Физические основы прогнозирования гелиогеофизических процессов и событий
«ПРОГНОЗ-2023», 29–31 мая 2023 г. ИЗМИРАН. Москва

Воздействие волн цунами на ионосферу и геомагнитное поле

В.М. Сорокин, В.В. Сурков, А.К. Ященко

Наблюдение эффектов волны цунами в системе океан – атмосфера – ионосфера.

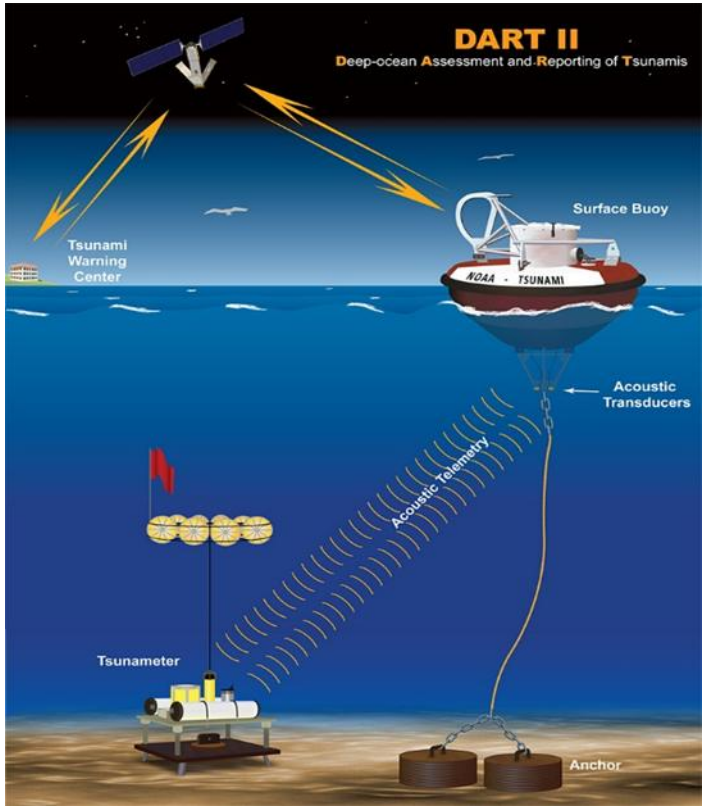
Характеристики волн цунами, ионосферных возмущений и геомагнитного поля.

Модели генерации волной цунами ионосферных и геомагнитных возмущений.

Возможности прогноза волны цунами.

Волна цунами в океане

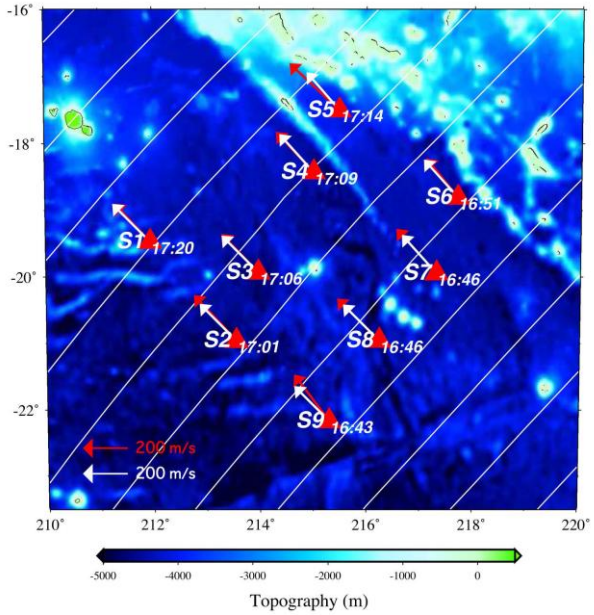
Система мониторинга цунами в реальном времени с использованием придонных датчиков

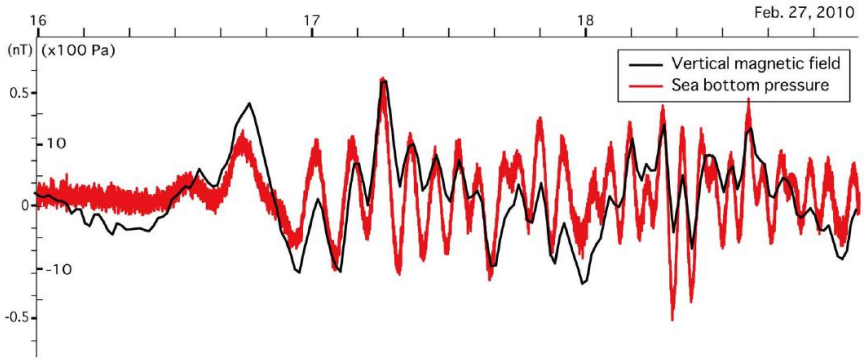


Наблюдение волны цунами и магнитного поля в океане

Данные подводной сети датчиков давления и магнитного поля. Землетрясение в Чили 27.02.2010, 06:34.

H. Sugioka et al., Scientific reports, 2014



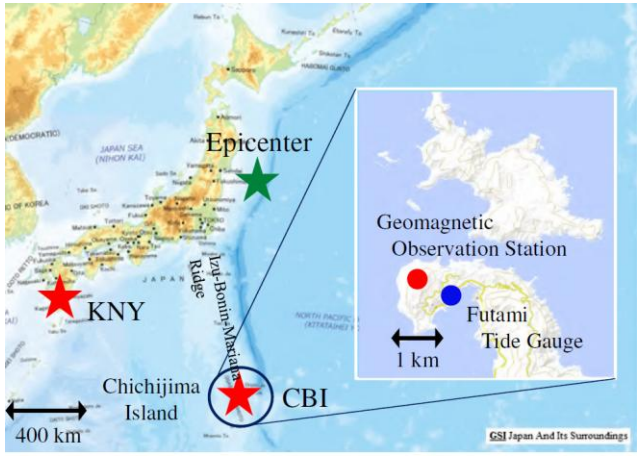


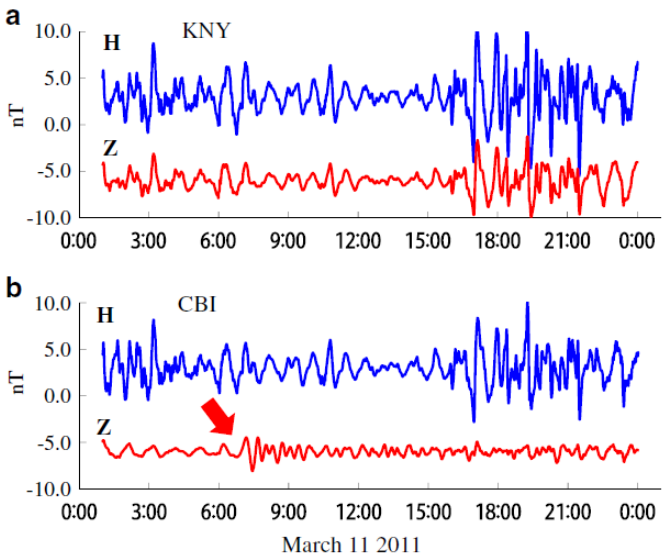
Волновой фронт цунами.
Белые стрелки – скорость распространения фронта по данным давления.
Красные стрелки – скорость распространения по электромагнитным данным.

