



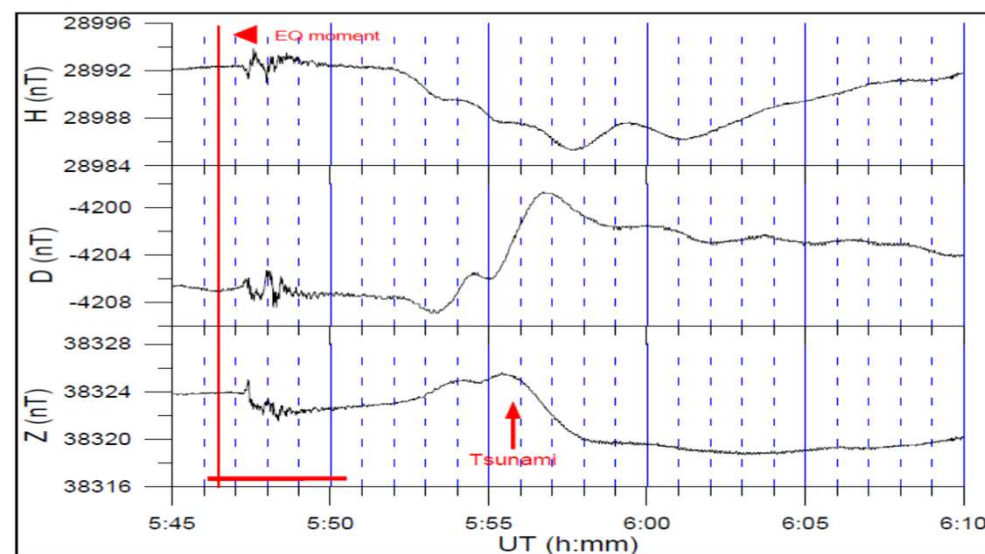
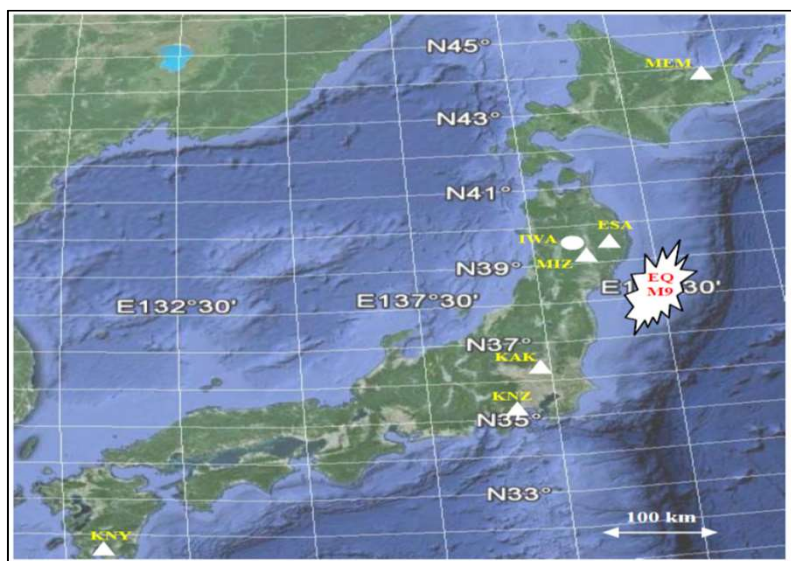
ВОЗМУЩЕНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ ЦУНАМИ



Сорокин В.М., Яценко А.К.

