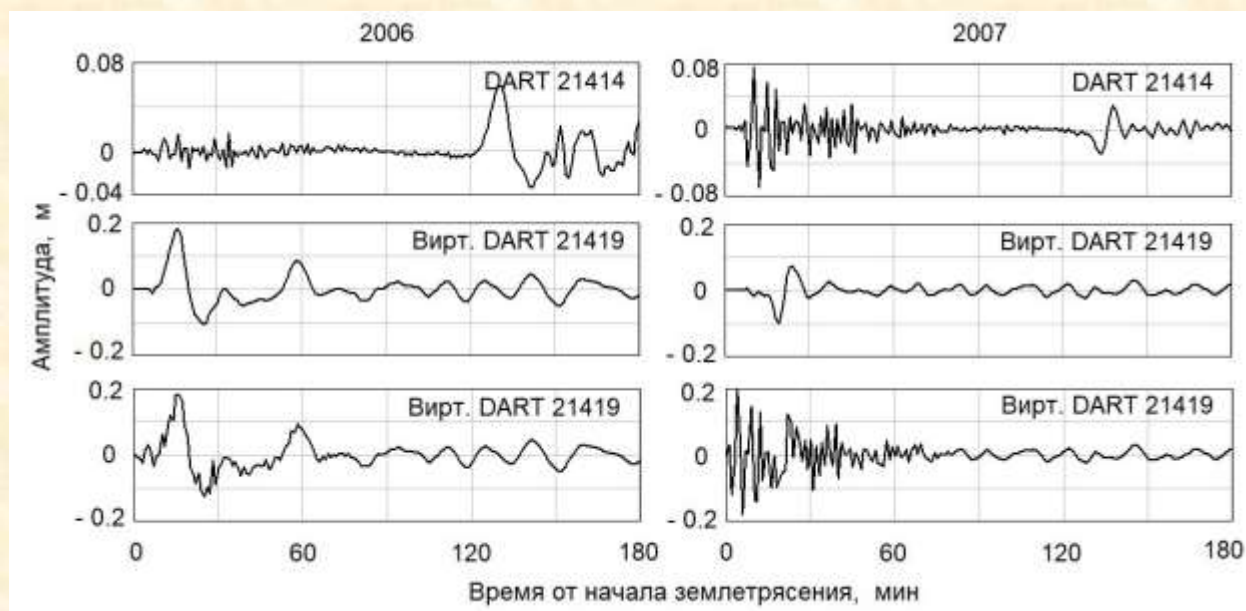
Симуширские цунами 2006 и 2007 гг.

Цунами 2006 и 2007 гг. зарегистрированы несколькими станциями системы DART, ближайшей к очагу является станция DART 21414. Время пробега цунами до этой станции превышает 2 часа, что заведомо не обеспечивает заблаговременность прогноза цунами на Курильских островах.

Оптимальным для южных и северных Курильских островов с точки зрения заблаговременности прогноза цунами, возникающих в районе центральных Курильских островов, является положение станции DART 21419, установленной лишь в 2009 г.



Для решения задачи моделирования процесса оперативного прогнозирования Симуширских цунами 2006 и 2007 гг. выполнена реконструкция формы цунами в точке нахождения в настоящее время станции DART 21419 по фактическим данным станции DART 21414.



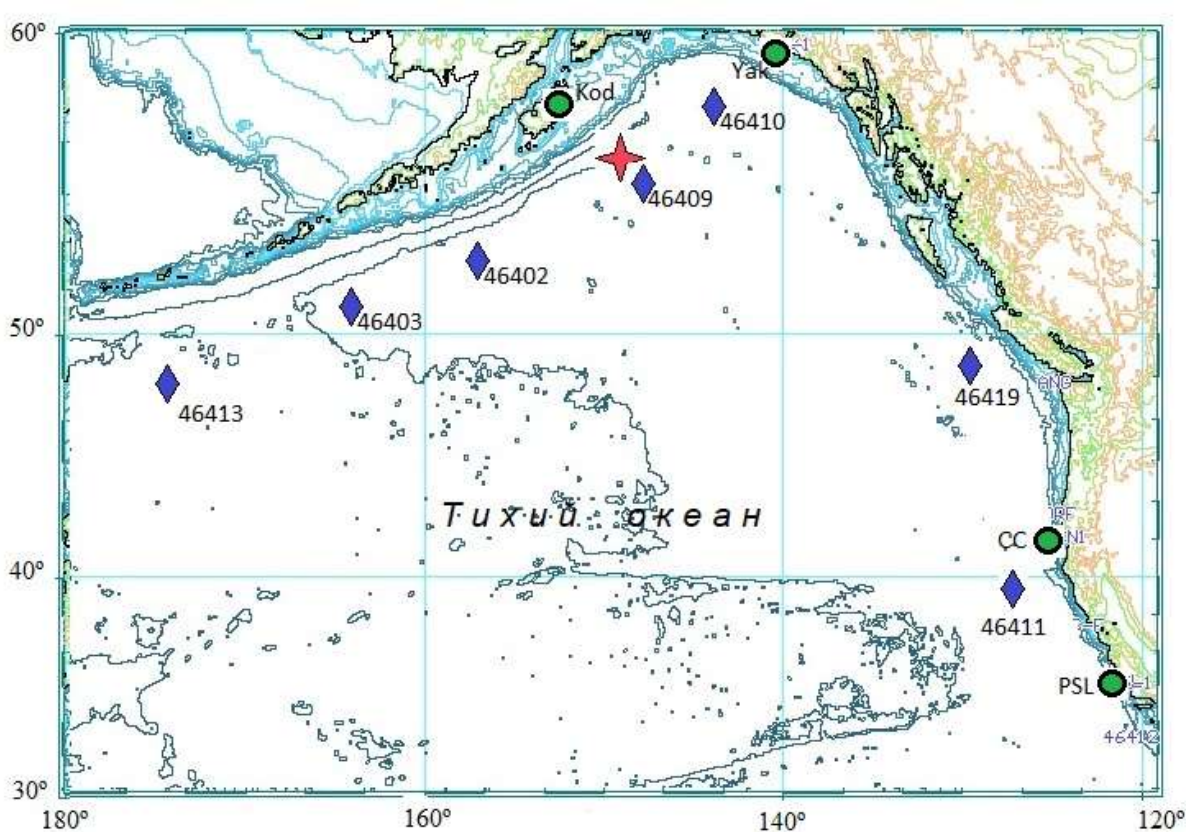
К данным о цунами в этой точке добавлены реконструированные шумы сейсмического происхождения, также зарегистрированные станцией DART 21414.

