

Восемнадцатая Всероссийская Открытая конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

(Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)»

**Сравнительный анализ гравитационных
аномалий по данным GRACE и
геодинамической активности на примере
Чилийских землетрясений**

В.Б. Кашкин¹, Т.В. Рублева¹, К.В. Симонов^{1,2},
А.А. Кабанов¹, А.В. Мальканова¹, Р.В. Одинцов¹

¹ *Сибирский федеральный университет*

² *Институт вычислительного моделирования СО РАН*

Красноярск, 2020

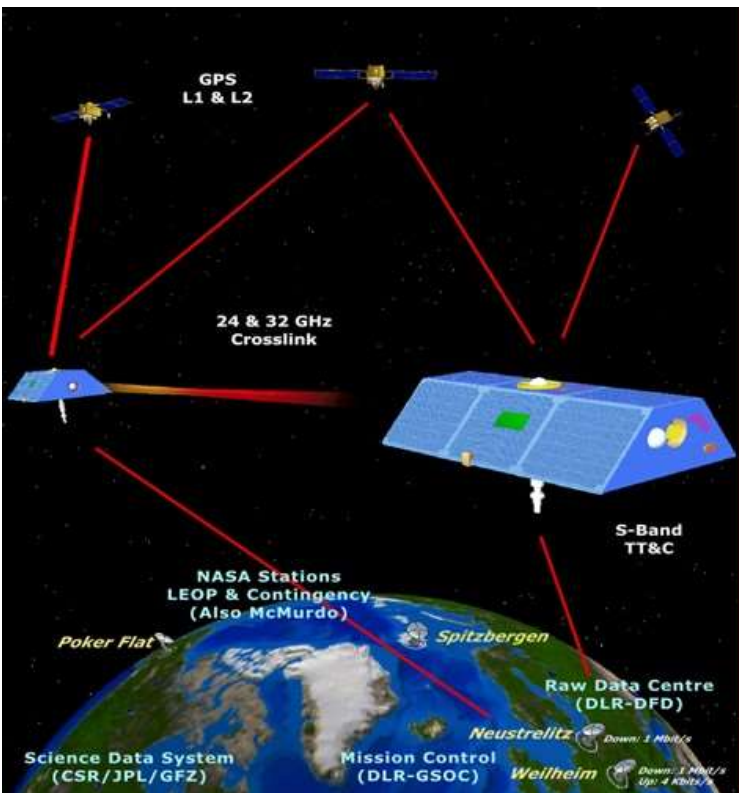
Актуальность и постановка задачи

В современных геодинамических исследованиях активно используются результаты измерений, полученные с помощью космических систем GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment, NASA – DLR) и GRACE-FO (GRACE-follow on, NASA – DLR). Спутники этих систем изучают пространственно-временные вариации параметров гравитационного поля Земли с периодом 30 суток. Погрешность измерений на GRACE не превышает 10 мкм, а на GRACE-FO – 1 мкм ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$).

Накоплен большой массив данных GRACE за период с 2002 по 2017 гг. и GRACE-FO – с 2018 г. по настоящее время. Данная информация является актуальной и вносит существенный вклад в изучение глобального гравитационного поля Земли, геодинамических процессов и природных катастроф. Так, реанализ данных GRACE позволяет выявить новые качественные и количественные изменения в очаговых областях сильнейших землетрясений во время сейсмической активности.

В нашей работе на основе измерений GRACE изучалась пиковая область Чилийского землетрясения $M_w=8.8$ в сравнении с последующими сильнейшими землетрясениями в Южноамериканском регионе в 2014 и 2015 годах с целью уточнения параметров этих катастрофических сейсмособытий.

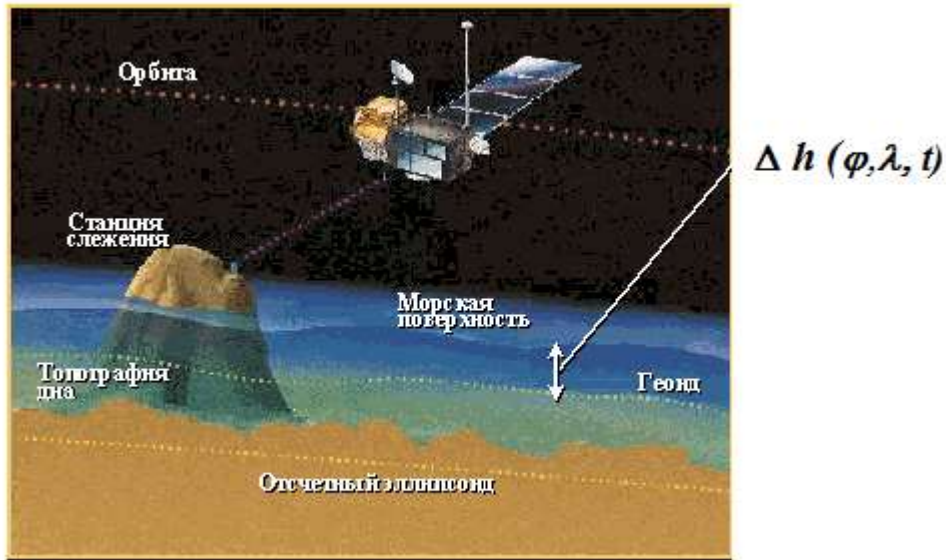
Орбитальная конфигурация спутников космической системы GRACE (NASA, США – DLR, Германия)



Продолжительность работы на орбите	17 марта 2002 - 3 сентября 2017 гг.
Количество спутников	2 (Grace 1, Grace 2)
Тип орбиты	околополярная, солнечно – синхронная
Большая полуось, км	6713
Эксцентриситет	0,00181
Наклонение орбиты	89,5°
Высота перигея, км	434
Высота апогея, км	451
Расстояние между спутниками, км	220±50
Масса 1 спутника (кг)	430

Аппаратура: Акселерометры **ACC** (измеряют негравитационные ускорения), приемники **GPS** (обеспечивают синхронизацию положения и времени), звездная камера **SCA** (служит для определения ориентации спутников в космическом пространстве), микроволновая система дальности **KBR** (обеспечивает точные, в пределах 10 мкм, измерения изменения расстояния между двумя спутниками), лазер **LRR**.

