

Девятнадцатая международная конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА (Физические основы, методы и технологии
мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и
объектов)»

Анализ аномалий в очаговой зоне глубокофокусного Охотоморского землетрясения по данным GRACE

Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Симонов К.В., Мальканова А.В.

Москва, 2021

Актуальность работы

В последние годы для анализа геодинимической активности и гравитационных изменений в районах повышенной сейсмичности широко используются спутниковые данные.

Для изучения пространственно-временных ежемесячных вариаций гравитационного поля Земли успешно применяются космические системы GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment, NASA (США) – GFZ (Германия)) и GRACE-FO (GRACE-follow on, в той же спутниковой конфигурации, NASA/GFZ). Период работы GRACE (2002-2017 гг.) и GRACE-FO (с 2018 г. по настоящее время).

На сегодняшний день гравитационные спутники этих систем стали составной частью глобального мониторинга Земли. Высокоточное позиционирование GRACE и GRACE-FO осуществляется привязкой к глобальной навигационной системе GPS. Погрешность измерений на GRACE не превышает 10 мкм, а на GRACE-FO – не более 1 мкм.

Целью нашего исследования является изучение аномалии, которая возникла в очаговой зоне сильного глубокофокусного землетрясения с $M_w=8.3$, произошедшего в Охотском море у западного побережья полуострова Камчатка 24.05.2013 г., по спутниковым данным GRACE.

Аппаратура космической системы (КС) GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment, NASA/GFZ)

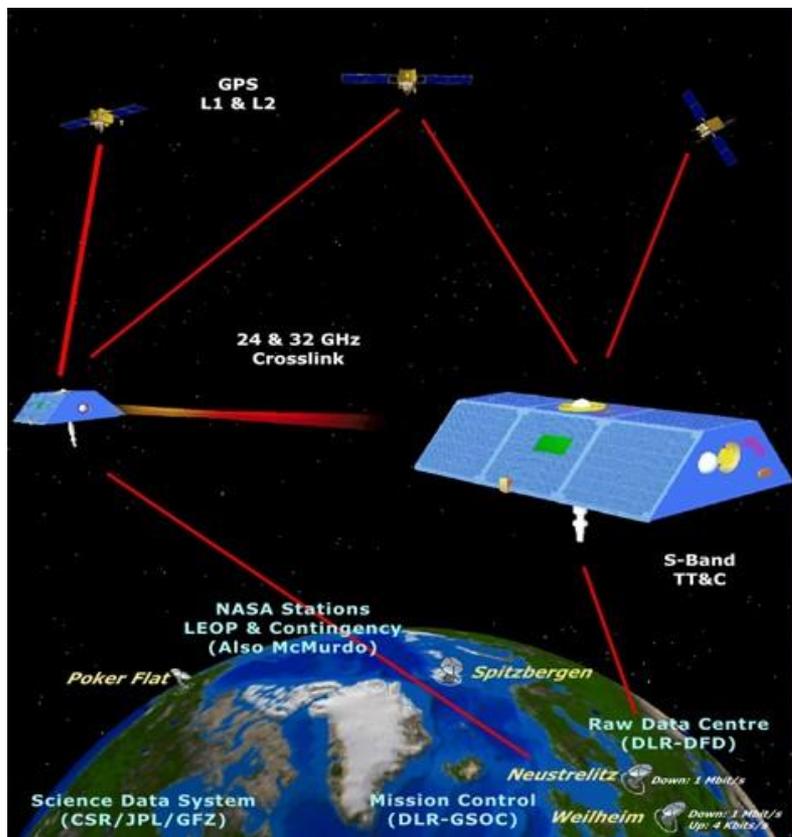


*Орбитальные параметры
КС GRACE
(<https://grace.jpl.nasa.gov>)*

Приборы, установленные на спутниках КС GRACE:

Акселерометры *ACC*, приемники *GPS*, звездная камера *SCA*, микроволновая система дальности *KBR*, лазер *LRR*.