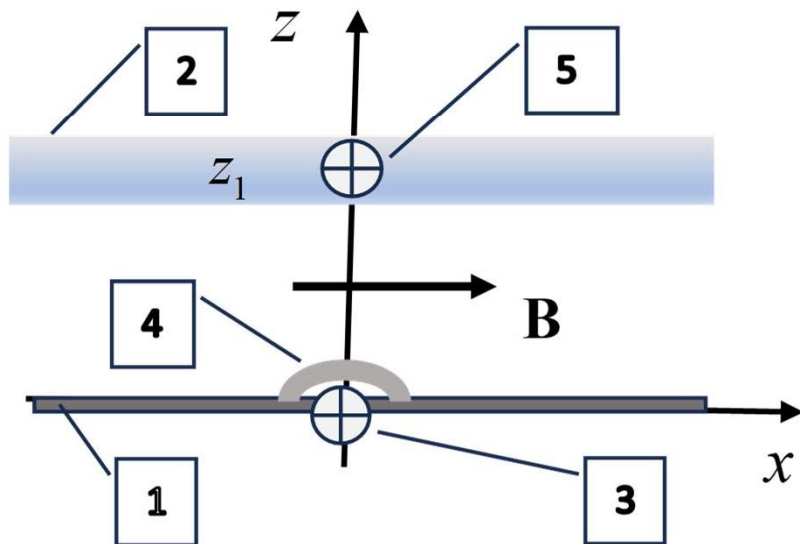
Быстрая деформация дна океана во время подводного землетрясения приводит к вертикальному движению проводящей морской воды в геомагнитном поле. В результате в океане возникает импульсный электрический ток. Вертикальное смещение поверхности океана излучает в атмосферу акустико-гравитационную волну. Распространение этой волны в ионосферу сопровождается появлением в ней электрического тока. Возникающие два тока генерируют электромагнитный импульс в системе морская среда – ионосфера. Получены уравнения электромагнитного поля и развит метод их решения в низких широтах. Проведен анализ спектральных характеристик распространяющегося поля, найдены пространственно-временные зависимости импульса поля.

Вариации магнитного поля, генерируемые цунами в прибрежной зоне на суше



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 (Kopytenko et al., 2017).

Система координат, используемая при расчетах.



1. Морская среда
2. Проводящий слой ионосферы
3. Электрический ток в морской среде
4. Область возмущения морской среды
5. Электрический ток в ионосфере.

Уравнения для возмущений электромагнитного поля в морской среде и ионосфере

В морской среде

$$\left(\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{E} = \mu_0 \sigma_w \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial \mathbf{j}_{ext}}{\partial t}$$

$$\mathbf{j}_{ext} = \sigma_w (\mathbf{V} \times \mathbf{B})$$

В ионосфере

$$\left(\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) (\mathbf{B} \times \mathbf{E}) - \mathbf{B} \times \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) = \mu_0 \sigma_P \left(\mathbf{B} \times \frac{\partial \mathbf{E}'}{\partial t} \right) - \mu_0 \sigma_H B \frac{\partial \mathbf{E}'}{\partial t}$$

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Уравнение для АГВ в изотермической атмосфере

$$\frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} = \nabla \left(c^2 \nabla \cdot \mathbf{v} + \mathbf{g} \cdot \mathbf{v} \right) + (\gamma - 1) \mathbf{g} (\nabla \cdot \mathbf{v})$$

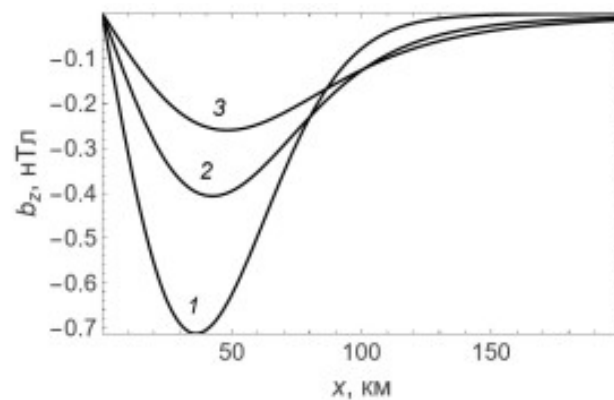
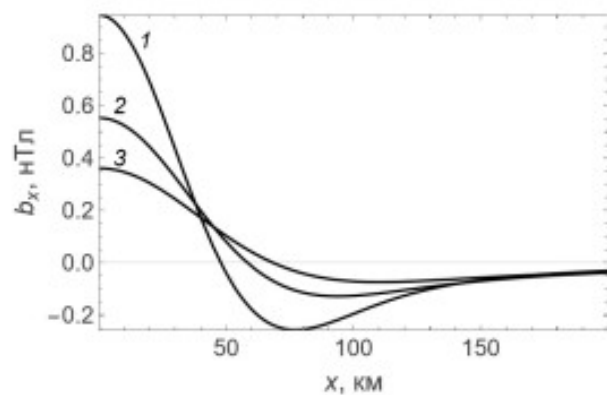
$$\frac{d^2 \bar{v}_z}{dz^2} - \frac{1}{H} \frac{d\bar{v}_z}{dz} + \left[\frac{\omega^2}{c^2} + k^2 \left(\frac{\omega_g^2}{\omega^2} - 1 \right) \right] \bar{v}_z = 0$$