Прогноз цунами 2006 и 2007 г. на Курильских островах выполнялся по реконструированным записям с шумом станции DART 21419 длительностью 32 мин и 35 мин от момента начала землетрясения, соответственно.

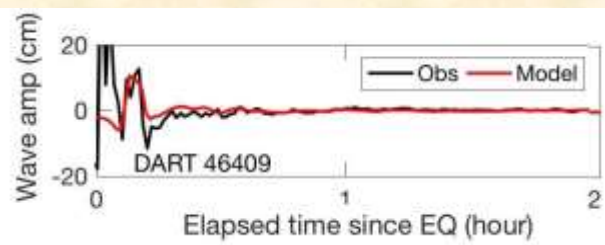
Аляскинское цунами 2018 г.

Аляскинское землетрясение 23.01.2018 с эпицентром в точке с координатами 56°02'46" с. ш., 149°04'23" з. д. вблизи о. Кодьяк вызвало слабое цунами, зарегистрированное рядом станций системы DART, а также множеством береговых мареографов. Цунами не причинило ущерба, но событие является хорошей возможностью, позволяющей лишний раз проверить на фактическом материале справедливость различных моделей прямого расчета и оперативного прогноза цунами.

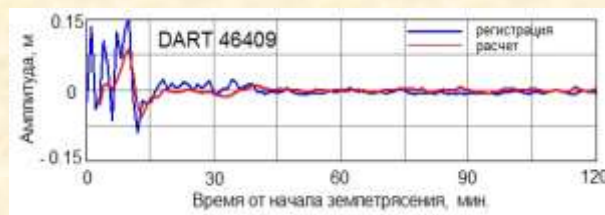
Ближайшая к очагу цунами станция DART 46409 находилась в непосредственной близости к очагу (около 90 км от эпицентра при времени пробега около 10 минут).



Данные станции содержат запись как собственно цунами, так и шум, обусловленный сейсмическими причинами (волнами Рэлея), наложенный на полезный сигнал.

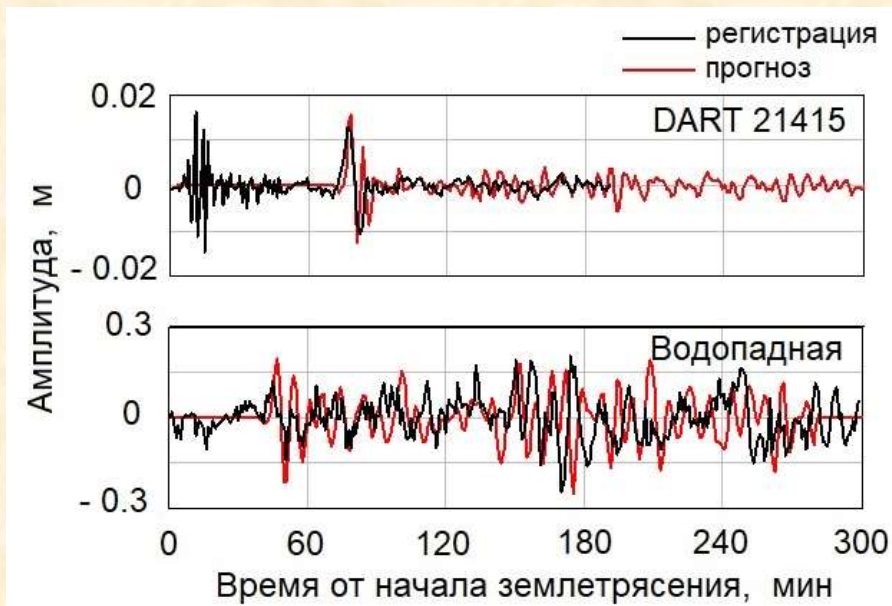
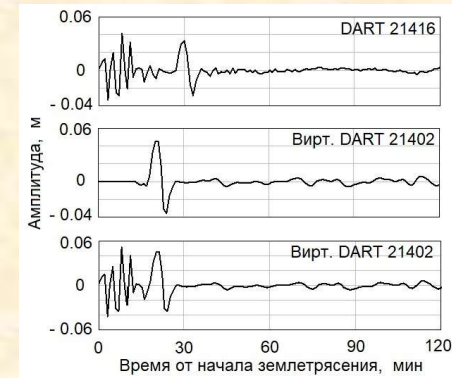
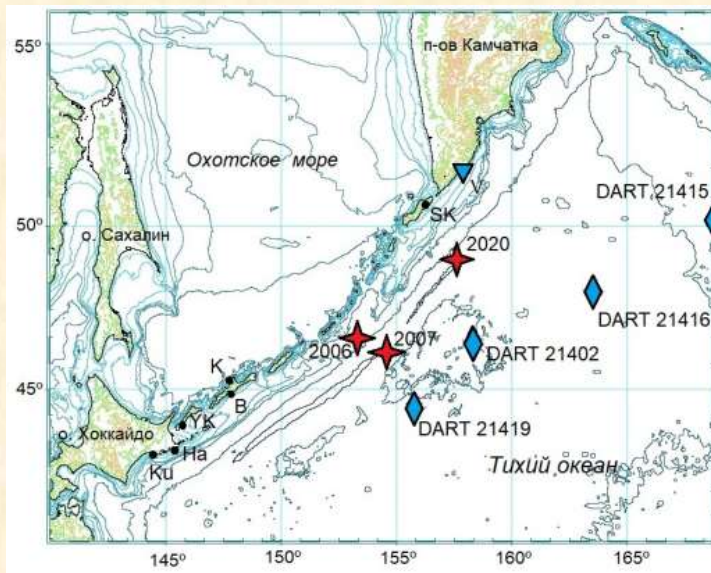


