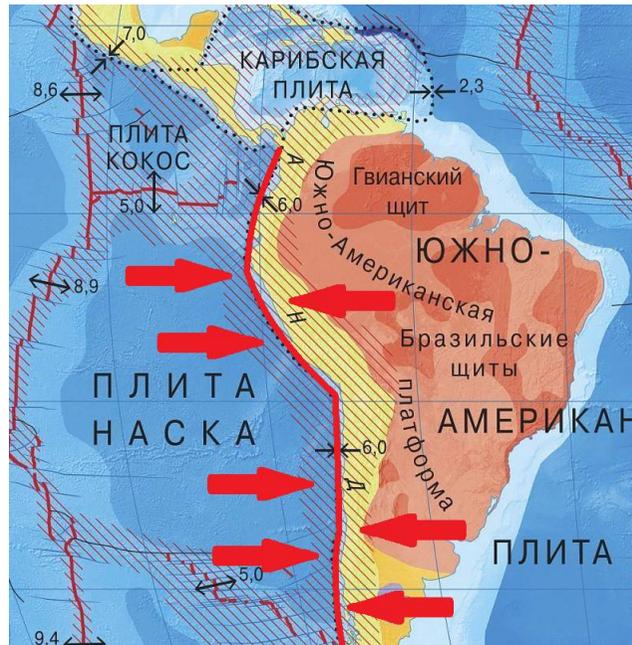


Численное моделирование катастрофического цунами в северо-восточной части Чилийского побережья 1 апреля 2014г

Р.Е.Мазова, Т.Е.Моисеенко

Постановка задачи

1 апреля 2014 г. на севере Чили произошло землетрясение с магнитудой $M=8.2$. Оно явилось результатом образования разлома надвигового типа на небольших глубинах вблизи Чилийского побережья. Положение и механизм очага землетрясения находятся в соответствии с характером смещений по главной поверхности контакта границы плит или меганадвигу между плитами Наска и Североамериканской

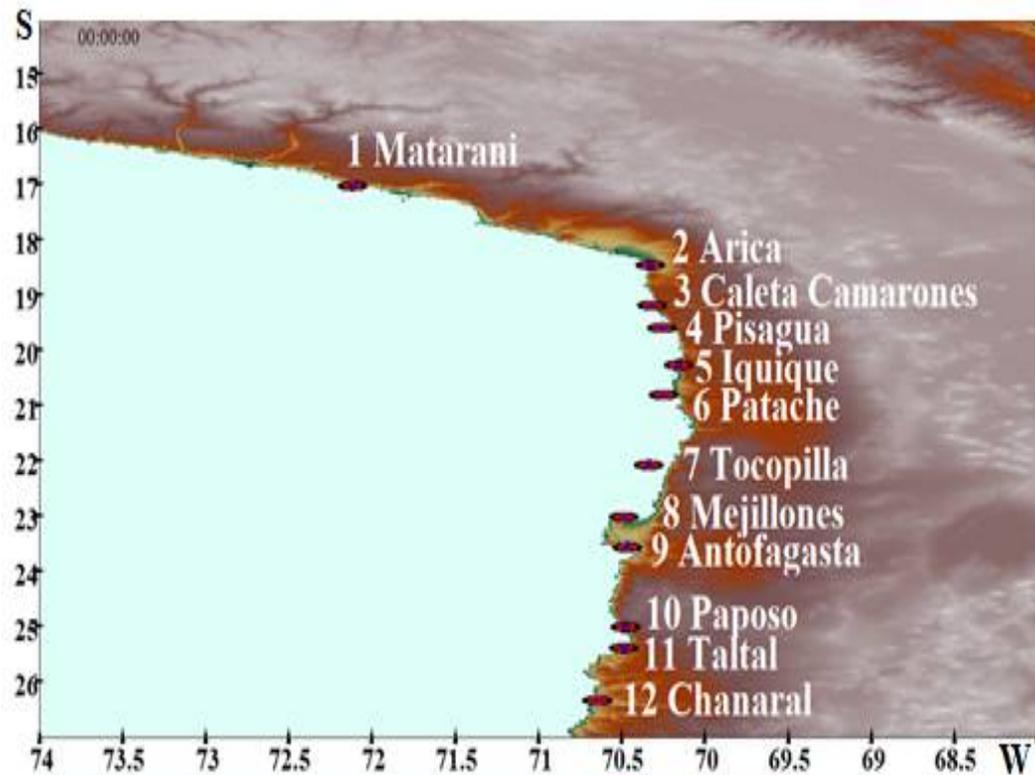


Движение тектонических плит в районе Чили

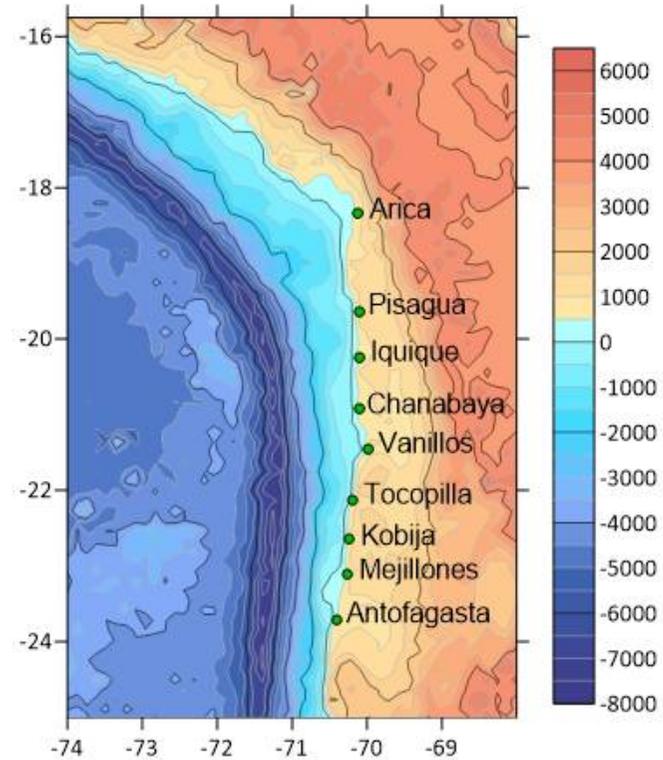
Points	Натурные данные, м
Matarani (72.11°W 17.02°S)	0.58
Arica (70.29°W 18.47°S)	2.01
Caleta Camarones (70.26°W 19.18°S)	4.63
Pisagua (70.2°W 19.6°S)	2.12
Iquique (70.1°W 20.2°S)	1.8
Patache (70.2°W 20.8°S)	1.66
Tocopilla (70.19°W 22.08°S)	0.87
Mejillones (70.45°W 23.1°S)	0.82
Antofagasta (70.39°W 23.65°S)	0.31
Paposo (70.46°W 25.01°S)	0.31
Taltal (70.48°W 25.4°S)	0.3
Chanaral (70.64°W 26.35°S)	0.45

Натурные данные волн цунами при землетрясении 2014 г.

