

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ВЫСОТОЙ ЦУНАМИ И ПАРАМЕТРАМИ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ГРУНТА ПО ДАННЫМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЯПОНИИ

Петухин А.Г.¹, Гусев А.А.^{2,3}, Чебров В.Н.³

¹*Geo-Research Institute, Осака, anatolyp@geor.or.jp*

²*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

³*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г.Петропавловск-Камчатский*

Введение

В работах Соловьева С.Л. и Поплавской Л.Н. 1980-1982гг. [1] была проведена корреляция и получена выраженная связь высот цунами с макросейсмическим баллом. На этой основе была сделана рекомендация объявлять тревогу немедленно примерно при 6 и более баллах. В работе Чеброва и др., 2011 [2], было отмечено, что для высоты цунами 1м тревога должна объявляться при пиковой скорости 11 см/с, что соответствует 6.3 балла по шкале MSK-64. Конечной целью данной работы является проверка и уточнение алгоритма прогноза цунами после сильного землетрясения на основе обильных исторических и инструментальных данных Японии. Исходный материал – синхронные данные по высотам цунами и параметрам сильных движений, как наблюдаемых непосредственно, так и пересчитанных из макросейсмической интенсивности с использованием корреляционных зависимостей. Алгоритм принятия решения основан на корреляции между высотой цунами и параметрами интенсивности сильных движений (напр. пиковые скорости, ускорения). Такие корреляции могут быть построены по наблюдаемым данным.

О проблемах регрессии данных цунами

При регрессии данных цунами возникает несколько проблем.

1. Неравномерное распределение количества данных по землетрясениям. Количество данных по последним землетрясениям, таким как Токати-оки 2003 или Тохоку 2011, в несколько раз превышает данные остальных землетрясений. Регрессия всех данных без учета весов приводит к смещению оценок в сторону параметров отдельных землетрясений, среди которых есть землетрясение с аномально большим цунами.

2. С другой стороны, землетрясения, при которых цунами было маленьким, или отсутствовало (включая цунами ниже порога детектируемости), вообще не попали в выборку, несмотря на значительные пиковые амплитуды сильных движений. Неучет таких землетрясений при построении прогнозных зависимостей приводит к большому количеству ложных тревог.

3. Предлагаемая схема прогноза [2] предполагает наблюдение сильных движений в пункте и оценку вероятности цунами в том же пункте по пиковым амплитудам наблюдаемых сильных движений. Исходя из этого, будет разумным строить корреляционную зависимость по данным одного и того же пункта. Но для этого нужно определить пункты с обилием данных.

4. При построении эмпирических зависимостей методом регрессии используются наблюдаемые данные. Пропуски в данных обсуждаются в рамках проблемы полноты данных, но при этом ограничиваются случаями, когда данные не были получены в виду недостаточности наблюдений. В этой работе мы рассмотрим случай, когда данные не получены ввиду отсутствия самого явления (цунами - как волны большой амплитуды). Конечной целью данной работы является прогноз прихода цунами и его высоты по результатам наблюдений сильных движений в пункте. Цунами возникает не при всех землетрясениях, при которых наблюдаются достаточно сильные колебания, и такие землетрясения естественно не попадают в статистику пар. Мы попытаемся применить альтернативный подход, когда таким землетрясениям приписывается «нулевое» цунами, и использовать их в регрессии. Такая схема регрессии разработана в финансовой статистике и называется моделью Тобит [10, 11].

Подбор источников и составление выборки данных

При сборе данных исторических землетрясений в основном использовались макросейсмический каталог Усами [3] и мировая база данных по цунами [4]. В каталоге Усами представлены землетрясения до 1867г. включительно. Для землетрясений после 1867г. использовались следующие источники: отчеты полевых обследований, научные публикации и базы данных по сильным движениям, цунами и балльности, а также оригинальные данные по отдельным землетрясениям. Подавляющая часть данных по цунами и часть данных по сильным движениям уже сведены в доступные базы данных (см. [4, 5, 6]). Данные по сильным движениям до 1996г. и данные по балльности приходилось собирать из разрозненных источников. Наиболее информативными и достоверными источниками оказались отчеты полевых обследований последствий землетрясений, а также отчеты экспертных советов при Центральном Совете по Предотвращению Стихийных Бедствий Японии. Большинство данных представлены в виде графиков и карт, которые приходилось оцифровывать. Всего обработано 38 землетрясений по данным 59 источников, собрано 3840 высот цунами, 2309 значений балльности и 536 записей сильных движений.