[NOAA Center...Kodiak]



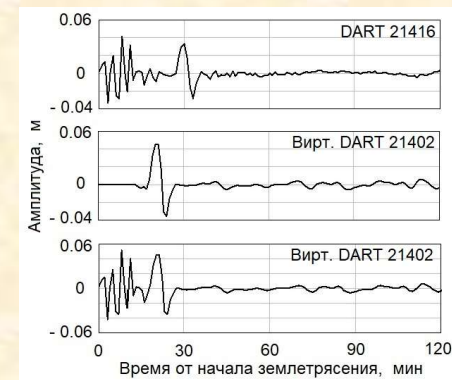
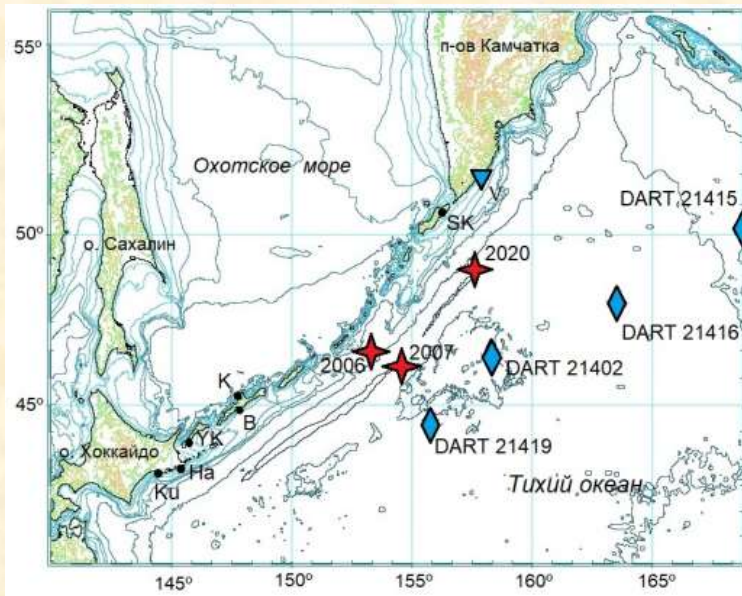
РЕЗУЛЬТАТЫ

Онекотанское цунами 2020 г.



Форма цунами на станции DART 21415 и у побережья Камчатки вблизи поста измерения уровня моря «Водопадная».

Неплохое соответствие между расчетной формой волны вблизи поста измерений уровня моря «Водопадная» и записью, полученной этим постом

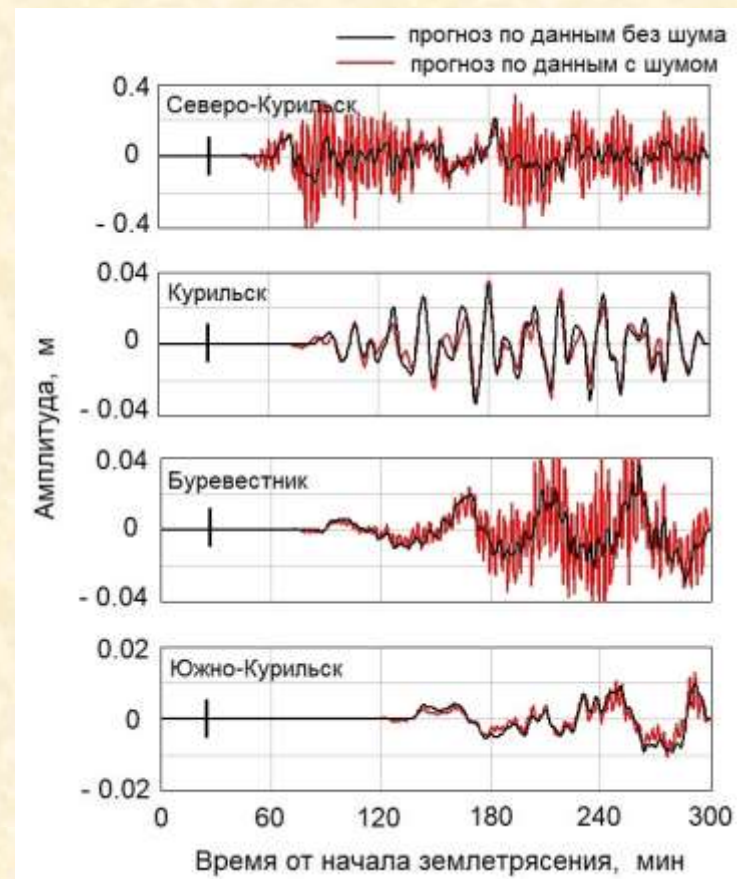


Расчитанные по данным с шумом и без шума формы цунами для Курильска и Южно-Курильска практически не искажены и хорошо совпадают друг с другом.

