

УДК 550.38

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА МЕХАНИЧЕСКИ ВОЗМУЩЕННОЙ СРЕДОЙ

В. В. Ласуков, Ш. Р. Мамтов

Проведено теоретическое рассмотрение процесса генерирования ЭМС как функции механических и электрических параметров деформируемой среды, характеристик деформаций и условий распространения сигналов.

В настоящее время обнаружены новые физические явления электромагнитной природы, являющиеся проявлением механических процессов, протекающих в среде. Они находят применение в неразрушающих методах контроля прочности материалов [1], при изучении прогнозе стихийных геологических процессов, таких как землетрясения, оползни, горные удары [2]. Исследование физических проявлений электромагнитной природы может привести как к существенной корректировке моделей указанных процессов (вплоть до сокращения их числа путем объединения), так и к повышению надежности решения технических задач контроля и прогноза механического состояния материалов.

Предлагаемая теоретическая модель явления генерирования электромагнитных сигналов (ЭМС) механически возмущенной средой позволяет количественно объяснить связь механических процессов, протекающих в среде, с электромагнитными явлениями. Значение модели выходит за рамки практики прогноза землетрясений и создания технических устройств для неразрушающего контроля прочности материалов. Дело в том, что до последнего времени понятие геофизической среды имело механический характер. На стыке геофизики и электродинамики это понятие становится более широким, отвечая представлениям физики твердого тела. Поэтому изучение электромагнитных эффектов механически возмущенной средой открывает новые возможности в исследовании физики твердого тела, механики сплошных сред, в изучении свойств горных пород, в развитии общих представлений о физике разрушения разномасштабных объектов.

Считается общепризнанным, что электромагнитные сигналы в пункте наблюдения есть результат совокупного действия элементарных источников (микротрещины, грани которых могут электризоваться) в очаге механического возбуждения [3].

Генерирование ЭМС происходит за счет появления (при появлении трещины) и изменения (при прорастании трещины) дипольного момента трещин. Дипольный момент трещин может изменяться за счет увеличения заряда на поверхности трещин (так как при постоянной поверхностной плотности заряда на трещине растет площадь поверхности трещины при ее прорастании) либо за счет изменения расстояния между бортами трещин, например, под действием звуковой волны (либо за счет того и другого вместе). В экспериментах измеряются напряженность электрического поля E или величина, определяемая dE/dt [4], причем измерения часто проводятся в ближней зоне, т. е. на расстоянии, меньшем чем длина волны.

В этой связи в работе основное внимание уделено теоретическому рассмотрению в ближней зоне напряженности электрического поля, генерируемого

за счет возникновения и изменения дипольного момента трещин, обусловленного динамикой их развития.

Из уравнения электродинамики сплошных сред для скалярного потенциала следует, что

$$\Phi = 4\pi \int \rho(\mathbf{r}, t') G(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|, t - t') d\mathbf{r}' dt', \quad (1)$$

где $G(z)$ — известная функция Грина [5], ρ — объемная плотность заряда.

Из выражения (1) можно получить, что напряженность электрического поля в дипольном приближении ($v \ll c$) с учетом затухания имеет вид

$$\mathbf{E} = [\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3] \exp[-r/R_0], \quad (2)$$

где $\mathbf{E}_1 = n(\vartheta) |\mathbf{D}| / 4\pi\epsilon r^3$ — напряженность электрического поля в ближней зоне, $n(\vartheta) = (3 + r/R_0) n_r \cos \vartheta - n_t$, $n_r = r/|r|$, $n_t = D/|D|$, $\mathbf{E}_2 = [n_r [n_r \dot{\mathbf{D}}] / c^2 r$ — напряженность поля в дальней зоне, $\mathbf{E}_3 = n_r (n_r \dot{\mathbf{D}}) / c r^2$ — в промежуточной области. Множитель e^{-r/R_0} учитывает ослабление поля в среде; $R_0 = c [\epsilon_0 / \nu \epsilon_3]^{1/2}$ — глубина проникновения поля в среду с проводимостью ϵ_3 ; $|\mathbf{D}|$ — дипольный момент трещины $|\mathbf{D}| = \epsilon_0 S l$; ϵ_0 — поверхностная плотность заряда на бортах трещины;

S — площадь поверхности трещины; $l = \int_0^t v(t) dt$ — длина трещины; $v(t)$ — скорость распространения трещины, определяемая динамикой процесса трещинообразования.