Определение параметра EWH



Эквивалентный уровень воды - параметр EWH (*Equivalent Water Height*) задается в виде отношения поверхностной плотности $\Delta\sigma(\varphi, \lambda)$ (масса/площадь) к плотности воды $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$:

$$EWH = \Delta h(\varphi, \lambda, t) = \frac{\Delta\sigma(\varphi, \lambda)}{\rho_w},$$

где $\Delta\sigma(\varphi, \lambda)$ определяется из теории гравитационного потенциала,*

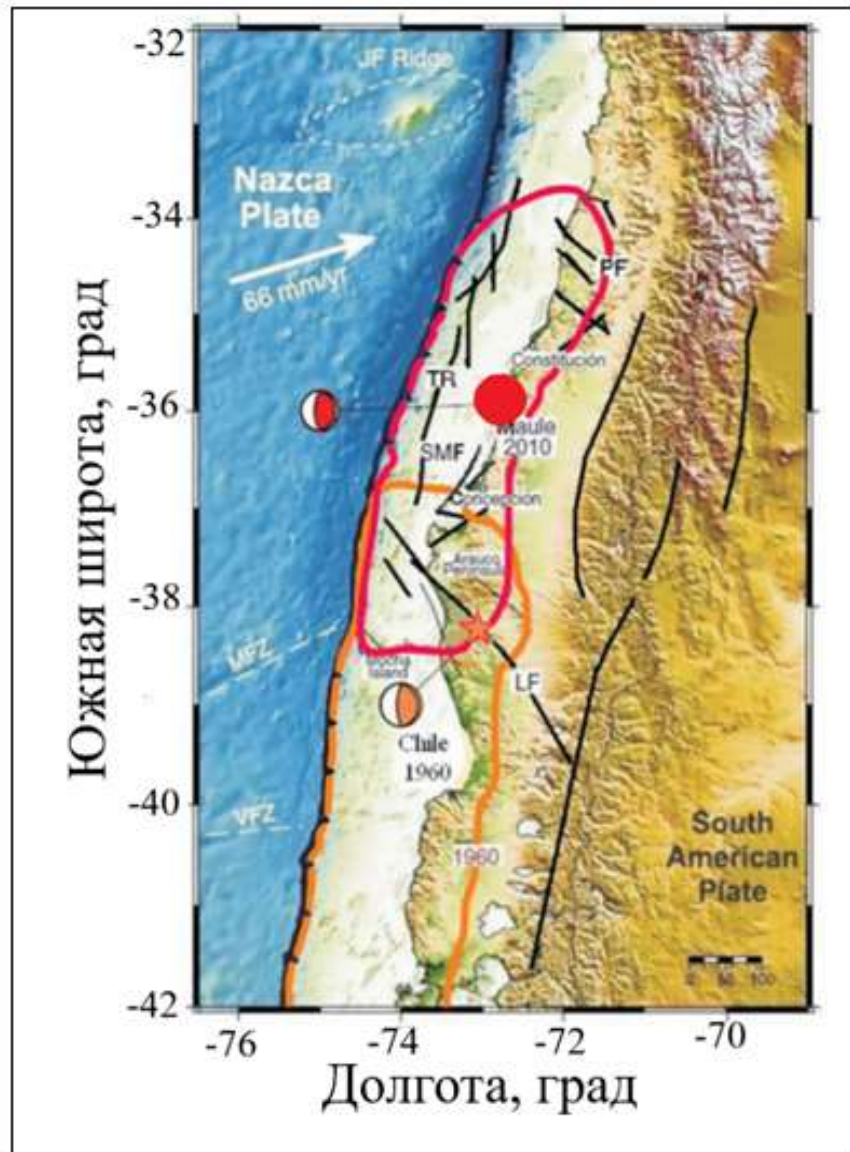
ИЛИ

$$\Delta h(\varphi, \lambda, t) = \frac{a\rho_{ave}}{3\rho_w} \sum_{n=2}^{60} \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k_n} W_n(\Delta C_{nm}(t) \cos m\lambda + \Delta S_{nm}(t) \sin m\lambda) P_n^m(\sin \varphi)$$

Плотность Земли $\rho_{ave} = 5520 \text{ кг/м}^3$.

* Wahr, J., Molenaar, M., & Bryan, F. O. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE / *J. Geoph. Res.* 1998. 103. 30205-30229. doi:10.1029/98JB02844

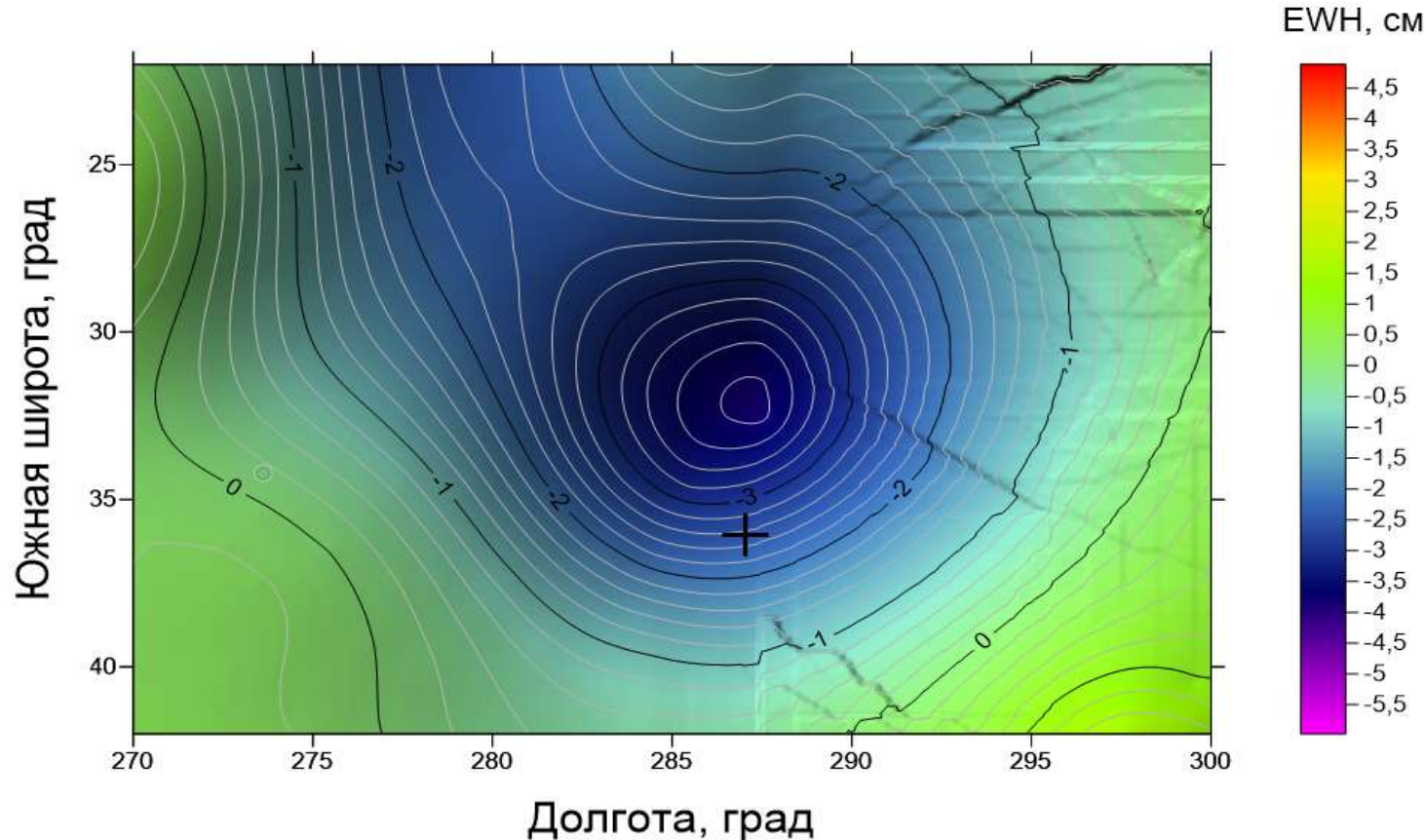
Очаговая область Чилийского землетрясения 2010 г.



