

## Электромагнитные сигналы деформационных процессов под дном океана

С. В. Ершов, О.Б. Новик, Ю.Я. Ружин

*Институт Земного Магнетизма, Ионосферы и Распространения Радиоволн (ИЗМИРАН), 140190, г. Троицк, Московская обл., onovik@online.ru*

*Electromagnetic (EM) signals of deformation processes under the ocean floor are considered as a result of seismo-hydro-EM interaction in the lithosphere-ocean-atmosphere system. The mathematical model of the tsunami EM precursors is formulated. The calculated signal's parameters correspond to observations. The recommendations for the seaquake and tsunami monitoring are formulated.*

*Электромагнитные (ЭМ) сигналы деформационных процессов под океанским дном рассматриваются как результат сейсмо-гидро-ЭМ взаимодействия в системе литосфера-океан-атмосфера. Формулируется математическая модель электромагнитных предвестников цунами. Параметры рассчитанных сигналов соответствуют соответствующим наблюдениям. Формулируются рекомендации по мониторингу моретрясений и цунами.*

### Введение

Электромагнитные (ЭМ) сигналы распространяются из очаговых зон сейсмических событий, упреждая сигналы в других полях на литосферном участке трассы, не говоря о световой скорости после выхода из литосферы в атмосферу. Кроме того, существует эффективная широкополосная наземная и бортовая (спутники, аэростаты и др.) аппаратура для приема таких сигналов. Однако, дискуссионной остается физика и моделирование таких сигналов, т.е. преобразование первоначального механического деформационного процесса - сейсмического возбуждения под дном моря - в ЭМ сигнал над ним, включая и прохождение сигналом низкоомного океанского участка трассы из литосферы в атмосферу. Используемая здесь математическая модель (достаточно громоздкая из-за включения полей и, соответственно, дифференциальных операторов, различных типов) сейсмо-гидро-ЭМ-температурного ( $\tau$ ) взаимодействия геофизических полей, т.е., с нашей точки зрения, модель предвестников цунами, сформулирована в [Новик, Ершов, 2001] на основе теории магнитотермоупругости и магнитной гидродинамики [Можен, 1991; Ландау и Лившиц, 1986]. В этих рамках численно прослеживается генерация и распространение взаимодействующих полей в сейсмически возмущенной модельной среде, содержащей области: литосферы с зоной субдукции тихоокеанской и евразийской литосферных плит, моря и атмосферы вплоть до нижней границы ионосферного слоя D. [Novik, Ruzhin et al.. 2004; 2005; Ershov, Novik 2009].

### Входные данные

В литосфере выделяется (сверху вниз) осадочный слой, слой гранитоидов, слой базальтов и слой верхней мантии M с обычными для этих структур геолого-геофизическими характеристиками, включая падение нижних слоев около зоны субдукции и повышенную электропроводность M, вызванную активным тектоническим режимом рассматриваемой среды. Эта грубая схематизация бассейна типичного окраинного моря Тихоокеанского сегмента оказалась достаточной для численного описания характерных черт сейсмо-гидро-ЭМ-т сигналов на изучаемой здесь начальной стадии цунами, т.е. пока сейсмически возбужденная гидродинамическая волна далека от берега и ее амплитуда остается малой по сравнению с амплитудой на прибрежном мелководье. Изменение физических параметров слоев ( $\sim 1,5$  раза) и варьирование рельефа границ глубинных слоев не приводят, согласно нашим расчетам, к сколько-

нибудь значительному изменению расчетной картины формирования ЭМ предвестников цунами.

Сейсмическое возбуждение модельной геосреды задавалось нестационарными краевыми условиями для упругого поля на нижней границе. Именно, предполагаем, что при  $t = 0$  на нижней границе слоя М возникают упругие вертикальные и более слабые горизонтальные смещения (например, из-за активизации источника под М) с амплитудой, главной частотой и длительностью несколько см, Гц и с (сек) соответственно. Отметим, что согласно ряду авторов быстрым вертикальным смещениям протяженных участков океанического ложа принадлежит ведущая роль в очаговом процессе цунамиопасных землетрясений.

Расчеты показывают, что сейсмо-гидро-ЭМ взаимодействие формируется, в основном, в зависимости от сейсмического возбуждения, тогда как равновесные начальные условия для магнитного, теплового и гидродинамического полей, а также условия на верхней и боковых внешних границах области расчета слабо сказываются на ЭМ- и т-отклике (в радиусе нескольких десятков км от эпицентра) на глубинное сейсмическое возбуждения.

### **Расчетные сейсмо-гидро-ЭМ-т сигналы**

Литосферный ЭМ сигнал (сигнал, генерированный в литосфере при сейсмическом возбуждении) возникает у основания проводящего слоя верхней мантии М под действием упругих смещений от падающей на основание М сейсмической волны от источника под М.