$$v_z(x, z=0, t) = V_z(x, t)$$

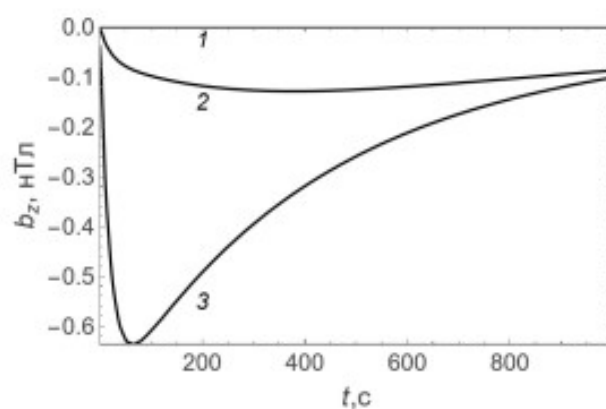
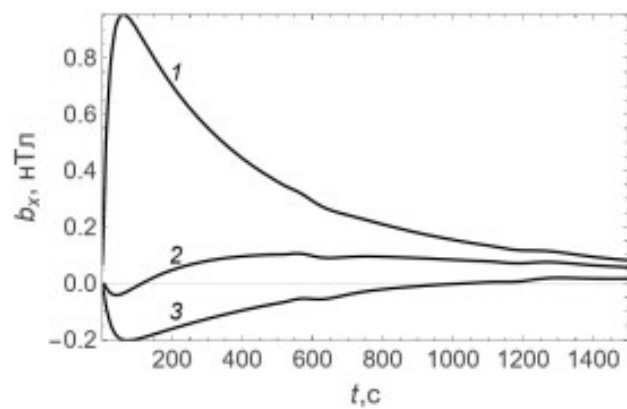
$$v_z(k, z_1, \omega) = V_0 \frac{i\sqrt{\pi}L}{\omega + i/T} \exp \left[\left(iK + \frac{1}{2H} \right) z_1 - \frac{k^2 L^2}{4} \right]$$

$$K = -\operatorname{sgn} \left[\omega \left(k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \right) \right] q(k, \omega); \quad q = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} + k^2 \left(\frac{\omega_g^2}{\omega^2} - 1 \right) - \frac{1}{4H^2}}$$

Зависимость от координаты и времени горизонтальной и вертикальной компонент возмущения ГМП, генерируемого током в МС на ее поверхности

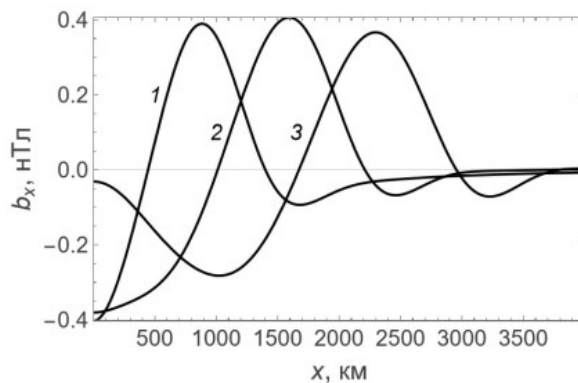
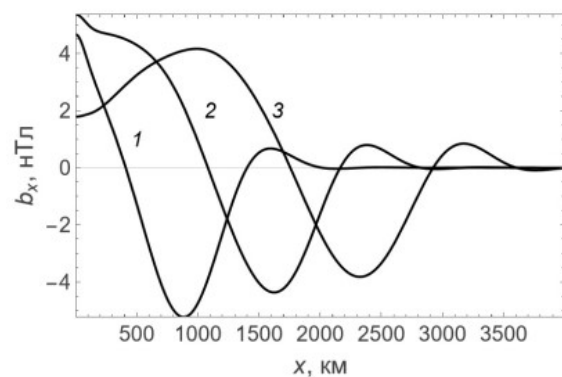