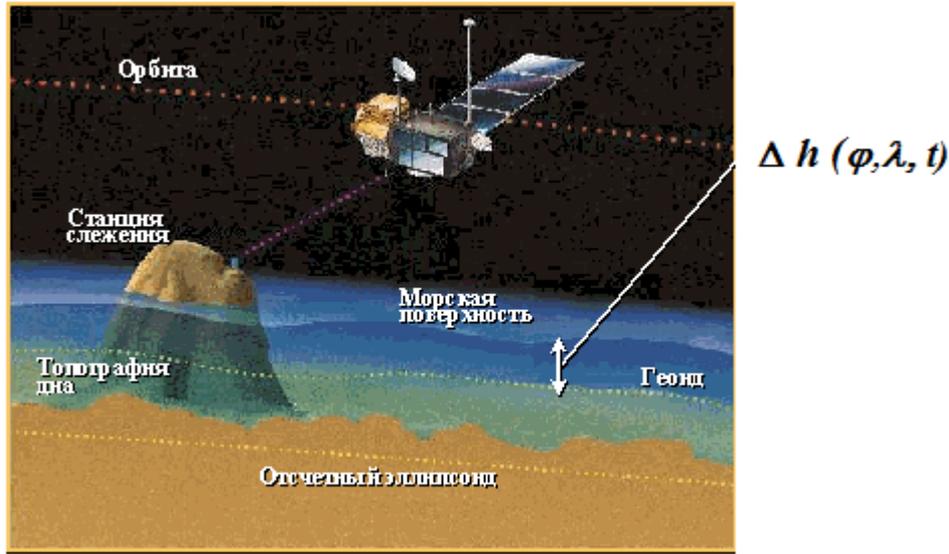
Схема измерений в системе GRACE



В КС GRACE реализуется метод межспутникового слежения SST (Satellite-to-Satellite Tracking), на основе которого выполняются бортовые измерения характеристик относительного движения (дальностей и лучевых скоростей) в системе двух низких спутников.

Суть метода SST: система низкоорбитальных спутников GRACE 1 и GRACE 2 рассматривается в качестве пробной гравиметрической массы. Слежение за ее движением позволяет получать необходимые данные об изменении структуры исследуемого глобального (или локального) гравитационного поля с течением времени.

Определение параметра EWH (*Equivalent Water Height*)



Параметр EWH – толщина слоя воды (в спокойном состоянии) над поверхностью геоида. Определяется из отношения поверхностной плотности $\Delta\sigma(\varphi, \lambda, t)$ * к плотности воды $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$:

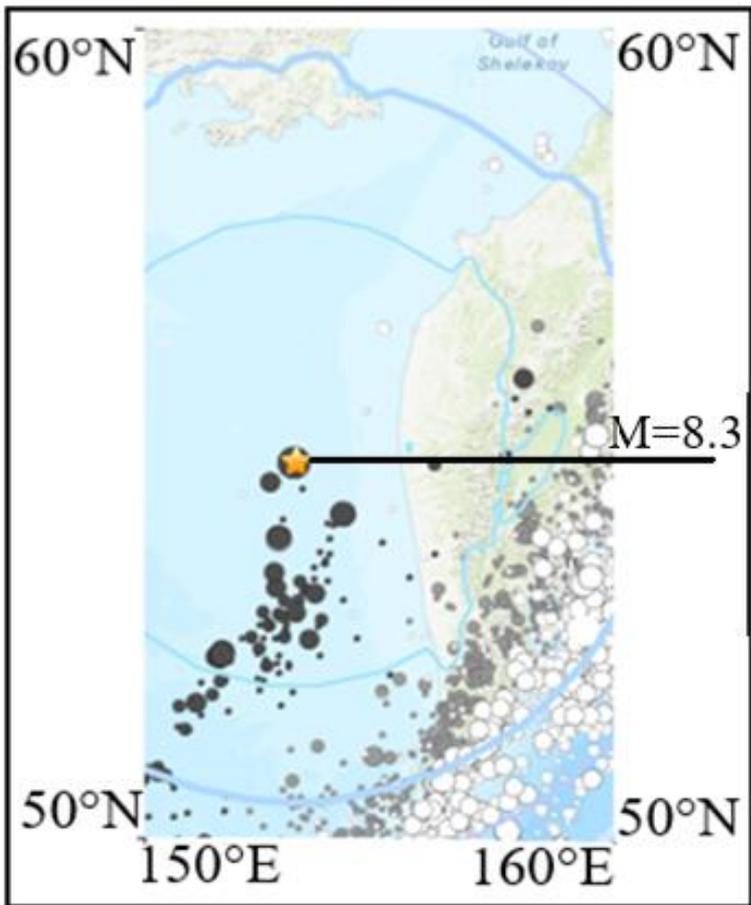
$$EWH = \Delta h(\varphi, \lambda, t) = \frac{\Delta\sigma(\varphi, \lambda, t)}{\rho_w},$$

