

**В. И. Короченцев****МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ УПРУГИХ  
И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ОЧАГОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

*Целью статьи является разработка математической модели очага землетрясений, описывающей появление новых информационных предвестников катастрофического подземного и подводного землетрясения.*

*Показано, что в результате нелинейных взаимодействий в очаге формируются электромагнитные волны, которые просачиваются в околоземное пространство. Обсуждается возможность генерации волн, связанных с ускоренным движением гравитационной массы очага.*

*Очаг землетрясения; нелинейное взаимодействие; упругие электромагнитные волны; гравитационные волны; подводное землетрясение*

**V. I. Korochenshev****MATHEMATICAL MODEL FOR GENERATION OF ELECTROMAGNETIC  
AND ELASTIC WAVES of earthquakes foci**

*The aim of the paper is to develop a mathematical model of the epicenter of earthquakes, describing the emergence of new information early warning of the catastrophic underground and underwater earthquake.*

*We show that, as a result of nonlinear interactions in the source are formed by electromagnetic waves, which seep into the near-Earth space. The possibility of generating waves associated with the accelerated motion of mass center of gravity.*

*Hearth earthquake; nonlinear interactions; elastic electromagnetic waves; gravitational waves; underwater earthquake.*

Несмотря на большое количество научных работ, посвященных прогнозу землетрясений и цунами, до настоящего времени нет способов и методов, указывающих время, координаты, магнитуду возникновения катастрофического явления с вероятностью более 0,8. В ряде наших научных работ и патентов доказано, что повышение количества различных физических предвестников и их комплексное использование позволит повысить вероятность правильного прогноза до 0,8 и более.

Такими дополнительными предвестниками, в частности, могут быть «электромагнитные» и «гравитационные» волны.

Использование волн с известной фазовой и групповой скоростью позволяет решить главную навигационную задачу об определении пространственных координат очага землетрясения по наблюдению за ним из трех и более точек.

Проводя анализ сигналов, одновременно поступающих в измерительные пункты от приемных датчиков различных волн (упругих, электромагнитных и гравитационных) и исследуя их взаимное влияние, можно оценить ожидаемую магнитуду и время прихода разрушительной упругой волны или цунами.

Для количественной оценки этих волн необходимо разработать корректную математическую модель, которая отражает основные энергетические процессы, происходящие в самом очаге землетрясений, а также в процессе распространения волн от очага до точки наблюдения.

Очевидно, учесть все возможные варианты генерации волн различной физической природы и их взаимодействий в одной статье невозможно. Поэтому оценим только упругие, электромагнитные и «гравитационные» волны, излучаемые очагом подводного или подземного ускоренного перемещения масс земли или жидкости.

Предполагается, что все эти типы волн можно уверенно зарегистрировать приемными датчиками: для упругих волн пьезоактивные антенны, для электромагнитных – приемные антенны электромагнитных волн, а для «гравитационных» волн – гравиметрами соответствующих конструкций.

«Гравитационные» волны взяты в кавычки, чтобы не считать их волнами на поверхности воды или границе раздела сред, а также гравитационными волнами из общей теории относительности А.Эйнштейна.

В статье под «гравитационными» волнами будем понимать возмущение гравитационного поля Земли, зарегистрированного в пункте измерения гравиметрическими приборами при ускоренном перемещении гравитационной массы очага землетрясения. При этом нами показано в предыдущих работах, что скорость передачи этого возмущения имеет конечное значение. Математическую модель построим в рамках классической теории механики сплошных сред. Используем подход к разработке модели, предложенной в работе [1].

В нелинейном приближении уравнения гидродинамики допускают существование трех независимых друг от друга типов колебаний “возбуждаемых” ими гармоник: звуковых, температурных (энтропийных) и волн завихренности. Эти поля при определенных условиях могут взаимодействовать друг с другом. Взаимодействию “звук-звук” посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ и монографий, например [2,3]. Взаимодействия “звук-энтропия”, “звук-завихрения” обычно рассматриваются как задачи рассеяния на неоднородностях среды или формирования таких важных физических явлений, как акустический ветер, аэродинамическая генерация звука и некоторые другие явления.