Расчетная акватория и батиметрия района Чили



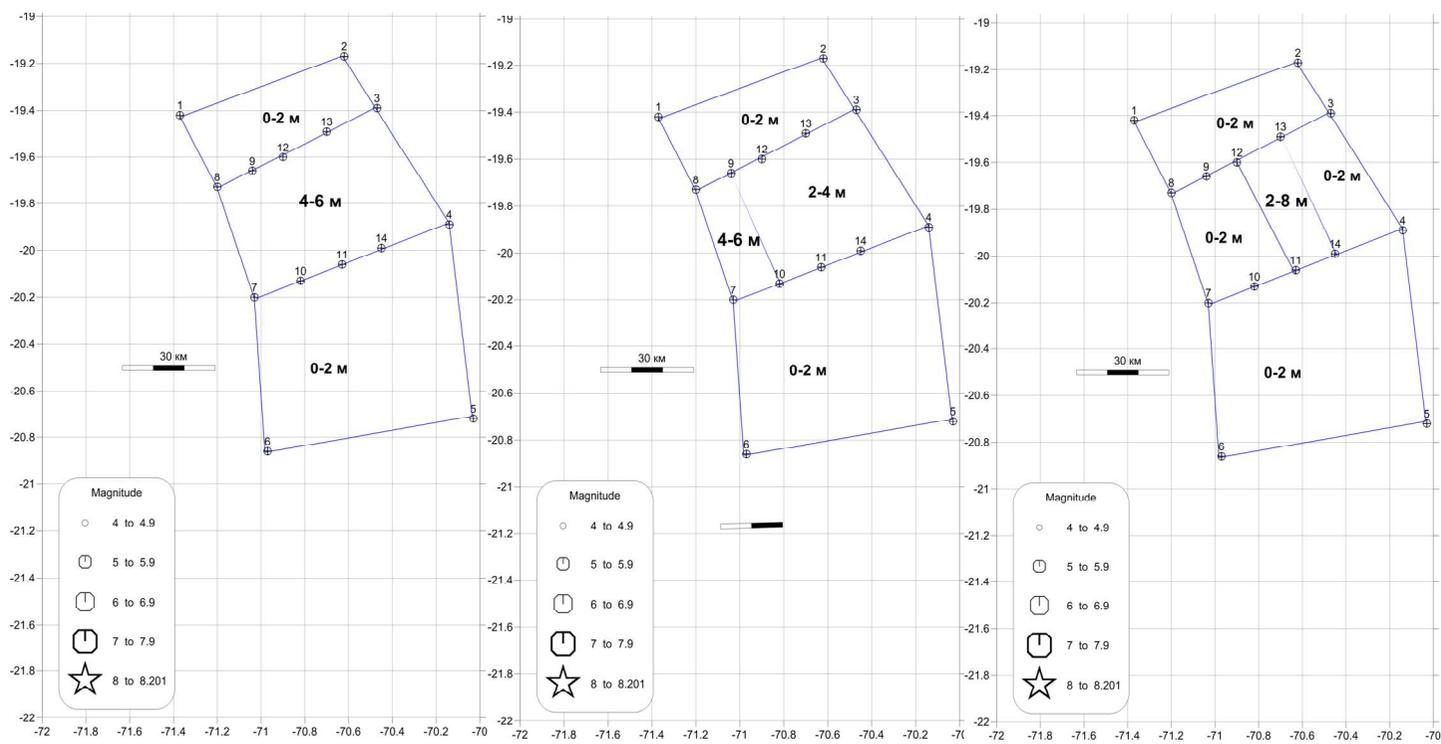
Расчетная акватория



Батиметрия северо-западной части чилийского побережья

Возможная геометрия очага землетрясения

(данные предоставлены Б.В.Барановым, ИОРАН)

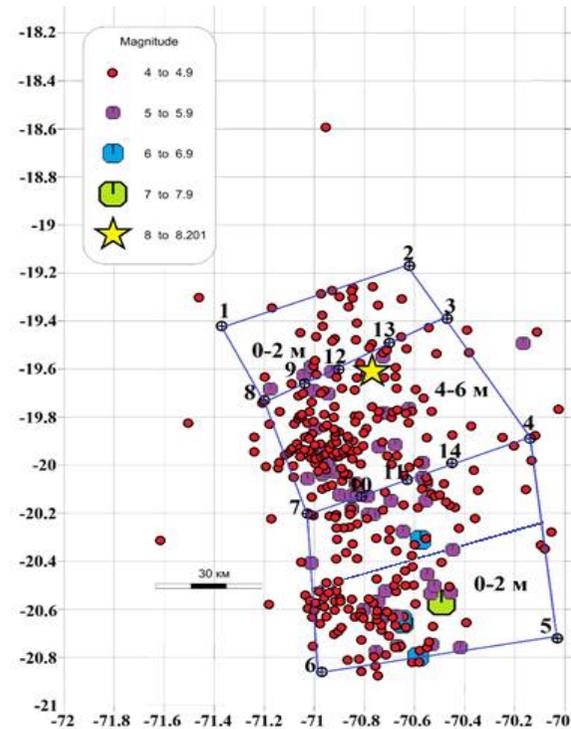
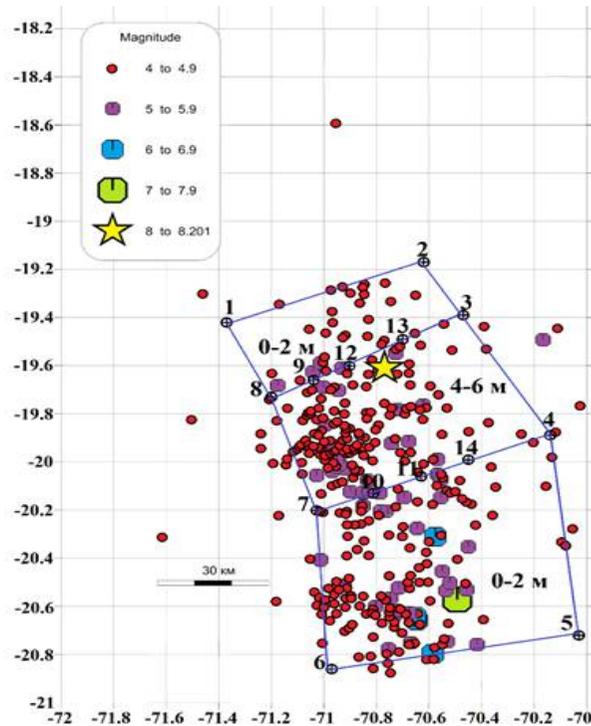