Точка S8.
Наблюдение возмущений вертикального магнитного поля (черное) и давления на дне (красное) в точке. Глубина 4800 м. Изменения 0.5 нТл и 1200 Па.

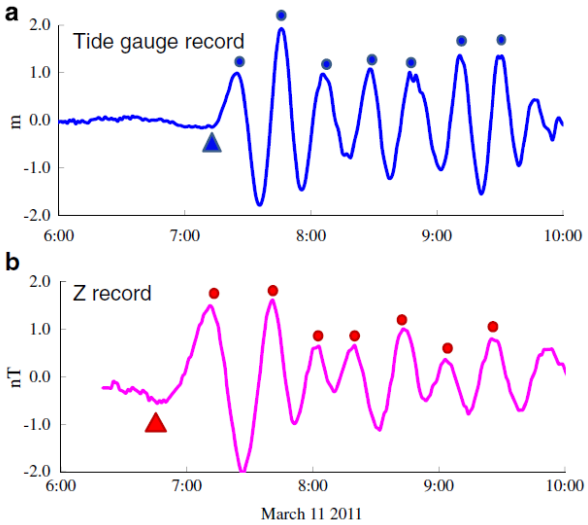
Наблюдение волны цунами и магнитного поля. Землетрясение в Tohoku 11.03.2011.

Tatehata et al., Earth, Planets and Space, 2015.





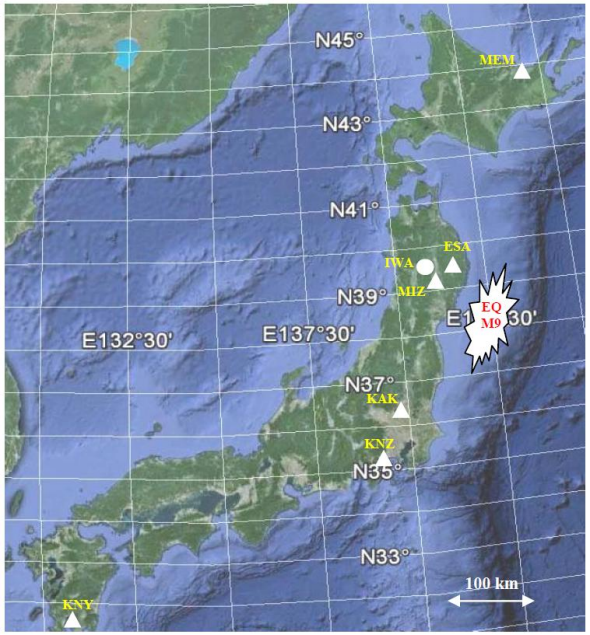
Наблюдения горизонтальной и вертикальной компонент магнитного поля на двух станциях a (KNY) и b (CBI). Красная стрелка указывает на появление аномального сигнала связанного с цунами.

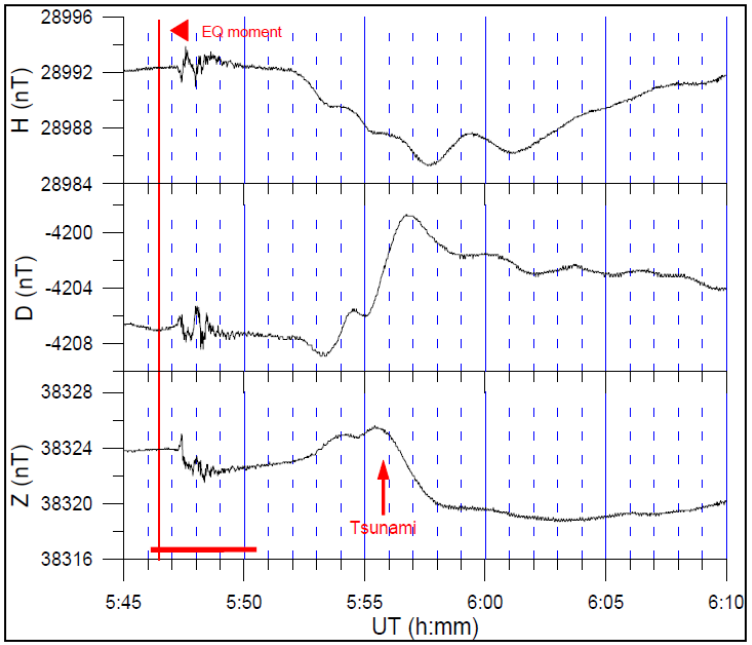


a) Запись мореографа и b) Z-компоненты магнитного поля на острове Chichijima 11.03.2011 (UTC). Треугольники обозначают появление сигнала.

Наблюдение вариации магнитного поля, генерируемого цунами в прибрежной зоне на суше. Землетрясение в Tohoku 11.03.2011.

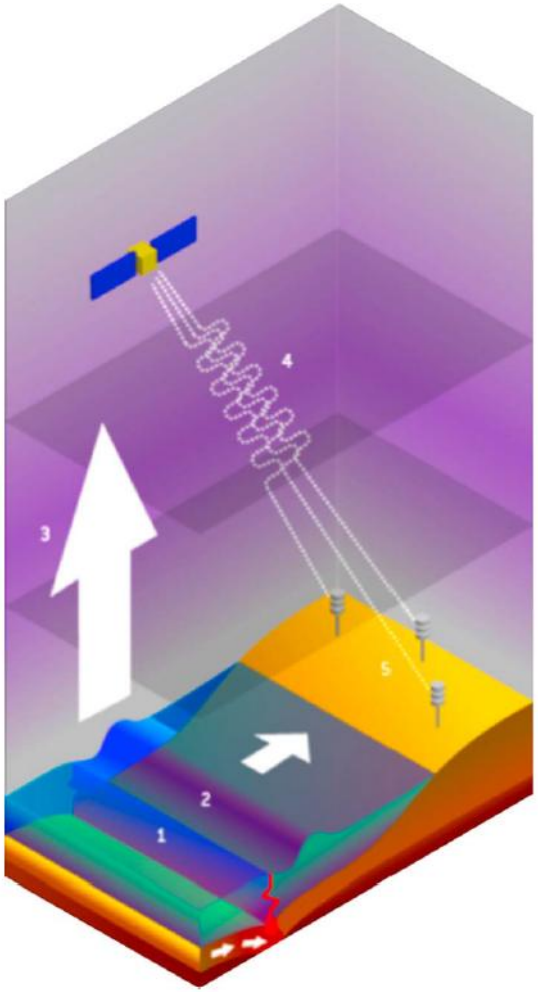
Kopytenko et al., 2017.