Рассмотрим систему уравнений Навье-Стокса для вязкой, теплопроводящей среды, с помощью которых можно рассматривать указанные взаимодействия с учетом скорости частиц  $v(r,t)$ , плотности  $\rho(r,t)$ , давления  $P(r,t)$ , а также тепловых параметров среды, энтропии  $S(r,t)$  и температуры  $T(r,t)$ .

$$\rho \left[ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} \right] = -\nabla P + \eta \Delta \bar{v} + \left( \xi + \frac{\eta}{3} \right) \text{grad div} \bar{v}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \bar{v} = 0, \quad (2)$$

$$P = P(\rho, S), \quad (3)$$

$$\rho T \left[ \frac{\partial S}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla) S \right] = \alpha T + \xi (\text{div})^2 + \frac{\eta}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right)^2, \quad (4)$$

где  $\eta, \xi$  – сдвиговая и объемная вязкости,  $\alpha$  – коэффициент теплопроводности.

Анализируя эти уравнения можно заметить, что изменение энтропии в среде, описанное в выражении (4), неизбежно приведет к изменению уравнения состояния среды (3), что в свою очередь, приведет к изменению фазовой скорости распространения упругих (звуковых) волн в среде. Следует ожидать, что такой энергоемкий параметр как упругость среды, выраженный через фазовую скорость может привести к генерации широкого спектра звуковых колебаний в электропроводящей среде, т.е. к параметрической генерации упругих волн через тепловые изменения. Изменение температуры в среде часто достигается естественным путем.

В океане они возникают за счет течений, завихрений и других изменений распределения масс воды. Такие процессы практически неуправляемы, поэтому перечисленные изменения водных масс удобнее проводить искусственно. В настоящей работе этот процесс проведен с помощью излучения в проводящую морскую воду электромагнитных волн. Известно, что излученная в морскую воду электромагнитная волна затухает на расстоянии нескольких длин волн и изменяет в ее ограниченном объеме распределение температуры (генерирует энтропийную волну). При этом изменение температурных параметров будет происходить с частотой затухающей электромагнитной волны. Именно эта локально изменяющаяся во времени область может являться: во-первых, параметрическим генератором упругих волн; во-вторых, областью, на которой рассеиваются или возбуждаются гармоники упругих волн, проходящих через область; в третьих, затухающие электромагнитные волны могут создавать другую структуру среды, например, наличие в ней пузырьковой фазы.

Покажем этот процесс на основе закономерностей магнитной гидродинамики. Предположим, что в среде отсутствует поляризация и намагниченность, но может протекать электрический ток. Будем считать, что отдельная элементарная частица с позиции механики сплошной среды может обмениваться с соседними частицами только механической и тепловой энергией. В связи с тем, что свойства вязкости среды в процессе взаимодействия акустических и электромагнитных волн не являются определяющими, то для упрощения анализа уравнений в дальнейшем их можно не учитывать [4]. В этом случае в правой части уравнения (1) заменим влияние механических свойств среды на электромагнитные, тогда это уравнение (1) можно представить в следующем виде:

$$\rho \left[ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} \right] = -\nabla P + \rho_e \left[ \bar{E} + \frac{1}{C} (\bar{v} \times \bar{H}) \right] + \frac{1}{C} (\bar{j}^* \times \bar{H}) + \rho \bar{F}_{dob} \quad (5)$$

где  $\bar{E}$ ,  $\bar{H}$  – электрическая магнитная напряженность поля,  $\rho_e$  – плотность электрических зарядов,  $\bar{j}^*$  – плотность электрического тока,  $C$  – фазовая скорость электромагнитных волн,  $\bar{F}_{dob}$  – плотность массовых сил, определенных гравитацией. Кроме этого систему уравнений (2, 3, 5) можно сделать замкнутой, если добавить зависимости, учитывающие приток тепла извне  $dq_{доб}^e$  и  $\bar{F}_{dob}$  удельную электропроводность  $\sigma$ . Скалярное уравнение притока тепла:

$$dU + Pd \left( \frac{1}{\rho} \right) = \frac{1}{\rho} (\tilde{j} \cdot \tilde{E}) dt + dq_{доб}^e, \quad (6)$$