Трехблочный очаг

Четырехблочный очаг

Пятиблочный очаг

Сейсмичность очага за месяц (каталог NEIC)



**Трехблочный и четырехблочный очаг землетрясения с афтершоками;
желтая звездочка обозначен эпицентр землетрясения; синяя линия – контур
очага землетрясения**

Математическая постановка задачи

Система нелинейных уравнений мелкой воды:

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

$B(x, y, t)$ - 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:

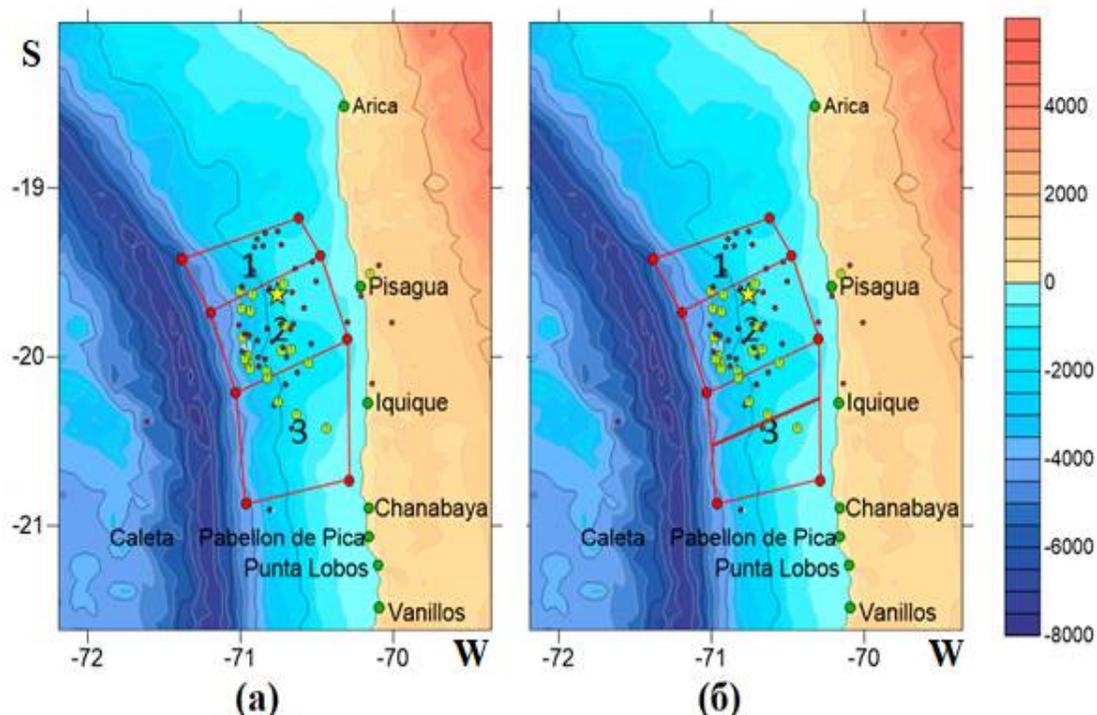
$$f_1 = fv - \frac{C_h}{H + \eta} u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad f_2 = -fu - \frac{C_h}{H + \eta} v \sqrt{u^2 + v^2},$$

Коэффициент Шези находится 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.

Геометрия и динамика сейсмического очага (сценарии 1-4)



Трехблочный очаг для землетрясения Чили 2014 г (а), четырехблочный очаг (б), символом желтая звездочка обозначен эпицентр землетрясения

Номера блоков	1	2	3
Высоты (м)	1	4	1
Время начала движения (сек)	80	0	40
Время завершения движения (сек)	120	40	80

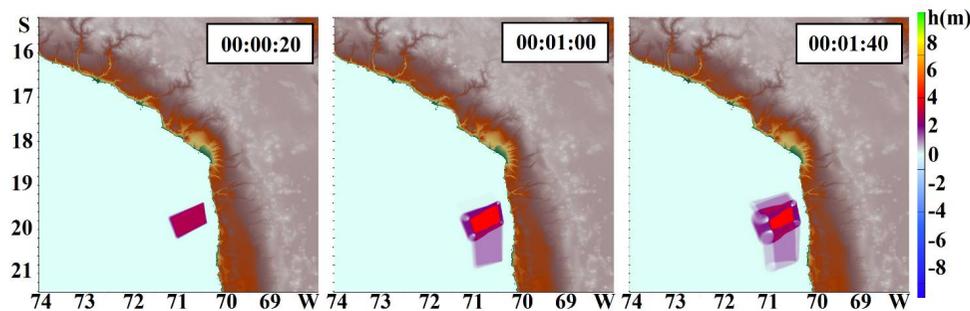
Номера блоков	1	2	3
Высоты (м)	0.5	1.6	0.5
Время начала движения (сек)	80	0	40
Время завершения движения (сек)	120	40	80

Номера блоков	1	2	3
Высоты (м)	0.8	1.6	1.2
Время начала движения (сек)	40	0	70
Время завершения движения (сек)	70	40	100

Номера блоков	1	2	3	4
Высоты (м)	1.2	1.6	1.3	1.5
Время начала движения (сек)	30	0	60	100
Время завершения движения (сек)	60	30	100	120

