Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Russia Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Russia Московский физико-технический институт (МФТИ), Russia Engineering Center Mitigation Natural Catastrophes Faculty of Engineering. Antofagasta, Chile.

Природа аномального механизма сейсмического источника катастрофического цунамигенного землетрясения на северо-западе Чили 9 мая 1877 г.

Мазова Р.Х., Лобковский Л.И., Мизонов С.А., Баранова Н.А., Jorge Van Den Bosch F. Чили входит в состав Огненного кольца (*Ring of Fire*), обрамляющего Тихий океан, получившего такое название благодаря частым извержениям многочисленных вулканов и землетрясениям.



Более 80% цунами имеют <u>сейсмический</u> <u>характер</u>, и возникают на периферии Тихого океана у побережий Чили, Перу, Алеутских островов, Аляски, Курило-Камчатской гряды, Японских островов, Индонезии и Океании.

Северный прибрежный район Чили и южный Перу являются одним из активных в мире районов из-за происходящих катастрофических сейсмических событий.



Движение тектонических плит в районе Чили

Вдоль всего побережья Чили тянется так называемый «Чилийский желоб» глубиной в среднем 5000 м. В самой глубокой точке, к северу от порта Антофагаста, глубина падает до 8 066 м. В этом месте находится стык тектонических плит: со стороны Тихого океана это плита Наска, а с материковой стороны – Южно-Американская плита. Абсолютная скорость движение плиты Наска составляет 3,7 см / год на восток. Особенность реализации катастрофических землетрясений в этой области связана с наличием и близостью сектора контакта между этими тектоническими плитами. История сильных землетрясений, начинается в 1444, 1543, 1615, 1768, 1877. Среднее землетрясение большой магнитуды происходит в этой области каждые 108 лет. Однако, такого сильного землетрясения как в 1877 больше не наблюдалось, 1 4 3 прошло года. ТЯ



В XXI веке в 2007 году произошло землетрясение с магнитудой 7,7 в окрестностях Тосоріlla, а в 2014 году - землетрясение Pisagua с магнитудой 8,2. Есть предположение, что часть накопленной энергии была высвобождена, но еще большей ее части предстоит высвободиться (Gonzales et al. to 2019).



КОГДА СЛЕДУЮЩЕЕ???

• Следовательно, можно ожидать, что в ближайшее время эта серия завершится сильным землетрясением, сопровождающимся цунами с разрушительными характеристиками. Поэтому, моделирование этого события в свете более совершенных методов позволит разработать адекватные ответные меры защиты населения, которому угрожает опасность, как на севере Чили, так и в остальной части Тихоокеанского бассейна. В то же время детальное знание истории катастрофического события 9мая 1877г имеет большое значение при выборе сценариев сейсмического моделирования, наиболее близких к исторической реальности, чтобы результаты исследований не отклонялись значительно от того, что произошло и может произойти в будущем и что даст надежду на большую безопасность населения.

Изучение исторических данных об этом великом землетрясении и цунами, предоставленных Francisco Vidal в ноябре 1877 г. и опубликованных в 1884 г Астрономической обсерваторией Сантьяго-де-Чили, дает основание применить модель, основанную на теории Л.Лобковского, (клавишная модель землетрясений (Лобковский и др., 1991)).

Геодинамическая модель очага аномально сильных землетрясений

Появление аномальных цунами может быть вызвано механизмом смещения в очаге землетрясения, характеризуемым сдвиговыми подвижками, причем эпицентры главных толчков этих землетрясений расположены на глубоководной террасе (рис.1). Движение под террасой, как показано на рис. 2, может сопровождаться подвижками вдоль поперечных разломов, отделяющих два соседних блока-клавиши.





Рис.2. Клавишная модель зоны субдукции [Лобковский, 1988; Лобковский и др., 2004]

Подтверждение клавишной модели

Катастрофическое землетрясение и цунами на побережье Чили 27 февраля 2010 года

27 февраля 2010 года мощное цунами (землетрясение в Мауле с магнитудой 8.8) пришло к побережью Чили в 150 км на северо-запад от Консепсьона. Волны обрушились на 11 чилийских городов, около 2 млн. чилийцев остались без крова, более 800 человек погибли, 1.200 человек пропали без вести.