Землетрясение 11.03.2011 с амплитудой M=9 в 05:46:24 UT. Величина вариаций магнитного поля 6–12 нТл на расстоянии ~30 км на суше от берега на расстоянии 130 км от эпицентра. Сейсмический сигнал приходит на 1 мин раньше вариации магнитного поля. Наблюдаются вариации с периодом 30-40 с. Такие вариации сейсмического поля отсутствуют. Стрелкой указан момент прихода волны цунами к береговой линии

Схема возмущения ионосферы волной цунами, регистрируемого методом GPS зондирования.
Occhipinti et al., JGR, 2013



Смещение поверхности океана в волне цунами генерирует АГВ, которая формирует возмущение в ионосфере.

Вариациями плотности плазмы воздействуют на электромагнитные волны, распространяющиеся от GPS спутников к наземным станциям.

Их регистрация позволяет получить изображение АГВ в ионосфере.

Моделирование волны цунами. Уравнения скорости и смещения поверхности моря в волне цунами.
Pelinovsky, 2006

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla_h \cdot \left(h\mathbf{V}_h \right) = 0; \quad \frac{\partial \mathbf{V}_h}{\partial t} + g\,\nabla_h \eta = 0$$

$\eta\left(\mathbf{r}, t\right)$ Смещение поверхности в волне цунами

Горизонтальная компонента скорости в волне цунами не меняется с глубиной

$$V_z\left(\mathbf{r}, z, t\right) = \left(1 + \frac{z}{h}\right)\frac{\partial \eta(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

Приближение мелкой воды и малых смещений поверхности $\eta / h << 1$ $kh << 1$

$$\Delta_h \eta - \frac{1}{a^2}\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0; \quad a = \sqrt{gh}$$

Скорость волны

Моделирование генерации и распространения АГВ волной цунами

Госсард и Хук, 1978

Система уравнений

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \left(\mathbf{v}\cdot\nabla\right)\mathbf{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \left(\mathbf{v}\cdot\nabla\right)p = -c^2\rho\nabla\cdot\mathbf{v}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla\left(\rho\mathbf{v}\right) = 0$$

Граничное условие на поверхности морской среды

$$v_z\left(\mathbf{r},0,t\right) = \frac{\partial}{\partial t}\eta\left(\mathbf{r},t\right)$$

Приближение изотермической атмосферы

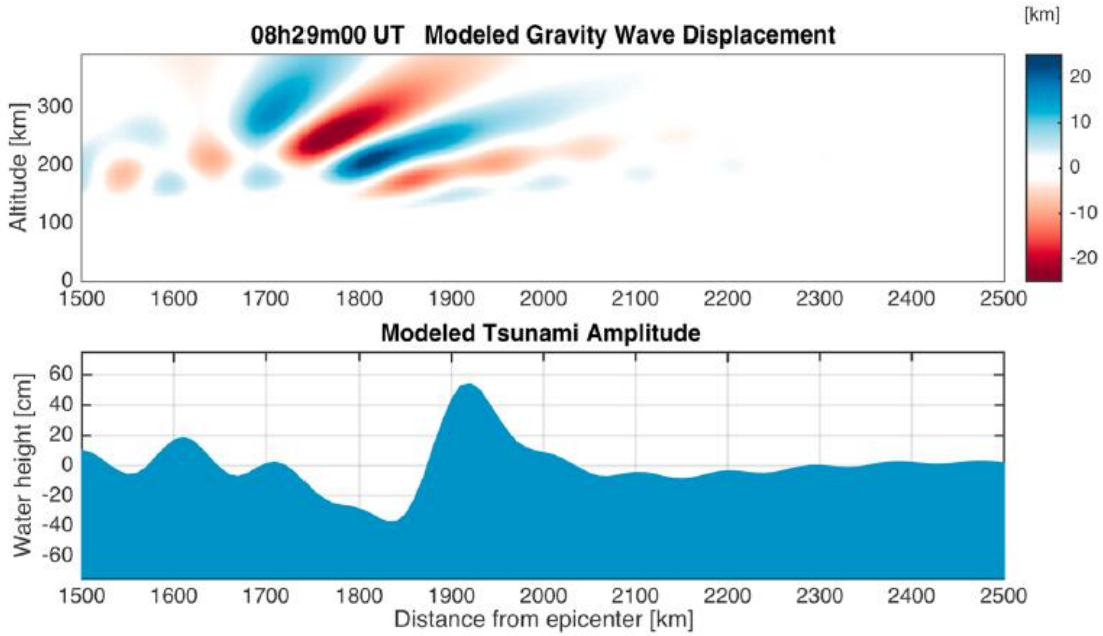
$$\frac{d^2\bar{v}_z}{dz^2} - \frac{1}{H}\frac{d\bar{v}_z}{dz} + \left[\frac{\omega^2}{c^2} + k^2\left(\frac{\omega_g^2}{\omega^2} - 1\right)\right]\bar{v}_z = 0; \quad \bar{v}_\xi = \frac{ik}{k^2 - \omega^2/c^2}\left(\frac{d\bar{v}_z}{dz} - \frac{\bar{v}_z}{\gamma H}\right)$$

$H = c^2/\gamma g$ — высота однородной атмосферы

$\omega_g = \sqrt{(\gamma-1)g}\,/c$ — частота Брента-Вяйсяля

Моделирование возмущения ионосферы волной цунами 11.03.2011.