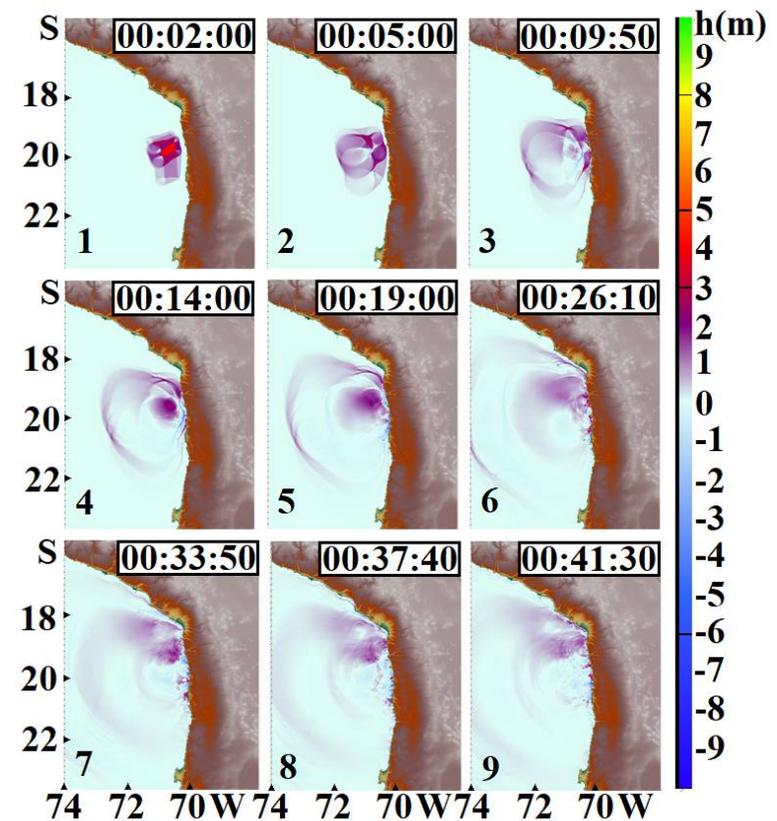
Последовательность движения блоков для Сценариев 1-4

Генерация очага цунами и распространение волн по расчетной акватории для Сценария 1.