$dU$  – внутренняя энергия,  $q_{доб}^e$  – приток тепла к единице массы извне. Скалярное уравнение, вытекающее из второго закона термодинамики:

$$TdS = \frac{1}{\rho} (\tilde{j} \cdot \tilde{E}) dt + dq_{доб}^e. \quad (7)$$

При этом внутренняя энергия  $U$  может быть представлена как функция  $\rho$  и  $S$

$$dU = TdS - Pd \left( \frac{1}{\rho} \right).$$

Из последнего выражения можно получить два скалярных уравнения состояния термодинамики:

$$T = \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right) \rho, \quad -P = \left( \frac{\partial U}{\partial \frac{1}{\rho}} \right). \quad (8)$$

Добавим электродинамические уравнения Максвелла и закон Ома:

$$\text{rot} \bar{E} = \frac{-1}{C} \cdot \frac{\partial \bar{H}}{\partial t}, \quad \text{div} \bar{H} = 0, \quad (9)$$

$$\text{rot} \bar{H} = \frac{4\pi}{C} \cdot \bar{j} + \frac{1}{C} \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}, \quad \text{div} \bar{E} = 4\pi \rho_e, \quad (10)$$

$$\bar{j} = \sigma \left( \bar{E} + \frac{1}{C} \bar{v} \times \bar{H} \right) + \rho_e \bar{v}. \quad (11)$$

Строгое решение системы этих уравнений до настоящего времени не найдено из-за больших математических трудностей. В настоящей работе выводятся упрощенные уравнения, позволяющие проводить не только качественные, но и численные оценки, а также некоторые частные практически важные элементы взаимодействия электромагнитных и упругих акустических волн в проводящих средах.

Электрическую компоненту поля из этой системы уравнений "свернем" и упростим до уравнения диффузии волнового уравнения и представим его в следующем виде:

$$\Delta \Psi = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \Psi}{\partial t}, \quad (12)$$

где  $\Psi$  – потенциал электрического поля,  $\alpha$  – так называемый коэффициент диффузии. Для магнитного поля, распределенного неоднородно в проводящей жидкости, коэффициент  $\alpha$  представим в виде  $\alpha = (\mu\sigma)^{-1}$ ;  $\mu$  – магнитная проницаемость,  $\sigma$  – удельная электропроводность. Решением уравнения (3) для распределения потенциала поля вдоль оси  $x$  в воде можно найти в виде

$$\Psi = \Psi_0 e^{-i[\omega t + \gamma x]}, \quad (13)$$

$$\gamma^2 = \frac{\Omega_{el}^2}{C^2} - i \frac{\omega}{\alpha}, \quad \left( \frac{\Omega_{el}}{C} \right)^2 = k^2 - \text{квадрат волнового числа.}$$

Решение (13) описывает затухающую электромагнитную волну. Затухание электромагнитной волны в проводящей среде зависит от коэффициента диффузии  $\alpha$  и может происходить как на нескольких длинах волн, так и на части волны.

Для звуковой части системы уравнений в приближении малых отклонений плотности и давления от стационарных значений получим следующие приближенные нелинейные уравнения:

$$\Delta P - \frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{b}{C_0^2 \rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \Delta P = Q_{el} - Q_{ac}. \quad (14)$$

где  $Q_{el}$  – группа членов, характеризующих генерацию упругих колебаний за счет электромагнитных волн.  $Q_{ac}$  группа нелинейных членов, определенных в работах по нелинейной акустике [2,3]:

$$Q_{ac} = \frac{1}{C_0^4 \rho} \left( \frac{\partial P}{\partial t} \right)^2 + \frac{\varepsilon - 1}{C_0^4 \rho_0} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{\rho_0}{2} \Delta v^2 + \rho_0 \bar{v} \Delta \bar{v} \quad (15)$$

Методы решения уравнения (14) разработаны в литературе по нелинейной акустике и могут быть применены и для электромагнитной части неоднородного уравнения.