1. $t = 50$ с , 2. $t = 300$ с , 3. $t = 500$ с

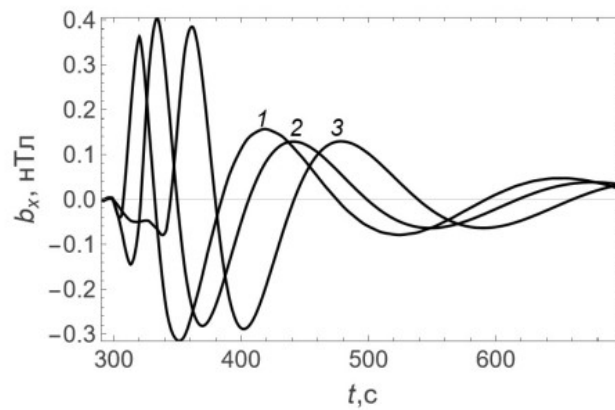
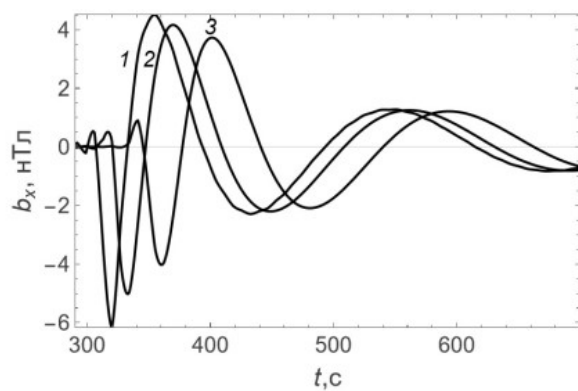


1. $x = 0$ км , 2. $x = 50$ км , 3. $x = 150$ км

Зависимость от координаты и времени горизонтальной компоненты возмущения ГМП, генерируемого распространением АГВ в ионосфере