Для каждого землетрясения проведен анализ данных на непротиворечивость. Для этого отобранные данные наносились на карту. Точки, не вписывающиеся в средний тренд, проверялись, и при отсутствии веских оснований выбраковывались.

Записи сильных движений пересчитаны в виде скоростей и смещений в достоверной полосе частот 0.1-9Гц для старых записей до 1987г., и 0.1-20Гц для новых записей. Затем рассчитывались пиковые ускорения A_{max} , скорости V_{max} и смещения D_{max} . Эти данные, а также все первичные данные по цунами и балльности сведены в базу данных.

На следующем этапе для каждого пункта регистрации цунами были подобраны пункты наблюдения балльности и сильных движений. По возможности отбирались данные для одного и того же пункта, либо для разных пунктов, но разнесенных на расстояние не более 30км. На этом этапе данные по балльности переведены из шкалы ЯМА в шкалу МСК и затем в пиковые скорости (ускорения) по эмпирическим зависимостям [7], и затем объединены с инструментально наблюдаемыми пиковыми амплитудами. Географическое распределение данных представлено на Рис. 1. На этом этапе отобрано 824 пункта.

На последнем этапе были отобраны пункты обильных данных с числом наблюдений 20 и более (предварительно, к собранным данным были добавлены данные 217 пунктов из обновленного каталога Поплавского [8]). Для этого весь район наблюдений был разбит по сетке на квадраты 30х30км и были выбраны квадраты с числом наблюдений 20 и более. Эти данные затем присвоены пунктам наиболее обильных наблюдений внутри каждого квадрата. Таких пунктов оказалось 8.

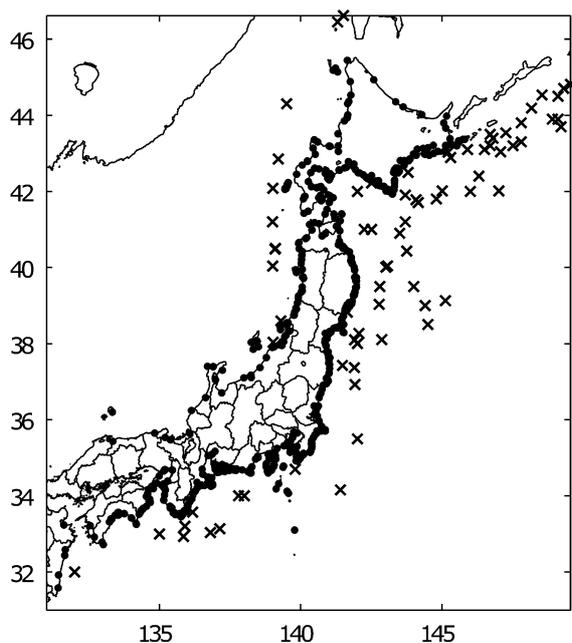


Рис. 1. Географическое распределение отобранных данных (точки) и эпицентры землетрясений (косой крест).

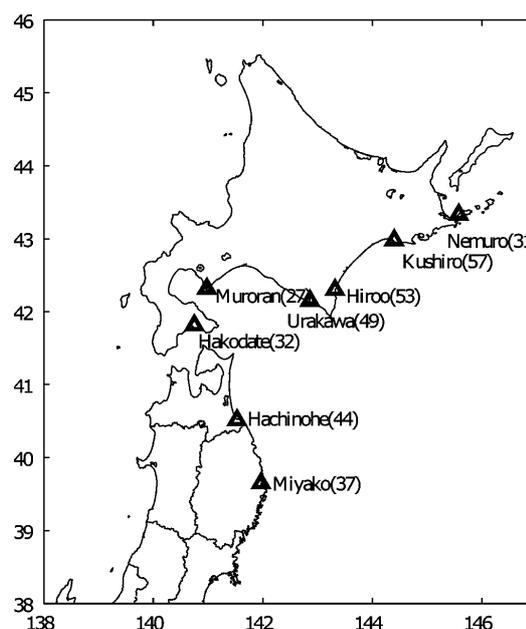


Рис. 2. Отобранные пункты обильных данных с числом наблюдений 20 и более.