Однако, в отличие от взаимодействия "звук-звук" уравнение (8) описывает ряд практически важных особенностей взаимодействия "звук - электромагнитная волна". Например, в случае, когда нелинейными акустическими членами  $Q_{ac}$  можно пренебречь, нелинейные взаимодействия в проводящей среде будут присутствовать за счет наличия членов  $Q_{em}$ . В случае малости диссипативных потерь уравнение (14) представляет собой неоднородное линейное волновое уравнение. В этом частном случае при совпадении частоты излучения электромагнитной волны с частотой звуковой волны следует ожидать наличия эффектов типа "резонанс в электромеханической колебательной системе".

Рассмотрим экспериментальную часть проверки закономерностей взаимодействия электромагнитных и упругих волн в проводящей среде. В качестве этой среды используем морской водоем (бухту) [1].

Экспериментальные исследования рассмотренных закономерностей взаимодействия волн различной физической природы проведены в два этапа. На первом этапе выполнены морские измерения близкие к лабораторным (рис.1). На втором этапе проведены широкомасштабные натурные испытания на стационарных "просветных" гидроакустических барьерных линиях (ГАБЛ) различной протяженности.

Условия эксперимента первого этапа заключались в следующем. Излучатель 1 (преобразователь) и приемник 2 (гидрофон) "просветных" акустических сигналов опускались с носа и кормы заякоренного судна, и посредством экранированного кабеля соединялись с лабораторным приемоизлучающим трактом, в качестве которого использовался измерительный комплект "КИП-10" (3). Протяженность "просветной" линии (1,2) составляла 70м. В качестве излучателя электромагнитных волн используется вибратор (4), который размещался на горизонте "просветной" линии. Тракт излучения электромагнитных волн был сформирован на базе звукового генератора стабильной частоты (5) с мощным (трансформаторным) выходом. Принимаемые сигналы подсветки усиливались, затем с помощью узкополосного анализатора спектров в реальном масштабе времени типа 3348 выделялись их спектры и регистрировались на самописце типа 2305 (6). При измерениях были проверены различные варианты соотношения частот акустически "просветных" и модулирующих электромагнитных волн. Проведенными измерениями была подтверждена закономерность эффективного взаимодействия акустических и электромагнитных волн (волн различной физической природы) при их совместном распространении в проводящей среде. При этом подтверждена основная (классическая) закономерность параметрического взаимодействия волн, а именно, интенсивность параметрического взаимодействия сигналов повышается с уменьшением разности частот взаимодействующих волн. При этом увеличиваются как уровень сформированных параметрических составляющих, так и количество их гармоник. Примеры параметрического взаимодействия акустических и электромагнитных волн приведены в работе [1]. Следует отметить, что при проведении аналогичных измерений в пресной (непроводящей) среде (в условиях гидроакустического бассейна) параметрическое взаимодействие акустических и электромагнитных волн не наблюдалось.

Отметим, что при совместном распространении в проводящей (морской) среде упругих (акустических) и электромагнитных волн возникает их параметрическое взаимодействие, что сопровождается образованием в исходной акустической

волне параметрических составляющих суммарной и разностной частоты и их гармоник.

Наличие параметрического взаимодействия волн различной физической природы в проводящей (с выраженной нелинейностью) морской среде может найти эффективное применение при решении различных задач практической гидроакустики. Например, гидролокации морских целей и объектов, дальней звукоподводной связи, излучении характеристик океана, а также геологической структуры дна и освоения их запасов.

Для определения возможности генерации и распространения электромагнитной волны при наличии магнитной поляризации в очаге землетрясения рассмотрим накопление электрической и магнитной энергии в нем. Для конкретизации расчетной модели рассмотрим только так называемые надвиговые очаги на глубинах от 5 до 20км. Будем считать, что надвигающиеся плиты зажимают объем 1 км<sup>3</sup> и обладают спонтанной намагниченностью по типу магнитных доменов. Тогда полную энергию таких гигантных квазидоменов оценим по формуле