К моменту времени  $t = 1$  с после начала сейсмического возбуждения среды (упругих смещений в слое М), сейсмическое возмущение геомагнитного поля достигает отметки (глубины в литосфере под морем)  $x_1 = 25$  км при амплитуде 20 пТл. Отметим, что низкочастотное (0,1 – 10 Гц) ЭМ поле в проводящей среде литосферы описывается в диффузионном приближении (т.е. токи смещения пренебрежимо малы по сравнению с токами проводимости). Диффузность ЭМ сигнала проявляется в отсутствии у него фронта в обычном понимании, как границы области среды, захваченной ЭМ колебаниями. Поэтому, характеризуя распространение диффузного ЭМ сигнала с помощью аналога фронта, используем порог амплитуды 10 пТл, ниже которого расчетный сигнал при визуализации принимается нулевым. При измерениях такая дискриминация сигналов обеспечивается ограниченной чувствительностью аппаратуры.

После выхода из верхней мантии в слои коры, проводимость которых ниже проводимости мантийного слоя М, распространение «главного» (с амплитудой не меньше 10 пТл) ЭМ сигнала (т.е. сейсмо-ЭМ возмущения) ускоряется, он отрывается от стартовавшей вместе с ним с нижней границы М сейсмической волны. Горизонтальная компонента возмущения магнитной индукции В2 достигает поверхности дна моря в момент  $t = 2,5$  с при амплитуде сигнала 15 пТл, которая возрастает до нескольких сот пТл по мере подпитки среды сейсмической волной в присутствии геомагнитного поля.

Нашими расчетами обнаружено «наследование» диффузным ЭМ полем пространственной структуры создавшего его (за счет сейсмогенной деформации проводящей литосферы в геомагнитном поля) сейсмического поля. Мы называем это явление *пространственной сейсмо-модуляцией диффузного ЭМ поля*. (*Пространственная сейсмо-модуляция ЭМ- и т-полей упругим полем* отмечалось нами [Новик, Ершов, 2001] и при моделировании сейсмо-ЭМ-т сигналов в случае континентальной литосферы с низкоомными включениями).

В момент  $t = 5$  с после начала сейсмического возбуждения в верхней мантии М сейсмо-гидро-ЭМ-т взаимодействие геофизических полей характеризуется: а)

сохранением пространственной сейсмо-модуляции ЭМ поля; б) «замораживанием» ЭМ поля у дна моря. Именно, пространственная структура поля В2 меняется весьма незначительно при  $3,5 < t < 5,0$  с : «замороженный фронт» В2 повторяет линию дна моря, но не распространяется выше нее сколько-нибудь заметным образом в указанный интервал времени. «Замораживание» магнитного поля или, выражаясь менее образно, резкое замедление магнитной диффузии в морскую воду, вызвано тем, что ее электропроводность 4См/м примерно на три порядка выше электропроводности пород коры. Детальная компьютерная визуализация расчетов показывает, что при  $3,5 < t < 5,0$  с происходит дифракция длинной ЭМ волны на морской впадине, т.е. диффузная ЭМ волна начинает медленно огибать впадину по берегам без захода в морскую воду.

В целом, описанный эффект «замораживания» литосферного сейсмо-ЭМ поля у дна моря мог бы исключить появление прогностически значимого сейсмо-ЭМ сигнала над морем, если бы ЭМ поле взаимодействовало с толщей морской воды один на один. Но после удара,  $t = 5,3$  с, сейсмической Р волны (отставшей от ЭМ волны, см. выше) в глубоководную часть дна моря, над зоной первоначального сейсмо-гидродинамического контакта возникает область преимущественно вертикального движения морской воды. Здесь геомагнитным полем генерируется ЭМ поле, распространяющееся в море, а затем, в результате эмиссии с его поверхности, и в атмосфере. Разумеется, это сейсмо-гидро-ЭМ поле, возникшее из-за сейсмической деформации дна моря, сопрягается и с литосферным сейсмо-ЭМ полем.

При  $t = 10,0$  с на рассчитанной карте горизонтальной компоненты В2 индукции (рис.1) сейсмо-магнитного поля (т.е. сейсмического возмущения геомагнитного поля) четко прорисовывается дно и поверхность моря, и видно, что сейсмо-магнитное поле захватывает всю его толщу. Видна также существенная неоднородность по горизонтальной координате сейсмо-магнитного поля у поверхности воды, причем уходящие вверх с поверхности воды «языки» (всплески) сейсмо-магнитного поля периодически повторяются по горизонтальной координате, повторяя структуру сейсмо-гидродинамического поля. Из-за активной роли сейсмически возмущенной морской воды, сейсмо-магнитное поле, возможно, следует называть сейсмо-гидро-магнитным.