Затем для выбранных 8-ми пунктов выборка данных была расширена. Из каталога JMA [9] выбраны все данные балльности начиная с 1926г. Из базы данных NGDC [4] выбраны все данные по высотам цунами в этих же пунктах и составлены пары данных балл-цунами. Из полученной выборки исключены уже обработанные землетрясения. Расположение пунктов и количество данных в каждом пункте показано на Рис. 2.

Регрессия Тобит цензурированных данных.

Рис. 3 показывает численный пример использования регрессионной модели Тобит. Для этого примера сначала сгенерировали случайный набор данных в диапазоне и с учетом разброса реальных данных (см. Рис. 4). Затем провели цензурирование: данным ниже порога цензурирования H_{min} присвоено значение равное порогу H_{min} ; здесь приняли $H_{min} = 3\text{см/с}$. На рисунке знаком «+» показаны исходные модельные данные, «x» – цензурированные данные, «*» соответственно исходные данные выше порога цензурирования («наблюдаемые» данные); линия – результаты регрессии по модели Тобит (пунктир) и по стандартной модели (сплошная линия). При регрессии по стандартной модели также, как и при регрессии наблюдаемых данных, цензурированные данные были отброшены. Этот пример наглядно демонстрирует, что средний тренд исходных данных может быть восстановлен по цензурированным данным. С другой стороны, использование стандартной регрессии с исключением цензурированных данных приводит к заметным искажениям.

Для применения регрессии Тобит из каталога JMA [9] выбраны все данные балльности цунамигенных землетрясений начиная с 1926г., не вошедшие в предыдущую выборку. Этим данным приписана высота цунами 0.03м. Количество данных для каждого пункта выросло почти в 2 раза. Для полученной выборки была проведена регрессия Тобит как отдельно по пунктам, так и для всех пунктов суммарно, см Рис.5. Цензурированные данные на рисунках несколько размыты для ясности: кластеры точек на уровне 0.03м соответствуют цензурированным данным.

За исключением 2-3 пунктов, линии регрессии ложатся кучно. Это позволяет использовать оценки среднего тренда и разброса для варианта всех пунктов суммарно в качестве прогнозной оценки для отдельных пунктов. Толстая пунктирная линия на Рис. 5 показывает прогнозируемое среднее + разброс (верхний 16% квантиль). Для сравнения тонкими линиями показан результат стандартной регрессии без учета цензурированных данных.

Результаты регрессий сведены в Табл. 1. Приведены следующие параметры: (1) уровень среднего ожидаемого цунами H при наблюдаемом $V_{max} = 10\text{см/с}$ (соответствует 6 баллам МСК), и его нижний и верхний 16% квантили; (2) наклон регрессии b и ошибка оценки наклона; (3) разброс остатков в логарифмических единицах σ .

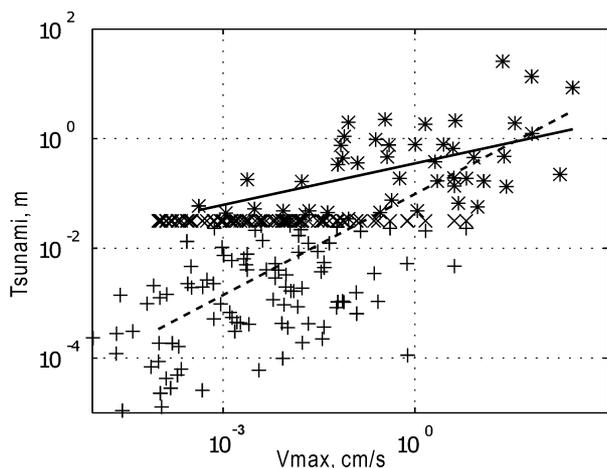


Рис. 3. Численный пример модели Тобит. «+» – исходные данные, «x» – цензурированные данные с порогом 3 см, сплошная линия – результат стандартной регрессии, пунктирная линия – результат модели Тобит.