Coisson et al., Earth and Spase Science, 2015

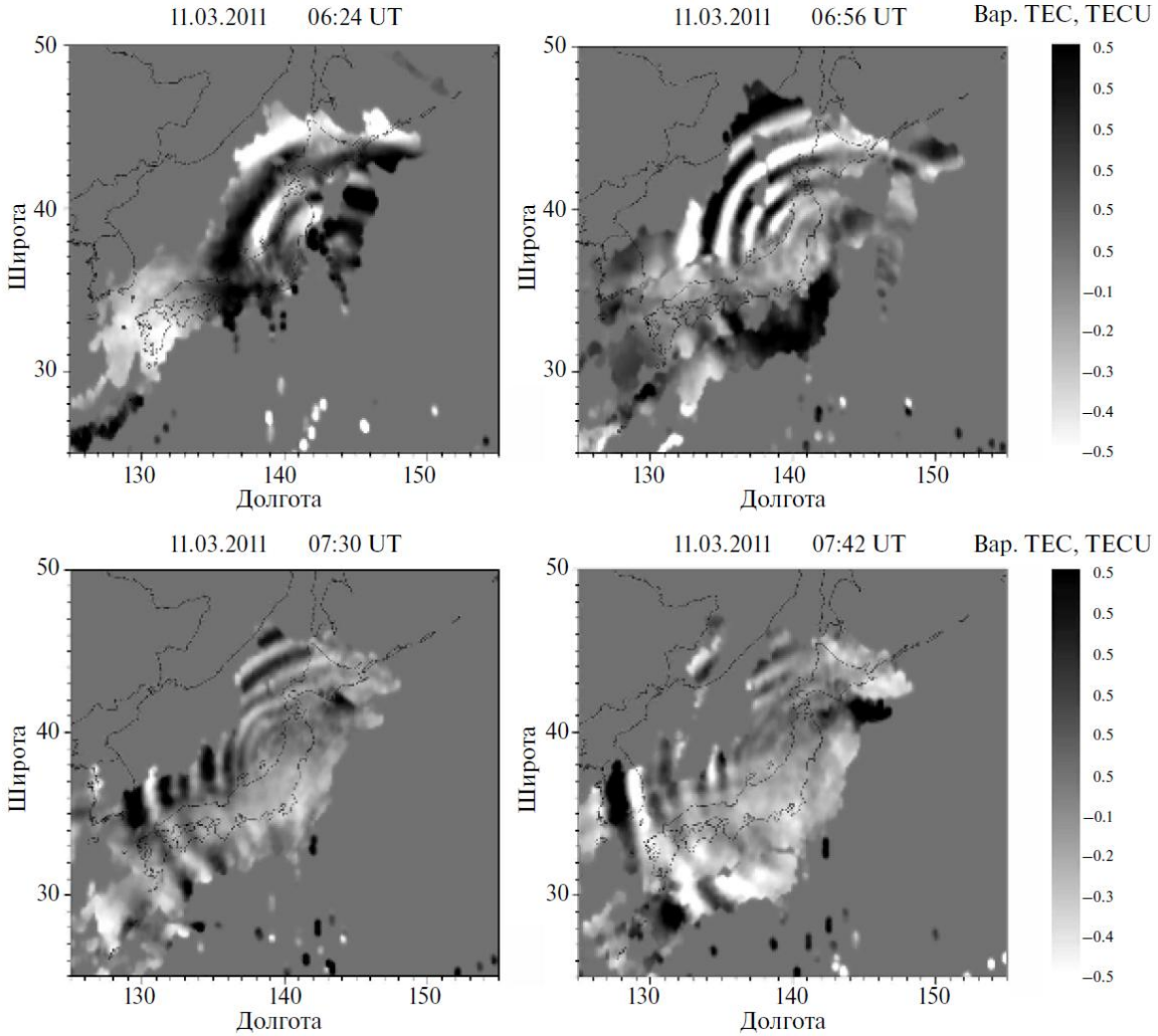


Цунами распространяется с лева на право в радиальном направлении, азимут 135◦ между точками с координатами (28.76◦N, 153.84◦E) and (22.40◦N, 160.09◦E).

Верхняя панель – вертикальное смещение в ионосфере в результате распространения АГВ генерируемой цунами.
Нижняя панель – модель смещения поверхности океана в волне цунами.

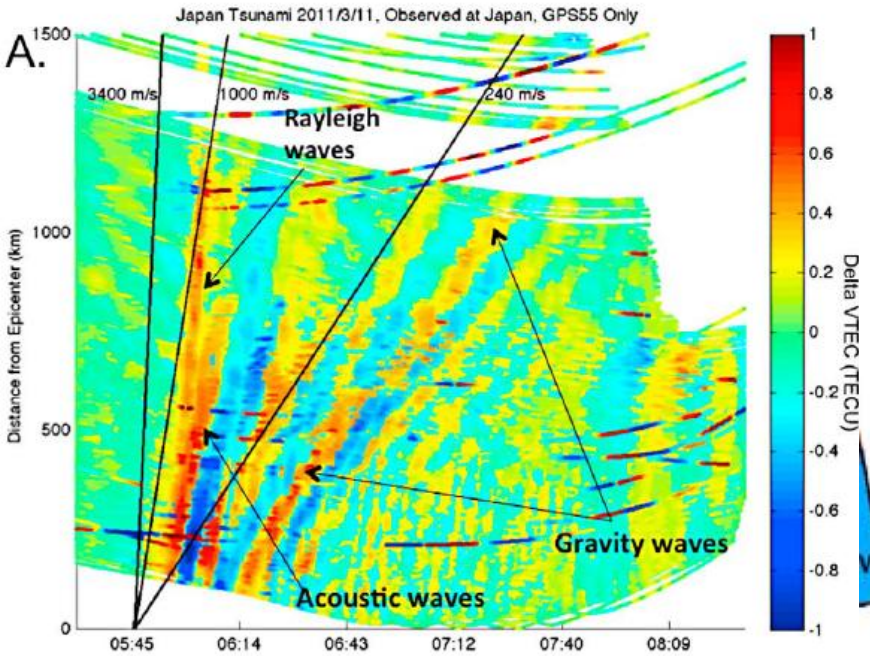
Вариации ПЭС на стадии распространения волны цунами землетрясения в Tohoku 11.03.2011. Эволюция и затухание расходящегося кольцевого возмущения

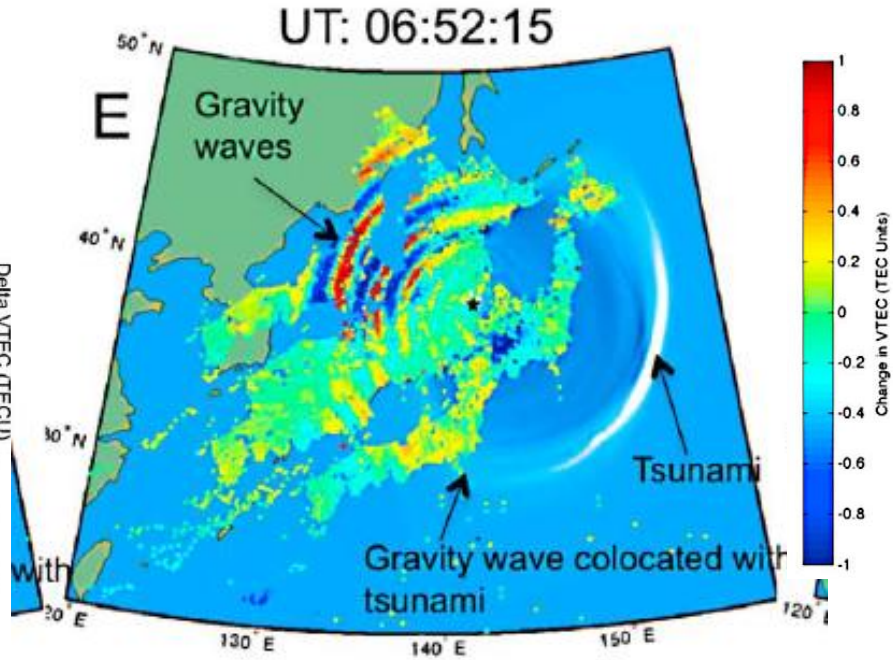
Куницын и др., Письма ЖЭТФ, 2011



Возмущение ионосферы волной цунами землетрясения в Tohoku 11.03.2011.