Землетрясение $M_W=8.8$ произошло в 06:34:11 UTC в прибрежной зоне Центрального Чили (район Мауле) 27.02.2010 г. и сгенерировало мощное цунами. Координаты эпицентра - $36,122^\circ\text{S}$ и $72,898^\circ\text{W}$. Очаг находился на глубине $22,9 \pm 9,2$ км, его размеры - 600×120 км. Здесь плита Наска поддвигается под Южноамериканскую со скоростью 66 мм/год.

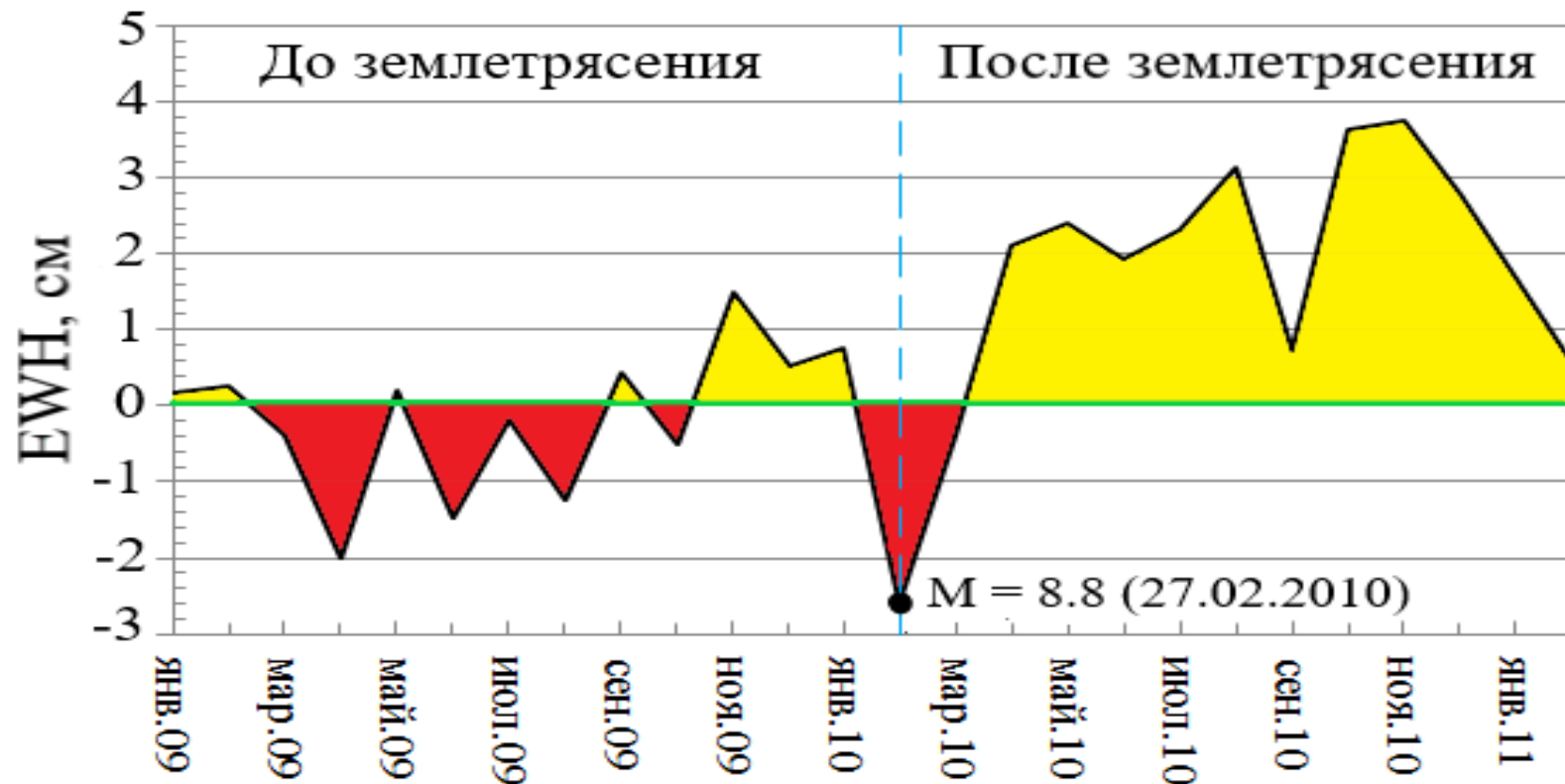
С 27 февраля 2010 г. по 28 февраля 2011 г. в очаговой области $M_W=8.8$, по данным USGS, были зарегистрированы 217 постсейсмических события с магнитудами $M > 5.0$ и глубинами гипоцентров от 11 до 50 км.

Цифровая карта пиковой области землетрясения $M_W=8.8$ (февраль 2010 г., по измерениям GRACE)



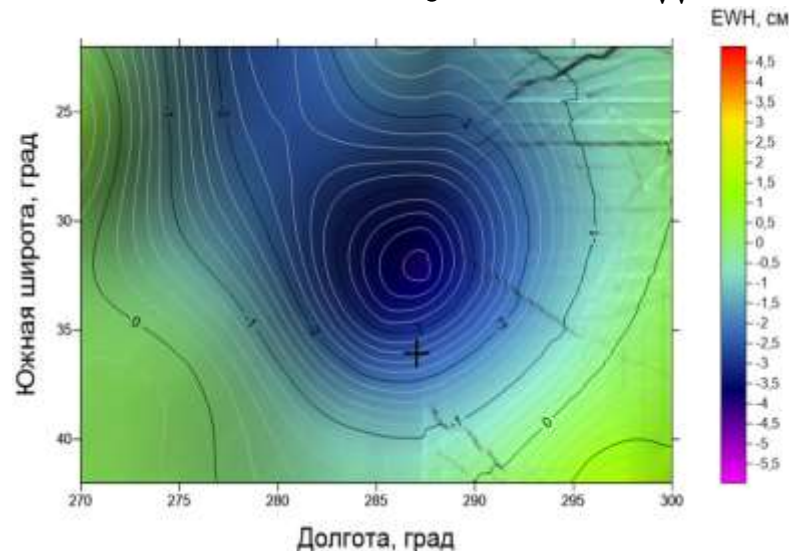
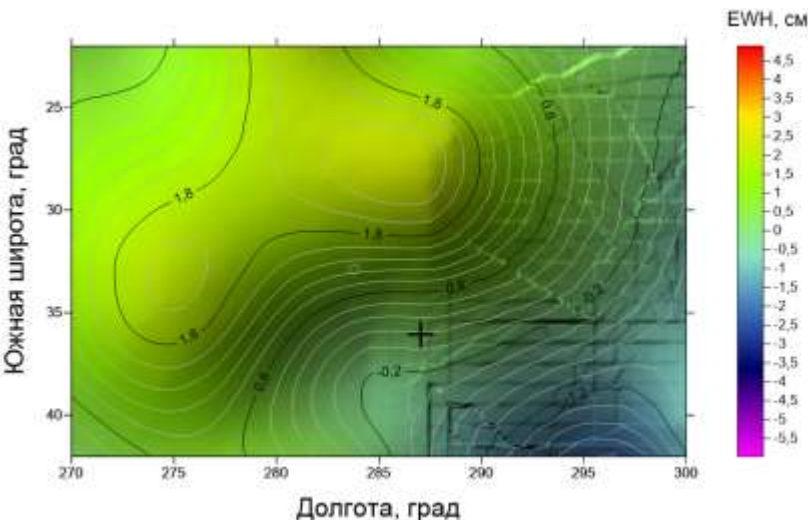
Эпицентр землетрясения Мауле расположен на периферии сейсмоактивной области с отрицательными значениями EWH. Центр аномалии расположен севернее эпицентра землетрясения $M_W=8.8$. Ориентация аномальной области - направление SW-NE.