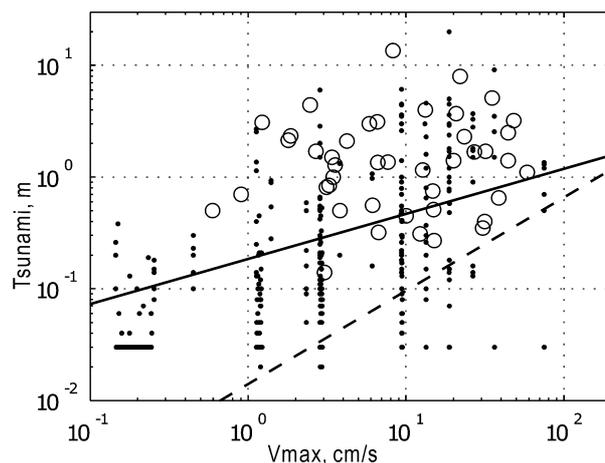


Рис. 4. Наблюдаемые данные (кружки – непосредственные измерения V_{max} , точки – V_{max} пересчитанные из балла), результат регрессии Тобит (пунктир) и стандартной регрессии (сплошная линия).

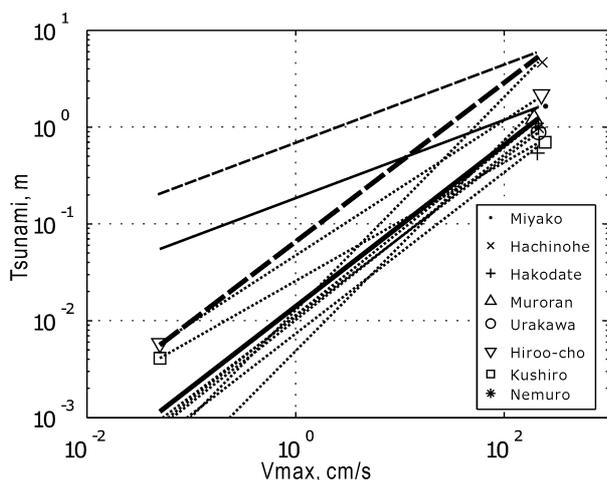


Рис. 5. Сводка результатов регрессии Тобит по пунктам в отдельности (точечные линии) и для всех

данных во всех пунктах суммарно (толстая сплошная линия). Толстая пунктирная линия показывает среднее+стандартное отклонение. Тонкие линии соответственно среднее и среднее+стандартное отклонение для стандартной регрессии.

Табл. 1. Сводка параметров регрессий.

	$H(10\text{cm/s})$, см	b	σ лог.ед.
Стандартная регрессия	47_{38}^{58}	0.40 ± 0.04	0.56
Модель Тобит	$9.6_{9.1}^{10.2}$	0.84 ± 0.02	0.67

Сравнение результатов регрессий и оценка прогнозных зависимостей

По результатам регрессии построены прогнозны зависимости для среднего и среднего + стандартное отклонение, для двух типов регрессии (см. Табл. 2 и 3). В сочетании с предположением нормальности распределения обе таблицы дают основу для построения вероятностных оценок прихода цунами заданного уровня в зависимости от наблюдаемого уровня V_{max} .

Отличие результатов 2-х типов регрессии незначительно в области больших амплитуд и существенно в области малых амплитуд которая является объектом данного исследования. Это естественный результат, отражающий тот факт, что в области больших амплитуд мы имеем полный набор данных, а в области малых амплитуд данные естественным образом цензурированы отсутствием цунами у части землетрясений (нецунамигенные землетрясения). В реальной прогнозной ситуации при наблюдении землетрясения по сильным движениям мы не можем сказать заранее, будет ли это землетрясение цунамигенным или нет. Поэтому нецунамигенные землетрясения тоже должны быть включены в регрессионную модель и модель Тобит позволила это сделать. Важное преимущество: использование модели Тобит позволяет уменьшить количество ложных тревог.