$$W = -1,5 \lambda_s \sigma \cos^2 \varphi - \mu H \cos \varphi.$$

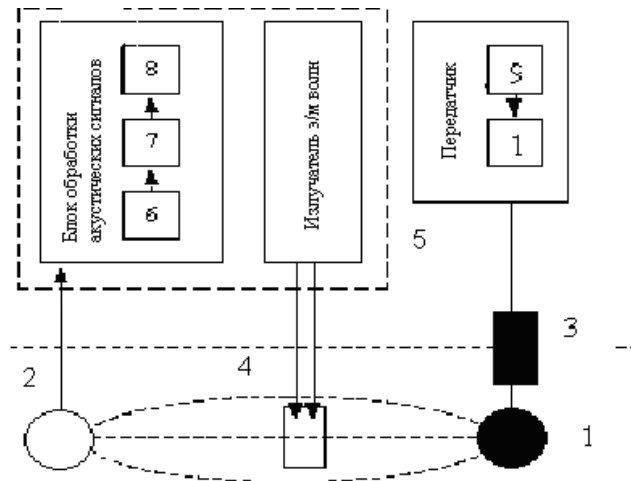


Рис. 1. Схема экспериментальной системы взаимодействия акустической и электромагнитной волн

Первый член определяет упругую механическую составляющую энергию, а второй – магнитную составляющую поля.

$\lambda_s = \Delta l/l$  – коэффициент магнитострикции материала, намагниченного до насыщения;  $\sigma$  – внешнее механическое напряжение, действующее на материал;  $\varphi$  – угол между внешним магнитным полем Земли напряженности  $H$  и движением деформируемой плиты,  $\mu$  – магнитная проницаемость материала. Предположим, что основной материал верхней мантии Земли оливин  $(MgFe)_2SiO_4$  – магнитодиэлектрик. Приблизительно примем для него механические характеристики чистого железа: предел прочности  $G_{пр} = 2,94 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ , модуль Юнга  $E = 19,6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ .

В этом приближении критический коэффициент магнитострикции можно определить по закону Гука:

$$\lambda_s = \Delta e/e = G_{пр}/E = 1,5 \cdot 10^{-3}.$$

Для магнетитов намагниченность  $I$  можно определить по формуле

$$I = H(\mu - 1).$$

Так как мы предположили, что оливин это силикатное железо, то примем для него  $\mu = 15$ , соответствующее карбонатному железу. Поскольку численно поле внутри Земли пока не измерено, принимаем приближенно на глубине 20 км,  $H = 1 \text{ э} = 79,6 \text{ А/м}$ . На поверхности Земли, как известно, напряженность магнитного поля примерно оценивается как  $H \approx 0,5 \text{ э}$ .

В этом приближении полная энергия, запасаемая в  $1 \text{ м}^3$  Земли, равна  $W \approx 6,62 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^3$ . Известно, что плотность энергии электрического поля напряженности  $E$ :

$$W = 1/2 \varepsilon_0 \varepsilon E^2.$$

Принимаем для оливина  $\varepsilon = 10$ , при этом  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{12}$ . Отсюда

$$E = \sqrt{6,62 \cdot 10^5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \approx 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ В/м}.$$

Необходимо учесть, что деформационное слагаемое зависит как  $\cos 2\varphi$ .

Учтем, что при резком сбросе механического напряжения плиты перемещаются в пространстве за интервал  $T = (0,1 \div 0,01) \text{ с}$ . Таким образом, при ускоренном перемещении электрически заряженных частиц должна генерироваться электромагнитная волна. Мощность этой электромагнитной волны  $\omega$  может достигать

$$W = W/T = \eta_i \cdot 6,62 (10^{-6} \div 10^{-7}) \text{ Вт/м}^3,$$

где  $\eta$  – коэффициент преобразования потенциальной энергии в волну частоты  $f$ .

Учитывая типично нелинейный процесс генерации волн различных гармоник, оценим плотность энергии различных гармоник.

Если основная частота  $f_0 = 1/T = 10 \text{ Гц}$  то для нее, выбрав  $\eta_{f_0} = 0,5$ , получим удельную мощность  $w_{f_0} \approx 3,3 \div 10^6 \text{ Вт/м}^3$ .