Galvan et.al., RADIO SCIENCE, 2012.



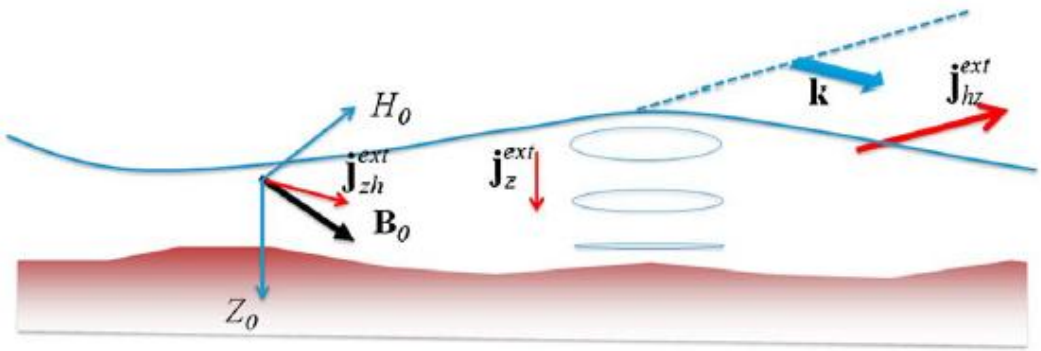


Зависимость расстояния от времени распространения волн в ионосфере.

Изображение ПЭС с помощью сети приемников GEONET

Моделирование вариаций магнитного поля тока в морской воде, генерируемого волной цунами.

Zhang et al., J. Geophys. Res. 2014



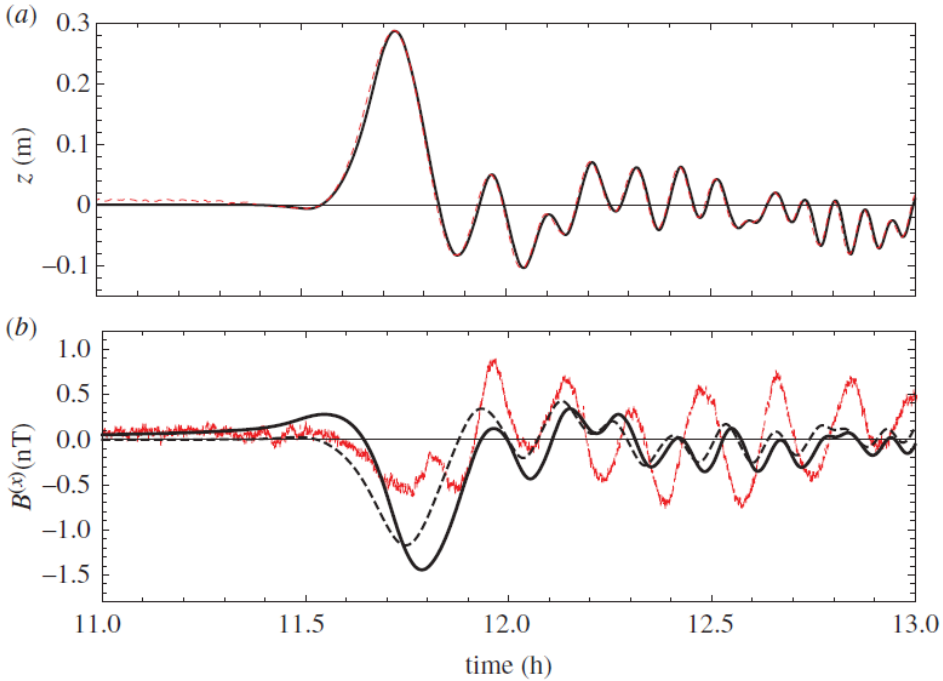
$$\nabla \times \mathbf{b} = \mu_0 \mathbf{j} \; ; \qquad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} ; \qquad \nabla \cdot \mathbf{b} = 0$$

Морская среда: $\mathbf{j} = \sigma_w \left(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B} \right)$

$$\Delta \mathbf{b} - \mu_0 \sigma_w \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t} = -\mu_0 \sigma_w \left(\mathbf{B} \cdot \nabla \right) \mathbf{V}$$

Сравнение данных наблюдения и модельного расчета волны цунами и магнитных аномалий в океане.

Wang and Liu, Proc. Roy. Soc. 2013

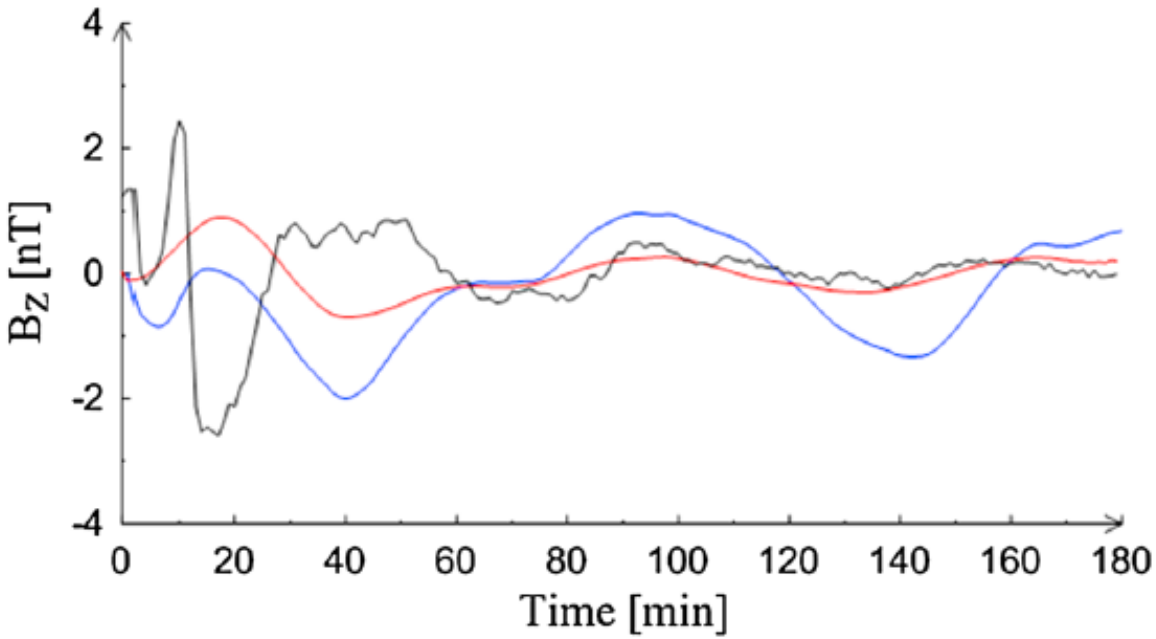


Панель А. **Пунктир – измерение вертикального смещения поверхности океана. Сплошная линия – результат моделирования волны.**

Панель Б. **Индуцированное магнитное поле.**
Сплошная линия – расчет по модели. Пунктир – приближенная формула. Красная линия – измерения магнитного поля.