Интерпретация смещений земной поверхности, наблюдаемых в окрестности очага землетрясения Мауле (27 февраля 2010 года) на разных стадиях сейсмического цикла, была затем проведена на базе спутниковых данных в рамках клавишной модели возникновения сильнейших землетрясений в зонах субдукции и опубликована в статье Лобковского и др. [Лобковский Л.И. и др. // ДАН, 477, 716 (2017)].

Подтверждение клавишной модели

Во время землетрясения 2010 г. на функционировавших в тот момент станциях GPS-наблюдений были зафиксированы быстрые косейсмические смещения. Расположение ряда станций непосредственно над очагом землетрясения позволяет оценить величину этих быстрых смещений, которые составили порядка 1 м, на ближайшей к эпицентру a землетрясения станции CONT превысили 3 м, т.е. были максимальными на границах блоков. Протяженность наиболее «цунамиопасных» зон составляет 750 км и более, поэтому, для исследования их необходимо разбивать очаг на мелкие блоки, порядка 25-50км. 42° [Лобковский Л.И. и др. // ДАН, 477, 716 (2017)].



Косейсмические смещения в Мауле 27.02.2010г.:

Катастрофическое землетрясение в Чили 9 мая 1877г

9 мая 1877г в 21:16 по местному времени в районе г. Икике было зарегистрировано землетрясение магнитудой 8,5 (по другим данным 8,8) и последующее цунами. Землетрясение сопровождалось многочисленными повторными толчками. Наибольшая интенсивность отмечалась между городами Arica, Iquique и Antofagasta. Все эти города были разрушены. Количество погибших 2541 человек. После землетрясения в районе городов Iquique, Ковіја пришли волны цунами: первая спустя 7 минут после основного толчка с высотой от 10 до 15м; вторая волна пришла спустя 15 минут после основного толчка с высотой от 20 до 23метров. В Mejillones первая волна пришла через 20 минут и в Antofagasta через 15 минут.



Чили, Южная Америка

Рассматриваемая область Чили

Катастрофическое землетрясение в Чили 9 мая 1877г



Батиметрия расчетной области



Темно-бордовые точки соответствуют зоне субдукции. Информация была обработана GFZ с изменением локализаций порядка 300 эпицентров в этой области. Данные были использованы для оценки размеров зоны субдукц ИИ землетрясения для моделирования процесса. Область в зеленом прямоугольнике соответствует начальной области моделирования».

Зона субдукции, расчетная область и эпицентр землетрясения (данные и предварительные расчеты чилийских цунамистов)

Катастрофическое землетрясение в Чили 9 мая 1877г



Слева на рисунке приведена база данных цунами и палеоцунами относительно береговой зоны. Красным отмечена локализация очага землетрясения 1877г. Справа, часть расчетной акватории, использованной чилийскими учеными для расчета землетрясения 1877г ("Centro Ingeniería Mitigación Catástrofes Naturales Facultad de ingeniería. Univ. Antofagasta. Chile."); а так же участок береговой зоны с отмеченной локализацией сейсмического очага

Математическая постановка задачи

Система нелинейных уравнений мелкой воды

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = f_1 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = f_2 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\eta + H - B)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(\eta + H - B)v] = \frac{\partial H}{\partial t} \end{cases}$$

B(x, y, t)- смещение поверхности дна относительно исходного положения; $\eta(x, y, t)$ -смещение свободной поверхности относительно ее спокойного уровня; H –глубина бассейна при невозмущённой воде;

u(x, y, t), v(x, y, t)- горизонтальные компоненты скорости частиц жидкости в волне. На жидкость действует сила Кориолиса и сила трения, представляемые функциями:

$$f_1 = fv - \frac{C_h}{H + \eta} u \sqrt{u^2 + v^2}, \qquad f_2 = -fu - \frac{C_h}{H + \eta} v \sqrt{u^2 + v^2},$$

Коэффициент Шези находился по формуле:

$$C_h = \frac{(H+\eta-B)^{0.4}}{s_h}$$

где s_h – коэффициент шероховатости, $f = 2\Omega \cos \theta$ - параметр Кориолиса, Ω – угловая скорость Земли, θ – географическая широта Земли.