Вариации параметра EWN в эпицентральной области землетрясения $M_w=8.8$



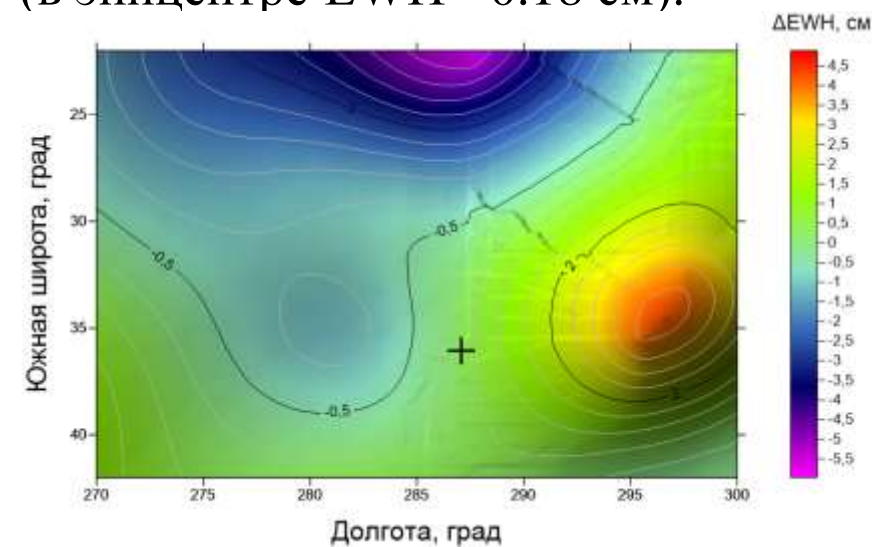
Минимальное значение EWN равно -2.58 см определено для февраля 2010 г., когда произошло Маульское сейсмособытие. С апреля 2010 г. по февраль 2011 г., в период регистрации постсейсмических явлений в Центральном Чили, параметр EWN был положительным.

Изменение EWH в пиковой области Мауле ($M_W=8.8$)



«Фоновая» цифровая карта EWH для спокойных геодинамических условий в январе 2009 г. (в эпицентре EWH= 0.18 см).

Цифровая карта EWH для возмущенных условий в феврале 2010 г. (в эпицентре EWH = -2.58 см).



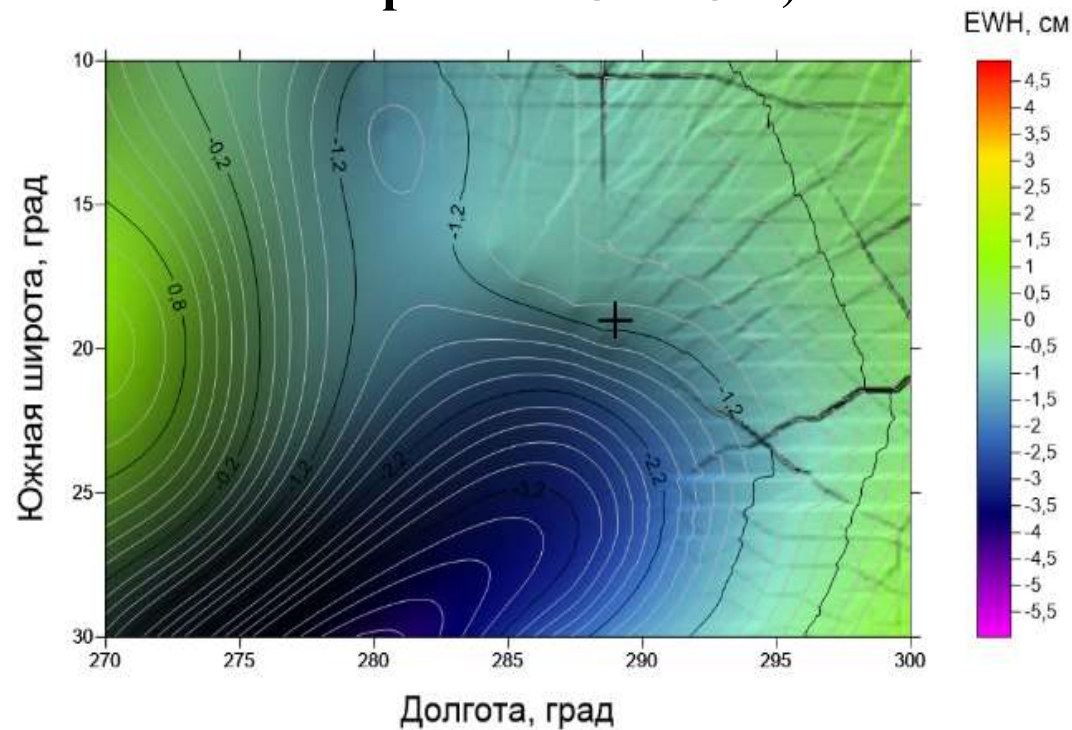
Цифровая карта разности ΔEWH , $\Delta EWH = EWH_1 - EWH_2$. Здесь EWH_1 – значения параметра эквивалентной высоты воды над геоидом за февраль 2010 г., а EWH_2 – за январь 2009 г. Уточнено месторасположение эпицентра: на границе двух областей (отрицательной и положительной) в момент нарушения равновесия фигуры Земли.

Очаговая область землетрясения в Чили (2014 г.)

Землетрясение $M_W=8.2$ произошло в 23:46:47 UTC в прибрежной зоне Центрального Чили 01.04.2014 г. и сгенерировало мощное цунами. Координаты эпицентра - $19.610^\circ S$ и $70.769^\circ W$. Очаг находился на глубине 25 км. С 1 по 15 апреля 2014 г., по данным USGS, произошло 376 форшоков.



Цифровая карта пиковой области землетрясения $M_W=8.2$ (апрель 2014 г., по измерениям GRACE)



Эпицентр землетрясения в Икике (карта GRACE за апрель 2014 г.) расположен к северу от центра аномальной области с отрицательными значениями EWH.