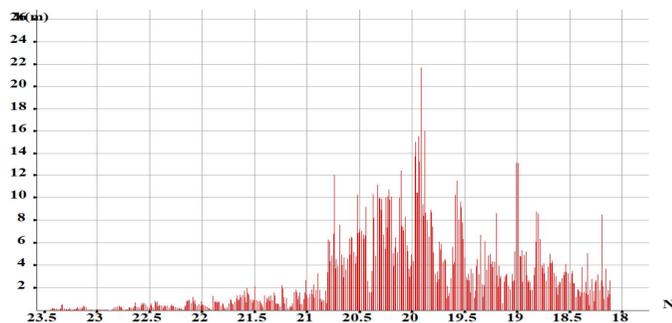


Генерация очага цунами для сценария 1

Распространение волн цунами при реализации сценария 1 для 9 моментов времени

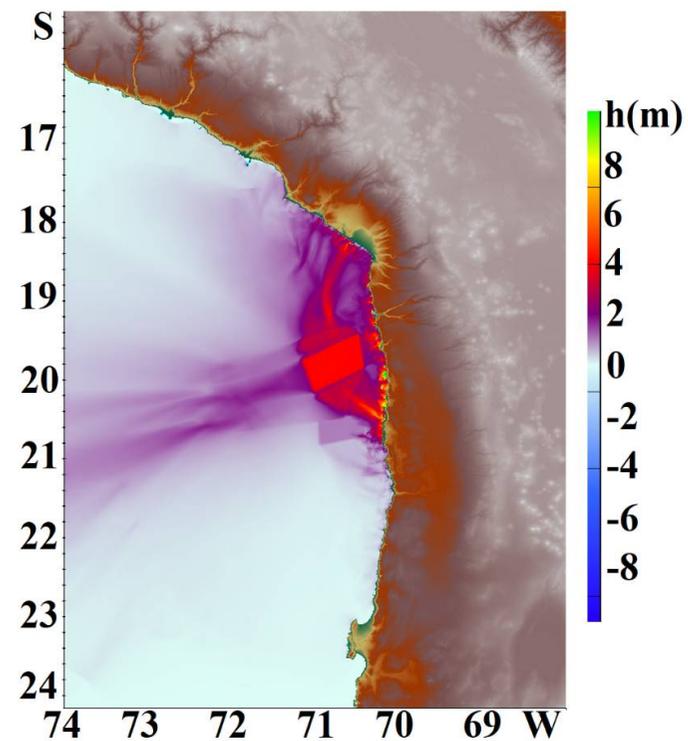


Распределение максимальных высот волн

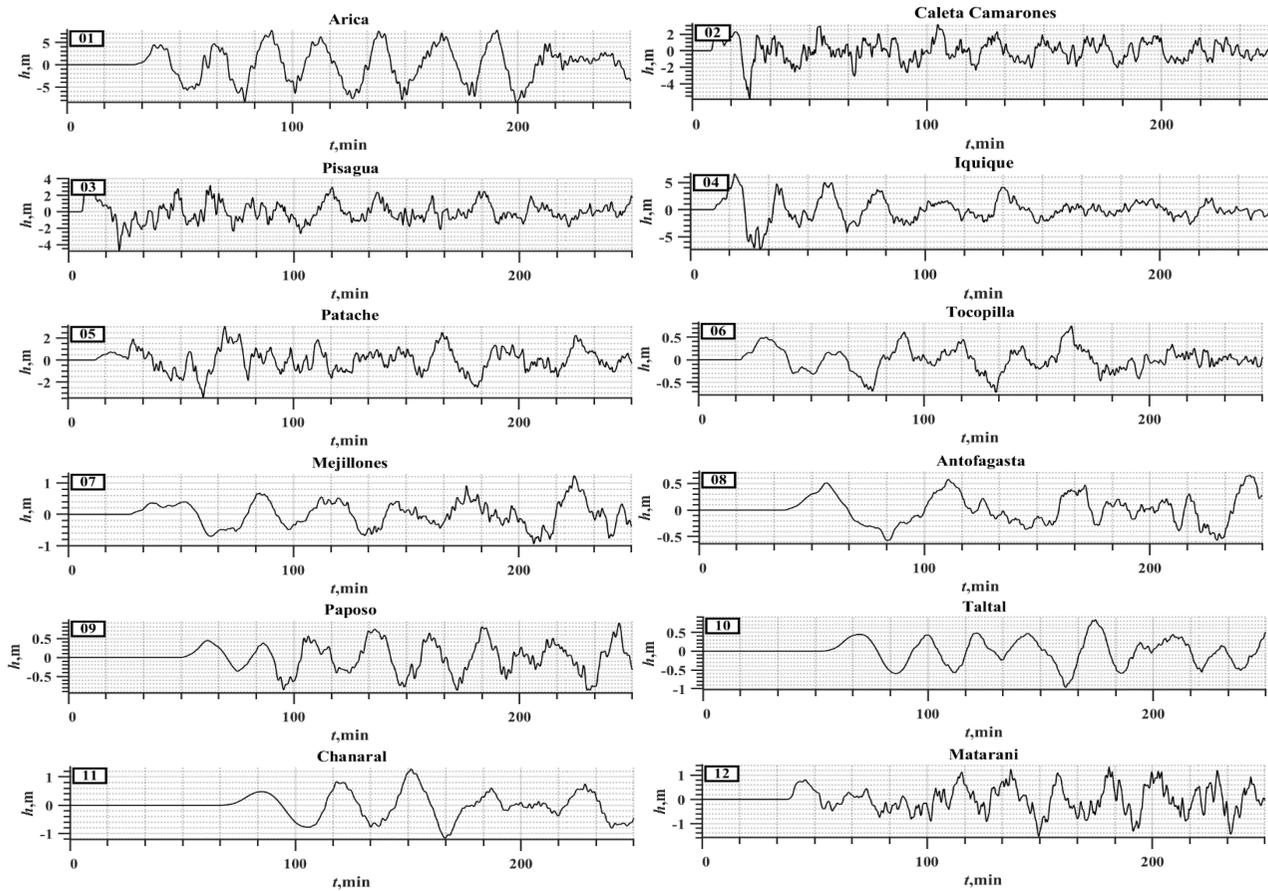


2D гистограмма распределения высот волн \на 5-м изобате

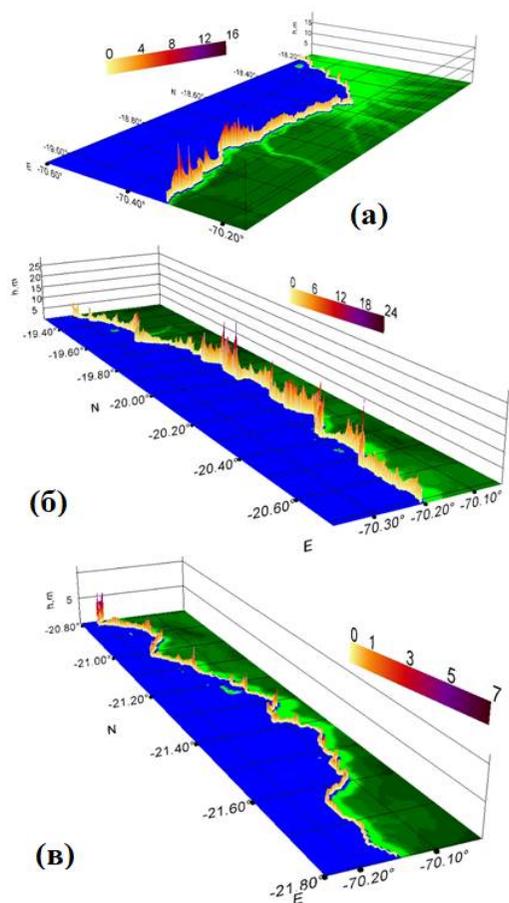
Распределение максимальных высот волн в рассматриваемой акватории при реализации сценария 1



Мареограммы для пунктов на побережье Чили (Сценарий 1)



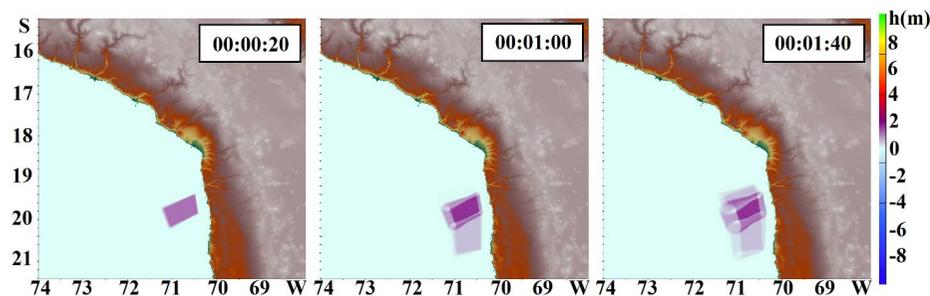
Гистограммы распределения максимальных высот волн (Сценарий1)



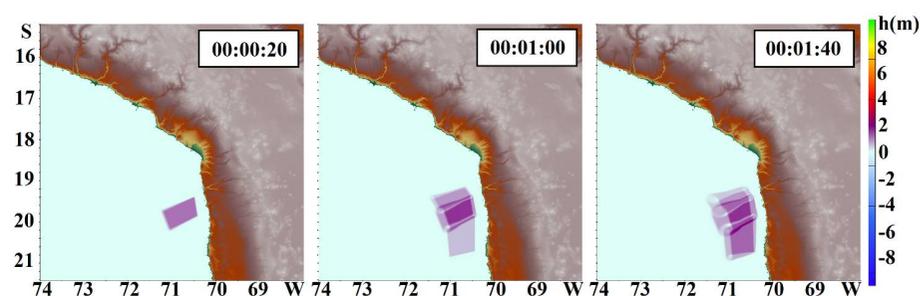
Трехмерные гистограммы для максимальных высот волн на 5-м изобате при реализации сценария 1 для побережья Чили

№	Points	Натурные данные (м)	Данные сценария 1 (м)
1	Matarani (72.11°W 17.02°S)	0.58	1.36
2	Arica (70.29°W 18.47°S)	2.01	7.82
3	Caleta Camarones (70.26°W 19.18°S)	4.63	3.22
4	Pisagua (70.2°W 19.6°S)	2.12	3.97
5	Iquique (70.1°W 20.2°S)	1.8	6.6
6	Patache (70.2°W 20.8°S)	1.66	3.09
7	Tocopilla (70.19°W 22.08°S)	0.87	0.75
8	Mejillones (70.45°W 23.1°S)	0.82	1.24
9	Antofagasta (70.39°W 23.65°S)	0.31	0.65
10	Paposo (70.46°W 25.01°S)	0.31	0.91
11	Taltal (70.48°W 25.4°S)	0.3	0.83
12	Chanaral (70.64°W 26.35°S)	0.45	1.28

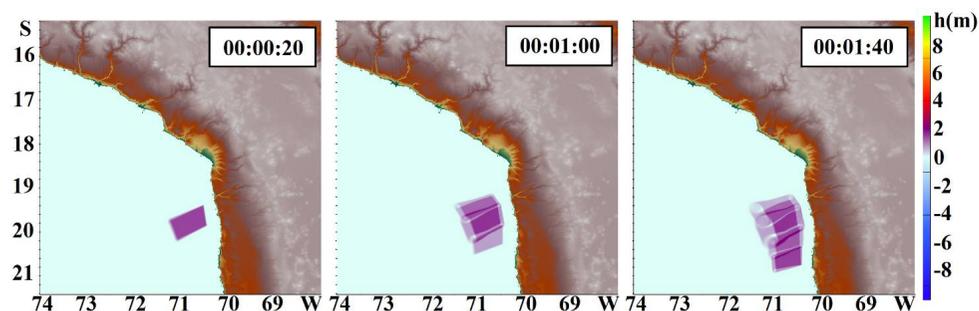
**Генерация очага цунами и распространение волн по расчетной акватории для
Сценарии 2-4.**



Генерация очага цунами для сценария 2.