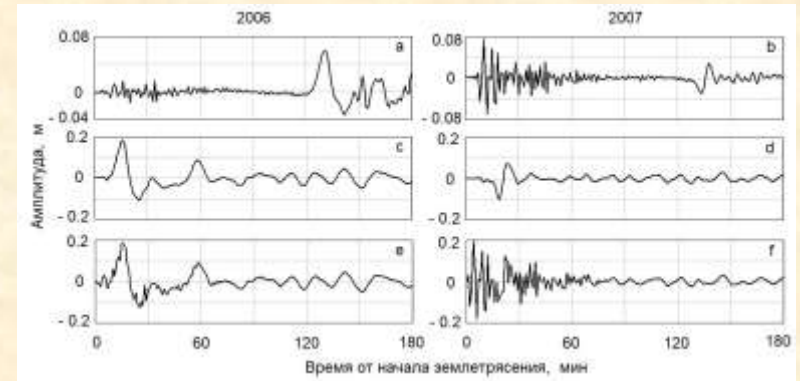
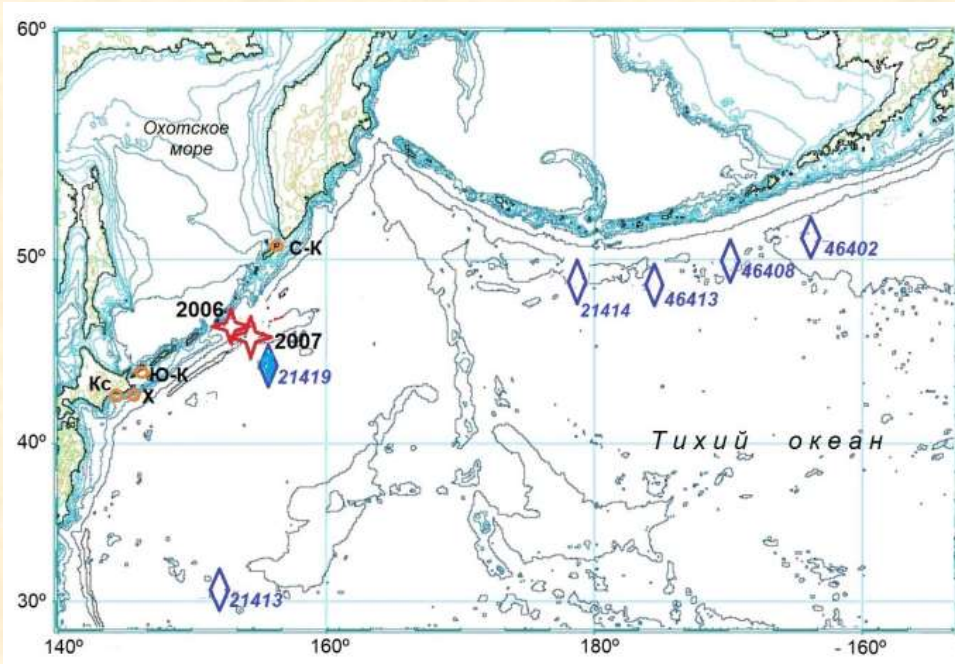
Расчетная форма цунами по данным с шумом вблизи Северо-Курильска содержит высокочастотные колебания, наложенные на волновую форму собственно цунами, рассчитанную по данным без шума. Высокочастотные осцилляции в расчетной форме не имеют отношения к цунами. Реальную форму цунами и степень опасности вполне можно оценить, мысленно осреднив расчетную кривую.

В Северо-Курильске приход первой волны с амплитудой около 15 см ожидается через 69 мин после начала землетрясения. В соответствии с законом Грина на глубине 1 м у берега – 30 см.

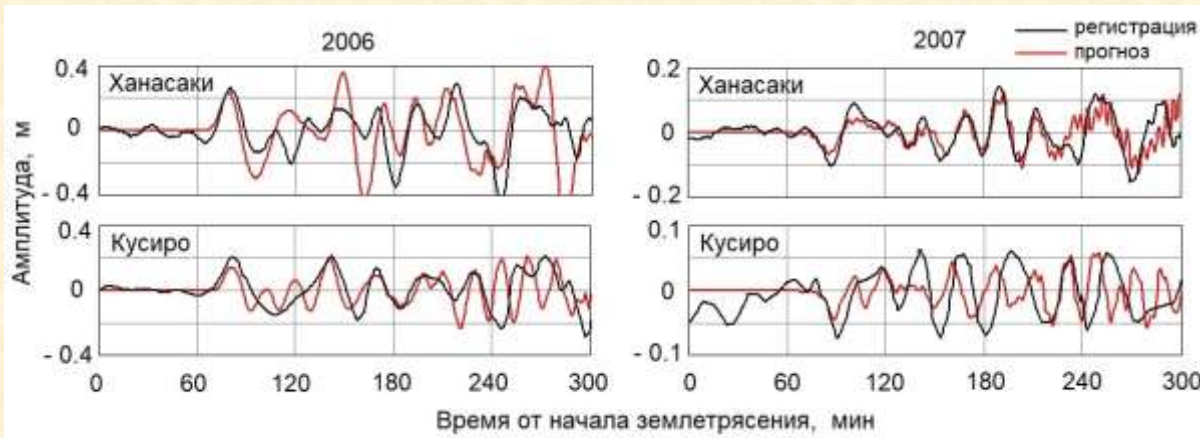
Прогноз мог быть дан сразу после прохождения первого периода цунами через станцию DART 21402, т.е. через 28 мин после начала землетрясения (этот момент отмечен вертикальной чертой).



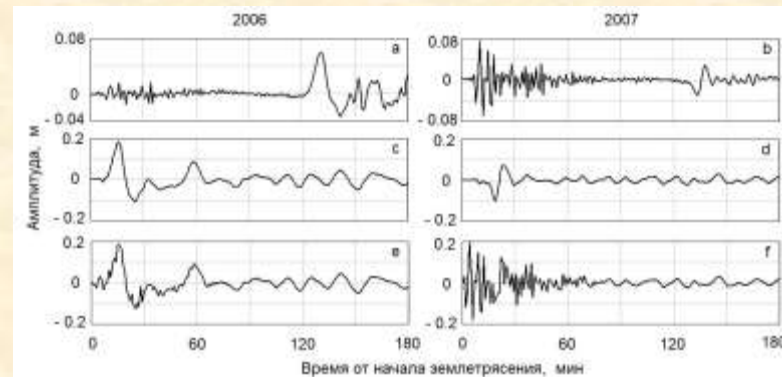
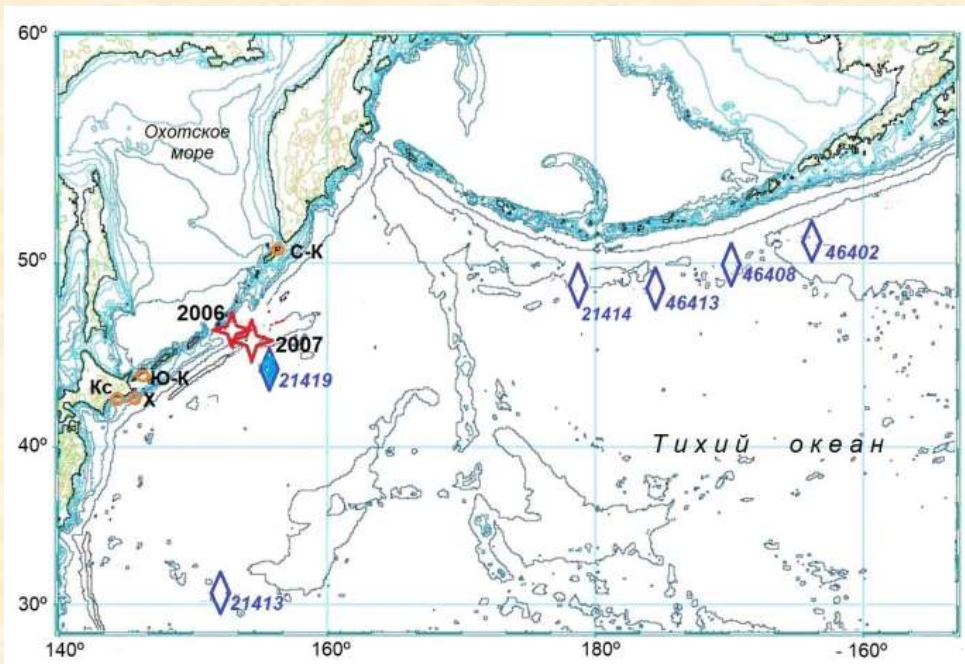
Симуширские цунами 2006 и 2007 гг.