Аномалия ориентирована в направлении SW-NE.

Годовые вариации параметра EWH в эпицентральной области сейсмособытия $M_W=8.2$ (апрель 2013 г. - апрель 2015 г.)

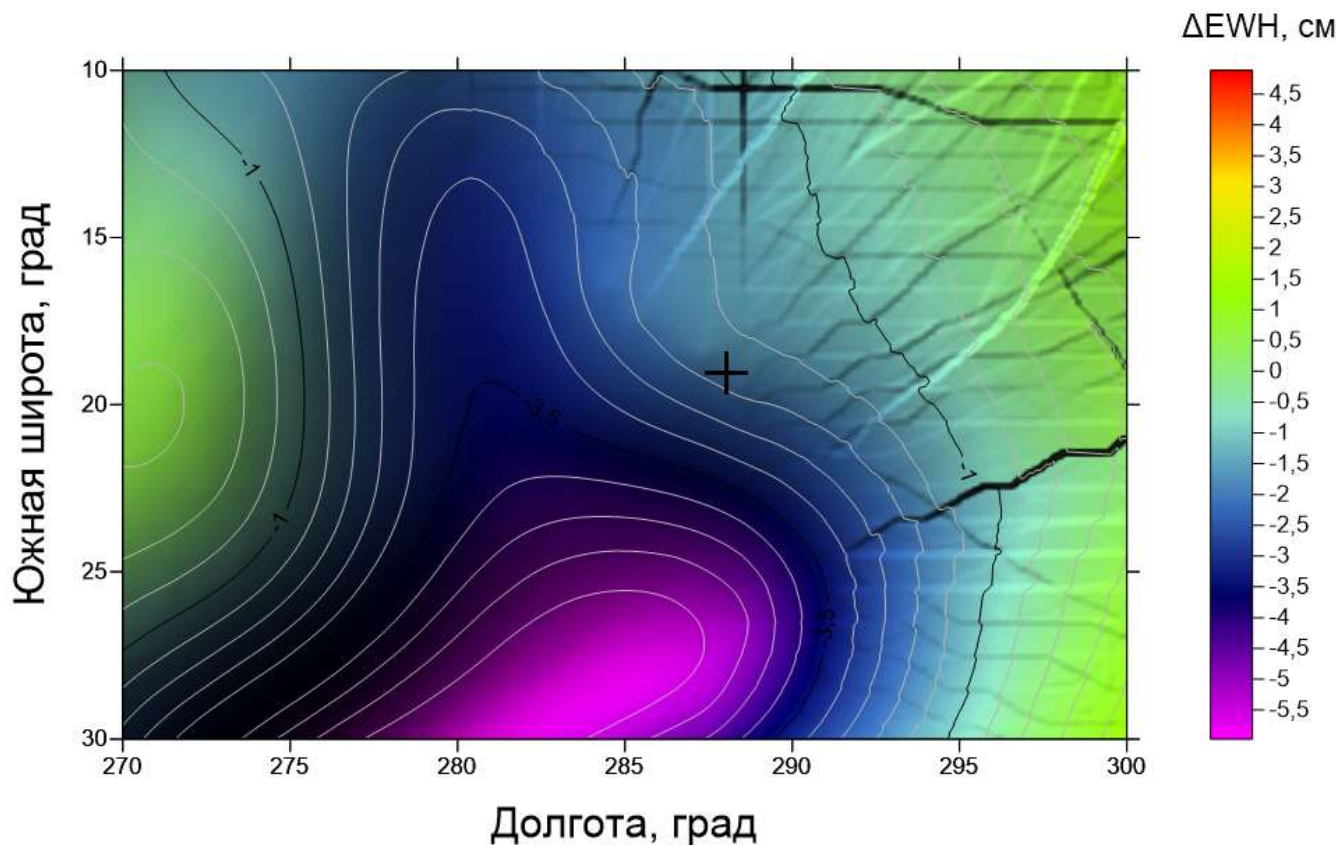


Афтершоком для землетрясения $M_W=8.2$ стало сейсмособытие $M_W=7.7$ (4.03.2014 г.), $EWH=-0,24$.

В апреле 2014 г., когда произошло землетрясение в Икике, $EWH=-1,1$.

В период «До землетрясения» выявлен временной промежуток 7 месяцев (с июня по декабрь 2013 г.), когда в эпицентре землетрясения $M=8.2$ наблюдалась аномалия с отрицательными значениями EWH. В период «После землетрясения» аномальная область с отрицательными EWH зафиксирована во временные промежутки «июль-октябрь 2014 г.» и «январь – март 2015 г.», что характеризует не спадающую геодинамическую активность в Юноамериканском регионе и свидетельствует о напряженно-деформированном состоянии геосреды.

Разностная цифровая карта ΔEWH в пиковой области землетрясения $M_w=8.2$ по данным GRACE

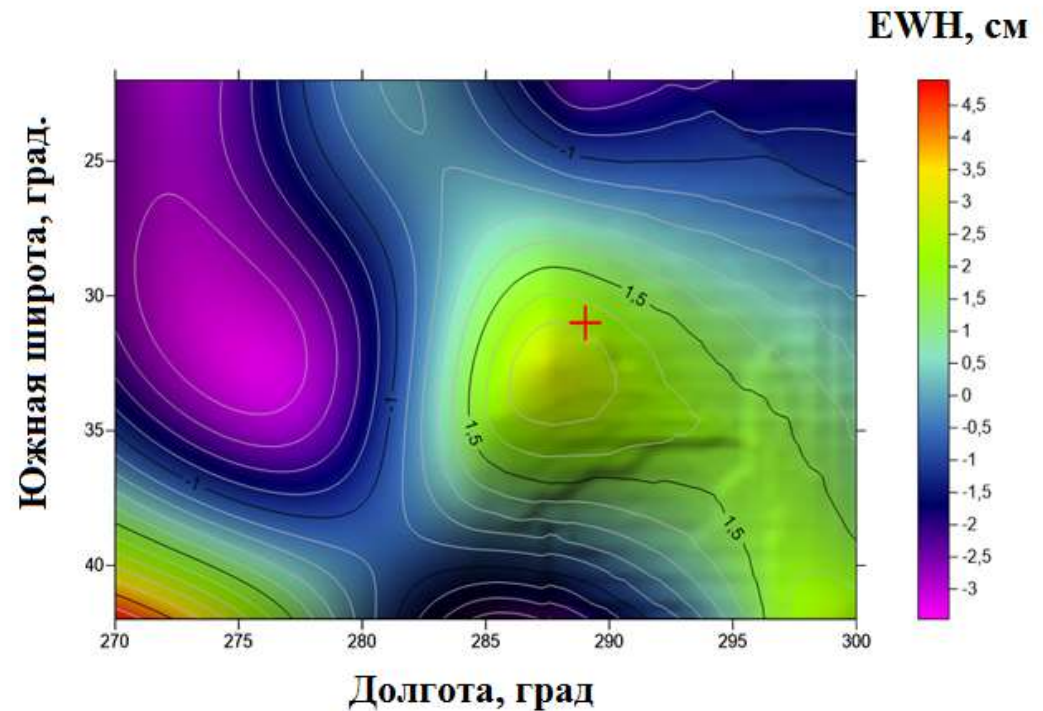


Эпицентр землетрясения в Икике находится севернее от центра аномальной области с отрицательными значениями EWH. Аномалия ориентирована в направлении SW-NE. *Уточнено месторасположение эпицентра:* на периферии аномалии в момент повышения упругой поверхностной нагрузки на разломы.