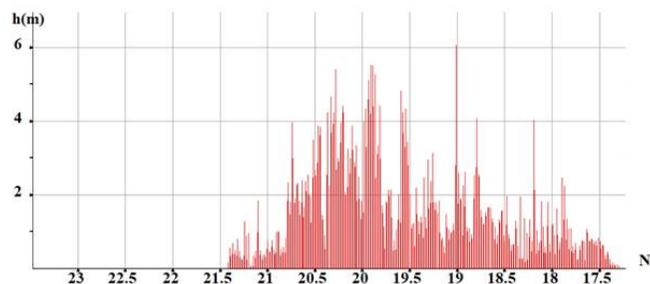


Генерация очага цунами для сценария 3.



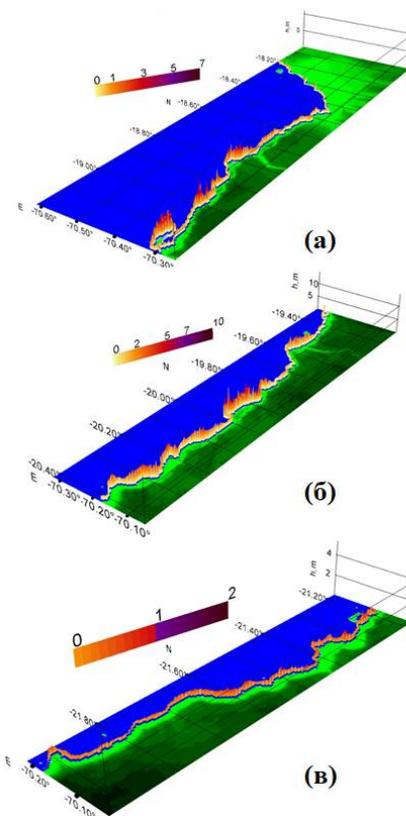
Генерация очага цунами для сценария 4

Гистограммы распределения максимальных высот волн (Сценарий 2)



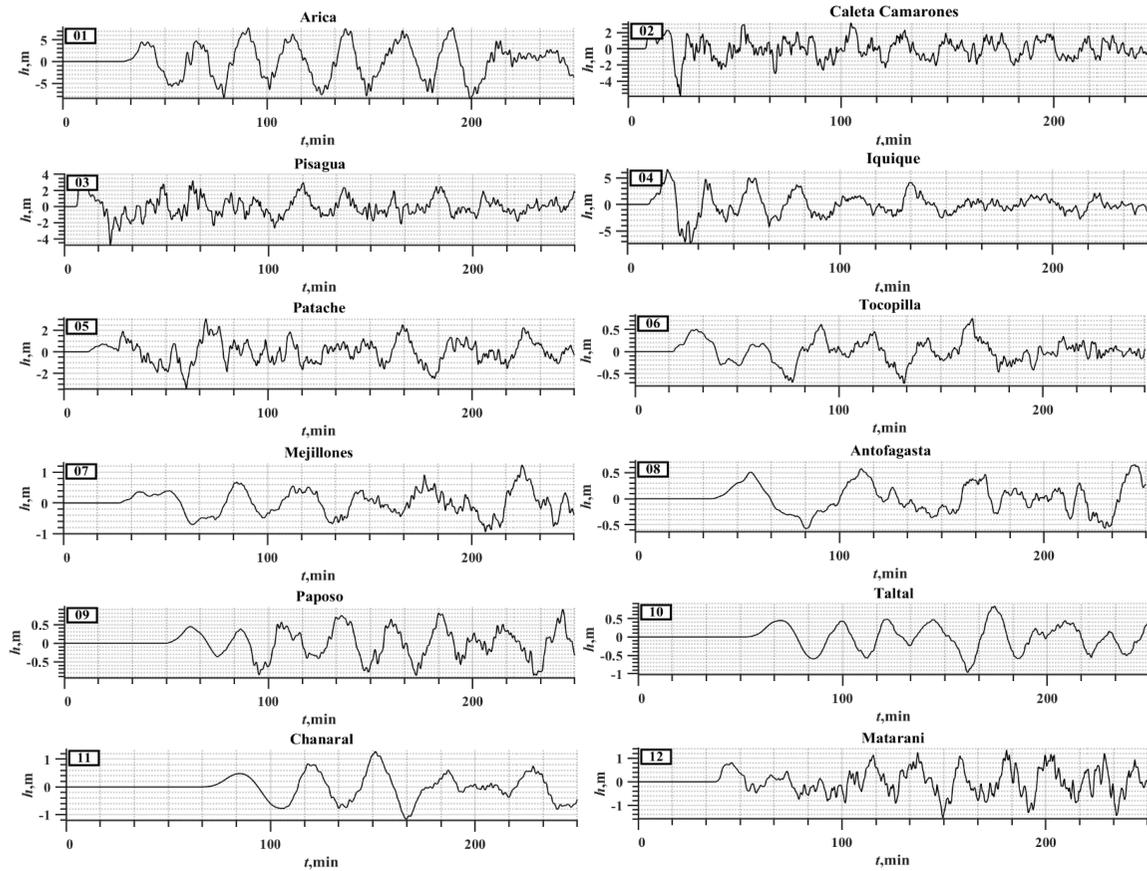
Двумерная гистограмма
распределения максимальных высот
волн на 5-м изобате

Трёхмерные гистограммы для
максимальных высот волн на
5-м изобате при реализации
сценария 2 для побережья Чили

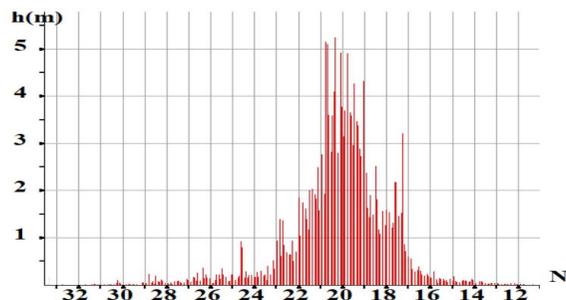


№	Points	Нагурные данные (м)	Данные сценария 2 (м)
1	Matarani (72.11°W 17.02°S)	0.58	0.61
2	Arica (70.29°W 18.47°S)	2.01	3.68
3	Caleta Camarones (70.26°W 19.18°S)	4.63	1.31
4	Pisagua (70.2°W 19.6°S)	2.12	1.58
5	Iquique (70.1°W 20.2°S)	1.8	2.72
6	Patache (70.2°W 20.8°S)	1.66	1.21
7	Tocopilla (70.19°W 22.08°S)	0.87	0.31
8	Mejillones (70.45°W 23.1°S)	0.82	0.51
9	Antofagasta (70.39°W 23.65°S)	0.31	0.29
10	Paposo (70.46°W 25.01°S)	0.31	0.39
11	Taltal (70.48°W 25.4°S)	0.3	0.37
12	Chanaral (70.64°W 26.35°S)	0.45	0.54