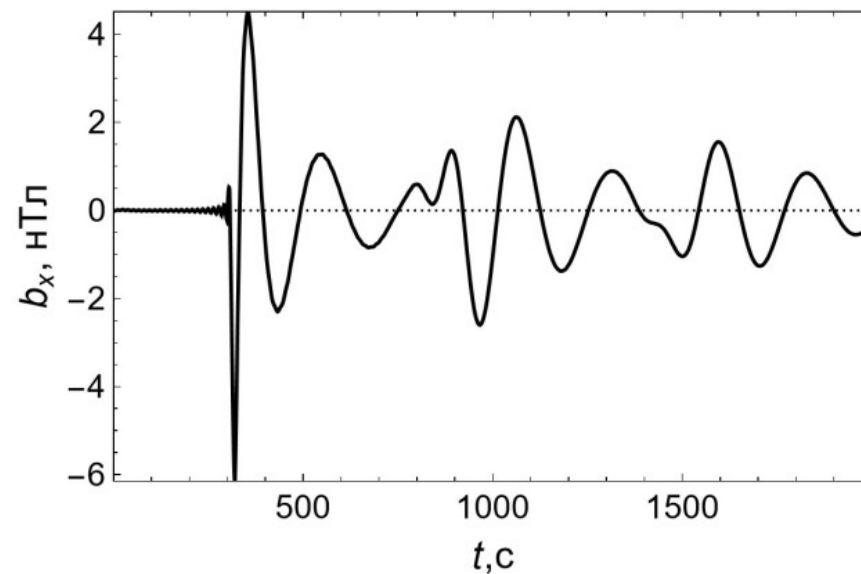
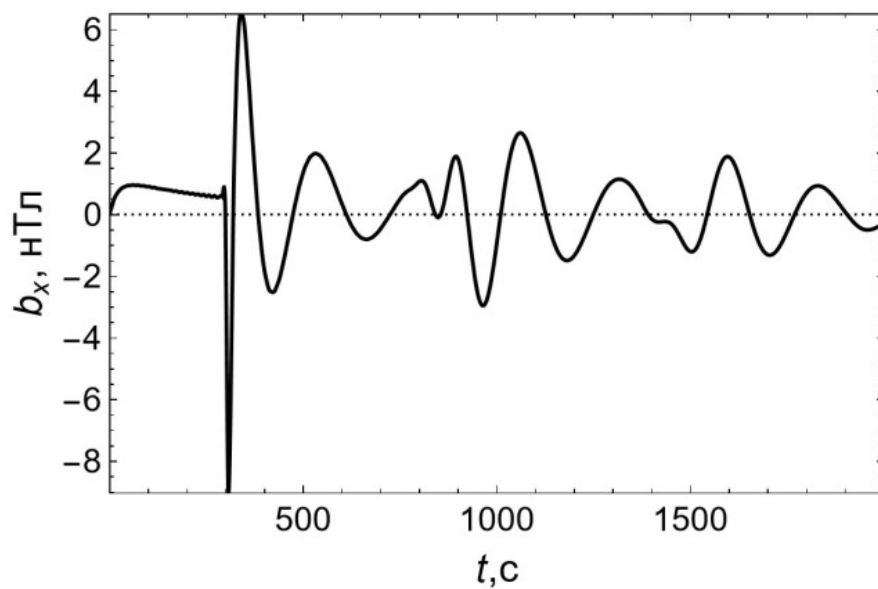