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

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

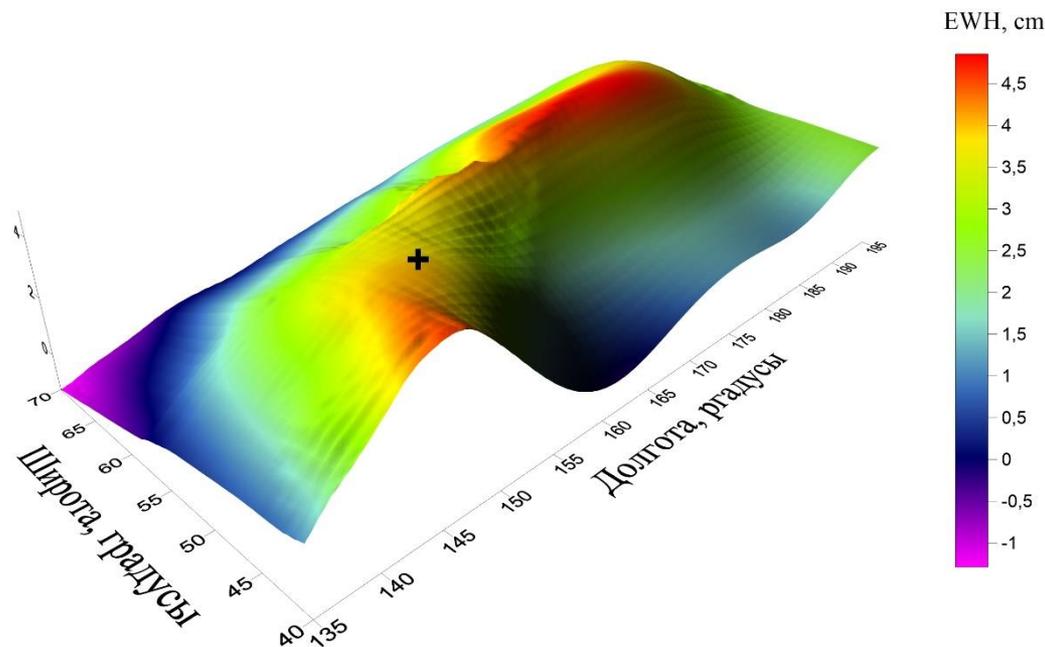
Характеристики очаговой зоны сильного глубоководного землетрясения с $M_w = 8.3$ в Охотском море (24.05.2013 г.)



Землетрясение произошло 24.05.2013 г. в 05:44:48 UTC. Координаты эпицентра - 54.892°N и 153.221°E . Очаг находился на глубине 598.1 км. Предварительная оценка размеров очага составила 400×200 км. В исследуемом регионе Тихоокеанская плита движется относительно Североамериканской плиты со скоростью 79 – 83 мм/год.

Охотоморское землетрясение сопровождалось активными афтерфоршоковыми процессами. По данным Камчатского филиала Геофизической службы РАН глубина афтершоков варьировалась в пределах от 425 км до 720 км.