Мареограммы для пунктов на побережье Чили (Сценарий 2)

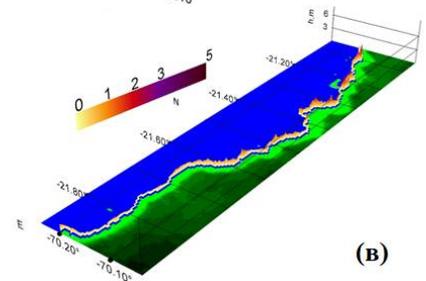
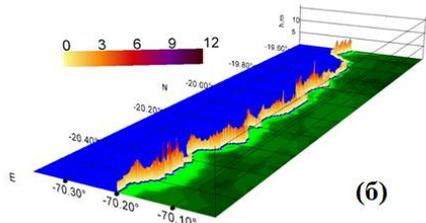
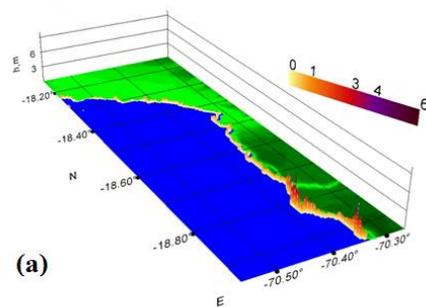


Гистограммы распределения максимальных высот волн (Сценарий 3)



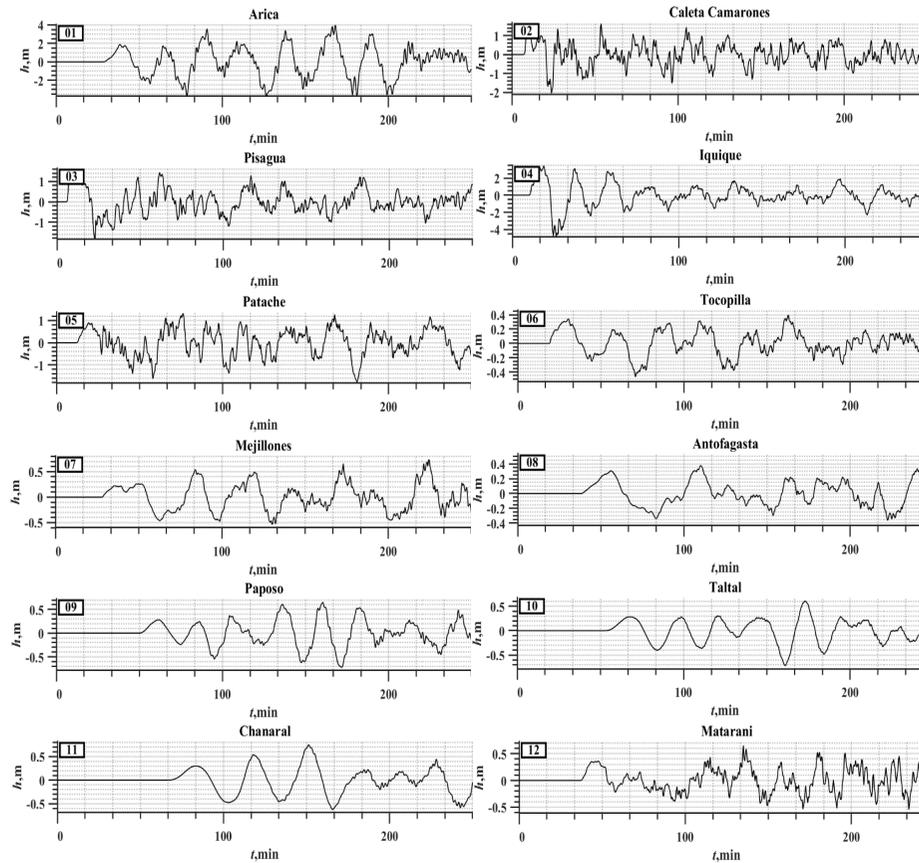
Двумерная гистограмма
распределения максимальных высо
волн на 5-м изобате

Трехмерные гистограммы для
максимальных высот волн на
5-м изобате при реализации сце
нария 3 для побережья Чили

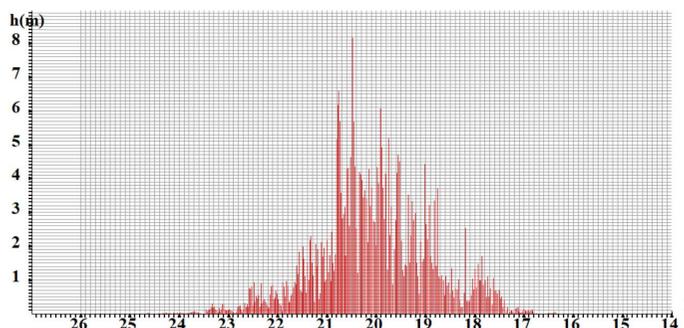


№	Points	Натурные данные (м)	Данные сценария 3 (м)
1	Matarani (72.11°W 17.02°S)	0.58	0.65
2	Arica (70.29°W 18.47°S)	2.01	4
3	Caleta Camarones (70.26°W 19.18°S)	4.63	1.63
4	Pisagua (70.2°W 19.6°S)	2.12	1.58
5	Iquique (70.1°W 20.2°S)	1.8	3.43
6	Patache (70.2°W 20.8°S)	1.66	1.32
7	Tocopilla (70.19°W 22.08°S)	0.87	0.39
8	Mejillones (70.45°W 23.1°S)	0.82	0.73
9	Antofagasta (70.39°W 23.65°S)	0.31	0.46
10	Paposo (70.46°W 25.01°S)	0.31	0.65
11	Taltal (70.48°W 25.4°S)	0.3	0.61
12	Chanaral (70.64°W 26.35°S)	0.45	0.75

Мареограммы для пунктов на побережье Чили (Сценарий 3)