1. $t = 330$ с , 2. $t = 350$ с , 3. $t = 370$ с

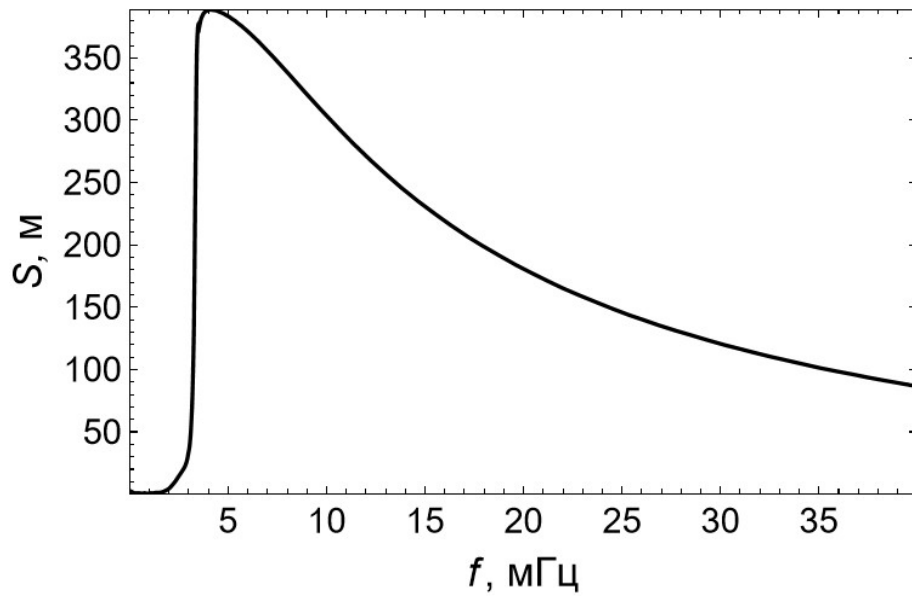


1. $x = 500$ км , 2. $x = 1000$ км , 3. $x = 2000$ км

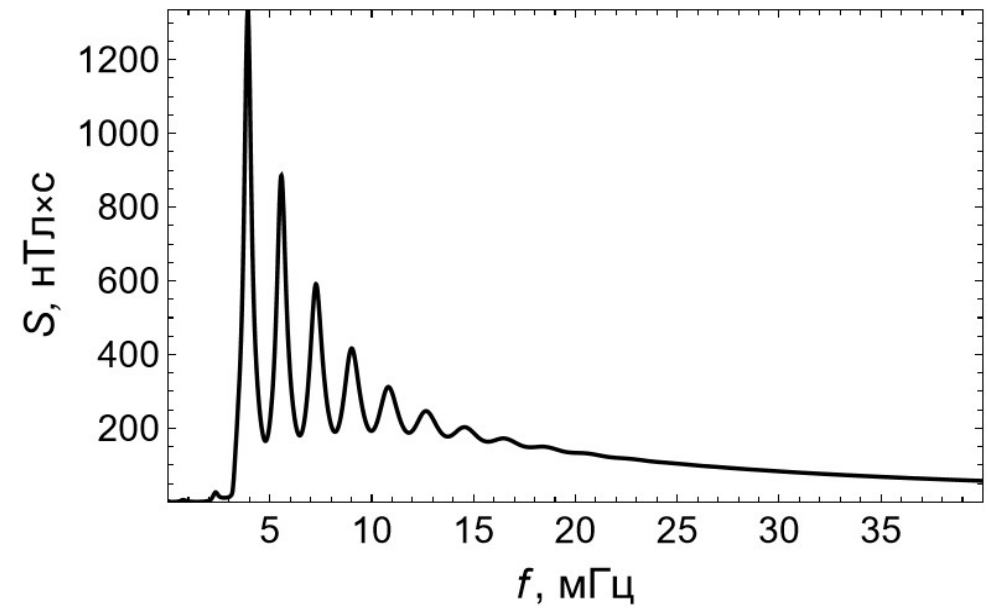
Зависимости от времени горизонтальной компоненты возмущения ГМП, генерируемого током в МС и АГВ в ионосфере на поверхности МС, на расстояниях 0 и 500 км от эпицентра возмущения