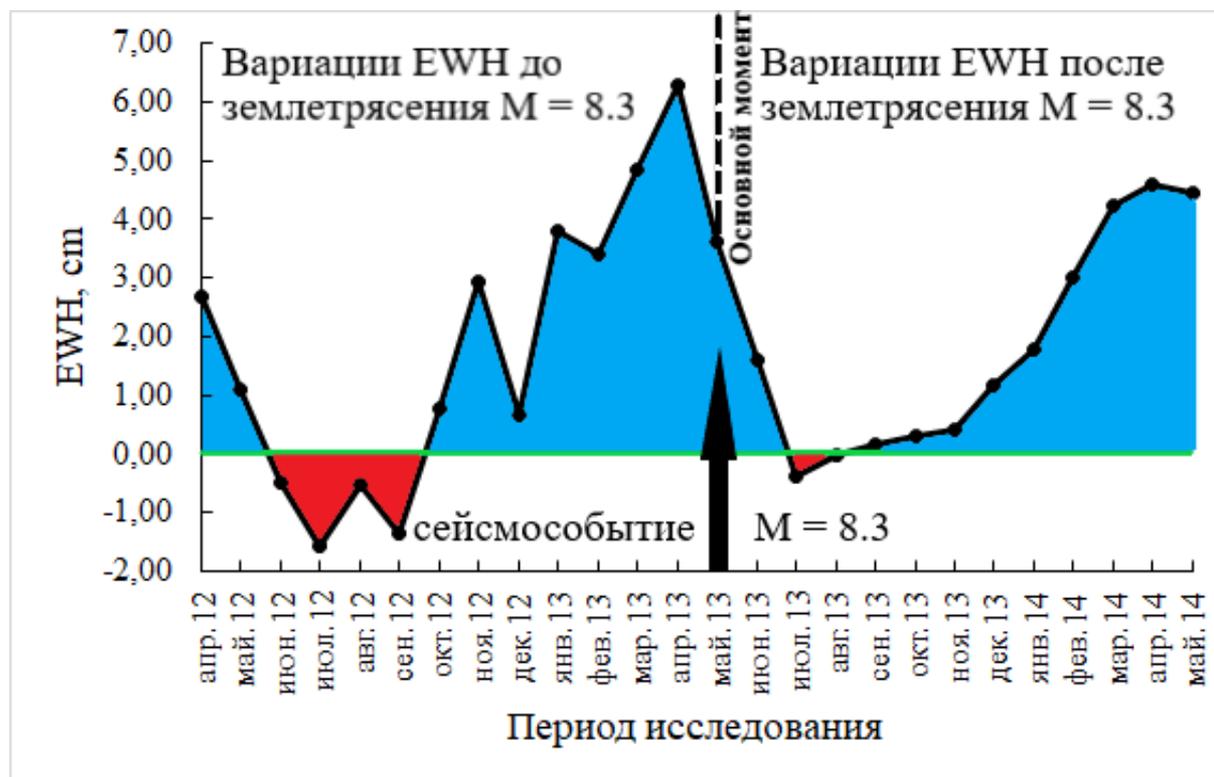
3D модель распределения вариаций EWH относительно очаговой зоны Охотоморского землетрясения по данным GRACE



На 3D модели показано, что гипоцентр (обозначен «крестиком») землетрясения с $M_w = 8.3$ расположен в северо-восточной части очаговой зоны. В это время геодинамическая активность в регионе была наибольшей.

В мае 2013 г. значение EWH относительно гипоцентра с координатами 54.892°N и 153.221°E составило 3,6см.

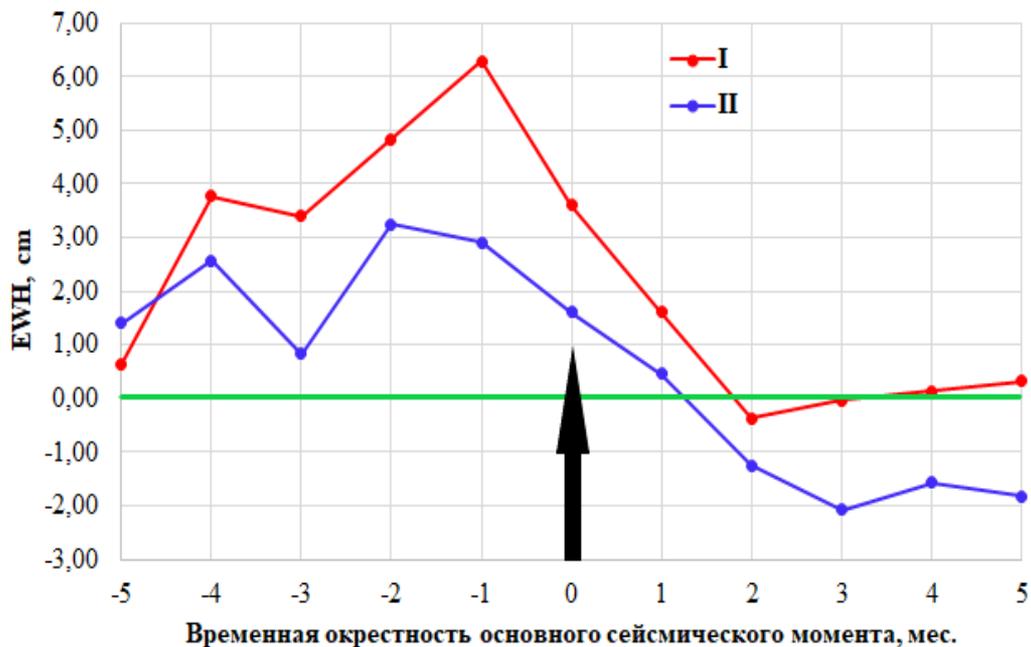
Вариации EWH относительно гипоцентральной области Охотского землетрясения (04.2012–05.2014 гг.)