Известно, что процесс прорастания трещин можно объяснить в рамках теории разветвленных цепных процессов [6]. Основой для подобной аналогии являются два положения: 1) освобождаемая в процессе прорастания трещины упругая энергия расходуется на рост самой трещины (это положение выдвинуто впервые Гриффитсом и является общепризнанным [7]); 2) распад упругонапряженного поля вокруг трещины идет по законам цепных реакций с взаимодействующими цепями. Согласно этим представлениям, каждое данное зерно, из которых состоит среда, теряет равновесие при движении трещины вблизи него и его упругое поле начинает уменьшаться. Разгрузка идет от границы трещины до противоположной границы зерна, так что граница зерна, прилегающая к трещине, подтягивается и уменьшается его первоначальное натяжение. Сокращаясь таким образом, зерно тянет за собой границу трещины, передавая усилие на ее вершину. При достижении фронтом разгрузки противоположной границы зерна освобождаются 1—2 соседних зерна, которые начинают доплачивать вверх и тянут за собой исходное зерно. — на трещину передается дополнительная энергия. Каждое из этих зерен в свою очередь дает возможность релаксировать нескольким.

Таким образом, высвобождение упругой энергии, предварительно переданной материалу, и передача ее к вершине трещины развиваются как цепной процесс, где роль активной частицы играет зерно, потерявшее равновесие.

В соответствии с этими модельными представлениями скорость роста трещины [6]

$$v(t) = V_0 [\exp(\varphi t) - 1] / [\varphi^2 / g_0 N_0 + \exp(\varphi t)], \quad (3)$$

где $V_0 = [\rho s^3 \varphi / \gamma \tau h g_0]$; $\varphi = \Delta f + (\rho s / \gamma \tau)$; ρ — объемная плотность упругой энергии, являющаяся функцией напряжения в среде; s — линейный размер зерна; τ — время жизни зерна; γ — коэффициент поверхностного натяжения; h — линейный размер исследуемой области; N_0 — число активных частиц, поставляемых за счет флуктуационных процессов релаксационного типа в 1 секунду; $\Delta f = f_1 - f_2$; f_1 — вероятность разветвления в 1 секунду; f_2 — вероятность обрыва цепи в 1 секунду, обусловленная пластической деформацией; $g = g_0 n$ — вероятность обрыва цепи в 1 секунду, обусловленная пересечением цепей; n — количество активных частиц, потерявших упругое равновесие и разрывающихся в данный момент времени.

Известно, что перед разрушением имеет место преимущественная ориентация трещин [8], а следовательно, и их дипольных моментов. Согласно результа-

там работы [9], распределение трещин по направлениям удовлетворительно описывается нормальным законом распределения

$$f(\vartheta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}m} \exp - [(\vartheta - \vartheta_0)^2/2m^2],$$

m — дисперсия; ϑ_0 — угол, который характеризует выделенное в задаче направление. Эти параметры определяются эмпирически.

При усреднении $E_1(\vartheta)$ по ϑ можно сделать замену

$$\sum_k E_1(\vartheta_k) f(\vartheta_k) \rightarrow \frac{N}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\vartheta) E_1(\vartheta) d\vartheta,$$

так как число трещин N велико. Тогда

$$\langle E_1 \rangle = |E_1| N_s \langle n(\vartheta) \rangle, \quad \langle \dot{E}_1 \rangle = \dot{N}_s \langle n(\vartheta) \rangle |E_1| + N_s \langle n(\vartheta) \rangle \langle \dot{E}_1 \rangle, \quad (4)$$

где

$$\langle n(\vartheta) \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} n(\vartheta) f(\vartheta) d\vartheta,$$

N_s — эффективное число трещин, определяемое выражением

$$N_s = n(t) \chi(r), \quad \chi(r) = \int_0^{R_{\max}} \frac{dV'}{|r|^3} = 4\pi \left[\frac{1}{2} \ln \left| \frac{1+x}{1-x} \right| - 1 \right]. \quad (5)$$