Как показывают расчеты, донная ЭМ станция, находящаяся на эпицентральной дистанции 100 км при глубине очага под дном порядка 30 км, регистрирует сейсмо-ЭМ сигнал, в зависимости от пород литосферы, примерно через 10 с после начала активизации сейсмического очага под дном моря.

Карта горизонтальной компоненты В2 (пТл) сейсмо-гидро-магнитной индукции через 10 с после начала сейсмического возбуждения в литосфере. Сверху – расстояние (км) от западного берега моря, снизу значения (пТл) черно-белой цветовой шкалы, слева глубины под уровнем моря (0) и высоты (-) над ним. Из-за ограничений черно-белой шкалы одинаковые по модулю, но разные по знаку значения поля изображаются одним цветом.

Сигналы типа показанного на рис.1 возникают на поверхности моря после того, как восходящее течение, вызванное ударом сейсмической Р волны в дно, достигнет поверхности моря,

(что занимает 2-3 с для средних глубин). Они распространяются со скоростью света над океаном вплоть до ионосферы. Эти сигналы усиливаются примерно пропорционально амплитуде слабого (предвестникового) сейсмического возбуждения, рассмотренного здесь.

Вертикальная компонента сейсмо-гидро-магнитной индукции В1 (пТл) в 200 км от западного берега на высоте 10 км над уровнем моря. При большом эпицентральной дистанции донной ЭМ станции (что типично) бортовая аппаратура аэростата регистрирует сейсмический ЭМ сигнал раньше.

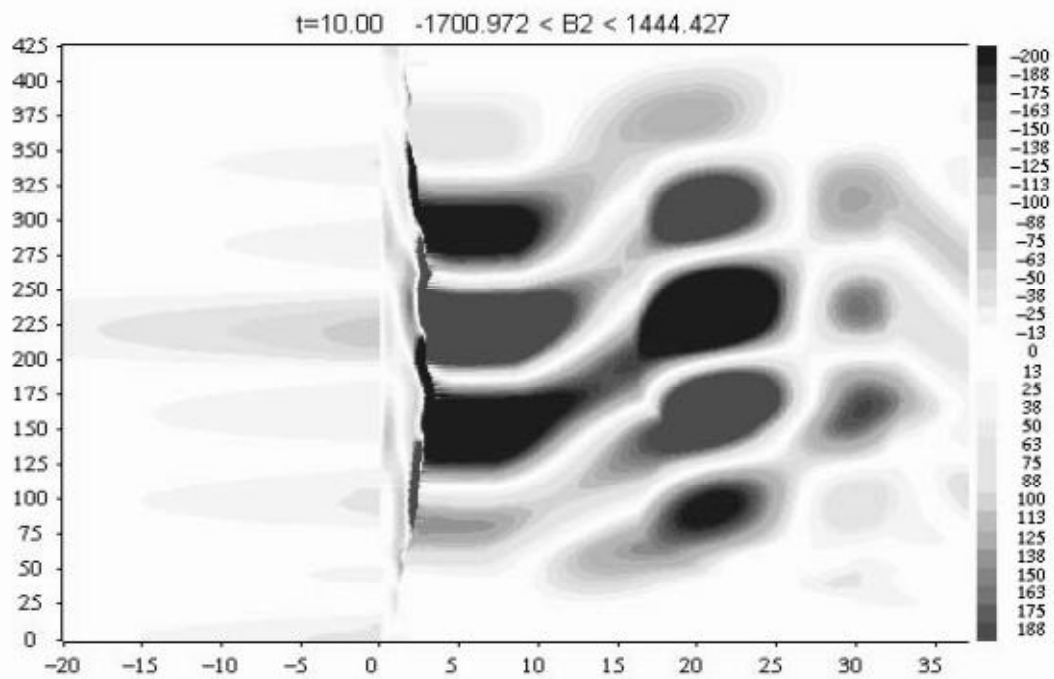


Рис. 1.