Наиболее существенные вариации EWH наблюдались в период с октября 2012 г. по июль 2013 г.

За месяц до землетрясения в апреле 2013 г. зафиксировано максимальное значение $EWH=6,07$ см. Сейсмическая активность в регионе продолжалась и в последующие 2 месяца. В июле 2013 г. в очаговой области произошло 6 землетрясений на глубине от 13 до 116 км, параметр EWH снизился до $-0,38$ см.

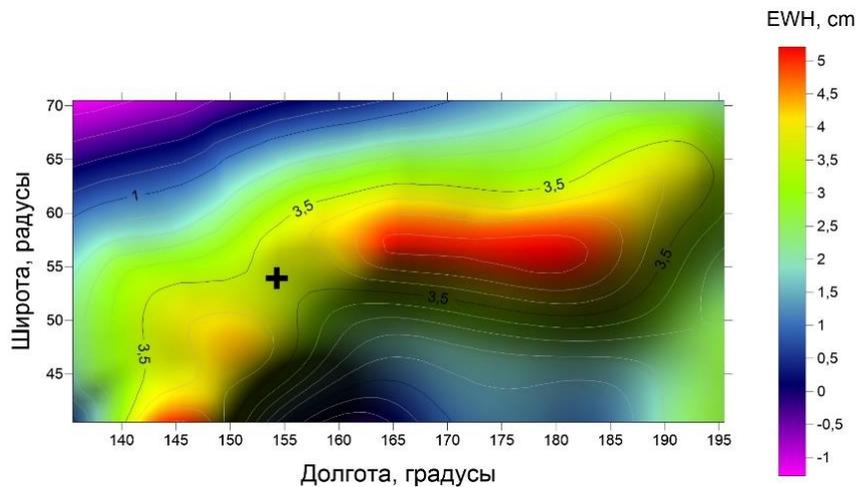
Вариации параметра EWH относительно гипоцентра в условиях возмущенной и фоновой сейсмичности



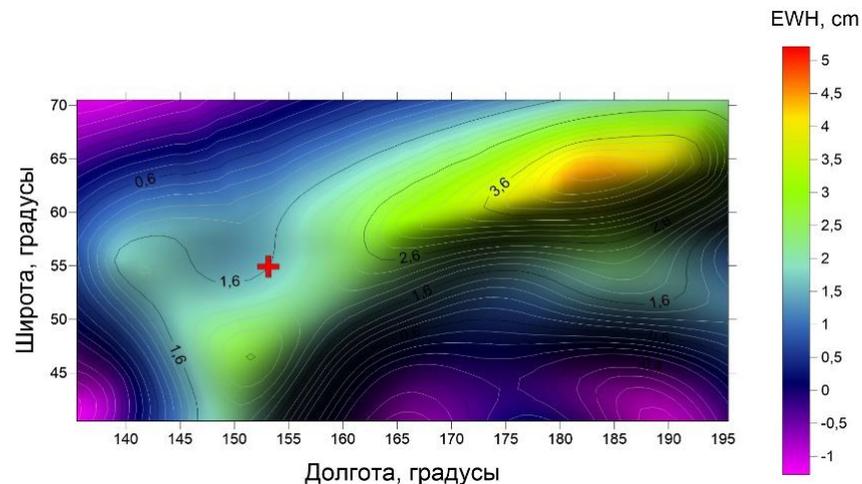
И ряд – значения EWH с декабря 2012 г. по октябрь 2013 г. *II ряд* – значения EWH - с декабря 2008 г. по октябрь 2009 г. Отметка «0» на временной шкале – дата основного момента. Отрицательные значения – период подготовки землетрясения с шагом 1 месяц; положительные – время сейсмической активности с шагом 1 месяц.