Обратная интерполяция данных Табл. 3 дает уровень тревоги для цунами 100см: 1.6см/с в случае стандартной регрессии, и 18см/с при использовании модели Тобит. Первое значение приблизительно соответствует 4 баллам МСК, а второе – 7 баллам МСК. Расхождение на первый взгляд сильное, но смысл цифр несколько отличается т.к. первая модель учитывает только цунамигенные землетрясения, а вторая модель все землетрясения. Статистика цунамигенных землетрясений показывает, что процент землетрясений, сопровождавшихся цунами в данном пункте, мал или очень мал (для цунами более 0.5м) при интенсивности сотрясений менее 7 баллов по МСК, и приближается к 100% при сотрясениях 7 и более баллов МСК. Результаты регрессии Тобит отражают этот факт.

В работе Соловьева и Поплавской [1] определено что при наблюдении сотрясений 6.2 балла МСК и более следует ожидать прихода цунами с вероятностью 50% и более, При этом высота цунами не определяется, подразумевается что это могут быть «сантиметровые» цунами тоже. В данной работе методом регрессии сделана оценка уровня тревоги для цунами представляющего реальную угрозу: 1.0м и более. В отличие от работы [1] при этом изначально подразумевается что произошло цунамигенное землетрясение.

Табл. 2. Прогнозные зависимости высоты цунами от пиковых скоростей V_{max} : средние величины.

V_{max} , см\с	H , см	
	Стандартная регр.	Тобит
3	30	4
10	50	10
30	75	30
100	140	80
300	190	220

Табл. 3. Прогнозные зависимости высоты цунами от пиковых скоростей V_{max} : среднее + стандартное отклонение.

V_{max} , см\с	$H + \sigma$, см	
	Стандартная регр.	Тобит
1	80	7
10	200	45
100	550	310

Заключение

Собраны наблюдения высот цунами и балльности исторических и инструментальных землетрясений Японии. Для землетрясений инструментального периода дополнительно собраны записи сильных движений грунта. Из полученного набора данных выделено 8 пунктов обильных наблюдений. Для этих пунктов изучена корреляция высот цунами и пиковых скоростей V_{max} . Для этого использована стандартная регрессия для наблюдаемых данных и регрессионная модель Тобит для набора данных, пополненных цензурированными данными цунами.

Получены прогнозные зависимости для среднего и для среднее+стандартное отклонения, для двух типов регрессии. В сочетании с предположением нормальности распределения прогнозные зависимости дают основу для построения вероятностных оценок прихода цунами заданного уровня в зависимости от наблюдаемого уровня V_{max} .

Список литературы

1. Соловьев С.Л., Поплавская Л.Н. Оценка цунамиопасности близкого землетрясения. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982, №11. С.87-91.
2. Чебров В.Н., Гусев А.А., Чебров Д.В. Методика, алгоритмы и программное обеспечение для подачи тревоги цунами до завершения расчетов магнитуды и координат гипоцентра землетрясения, III научно-техническая конференция Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России, г. Петропавловск-Камчатский, 9-15 октября 2011 г., Сборник докладов.
3. Усами Т., 2010, Распределение интенсивностей и контурные карты балльности исторических землетрясений Японии (исправленное и дополненное издание), Японская Электрическая Ассоциация, 2010, 745с. (in Japanese)
4. National Geophysical Data Center / World Data Center (NGDC/WDC) Global Historical Tsunami Database, Boulder, CO, USA. (Available at http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml)
5. Japan Meteorological Agency (JMA), Strong Motion Database (in Japanese).
6. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED), Strong-motion Seismograph Networks (KNET, KiK-net), <http://www.kik.bosai.go.jp/> (in English)
7. Гусев А.А., Шумилина Л.С. Моделирование связи балл-магнитуда-расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге. Вулканология и сейсмология. 1999, №4-5, с.29-40.
8. Поплавский, А.А., 2007, Каталог ощутимых землетрясений, сопровождавшихся локальными проявлениями цунами, 1737-1997гг.
9. JMA, 2008, The Annual Seismological Bulletin of Japan for 2007, Japan Meteorological Agency, DVD-ROM (in Japanese).
10. Tobin, J., 1958, Estimation of relationships for limited dependent variables, *Econometrica* (The Econometric Society) 26 (1): 24–36, doi:10.2307/1907382
11. LeSage J.P., ECONOMETRICS: MATLAB toolbox of econometrics functions. Boston College, Department of Economics.