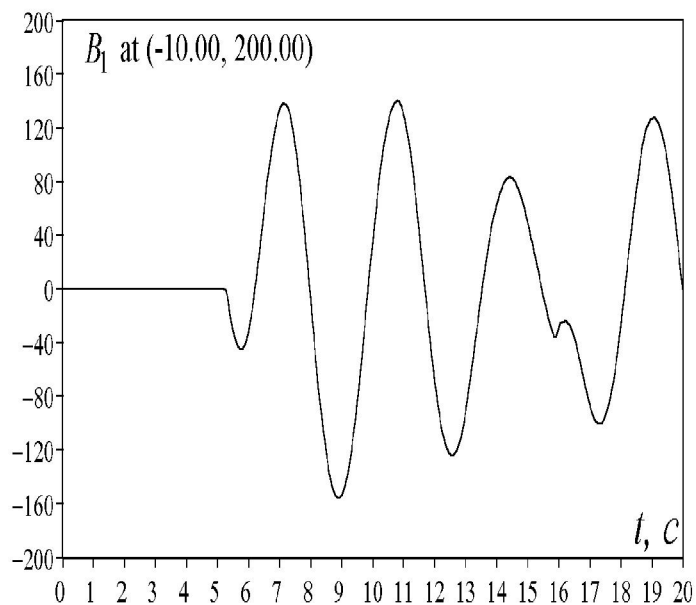


Рис. 2.

Компьютерная графика, иллюстрирующая отмеченные и другие свойства сейсмо-гидро-ЭМ-т взаимодействия здесь не приводится, в том числе длинная (длина волны около 100 км) гидродинамическая волна цунами малой (около 10 см) амплитуды вдали от берега в момент 12,5 с после начала моретрясения. Такую волну обычно применяемые датчики давления регистрируют (вместе с зашумляющими ветровыми волнами) только в момент взаимодействия с ней, отставая от ЭМ датчиков над океаном. Отметим, что волна цунами распространяется согласно наблюдениям (и нашим расчетам) со скоростью порядка нескольких сот км/час при средней глубине океана. Следовательно, при эпицентральной расстоянии 100 км волна цунами будет зафиксирована датчиками давления примерно на 10 мин позже, чем донная станция зафиксирует ЭМ сигнал сейсмической активизации. При учете сжимаемости воды в

гидроакустическом приближении сохраняется *наследование* ЭМ-сигналами на дне моря, в его толще, на поверхности и в атмосфере *низкочастотного спектра сейсмического возбуждения* в литосфере под моря, как и в нелинейной теории «мелкой воды» (это одна из основных океанологических моделей), использованной при расчетах рис. 1,2. Полученные теоретические характеристики сейсмо-гидро-ЭМ-т сигналов соответствуют наблюдениям [Белов и др., 1974; Гохберг и др., 1991]. В частности, как видно из расчетов, время запаздывания принимаемого на берегу ЭМ сигнала относительно начала моретрясения складывается из времени движения сейсмической Р волны от очага к поверхности дна моря и времени движения гидроакустической волны от сейсмически деформированного дна к морской поверхности, т.к. время распространения (со скоростью света) ЭМ сигнала над морем к приемнику пренебрежимо мало. Это и объясняет наблюдаемую независимость времени запаздывания (относительно начала моретрясения ) ЭМ сигнала от эпицентрального расстояния приемника.

### **Выводы**

Авторы полагают, что разработанная математическая модель сейсмо-гидро-ЭМ-т взаимодействия проливает свет на физическую природу и числовые характеристики предвестников моретрясений и цунами и может быть использована при проектировании *комплексной* (регистрирующей сигналы в различных по физической природе полях) *наземно-космической* (включая донные станции, буи, бортовую аппаратуру стратостатов и спутников) *системы мониторинга* подготовки и развития морских сейсмических событий.

### **Литература**

1. Белов С.В., Мигунов Н.И., Соболев Г.А., 1974. Магнитные эффекты сильных землетрясений на Камчатке // Магнетизм и аэрономия. Т. 14. С. 380-382.
2. Гохберг М.Б., Крылов С.М., Левшенко В.Т., 1991. Электромагнитное поле очага землетрясений // Доклады АН СССР. Т. 308. № 1. С. 62-65.
3. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М., 1986. Гидродинамика. М. Наука. 1986. 733 с.
4. Можен Ж., 1991. Механика электромагнитных сплошных сред. М. Мир, 560 с.
5. Новик О., Ершов С., 2001. Электромагнитные и температурные сигналы из недр Земли. М. Круглый Год, 254 с.
6. Sergey Ershov, Oleg Novik, 2009. Elements of the tsunami precursors' physics: seismo-hydro-electromagnetics. // Proc. Intern. Conference MARELEC 2009, pp 122-131, Stockholm, 2009.
7. Novik, O., Ershov, S., Mikhaylovskaya, I., Ruzhin, Yu., 2004. Theory of electromagnetic tsunami precursors // Международная конференция «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность» 23-25 ноября 2004г., ИКИ, Москва. Сборник трудов, С. 368-373.
8. Novik, O., Ruzhin, Yu., Ershov, S., 2005. EM tsunami monitoring: theory and recommendations. In: Satake, K. (Ed.), Tsunamis: Case Studies and Recent Developments, "Springer", P. 319-340.