Для выявления фонового периода анализировались сейсмические данные по каталогу USGS. Рассчитывался коэффициент корреляции R между рядами EWH для возмущенных и фоновых условий геосреды. Максимальное значение R равное 0,89 получено при анализе рядов EWH I и II. Выявлено, что в течение 10 месяцев исследуемой сейсмической активности значения ряда EWH I существенно превышали величины ряда EWH II.

Визуализация пространственного распределения EWH в сейсмоактивном районе Охотского моря: для возмущённых условиях (а) и фоновых условиях (б)



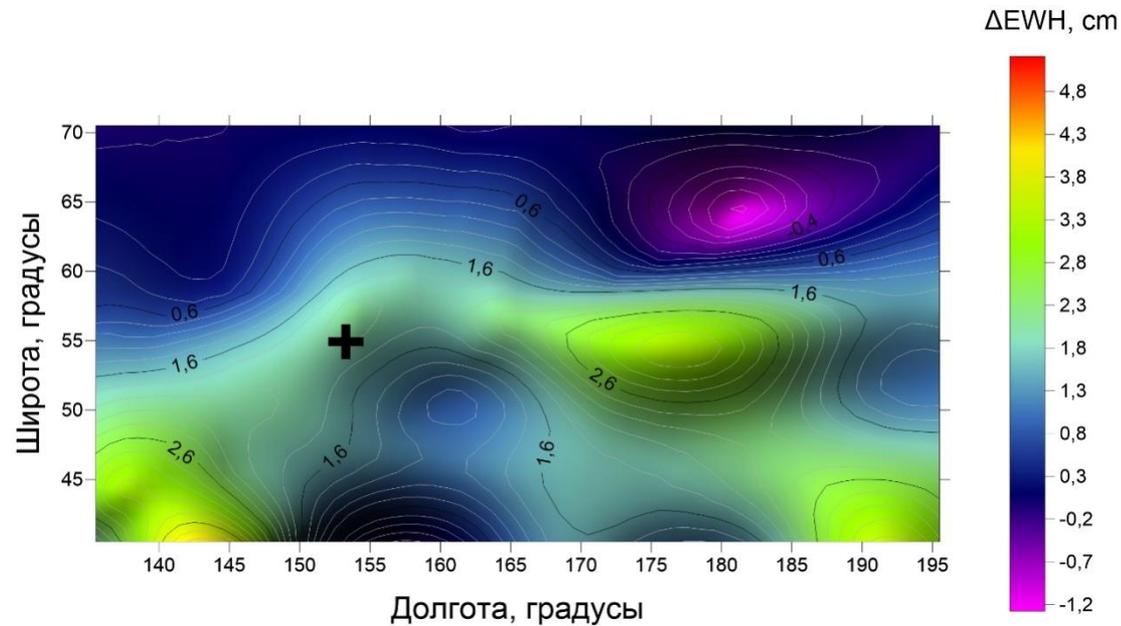
(а) – май 2013 г.



(б) – май 2009 г.

Выполнено картирование распределения параметра EWH для возмущённых (а) и фоновых (б) сейсмических условиях. Показано, что очаговая зона сильнейшего землетрясения расположена в области между положительными аномалиями. Гипоцентр сильнейшего землетрясения расположен в северной части сейсмоактивной области.

Разностная карта распределения ΔEWH относительно очаговой зоны Охотского землетрясения



$$\Delta EWH = EWH_2 - EWH_1,$$

здесь параметр EWH_2 – эквивалентная высота воды над геоидом в мае 2013 г.,
а EWH_1 – в мае 2009 г.

Из анализа цифровой карты вариаций EWH выявлено, что относительно гипоцентра сильнейшего землетрясения сформировалась положительная аномальная область, где $\Delta EWH = 1,6$ см. Аномальная область направлена с юго-запада на северо-восток, значение СКО составило 1,38.