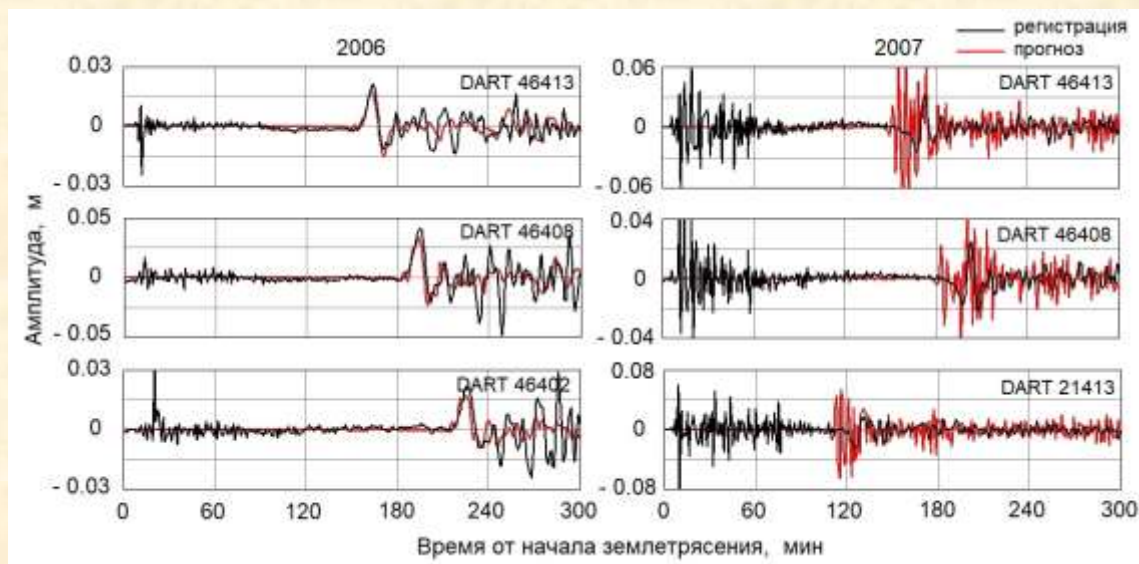
Результаты прогноза цунами 2006 и 2007 гг. по реконструированным данным с шумом станции DART 21419 длительностью 32 и 35 мин от момента начала землетрясения



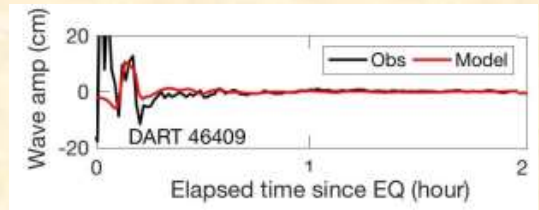
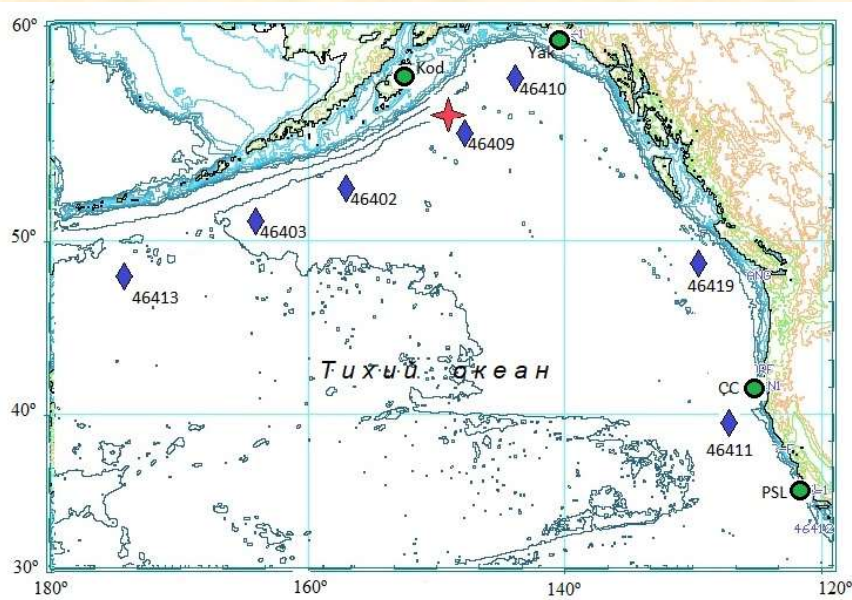
Вопреки опасениям, прогноз для Ханасаки и Кусиро по данным, осложненным шумом сейсмического происхождения, вполне адекватен. Качество прогноза позволяет достоверно оценить опасность ожидаемого цунами и принять решение об объявлении тревоги в этих пунктах.