Для гармоники  $f_{100} = 100 f_0$  коэффициент гармоник составит приблизительно  $10^{-6}$ , то есть  $w_{f_{100}} = 3,3 \cdot (10^{-12} \div 10^{-9}) \text{ Вт/м}^3$ .

В этом случае весь объем очага землетрясения объемом  $10 \text{ км}^3$ , на частоте  $f_0 = 100 \text{ Гц}$ , длина волны в среде  $\lambda_{\text{э,м}} \approx 300 \text{ км}$  будет излучать волну мощностью

$$w_{\text{э,м}} \approx 3,3 \cdot (10 \div 10^3) \text{ Вт}.$$

Такой мощности излучения в принципе достаточно, чтобы волна достигла диэлектрической части волновода Земли (глубина от 5 до 11 км) и распространялась по всему объему Земли в пределах подземного волновода.

Таким образом, можно ожидать, что при землетрясении в сверхнизком диапазоне частот от 10 Гц до 1000 Гц генерируются волны мощности, достаточной для прохождения толщи земных пород и выхода на поверхность через магнитные силовые линии Земли. В принципе эти же оценки можно привести для более высокого диапазона частот.

Рассмотрим возмущение гравитационного поля Земли при ускоренном движении массы очага землетрясения. Предположим, что электромагнитные силы оказывают сравнительно малое влияние на гравитационную массу очага. Кроме этого лианезируем модель (1) и будем считать, что упругие и гравитационные силы действуют на очаг независимо друг от друга. Это приближение применяется в акустических задачах. В отличие от акустических проблем рассмотрим отдельно влияние только гравитационных сил  $F_{\text{доб}} = F_{\text{гр}}$ , которые действуют на элемент очага с плотностью  $\rho_{\text{гр}}$ . Очевидно,  $\rho_{\text{гр}} = \rho_{\text{ин}}$ , т.е. плотности инерционной массы  $m_{\text{ин}}$  и гравитационной  $m_{\text{гр}}$  тождественно равны. В этом случае линейное приближение дает следующую формальную модель поля ускоренно движущейся массы (УДМ).

$$\rho_{\Sigma} \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial t^2} + (\lambda_{\Sigma} + \mu_{\Sigma}) \frac{\partial \Phi_{ii}}{\partial x_j} + \mu_{\Sigma} \frac{\partial^2 \Phi_{ji}}{\partial x_i^2} = F_{\text{доб}}, \quad (16)$$

где  $\Phi_{ii} = \delta_{ij} \Phi_{ij}$  – компоненты тензора деформации поля УДМ в гравитационном поле упругой среды вблизи поверхности Земли.

$$\Phi_{ii} = \left( \frac{\partial \Phi_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \Phi_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \Phi_3}{\partial x_3} \right) - \text{дивергенция смещения.}$$

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda + \lambda_{\text{тр}}, \mu_{\Sigma} = \mu + \mu_{\text{тр}}.$$

$\lambda, \mu$  – коэффициенты Ляме, характеризующие упругие свойства среды.  $\lambda_{\text{тр}}, \mu_{\text{тр}}$  – введены нами как некоторые квазиупругие константы, характеризующие упругие свойства физического вакуума вокруг УДМ;

$\rho_{\Sigma} = \rho_{\text{ин}} = \rho_{\text{г}}$  – общая суммарная плотность, численно равная плотности инерционной или гравитационной массе.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} = 1 & \text{при } i = j, \\ = 0 & \text{при } i \neq j. \end{cases}$$

Уравнение (16) показывает, что если УДМ окружает вакуум (в этом случае упругие постоянные Ляме  $\lambda=0, \mu=0$ ), то поле  $\Phi_i$  вокруг тела также может изменяться в пространстве и времени. При этом скорость распространения импульса гравитации в вакууме будет определяться квазиупругими постоянными гравитационного поля  $\lambda_{\text{тр}}, \mu_{\text{тр}}$ , а также плотностью среды, в которой происходит распространение импульса возмущений сформированной гравитационной волны.