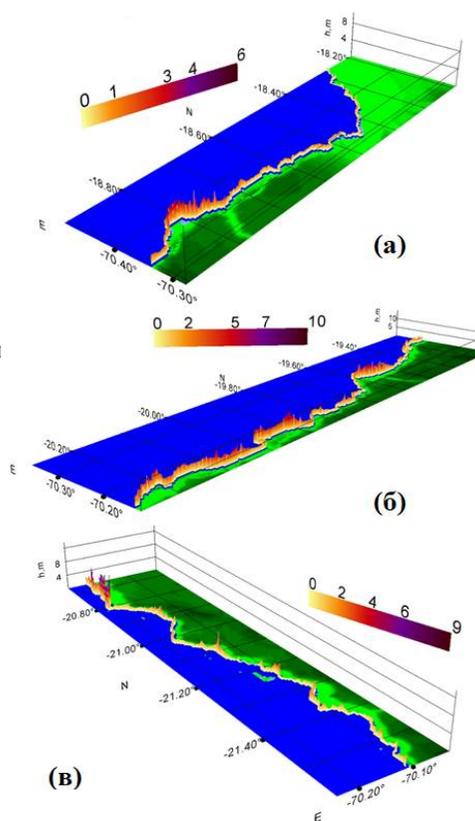


Гистограммы распределения максимальных высот волн (Сценарий 4)



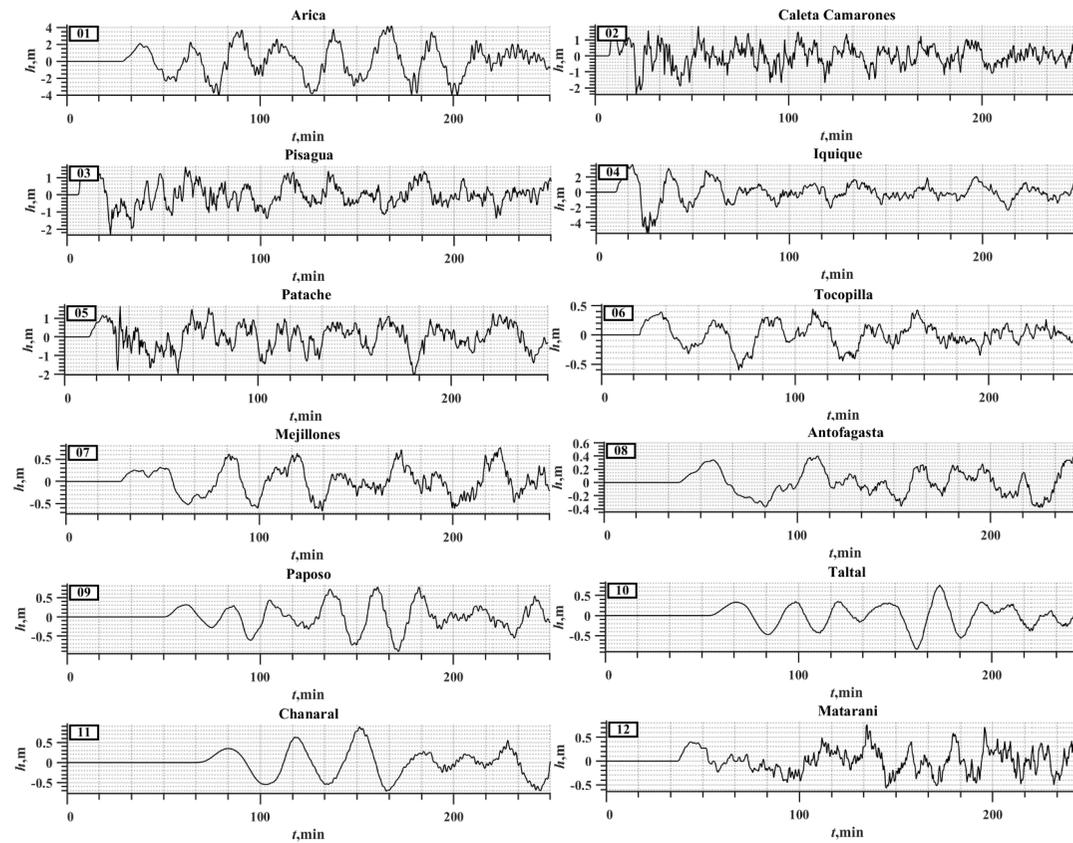
Двумерная гистограмма
распределения максимальных высот
волн на 5-м изобате

Трехмерные гистограммы для
максимальных высот волн на
5-м изобате при реализации
сценария 4 для побережья Чили



№	Points	Натурные данные (м)	Данные сценария 4 (м)
1	Matarani (72.11°W 17.02°S)	0.58	0.76
2	Arica (70.29°W 18.47°S)	2.01	4.22
3	Caleta Camarones (70.26°W 19.18°S)	4.63	1.86
4	Pisagua (70.2°W 19.6°S)	2.12	1.66
5	Iquique (70.1°W 20.2°S)	1.8	3.67
6	Patache (70.2°W 20.8°S)	1.66	1.65
7	Tocopilla (70.19°W 22.08°S)	0.87	0.44
8	Mejillones (70.45°W 23.1°S)	0.82	0.76
9	Antofagasta (70.39°W 23.65°S)	0.31	0.53
10	Paposo (70.46°W 25.01°S)	0.31	0.78
11	Taltal (70.48°W 25.4°S)	0.3	0.75
12	Chanaral (70.64°W 26.35°S)	0.45	0.88

Мареограммы для пунктов на побережье Чили (Сценарий 4)



Сравнения натуральных данных и расчетных высот Чили, 2014

№	Points	Натурные данные (м)	Данные сценария 1 (м)	Данные сценария 2 (м)	Данные сценария 3 (м)	Данные сценария 4 (м)
1	<u>Matarani</u>	0.58	-	0.19	0.6	0.15
2	<u>Arica</u>	2.01	3.5	1.97	1.8	1.35
3	<u>Caleta Camarones</u>	4.63	3	0.98	3.48	1.5
4	<u>Pisagua</u>	2.12	10.2	2.48	3.7	2.75
5	<u>Iquique</u>	1.8	10	4.2	2.8	3.4
6	<u>Patache</u>	1.66	1.8	0.87	1.95	5.2
7	<u>Tocopilla</u>	0.87	1.2	0.3	0.7	0.4
8	<u>Mejillones</u>	0.82	0.5	0.1	0.35	0.3
9	<u>Antofagasta</u>	0.31	-	0.02	0.3	0.05
10	<u>Paposo</u>	0.31	-	-	0.2	-
11	<u>Taltal</u>	0.3	-	-	0.2	-
12	<u>Chanaral</u>	0.45	-	-	0.37	-

Заключение

Таким образом, расчет, проведенный в рамках клавишной модели показал близкое совпадение натуральных данных с данными моделирования.