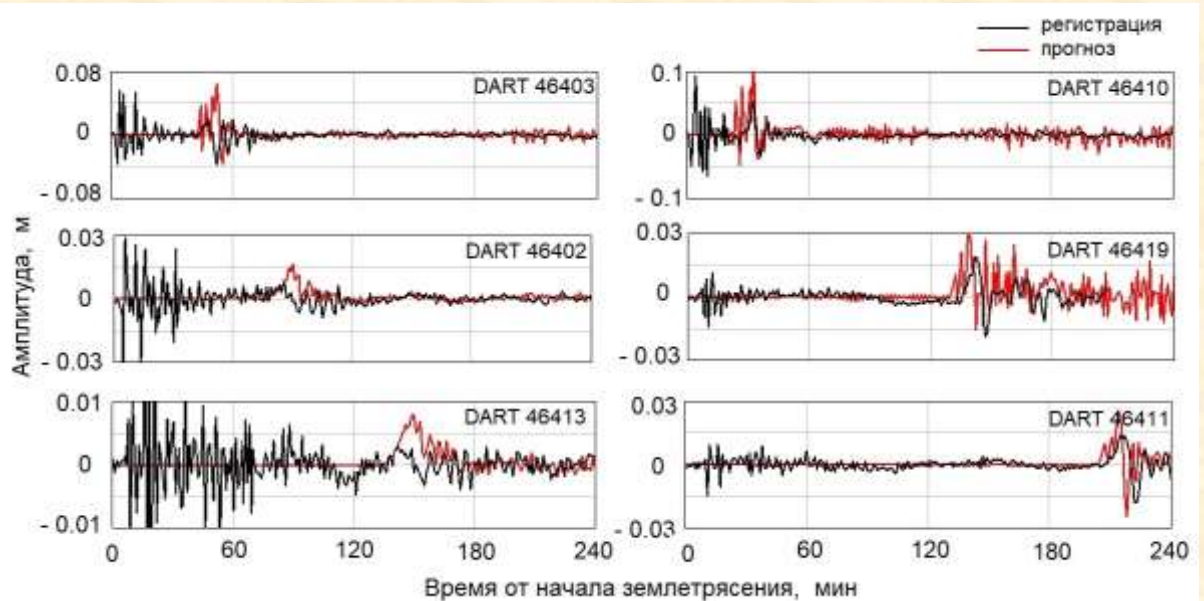
Расчеты по данным с шумом станции DART 21419 выполнены также для точек в океане, в которых находились станции системы DART.



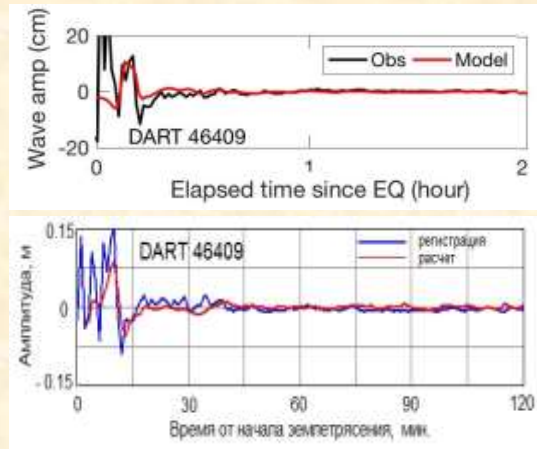
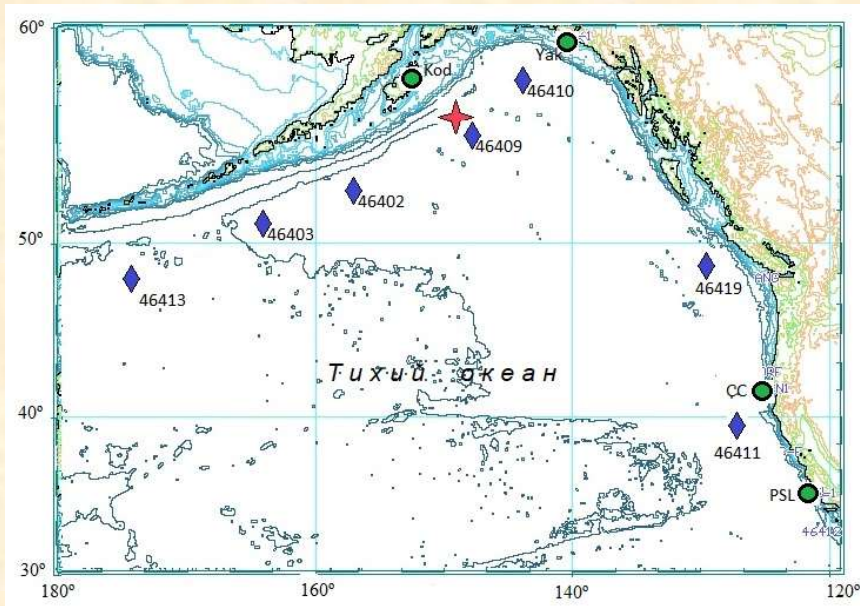
Аляскинское цунами 2018 г.



Прогноз по данным станции DART 46409 длительностью 16 мин от начала землетрясения, включающим записи как собственно цунами, так и сейсмического шума.