Сравнение результатов моделирования компоненты магнитного поля Bz на суше на расстоянии 30 км от моря с данными регистрации. Землетрясение в Tohoku 11.03.2011.

Zhang et al., 2014



Голубая линия – расчет поля по закону Био-Савара,
Красная линия – расчет по 3D модели,
Черная линия – результаты регистрации на суше.

Величина возникающего электрического тока в ионосфере сопоставима с величиной электрического тока в морской среде, генерируемого волной цунами

Сорокин и др., ГА, 2019; Sorokin et al., PIER, 2019.

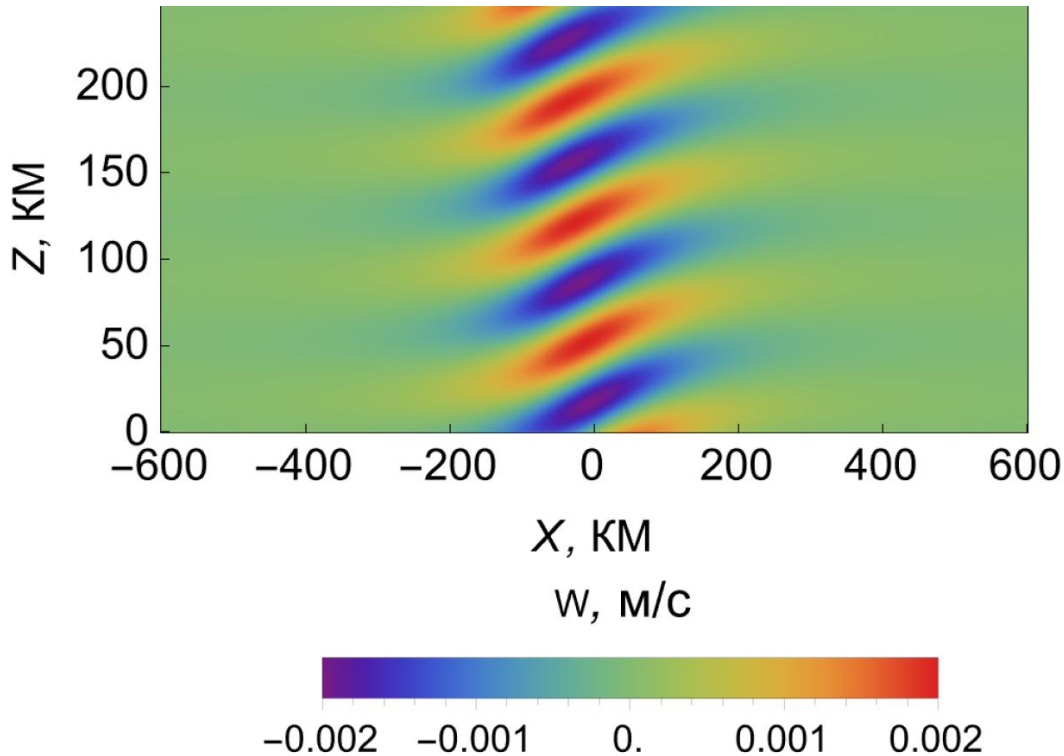
Экспоненциальный рост амплитуды АГВ

Электрический ток в ионосфере $I_i \approx \sigma_i v_i B_0$

Электрический ток в морской среде $I_w \approx \sigma_w V_w B_0$

$$\sigma_i << \sigma_w; \quad v_i >> V_w \qquad \frac{I_i}{I_w} \approx \frac{\sigma_i v_i}{\sigma_w V_w} \square 1$$

Моделирование пространственного распределения вертикальной скорости АГВ в изотермической атмосфере генерируемой уединенной волной цунами.
Сорокин и др., ГА, 2019.



$H = 8\,km$

$h = 1\,km$

$L = 100\,km$

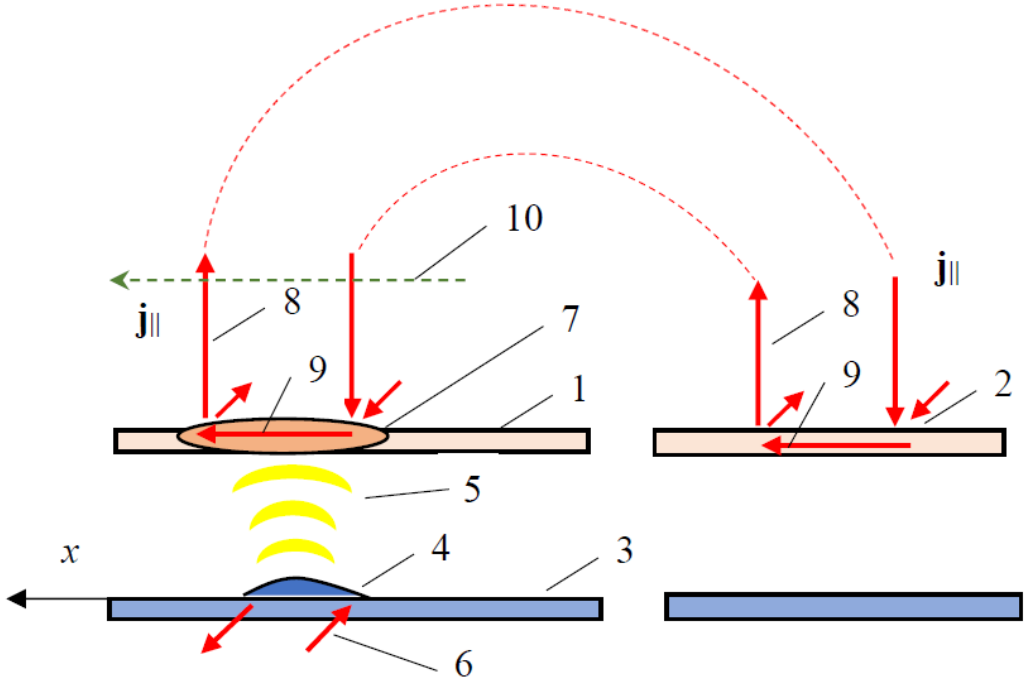
$\eta_m = 0.5\,m$

$W(\xi, z)$

График функции $W(\xi, z) = \exp(-z/2H)\, v_z(\xi, z)$

Моделирование ионосферной токовой системы возникающей в результате распространения вверх АГВ, генерируемой волной цунами.