Катастрофическое землетрясение в Чили 9 мая 1877г

Расчетная область по данным из работ (Соловьев, 1975; Diaz, 1992). Крупные синие цифры определяют области, где цунами имело наибольшую интенсивность; пунктирные черные линии – изосеймы; цифры, отмеченные желтым цветом-высоты волн в конкретных пунктах; знаки (+) и (-) около цифр слева определяют характер подхода первой волны к берегу: (+) накат волны на берег, (-) откат волны от берега; две желтые цифры около одного пункта: информация из разных документальных источников.



Табл.1

Характерные параметры землетрясения 1877(SHOA, 1997)

SOUTH END	Dislocation	Long	Width	Rhumb	DIP	DEPTH	. Angle of Displacement
23° S 71° W	12 m.	490 Km.	150 Km.	359°	19°	10 Km.	90°

Контур очага землетрясения 1877г (по первоначальным данным 530 x 150 км)



Fuente: SHOA, 1997. Land deformation generated by Tsunami 1877.

Контур очага землетрясения 1877г



-72

-71

-70

-73

Численное моделирование цунами сейсмическим очагом,

состоящим из 8 блоков



Последовательность движения блоков для Сценария 1

Движе ние	Номера блоков	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Высоты (м)	-4	5	4	-4	3	4	-3	4
	Время начала поднятия (сек)	100	0	270	200	410	340	570	480
	Время завершения поднятия (сек)	170	70	310	240	450	380	600	510

Реальные и расчетные данные по Сценария 1

Earthquake data													
	Aric a	Pisa gua	lqui que	Chan abaya	Caleta Pabellon de Pica	Punta Lobos	Vani Ilos	Tocop illa	Kobi ja	Mejill ones	Antofa gasta		
Real data	9 (20)	5	6 (9)	10	10	10	14	24	9 (12)	21 (12)	6(7)		
Scena rio 1	20	23	27	23	32	32	30	21	21	17	19		

о – олочныи очаг землетрясения по уточненным данным (543 х 72 км)



Численное моделирование цунами от сейсмического очага, состоящего из 8 блоков

Гистограмма распределения максимальных высот волн цунами для 8-ми блочного очага: красный цвет – расчетная гистограмма; серый – данные по каталогу С. Л. Соловьеву; синий – данные по работам Diaz, J., 1992; Barrientos, S., Ward, S.N.,2009; Diana Comte and Mario Pardo,1991.



Численное моделирование цунами сейсмическим очагом, состоящим из 12 блоков



Последовательность движения блоков для Сценария 4

Номера блоков	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Высоты (м)	-3.5	3.5	10	8	2	-4	1.8	-1.8	1.5	-1	-3	5
Время начала поднятия (сек)	135	120	90	60	30	0	45	15	105	75	165	150
Время завершения поднятия (сек)	150	135	105	75	45	15	60	30	120	90	180	165

Реальные и расчетные данные по Сценария 4

	Earthquake data												
	Aric a	Pisa gua	Iqui que	Chan abaya	Caleta Pabellon de Pica	Punta Lobos	Vani llos	Tocop illa	Kobi ja	Mejill ones	Antof agasta		
Real data	9 (20)	5	6 (9)	10	10	10	14	24	9 (12)	21 (12)	6(7)		
Scena rio 1	6	6	9	11	10	10	13	11	15	14	14		
Scena rio 4	7	20	7	20	22	20	22	15	14	12	10		

12 – блочный очаг землетрясения по уточненным данным (543 х 72 км)



^(m) Численное моделирование цунами от сейсмического очага, состоящего из 12 блоков

Гистограммы распределения максимальных высот волн цунами для 12 блочного очага



Гистограмма распределения максимальных высот волн цунами для 12-ти блочного очага: красный цвет – расчетная гистограмма; серый – данные по каталогу С. Л. Соловьеву; синий – данные по работам Diaz, J., 1992; Barrientos, S., Ward, S.N.,2009; Diana Comte and Mario Pardo,1991.