Очаговая область землетрясения 2015 г. (Чили)



Цифровая карта аномальной пиковой области землетрясения $M_W=8.3$ (измерения GRACE)



Землетрясение $M_W=8.3$ произошло в 22:54:32 UTC в прибрежной зоне Центрального Чили 16.09.2015 г. и сгенерировало мощное цунами. Координаты эпицентра 31.573°S и 71.674°W . Очаг находился на глубине 22,4 км.

Эпицентр землетрясения в Ильяпель расположен на периферии аномалии с положительными значениями EWN. Ее центр находится южнее эпицентра $M_W=8.3$. Аномалия ориентирована в меридиональном направлении.

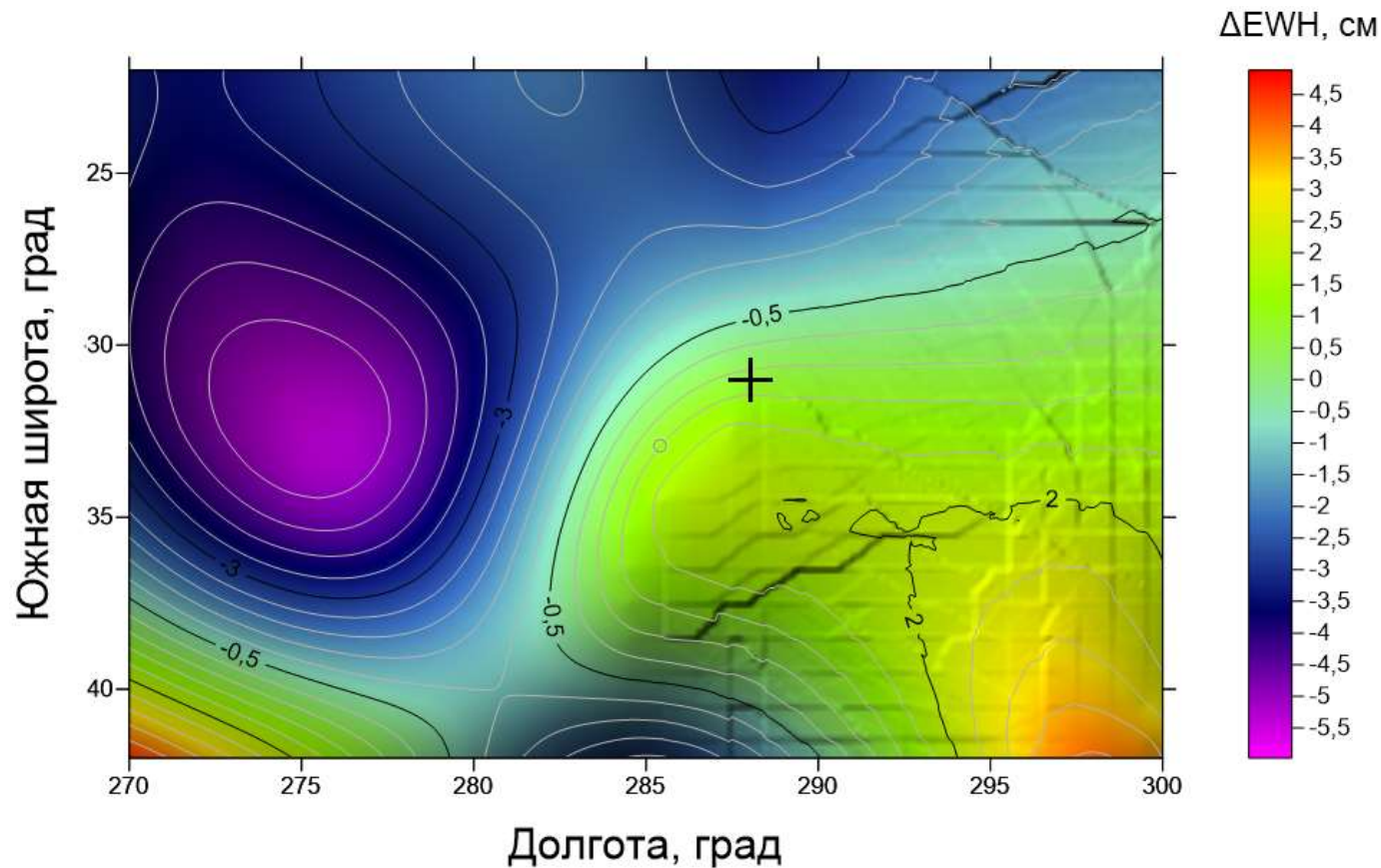
Изменения параметра EWH в эпицентральной области землетрясения $M_W=8.3$



В сентябре 2015 г.,
когда произошло
сейсмособытие с
 $M_W=8.3$,
 $EWH=0,78$.

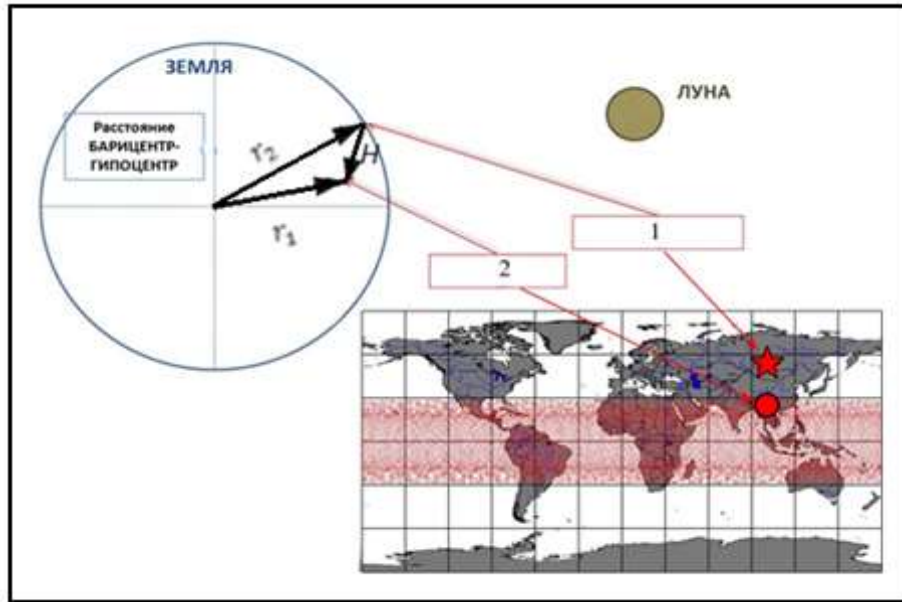
В исследуемый период, с сентября 2014 г. по август 2016 г., параметр EWH был положительным. Максимальное значение параметра зафиксировано в июле 2015 г., $EWH=7,42$. В эпицентральной области с землетрясения с $M_W=8.3$ уменьшение EWH наблюдалось в течение 2-х месяцев перед основным сейсмическим моментом.