Определение индекса аномальности δEWH^*

$$\delta EWH = \frac{\Delta EWH}{\sigma_{\Delta EWH}},$$

$$\Delta EWH = EWH_2 - EWH_1,$$

где EWH_2 – значения параметра эквивалентной высоты воды над контуром геоида за май 2013 г., EWH_1 – за май 2009 г.,

$\sigma_{\Delta EWH}$ – среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma_{\Delta EWH} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta EWH_i - \Delta EWH_{\text{cp}})^2}{n-1}},$$

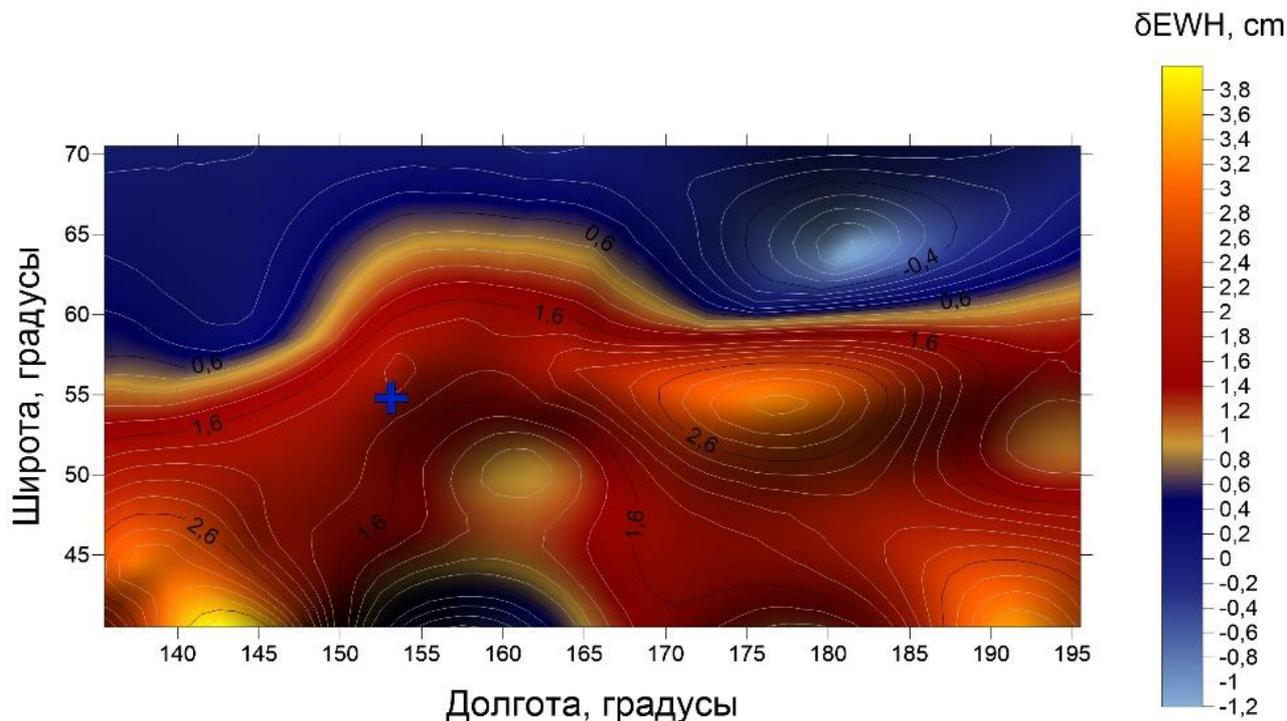
ΔEWH_{cp} – среднее значение ΔEWH ,

n – количество измерений,

i – номер измерения.

* *Кашкин В.Б., Одинцов Р.В., Рублева Т.В., Романов А.А., Симонов К.В. Геофизические явления в атмосфере над сейсмофокальными зонами коровых землетрясений в приграничных районах Ирана–Ирака // Триггерные эффекты в геосистемах. – Москва: Институт динамики геосфер РАН, 2019. – С. 374-382.*

Визуализация пространственного распределения модифицированного индекса аномальности δEWH относительно очаговой области



Выявлена положительная аномалия относительно очаговой области сильнейшего землетрясения, карта которой построена на основе индекса δEWH . Область аномалии ориентирована в направлении юго-запад-северо-восток. Выполнен статистический анализ полученных данных, значение СКО = 1.

Определение индекса аномальности ω_{EWH}^*

$$\omega_{EWH} = \frac{\Delta EWH - \mu \Delta EWH}{\sigma_{\Delta EWH}}$$

$$\Delta EWH = EWH_2 - EWH_1,$$

здесь EWH_2 – значения параметра эквивалентной высоты воды над геоидом за май 2013 г.; EWH_1 – за май 2009 г.

$\mu \Delta EWH$ – математическое ожидание.