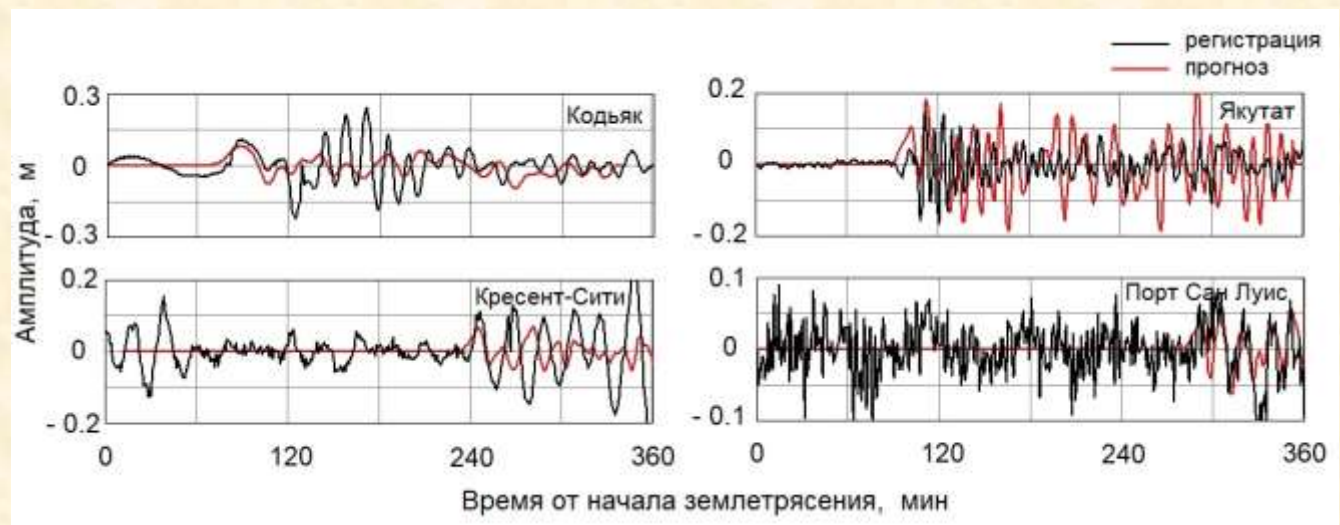


[NOAA Center...Kodiak]



Прогноз для некоторых пунктов северо-восточной части Тихого океана.

Неплохое соответствие головных частей расчетных и фактических волновых форм. Рассчитанные формы цунами позволяют оценить степень опасности цунами в населенных пунктах. Качество расчетов сопоставимо с подобными расчетами в [NOAA Center...Kodiak]



Данные для сравнения – из [Sea Level Station Monitoring Facility]

ОБСУЖДЕНИЕ

Действия службы предупреждения о цунами в Сахалинской области 25.03.2020 в рамках регламента в условиях отсутствия какой-либо информации об ожидаемом цунами являются оправданными. Тем более, что Тихоокеанский Центр предупреждения о цунами и Японское Метеорологическое Агентство предупредили о возможных разрушительных волнах цунами на Курильских островах с амплитудой 1–3 метра.

Однако, ввиду малой амплитуды цунами, объявленная тревога оказалась ложной как по прогнозу сахалинской, так по прогнозам зарубежных служб. Необоснованным является продление тревоги цунами уже после прихода первых волн малой амплитуды.

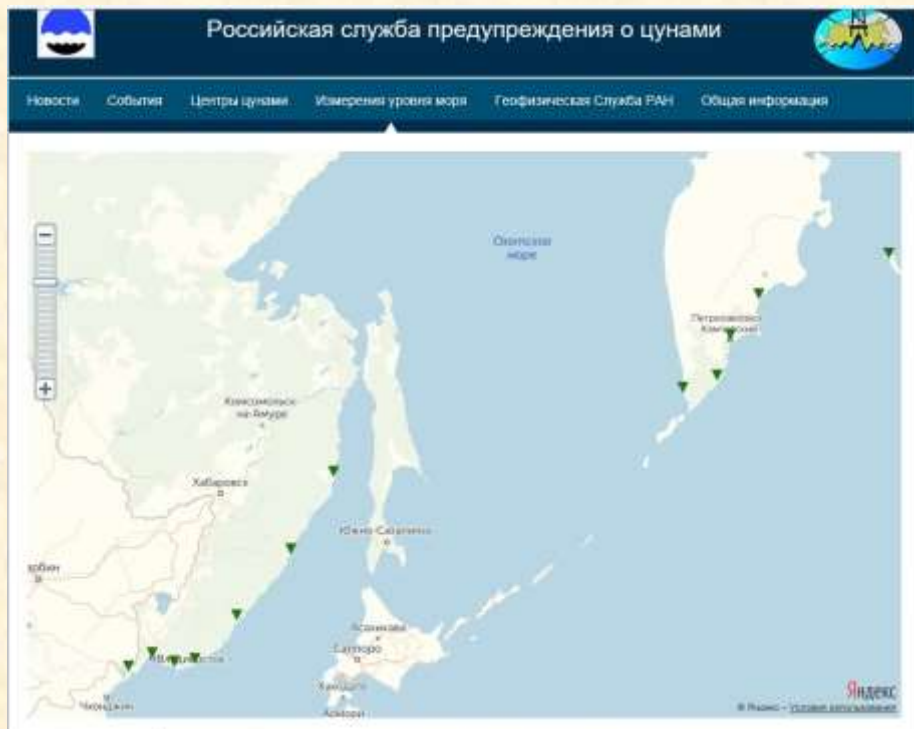
И сахалинская служба цунами, и Тихоокеанский Центр действовали на основании магнитудно-географического способа, разработанного в середине прошлого века, который с корректировками в настоящее время является основным способом предупреждения о цунами. В силу статистического характера магнитудного способа с момента создания до 2009 г. службы цунами подали большое количество (75 % от общего числа тревог) ложных тревог, при этом пропустив некоторое количество цунами [[Gusiakov, 2011](#)]. Тревога объявляется на побережьях большой протяженности без информации об ожидаемых высотах волн.

В США гидрофизический способ SIFT (Short-term Inundation Forecasting for Tsunamis – краткосрочный прогноз затопления от цунами) по информации о цунами в океане (система DART) может давать заблаговременную численную оценку амплитуды, времени пробега, других свойств цунами [[NOAA Center...DART](#)] для северо-западного побережья США, побережья Аляски и Алеутских островов. Для северо-запада Тихого океана, включая побережье Камчатки и Курильских островов, прогноз Тихоокеанским Центром предупреждения о цунами дается на основе магнитудного критерия.