Разностная цифровая карта ΔEWH в пиковой области землетрясения $M_W=8.3$ по данным GRACE



В момент повышения упругой поверхностной нагрузки на разломы. Эпицентр землетрясения $M_W=8.3$ расположен на периферии, в северной части, положительной аномальной области.

Определение расстояния от гипоцентра сильного землетрясения до барицентра системы Земля-Луна



1 – эпицентр землетрясения
2 – проекция барицентра на поверхность Земли

r_1 – расстояние от центра Земли до барицентра системы Земля-Луна с координатами $(\varphi_2; \lambda_2; T_2; H_6)$

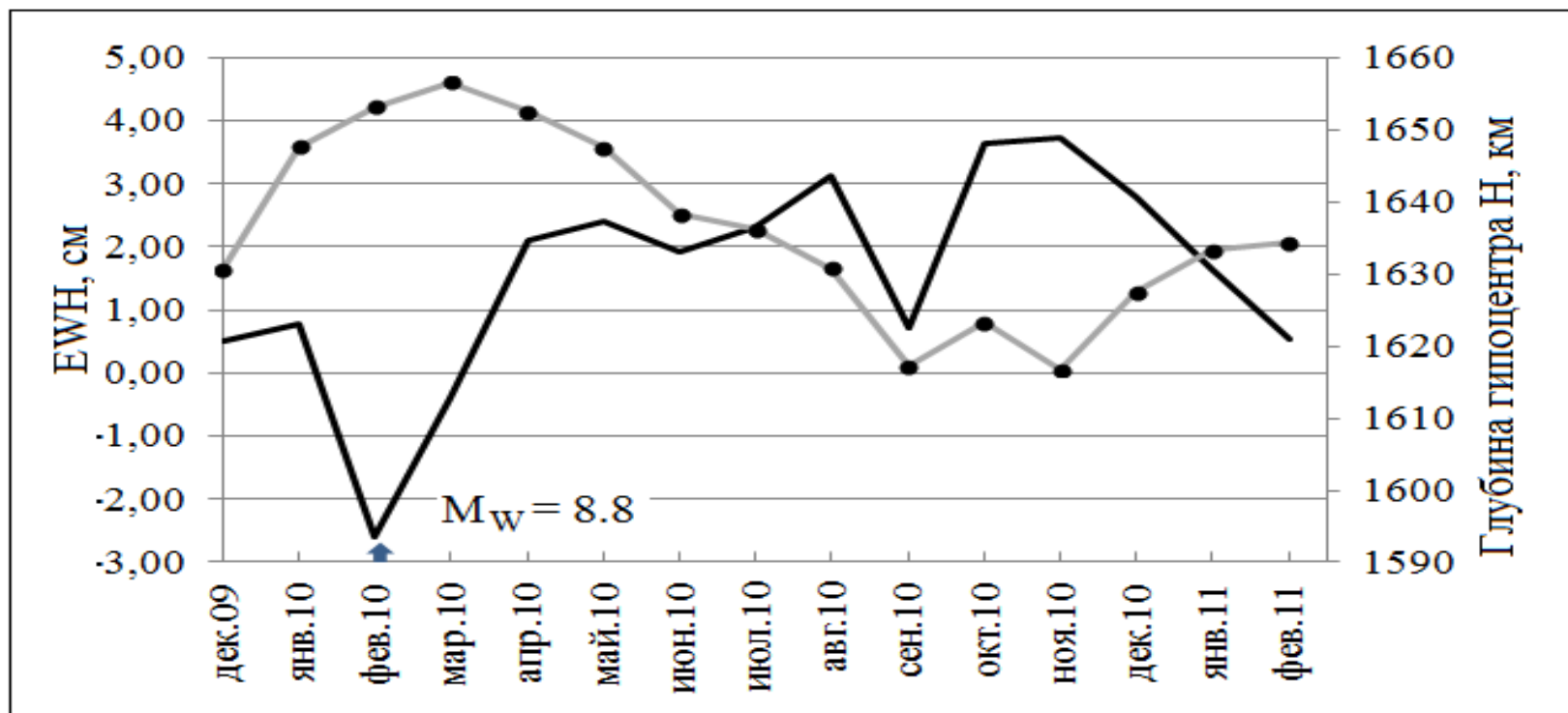
r_2 – расстояние от центра Земли до эпицентра (гипоцентра) с координатами $(\varphi_1; \lambda_1; T_1; H_\Gamma)$

Геодинамический параметр H – расстояние от гипоцентра сильного землетрясения до барицентра системы Земля-Луна.

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi \cos \lambda \\ y = r \cos \varphi \sin \lambda \\ z = r \sin \varphi \end{cases}$$

$$H = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

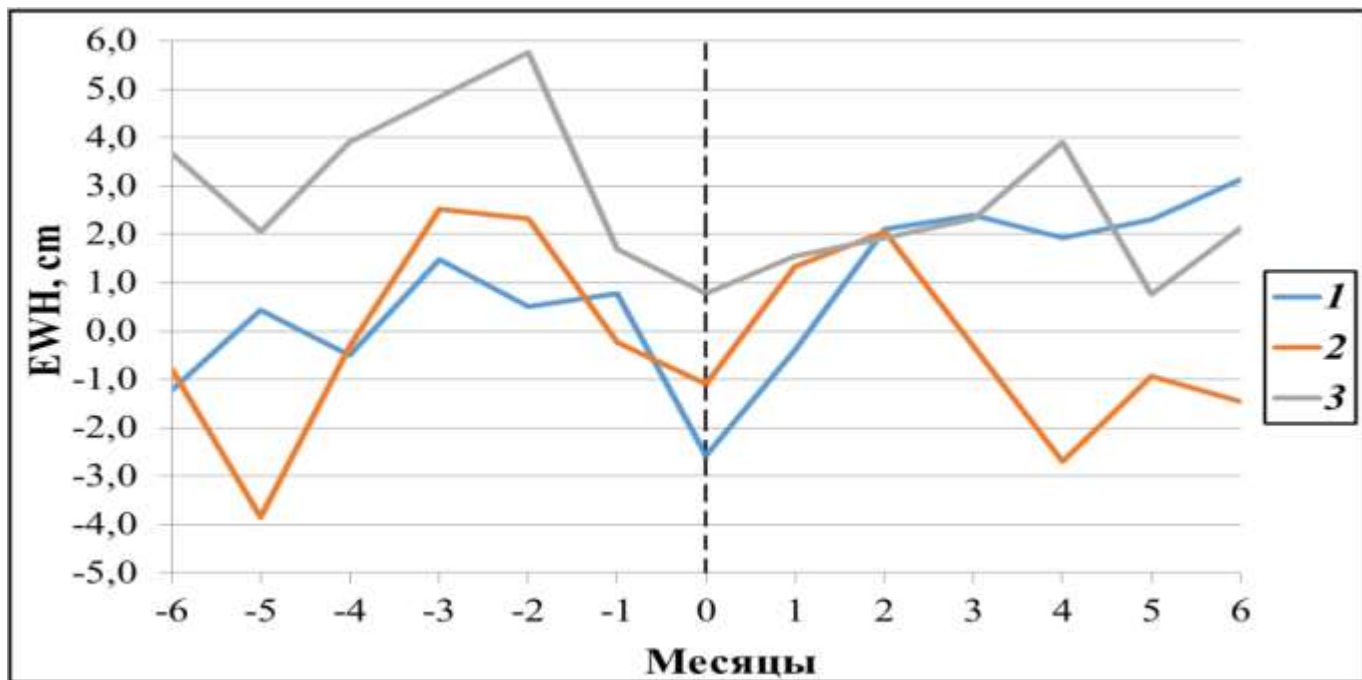
Вариации параметров EWN и Н в эпицентральной области Чилийского землетрясения (2010 г.)