$$C_{zp} = \sqrt{\frac{F(\lambda_{zp}, \mu_{zp})}{\rho_{zp}}},$$

где  $F(\lambda_{\text{тр}}, \mu_{\text{тр}})$  – комбинация квазиупругих констант, характеризующих поле тяготения движущегося тела. В общем случае скорость гравитационной волны зависит от пространственных координат и соотношения между упругими константами и плотностью среды. Однако вблизи с земной поверхностью может быть записана в следующем виде:

$$C_{zp}(r) = \sqrt{\alpha r},$$

где  $\alpha$  – константа, имеющая размерность ускорения движущегося тела в  $[\text{м/сек}^2]$ ,  $r$  – расстояние в  $[\text{м}]$ . В линейном приближении для такой зависимости  $C_{zp}$  уравнение (16) запишется в следующем виде:

$$\Delta \Phi - \frac{1}{\alpha r} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = F_{\text{дооб}}, \quad (17)$$

где  $\Delta$  – лапласиан,  $\Phi$  – потенциал поля, связанного с тензором деформации поля УДМ при  $\lambda=\mu=0$ .

Принципиальным фактором является то, что изменение потенциала гравитационного поля во времени и пространстве экспериментально может быть обнаружено различными приемниками гравитационного поля.

На рис. 2 приведены типичные графики резких возмущений гравиметра от землетрясений на фоне плавных изменений показаний, вызванных приливными волнами.

Экспериментальные оценки скорости распространения гравитационных возмущений («гравитационных волн») вблизи поверхности Земли проведены на двух гравиметрах, расположенных на расстоянии  $r=(700 \pm 5) \times 10^3$  метров друг от друга. Первый пункт измерений находился в г. Петропавловск-Камчатский (1), а второй в поселке Ключи (Камчатка) (2). На индикаторах гравиметров фиксировались изменения показаний значений силы тяжести и время начала этих изменений с точностью до секунды. Источником возмущений гравитационного поля являлось землетрясение на глубине 33км, предположительно Фиджийское (о.Тонго). Время по



Гринвичу  $t=02$  часа 10 минут 36,6 секунд, широта  $-22,89$ , долгота  $-174,97$ , магнитуда  $5,2$ . Разница во времени прихода трех наибольших по интенсивности возмущений в пункты (1) и (2) составила  $\Delta t_1=25'30''$ ,  $\Delta t_2=24'15''$ ,  $\Delta t_3=23'20''$ . Исходя из этих оценок скорость «гравитационных» волн  $v_{гр}^1 \approx 480 \pm 20$  м/сек.

Скорость прихода волн от о.Тонга (расстояние до Петропавловска-Камчатский  $8802$  км)  $v_{гр}^2 \approx 610 \pm 50$  м/сек. Очевидно, что эти скорости значительно меньше скорости электромагнитных волн. Теоретически в ряде наших прежних работ, посвященных описанию «гравитационных» волн были даны подобные оценки скорости и их зависимости от расстояния. Однако, для детального исследования зависимости скорости от высоты над поверхностью Земли необходимо продолжить подобные эксперименты как с одним, двумя и несколькими гравиметрами.

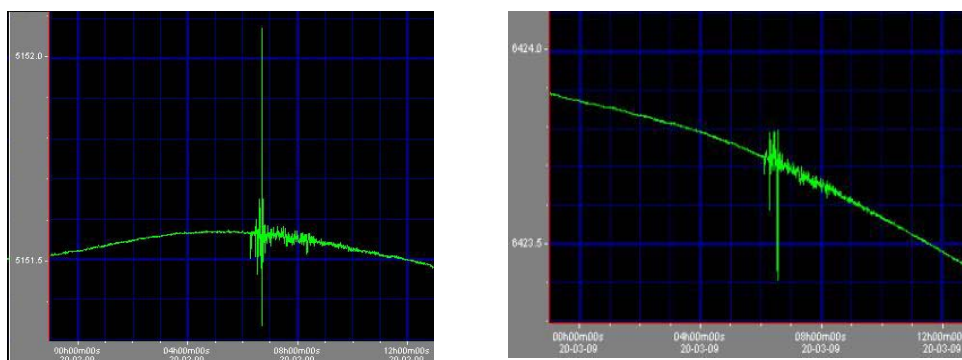


Рис. 2. Сигналы в пунктах 1 и 2

Экспериментальные исследования проведены совместно с группой научных сотрудников института ИВиС ДВО РАН под руководством проф. Н.И. Селиверстова и н.с. И. Абкадырова (г. Петропавловск-Камчатский) с использованием гравиметров типа AVTOGRAV – ТМСq-5, класс точности №1.