$\sigma_{\Delta EWH}$ – среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma_{\Delta EWH} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta EWH_i - \Delta EWH_{cp})^2}{n - 1}}$$

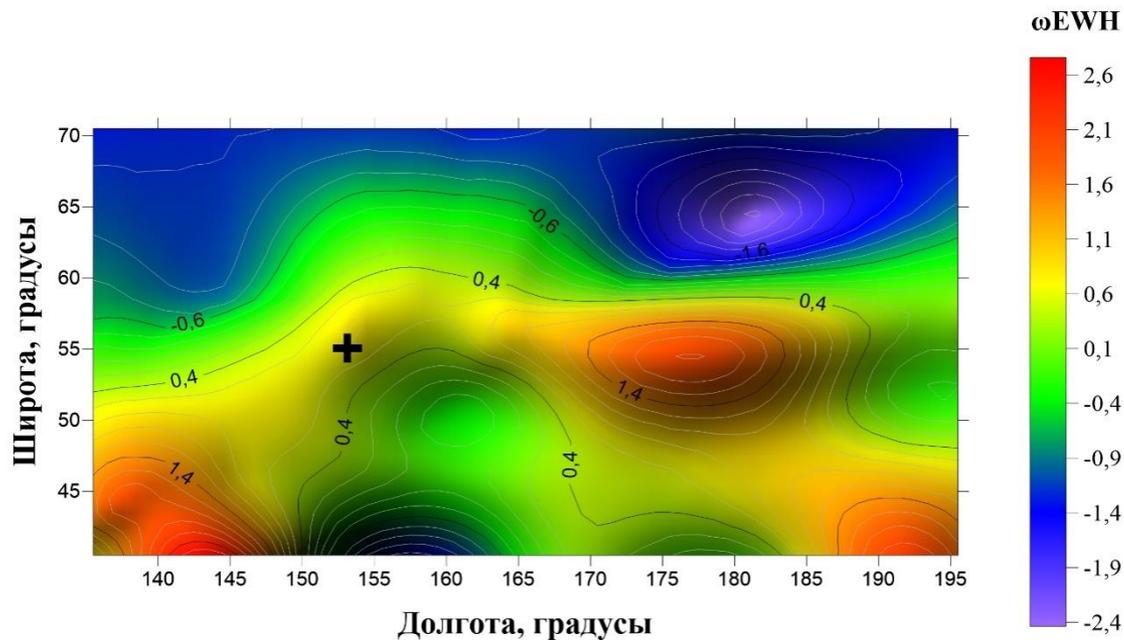
ΔEWH_{cp} – среднее значение ΔEWH

n – количество измерений

i – номер измерения

* *Eleftheriou A., Filizzola C., Genzano N., Lacava T., and et al. Long-Term RST Analysis of Anomalous TIR Sequences in Relation with Earthquakes Occurred in Greece in the Period 2004–2013 // Pure and applied geophysics. 2016. V. 173. P. 285–303.*

Визуализация распределения индекса аномальности ω EWH относительно очаговой зоны



Предложенный метод визуализации позволил выявить область положительной аномалии относительно очаговой зоны землетрясения с $M = 8.3$, ориентированную в том же направлении. Выполнен статистический анализ полученных данных, СКО = 1.

Заключение

- Выполнен анализ геодинамических особенностей сильного глубоководного землетрясения с $M_w=8.3$, которое произошло в районе Охотского моря, по данным USGS за 2008 – 2014 гг. Основное землетрясение сопровождалось афтершоками.
- Построены карты распределения EWH (I, II) относительно очаговой зоны этого землетрясения: для возмущенной геосреды (декабрь 2012 г.–октябрь 2013 г.) и фонового сейсмического режима (декабрь 2008 г. – октябрь 2009 г.). Рассчитан коэффициент корреляции между рядами значений EWH I и EWH II относительно гипоцентра, $R = 0.89$.
- Для выявления особенностей аномалии относительно очаговой зоны землетрясения построены карты отклонений ΔEWH , модифицированных индексов аномальности δEWH и ωEWH для мая 2013 г.. Выполнен статистический анализ результатов расчетов.
- По картам распределения индексов аномальности δEWH и ωEWH выполнен анализ особенности расположения положительной аномалии, выявленной относительно гипоцентра. Область аномалии ориентирована в направлении SW-NE. Полагаем, что образование выделенной аномалии связано с активными геодинамическими процессами в исследуемом регионе в апреле-июле 2013 г.

Спасибо за внимание!