Для выявления связи параметров Н и EWN проводился корреляционный анализ. Наибольший коэффициент корреляции между рядами значений EWN и Н в период с января 2010 г. по январь 2011 г. равен $R = -0,61$. В этот временной промежуток наблюдается максимальное количество постсейсмических явлений в регионе Центрального Чили.

Анализ изменений рядов значений EWH в пиковых областях Чилийских землетрясений

Значение «0» на горизонтальной шкале соответствует месяцу, когда произошло сейсмособытие.



Ряд EWH *1* построен для эпицентра землетрясения $M=8.8$ за период с августа 2009 г. по август 2010 г. Ряд EWH *2* построен для эпицентра землетрясения $M=8.2$ - с октября 2013 г. по октябрь 2014 г. Ряд EWH *3* построен для эпицентра землетрясения $M=8.3$ - с марта 2015 г. по март 2016 г.

Оценки коэффициентов корреляции рядов EWH для эпицентральных областей сильных Чилийских землетрясений с $M_w > 8.0$

Во «втором столбце» приведены коэффициенты корреляции для рядов EWH 1 и 2,

в «третьем» – для рядов EWH 1 и 3, в «четвертом» – для рядов EWH 2 и 3.

Временные промежутки

«13 месяцев» – 6 месяцев до основного сейсмического момента, месяц сейсмособытия и 6 месяцев после основного сейсмомомента.

«7 месяцев» – 3 месяца до землетрясения, месяц сейсмического события и 3 месяца после основного сейсмического момента.

«6 месяцев» – 3 месяца до сейсмического события, 1 месяц землетрясения и 2 месяца после основного сейсмомомента.

«4 месяца» – 3 месяца до землетрясения и месяц сейсмического события.

Временные промежутки	Коэффициенты корреляции		
	Ряды 1 и 2	Ряды 1 и 3	Ряды 2 и 3
13 месяцев	0,02	0,02	0,36
7 месяцев	0,44	0,36	0,73
6 месяцев	0,75	0,45	0,75
4 месяца	0,76	0,68	0,98

Заключение

- В работе на основе измерений GRACE изучалась очаговая область Чилийского землетрясения 2010 г. с магнитудой $M_w=8.8$ в сравнении с последующими сильнейшими землетрясениями в Южноамериканском регионе, произошедших в 2014 и 2015 годах с целью уточнения параметров этих катастрофических сейсмособытий.
- Построены цифровые карты изменения параметра EWN над контуром геоида в исследуемых сейсмоактивных районах (Чили). Показано, что существует отрицательная корреляция между величиной геодинамического параметра H для сильного землетрясения с $M_w=8.8$ (расстояние от гипоцентра до положения барицентра Земля-Луна) и эквивалентной высотой воды над геоидом EWN. Наибольший коэффициент корреляции между рядами H и EWN равный $R = -0,61$ отмечен в период регистрации максимального количества постсейсмических явлений в регионе Центрального Чили.
- Обнаружена в феврале 2010 г. к западу от эпицентра отрицательная аномалия, ориентированная в направлении NE-SW. Аналогичные аномалии наблюдались и для последующих сильных землетрясений в 2014 и 2015 годах. Возможно, образование аномальной области связано с геодинамическими процессами в это время. В ходе дальнейших исследований планируется изучить представительный класс сильнейших землетрясений для детального анализа особенностей изменчивости параметра EWN и его связь с геодинамическими процессами.

Список литературы

1. Tapley B. D., Bettadpur S., Ries J. C., Thompson P. F., Watkins M. M. GRACE measurements of mass variability in the Earth system // *Science*. 2004. V. 305, Is. 5683. P. 503–505.
2. Peidou A., Pagiatakis S. Gravity Gradiometry With GRACE Space Missions: New Opportunities for the Geosciences // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2019. V. 124. Is. 8. P. 9130–9147.
3. NASA. GRACE. URL: <https://grace.jpl.nasa.gov/>
4. USGS. URL: <https://earthquake.usgs.gov/>
5. Moreno M., Rosenau M., Oncken O. Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone // *Nature*. 2010. V. 467. Is. 7312. P. 198–202.
6. Владимирова И. С. Моделирование постсейсмических процессов в субдукционных зонах // *Геодинамика и тектонофизика*. 2012. Т. 3. № 2. С. 167–178.
7. Мазова Р. Х., Рамирес Х. Ф., Баранова Н. А. Рассадин А. Г. Катастрофические землетрясения и цунами в Чили. Свидетельства оправдавшегося прогноза // *Труды НГТУ*. 2014. № 2 (104). С. 43–52.
8. Han S. C., Sauber J., Luthcke S. Regional gravity decrease after the 2010 Maule (Chile) earthquake indicates large-scale mass redistribution // *Geophysical Research Letters*. 2010. V. 37. Is. 23. P. 1–5.
9. Mitsui Y., Yamada K. Possible correlation between annual gravity change and shallow background seismicity rate at subduction zone by surface load // *Earth, Planets and Space*. 2017. V. 69. № 166. P. 1–7.
10. Wahr J., Molenaar M., Bryan F. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1998. V. 103, №. B 12. P. 30205–30229.
11. Simonov K. V.; Kashkin V. B.; Rubleva T. V.; Krasnoshekov K. V. Analysis of GRACE satellite measurements over seismically active areas of the strongest earthquakes // *E3S Web of Conferences: Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2018)*. 2019. Т. 75. С. 1-5.
12. SpaceWeatherLive. URL: <https://www.spaceweatherlive.com/ru/solnechnaya-aktivnost/solnechnyy-cikl>
13. Сибгатулин В. Г.; Перетокин С. А.; Кабанов А. А. Резонансы гравитационных приливов – мощный энергетический источник геодинамических процессов в земной коре // *Журнал СФУ, Техника и технологии*. 2016. № 9 (2). С. 146–165.

Спасибо за внимание !