Спектры сигналов

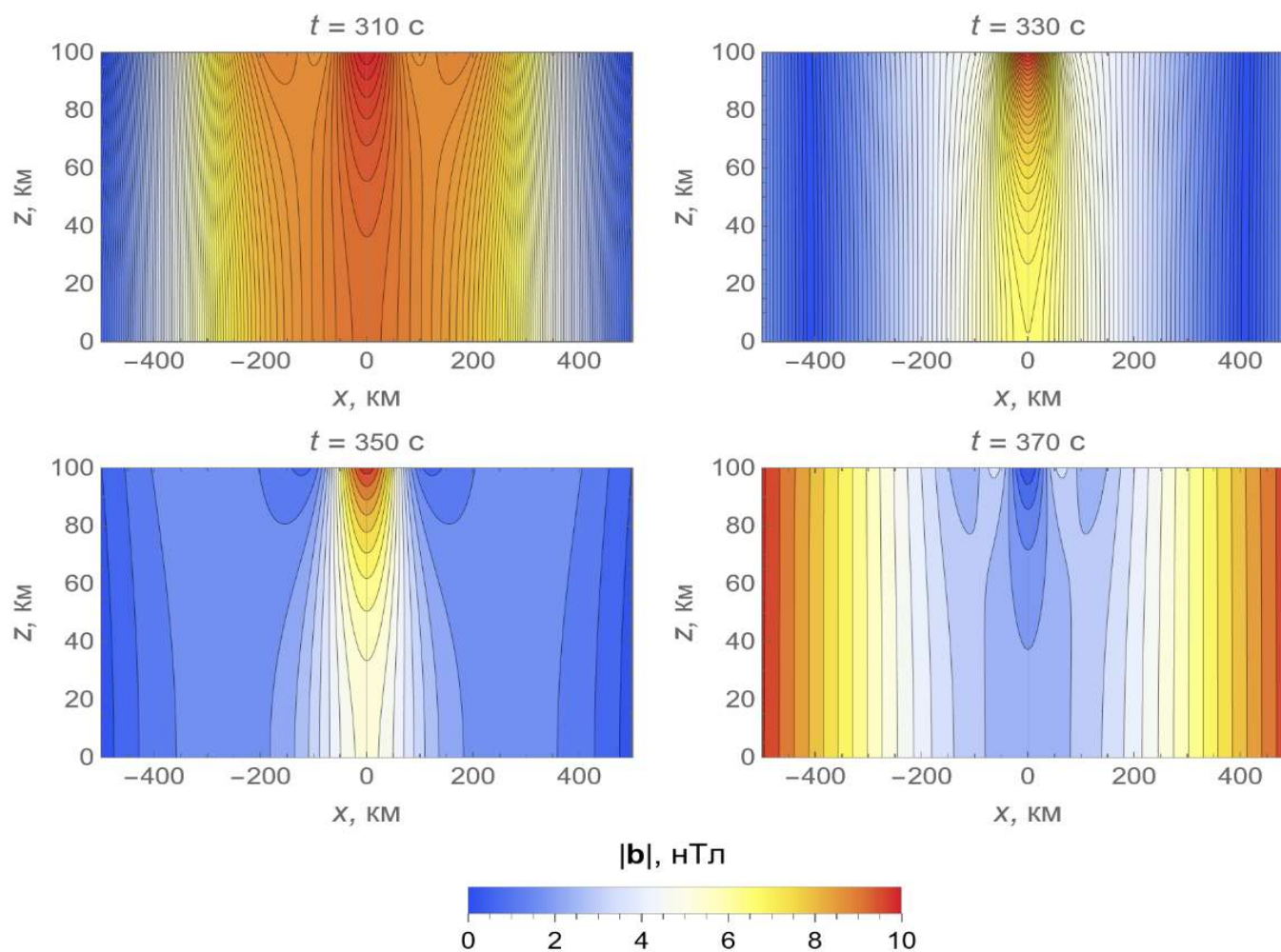


Спектр скорости газа в АГВ



Спектр возмущения ГМП на поверхности МС,
генерируемого распространением АГВ в ионосфере

Пространственное в плоскости распределение модуля возмущения ГМП в слое Земля – ионосфера



Выводы

1. Главный толчок подводного землетрясения приводит к вертикальному переносу морской воды, движение которой в геомагнитном поле формирует электрический ток.
2. Вертикальное смещение поверхности МС генерирует АГВ в атмосфере, распространяющейся в ионосферу и приводящей к появлению в ней электрического тока с задержкой на время распространения волны до ионосферы. Таким образом, главный толчок подводного землетрясения сопровождается возникновением двух источников электромагнитного излучения в МС и в ионосфере.
3. Возмущение ГМП, генерируется этими двумя источниками. В начальные моменты времени, пока АГВ не достигло ионосферы, возмущение формирует ток в воде. Сигнал представляет собой магнитное поле индукционного тока в воде и в ионосфере. Поле ионосферного тока значительно меньше поля индукционного тока в воде. Амплитуда возмущения достигает величины порядка 1 нТл на расстоянии в десятки километров от источника и быстро убывает с расстоянием $\sim 1/x^2$. Скорость перемещения сигнала составляет примерно (60 – 80) м/с.
4. В момент падения АГВ на ионосферу возникает возмущение ГМП, амплитуда которого на поверхности достигает величины (4 – 5) нТл. На высоте 500 км амплитуда возмущения меньше в 10 раз. Временная зависимость возмущения ГМП носит колебательный характер в интервале периодов (2 – 5) мин на различных расстояниях от источника. Наблюдается смещение с расстоянием фазы колебаний. Фазовая скорость распространения возмущения составляет около (35 – 45) км/с. Степень убывания амплитуды с расстоянием $x \sim 1/x^{0.5}$