Поскольку изменение потенциала гравитационного поля описывается волновым уравнением, а скорость перемещения возмущения  $v_{гр}$  подобна скорости распространения цунами в воде, то нами высказано следующее предположение: цунами, по-видимому, генерируется в том случае, когда очаг землетрясения движется с отрицательным ускорением. Высота подъема воды в очаге землетрясения зависит только от потенциала возмущенного гравитационного поля и не зависит от механических свойств воды. Жидкость в этом случае служит индикатором (измерителем) интенсивности гравитационного поля, а скорость перемещения цунами в пространстве определяется скоростью движения гравитационного возмущения. Возмущения гравитационного поля можно зафиксировать не только под водой, но и другими преемниками, расположенными над поверхностью воды (гравиметры, измерители давления и др.)

Характер возникновения другого природного явления – циклонов, тайфунов, торнадо также невозможно объяснить только температурными перепадами и изменением атмосферного давления. Изменение давления в атмосфере, по-видимому, также связано с изменениями в гравитационном поле Земли. Температура является вторичным фактором, который способствует развитию процесса.

Оценив скорость распространения возмущения «гравитационной» волны, можно также решить навигационную задачу определения координат очага по измерению  $\Phi_{гр}$  в трех (или более) точках вблизи поверхности Земли.

Таким образом, совместно используя волновые свойства упругих, электромагнитных и «гравитационных» волн, можно повысить эффективность комплексных измерений для прогноза катастрофических явлений в океане и прибрежных районах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Короченцев В.И., Мироненко М.В., Короченцев В.В. Повышение эффективности работы параметрических антенн при взаимодействии упругих и электромагнитных волн в морской воде / 2-й Всероссийский симпозиум «Сейсмоакустика переходных зон». – Владивосток: Дальнаука, 2001. – С.100-106.
1. Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1981. – 263 с.
2. Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. – Ростов-на-Дону: РосИздат, 2007. – 448 с.
3. Патент на изобретение № 2140093, 20 октября 1999 г. (19) RU (11) 2140093 (13)С1 (51) bG IV 11,00, 3,00 1/00.
4. Патент на изобретение № 2138123, 20 сентября 1999 г. (19) RU (11) 2138123 (13) С1 (51) 6H01H 5/00.
5. Патент России Приоритет № 98104556 19 февраля 1998 г.
6. Патент России 3 2147755 20 апреля 2000 г.
7. РФФИ, № проекта 08-01-99034, 2008.

#### **Короченцев Владимир Иванович**

Институт радиоэлектроники, информатики и электротехники Дальневосточного государственного технического университета  
E-mail: [vkoroach@mail.ru](mailto:vkoroach@mail.ru)  
690950, Россия, г. Владивосток, Аксаковский переулок, 3а, тел.: 8(4232) 450982  
Кафедра гидроакустики

#### **Vladimir Ivanovich Korochentsev**

Far Eastern National Technical University, Institute of Radio electronics, Information Science and Electrical Engineering  
E-mail: [vkoroach@mail.ru](mailto:vkoroach@mail.ru)  
3a, Axakovsky pereulok, Vladivostok, 690950, Russia, Ph.: +7 (4232) 450982  
Department of Hydroacoustics

УДК 538.3

**В. П. Рублев**

#### **МОДЕЛЬ РАСЧЕТА КОМПОНЕНТ ПОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЯ В ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ**

*В докладе рассмотрены проблемы подводной связи в мелком море, предложена модель расчета и анализа параметров электромагнитного канала связи в безграничной морской среде. Приведен пример разработки и опытной эксплуатации переговорного устройства для аквалангистов на электромагнитном канале связи.*

*Модель расчета; подводная связь; мелкое море; электромагнитный канал связи.*