Численное моделирование цунами сейсмическим очагом, состоящим из 13 блоков





Гистограмма распределения максимальных высот волн цунами для 13-ти блочного очага: красный цвет – расчетная гистограмма; серый – данные по каталогу С. Л. Соловьеву; синий – данные по работам Diaz, J., 1992; Barrientos, S., Ward, S.N.,2009; Diana Comte and Mario Pardo,1991.

Новый эпицентр землетрясения



"Centro Ingeniería Mitigación Catástrofes Naturales Facultad de ingeniería. Univ. Antofagasta. Chile."

The two groups of Chilean seismologists agree with you, we believe that you they are more consistent in their analysis, therefore it is better to accept epicenter at approximately 21° latitude.

Две группы чилийских сейсмологов согласны с вами, мы считаем, что вы более последовательны в своем анализе, поэтому лучше принимать эпицентр приблизительно на 21 ° широты.

Сейсмический очаг из 14 блоков



Проведенный дополнительный анализ имеющихся данных по реализации этого землетрясения, приводит к выводу о необходимости корректировки локализации эпицентра землетрясения 9 мая 1877 г. Получив на это полное согласие наших чилийских коллег, была изменена локализация эпицентра землетрясения и был сформирован более сложный сейсмический очаг. На рисунке можно видеть 14блочный очаг рассматриваемого землетрясения с эпицентром землетрясения в районе г. Caleta Pabellon de Pica.

Результаты численного моделирования землетрясения 9 мая 1877г у побережья Чили

и сравнение с документальными данными

Points	Arica	Pisagua	Iquique	Chanabaya	Caleta Pabell on de Pica	Punta Lob os	Vanillos	Tocopilla	Kobija	Mejillones	Antofaga sta
Real data	9 (20)	5	6 (9)	10	10	10	14	24	9 (12)	21 (12)	6(7)
Scenario 13	5	9	16	14	15	18	10	10	6	8	4
Scenario 15	8	13	12	8	20	15	10	8	8	12	6
Scenario 16	12	23	8	10	10	13	18	10	13	15	5
Scenario17	9	21	10	12	13	12	15	12	18	18	5
Scenario 18	13	21	10	9	10	10	8	10	8	14	5
Scenario 20	10	18	8	10	8	10	11	6	10	13	6
Scenario 21	2	10	13	11	14	18	7	11	10	15	4
Scenario 22	4	10	17	11	8	22	15	10	8	14	5
Scenario 23	7	12	13	8	8	12	11	11	12	10	12

Волновые характеристики для 14 блочного очага землетрясения (Сценарий 23)



Гистограмма распределёния максимальных высот волн цунами; красный цвет – расчетная гистограмма; серый – данные по каталогу С. Л. Соловьеву; синий – данные по работам Diaz, J., 1992; Barrientos, S., Ward, S.N.,2009; Diana Comte and Mario Pardo,1991.



Заключение

Таким образом, результаты показывают, что клавишная модель, примененная в нашей работе для моделирования генерации и распространения волны цунами до 5-ти метровой изобаты вдоль чилийского побережья, для данного события является наиболее приемлемой. Такой вывод следует из того, что, как было отмечено нашими чилийскими коллегами, попытки моделировать данное событие по некоторым широко известным численным комплексам не привели к хорошему согласию с реальными данными, даже при учете динамики движения земной коры в очаге землетрясения при сейсмическом процессе. Противоречивость имеющихся исторических данных у разных авторов серьезно усложнила анализ возможной реализации динамики в очаге землетрясения. Проблемой при моделировании данного события может быть мелкомасштабный характер разрывов смежных сегментов в данной зоне субдукции (порядка и менее 50 км). Применение блочноклавишной модели очага землетрясения позволяет наиболее близко подойти к решению задачи получения при численном моделировании землетрясения 9 мая 1877 г. в ряде пунктов побережья данных, близких к имеющимся в литературе.