Сорокин и др., ГА, 2019



1. Проводящий слой ионосферы; 2. Проводящий слой сопряженной ионосферы; 3. Проводящий морской слой; 4. Волна цунами; 5. АГВ; 6. Электрический ток в морской среде; 7. Возмущение ионосферы; 8. Продольный ток в верхней ионосфере и магнитосфере; 9. Электрический ток в ионосфере и сопряженной ионосфере; 10. Траектория спутника.

Уравнения электромагнитного поля, генерируемого волной цунами.

Sorokin, Yaschenko; JASTP, 2020

$$\nabla\times\mathbf{b}=\mu_0\mathbf{j}\ ;\qquad \nabla\times\mathbf{E}=-\frac{\partial\mathbf{b}}{\partial t}\ ;\qquad \nabla\cdot\mathbf{b}=0$$

Ионосфера: $$\mathbf{j}=\hat{\sigma}\left(\mathbf{E}+\mathbf{v}\times\mathbf{B}\right)$$

$$\hat{\sigma}=\begin{pmatrix}\sigma_{\parallel}\cos^2 I+\sigma_P\sin^2 I & \sigma_H\sin I & \left(\sigma_{\parallel}-\sigma_P\right)\sin I\cos I\\ -\sigma_H\sin I & \sigma_P & \sigma_H\cos I\\ \left(\sigma_{\parallel}-\sigma_P\right)\sin I\cos I & -\sigma_H\cos I & \sigma_{\parallel}\sin^2 I+\sigma_P\cos^2 I\end{pmatrix}$$

Полный ток – сумма поверхностного и продольного токов:

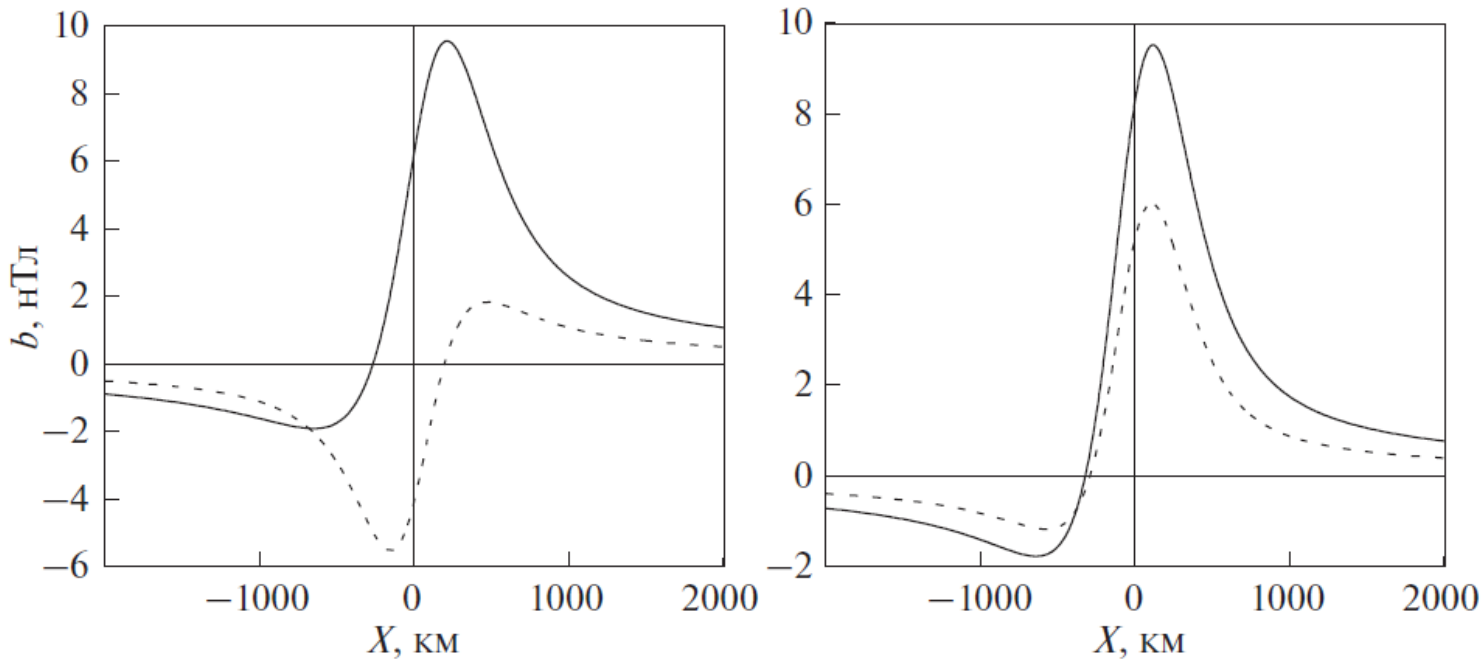
$$\mathbf{j}(\mathbf{r},z)=\left[\hat{\Sigma}\mathbf{E}(\mathbf{r},z_1)+\mathbf{J}(\mathbf{r})\right]\delta\left(z-z_1\right)+\frac{\mathbf{e}_{\parallel}}{2\sin I}\nabla_h\cdot\mathbf{J}\left(x-\frac{z-z_1}{\tan I},y\right)\theta\left(z-z_1\right)\qquad \mathbf{J}=\hat{\Sigma}\left(\mathbf{v}_1\times\mathbf{B}\right)$$

$$\hat{\Sigma}=\begin{pmatrix}\dfrac{\Sigma_P}{\sin^2 I} & \dfrac{\Sigma_H}{\sin I}\\ -\dfrac{\Sigma_H}{\sin I} & \Sigma_P\end{pmatrix};\quad \Sigma_{P,H}=\int_{z_1-l/2}^{z_1+l/2}\sigma_{P,H}\left(z\right)dz\qquad \Delta\mathbf{b}=-\mu_0\nabla\times\mathbf{j}$$

Влияние тока в ионосфере на магнитную аномалию

Результаты расчетов горизонтального распределения компонент возмущения геомагнитного поля на поверхности морской среды.

Сорокин и др., ГА, 2019.