Японское Метеорологическое Агентство, ответственное за прогноз цунами на северо-западе Тихого океана, действует в соответствии с новым регламентом [[UNESCO/IOC](#)]. При выработке прогноза используется база данных о высотах цунами в большом количестве точек в океане. В частности, для Курильских островов одна из точек находится в нескольких километрах к северу от о. Парамушир, другая – в нескольких километрах к востоку от северной оконечности о. Уруп. База данных основана на результатах предварительных расчетов высот цунами от сейсмических источников с наиболее вероятным механизмом землетрясения и различными магнитудами (8.5, 8.0, 7.5 и 7.0), а также глубинами гипоцентров (0, 20, 40, ..., 100 км). Источники достаточно плотно покрывают области вероятных цунамигенных землетрясений. Приблизительно оцениваются максимальные амплитуды волн на некотором расстоянии от побережья и вблизи берега на глубинах 1 м в соответствии с известным законом Грина вне зависимости от амплитуды набегающей волны. При этом принятие решения об объявлении тревоги цунами возлагается на региональные центры.

Все три прогноза цунами 25.03.2020, основанные на магнитудном критерии, а прогноз ЯМА, по сути, также опирается на оценку магнитуды, оказались неэффективными: при прогнозируемых 1–3 м фактическая высота составила около 0.5 м.

Прогноз ни одной из перечисленных выше служб не отвечает определению прогноза цунами, данному МОК ЮНЕСКО [[Intergovernmental Oceanographic Commission](#)], из-за отсутствия детальной информации об ожидаемом цунами: не определяется ни структура волны, ни длительность тревоги.



К сожалению, в России гидрофизическая подсистема службы предупреждения о цунами не выполняет прогноз по гидрофизическим данным. Россия является едва ли не единственной страной бассейна Тихого океана, не имеющей глубоководных станций измерения уровня океана, позволяющих осуществлять оперативный прогноз цунами.

Более того, на Курильских островах, наиболее подверженных воздействию цунами, отсутствует регулярная регистрация морского волнения. Посты установлены и работают в Камчатском, Хабаровском и Приморском краях, но отсутствуют на Курилах.

Назрела необходимость разработки российских глубоководных станций измерения уровня океана для раннего и достоверного обнаружения и оперативного прогноза цунами [[Решение VII Всероссийской научно-технической конференций «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», 2019](#)].

Примененный в работе способ оперативного прогноза цунами, требующий сейсмологическую информацию только о времени начала и координатах эпицентра землетрясения, может давать заблаговременный адекватный прогноз.

Даже при наличии в исходных данных шумов сейсмического происхождения расчетная форма цунами позволяет оценивать степень опасности с точностью, достаточной для принятия решения об объявлении тревоги цунами. Присутствие высокочастотных колебаний в расчетной форме ожидаемого цунами не влияет на адекватность оценки опасности. Результаты расчетов хорошо совпадают с данными регистрации цунами прибрежными мареографами и станциями системы DART в океане. Качество прогноза, выполняемого предложенным способом оперативного прогноза цунами, сопоставимо с качеством расчетов способом SIFT.

Следует напомнить, что в работе применяется способ, т.е. действующие алгоритмы расчетов, но не программный комплекс, готовый к применению в практической работе. При реализации способа в программном комплексе возможен дальнейший расчет цунами вплоть до береговой черты, если позволяют условия оперативного режима, а также может и должна быть применена фильтрация от высокочастотных выбросов, должен быть учтен приливной режим.

ВЫВОДЫ

Наличие неустранимого шума в данных близких к очагу станций приводит к появлению в результатах расчетов высокочастотных колебаний, наложенных на форму собственно цунами. Вопреки предположению, что наличие шумов сейсмического происхождения может стать препятствием для получения адекватного прогноза, реалистичная оценка формы ожидаемого цунами вполне возможна. Качество расчета достаточно для заблаговременного принятия службой предупреждения решения об объявлении тревоги в том пункте, в котором цунами представляет реальную угрозу. Результат полностью соответствует определению прогноза цунами МОК ЮНЕСКО.

Предложенный способ оперативного прогноза цунами при реализации его в едином программном комплексе и при наличии информации о цунами в океане может служить инструментом, который позволит повысить качество оперативного предупреждения о цунами, существенно уменьшив количество ложных тревог цунами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Решение VII Всероссийской научно-технической конференций «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», **2019**. URL: <http://emsd.ru/conf2019lib/pdf/solution.pdf>. (дата обращения: 6.11.2020)
2. Gusiakov V.K. **2011**. Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data. *Pure Appl. Geophys.*, 168(11): 2033–2041. doi:10.1007/s00024-011-0286-2
3. Intergovernmental Oceanographic Commission. Third Edition. Tsunami Glossary, **2016**. Paris, UNESCO. IOC Technical Series, 85. (English, French, Spanish, Arabic, Chinese) (IOC/2008/TS/85 rev.2) http://legacy.ioc-unesco.org/index.php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=10442 (дата обращения: 6.11.2020)
4. Korolev Yu. P. **2011**. An Approximate Method of Short-term Tsunami Forecast and the Hindcasting of Some Recent Events. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11: 3081–3091. doi:10.5194/nhess-11-3081-2011
5. NOAA Center for Tsunami Research: DART. URL: <http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart> (accessed 6.11.2020)
6. NOAA Center for Tsunami Research: Kodiak, Alaska Tsunami, January 23, 2018 Main Event Page. URL: <https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123> (дата обращения: 6.11.2020)
7. UNESCO/IOC. **2019**. *Users' Guide for the Northwest Pacific Tsunami Advisory Center (NWPTAC): Enhanced Products for the Pacific Tsunami Warning System*. IOC Technical Series No 142. Paris, UNESCO URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000366546?posInSet=1&queryId=d1288da0-390e-47b1-8a51-a529b04abf93> (дата обращения: 6.11.2020)
8. National Data Buoy Center. URL: <https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml> (дата обращения: 6.11.2020)
9. Sea Level Station Monitoring Facility. URL: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/list.php?showall=a&output=general&order=location&dir=asc> (дата обращения: 6.11.2020)



Спасибо за внимание!