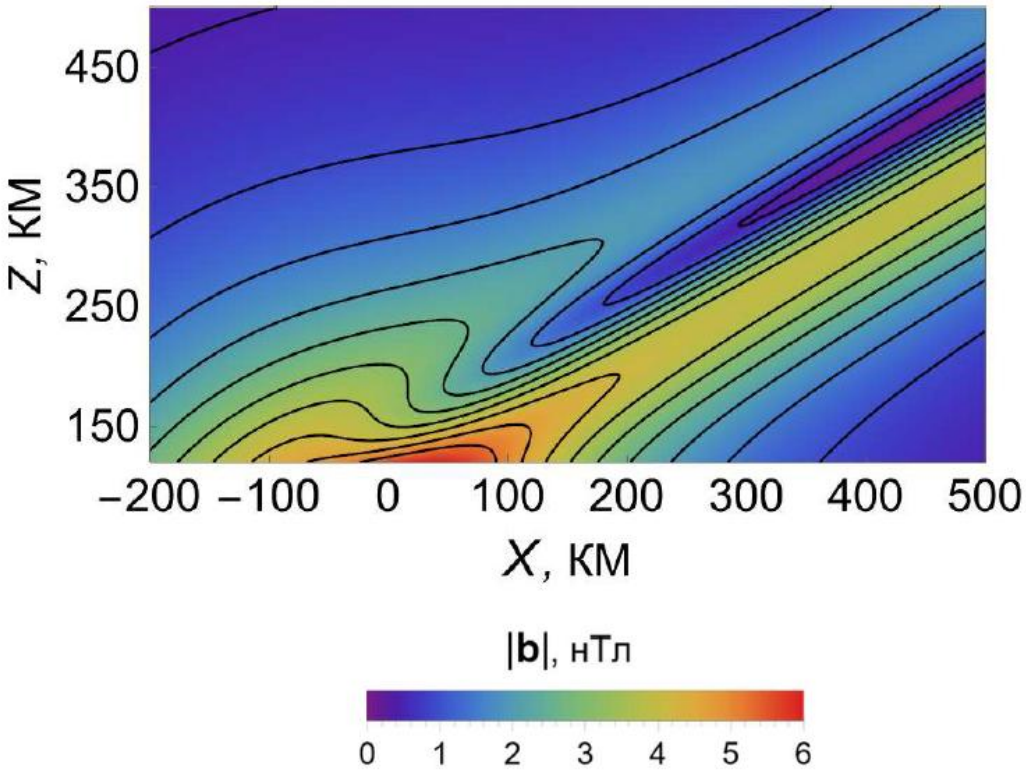


Пунктирная линия - возмущение магнитного поля тока в морской среде.
Сплошная линия - возмущение магнитного поля тока в ионосфере и в морской среде.
Левая панель – компонента b_x . **Правая панель** – компонента b_y .

Значения параметров: x_0 = 300 км, h = 3км.

Пространственное распределение модуля возмущения магнитного поля в вертикальной плоскости в ионосфере.

Sorokin, Yaschenko; JASTP, 2020



Волна цунами распространяется вдоль магнитного меридиана, угол наклона геомагнитного поля 30^0

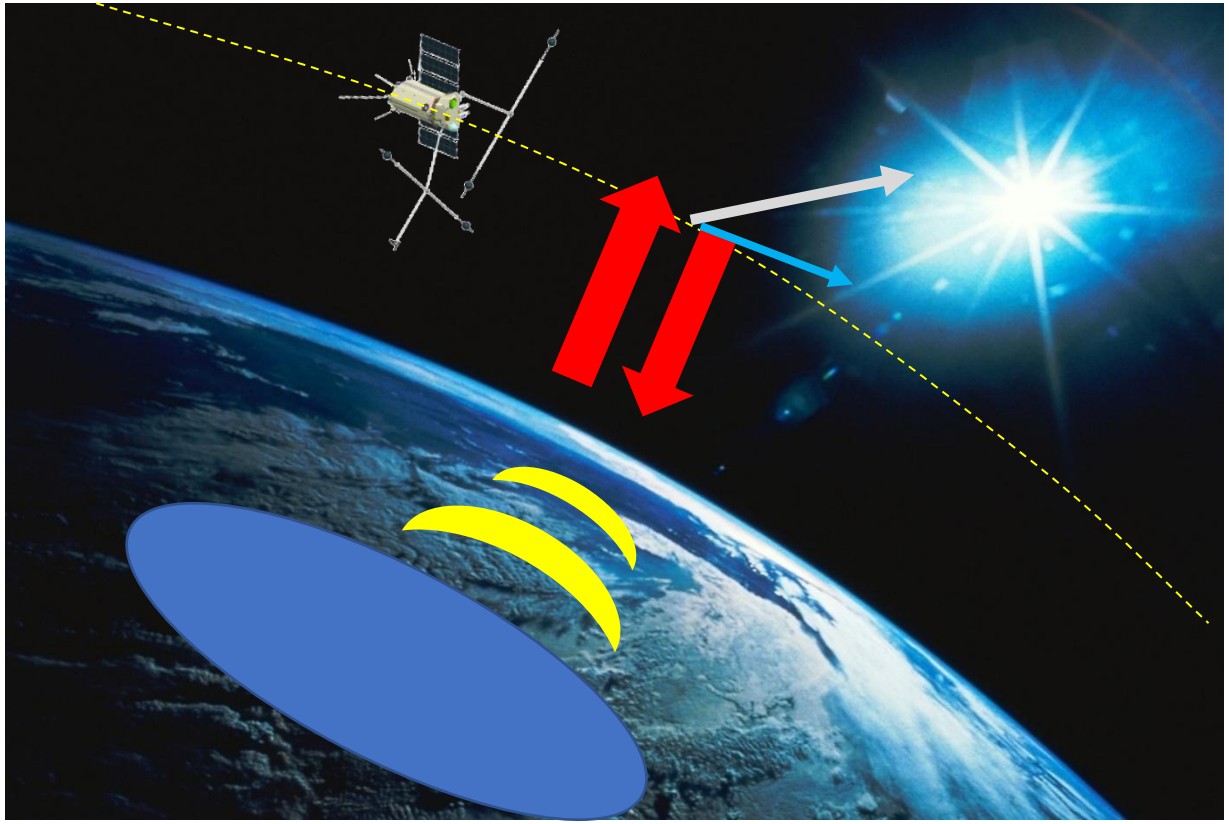
Возмущение магнитного поля локализуется в окрестности продольного тока.

Спутниковый мониторинг цунами

Спутник пересекает продольный ток над районом цунами.

Продольный ток возникает в результате взаимодействия АГВ и ионосферы.

Регистрируются поперечные компоненты магнитного и электрического поля.



Field-align current 10^{-8} A/m^2

Magnetic field 10 nT

Electric field 10 mV/m

Заключение

- Результаты наблюдения - смещение поверхности моря в волне цунами составляет (0.1 – 1) м, а возмущение магнитного поля достигает (1-10) нТл.
- Одновременно с появлением волны цунами наблюдаются аномалии магнитного поля.
- Волна цунами генерирует АГВ и возмущение ионосферы.
- Электрический ток в ионосфере сопоставим с током в морской среде.
- Возможен спутниковый мониторинг электромагнитных и плазменных эффектов волны цунами.

Спасибо за внимание!