Модели поверхностных излучателей [4] соответствует $\chi = \int dS/|r|^3$; dS — элемент поверхности, в которой расположены излучатели; $x = (R_{\max}/r)$; R_{\max} — радиус исследуемой области подготовки разрушения среды; $r = R_{\max} + z$ — расстояние от приемника до центра этой области ($r < R_0$); z — расстояние от приемника до границы этой области; $n(t)$ — объемная плотность трещин, определяемая ниже соотношениями (7)–(10); $\dot{N}_s \sim \dot{n}(t)$; $|E_1| \sim v(t)$. Известно, что процесс образования трещин можно рассматривать как случайный процесс [10]. При этом число трещин в единичном объеме $dn(t)$, возникающих за бесконечно малый промежуток времени от t до $t + dt$, прямопропорционально $n_0 - n(t)$, где n_0 — максимально допустимая плотность трещин, что математически выражается уравнением

$$dn(t) = [n_0 - n(t)] m(t) dt, \quad (6)$$

где $m(t) dt$ — вероятность появления трещин в течение времени dt . Решение уравнения (6) имеет вид

$$n(t) = n_0 \left[1 - \exp - \left(\int_0^t m(t) dt \right) \right], \quad (7)$$

$$\dot{n}(t) = n_0 m(t) \exp - \left[\int_0^t m(t) dt \right]. \quad (8)$$

Анализ лабораторных экспериментов показывает, что можно положить [10]

$$m(t) = \kappa_1 \bar{\sigma}(t)/(1+t), \quad \bar{\sigma}(t) = \sigma(t)/\sigma_{\text{ср}} - \sigma(t),$$

$\sigma_{\text{ср}}$ — условно-мгновенная прочность, $\sigma(t)$ — действующее механическое напряжение (в случае очаговой модели излучателей $\sigma(t)$ — напряжение в очаговой области, а в случае модели поверхностных излучателей $\sigma(t)$ — напряжение

в поверхностных слоях земной коры). Нетрудно видеть, что в случае консолидации среды

$$n(t) = n(0) \exp - \left[\int_0^t m(t) dt \right], \quad (9)$$

$$\dot{n}(t) = -n(0) m(t) \exp - \left[\int_0^t m(t) dt \right]. \quad (10)$$

Согласно (2)—(10), при разумных допущениях о параметрах деформируемых горных пород и трассы распространения сигнала [11] ($\rho = \sigma_1^2/2E$, где $\sigma_1 = 10^6 \div 10^9$ Н/м² — напряжения в среде, $E = 10^{11}$ Н/м² — модуль Юнга, $\gamma = 0.1 \div 10$ Н/м, $s/\tau = 10^3$ м/с, $\sigma_3 = 1 \div 10^{-5}$ См/м) амплитуда сигнала в диапазоне частот $1-10^3$ Гц доступна наблюдению (при пороговой чувствительности приемника 10^{-3} В/м) не только от трещин, расположенных в поверхностных слоях среды, но и от глубинных источников, расположенных на расстояниях до первых десятков километров. Характерно, что предлагаемая конструкция вблизи ее границы $z < R_{\max} < R_0$ может создавать электрическое поле до 10^8 В/м. Такие поля способны существенно изменить условия распространения ЭМС в волноводе Земля—ионосфера.

Соотношения (2)—(10) позволяют объяснить наблюдаемые в экспериментах закономерности электромагнитного предвестника разрушения. Так, возрастание напряженности поля перед землетрясением естественно связать с известным фактом увеличения механического напряжения, а резкое уменьшение амплитуды сигнала в момент сейсмического события сбросом механического напряжения в среде [8].

Согласно соотношению (3), частотный диапазон ЭМС определяется длительностью единичного акта роста микротрещин, являющегося в свою очередь функцией механического напряжения, и лежит в широких пределах

$$\nu = \Delta t^{-1}, \quad \Delta t = [\ln(10\varphi^2/g_0 N_0)/\varphi].$$

Из соотношений (7)—(10) следует, что форма предвестника при регистрации частоты следования импульсов имеет «буктообразный» вид, что совпадает с многочисленными полевыми результатами [3, 4]. Максимальные значения «букты» определяются соотношением $[n_0 \times_1 k / \sigma_{np}]$ (k — скорость роста механического напряжения) и не зависят от энергии события, чем и объясняются неудачи авторов работы [3] в нахождении корреляционной связи между этими характеристиками. Отсутствие связи между возмущением напряженности поля предвестника и энергетическим классом событий есть следствие концентрационного критерия сейсмических разрывов, согласно которому критическая плотность микротрещин, обеспечивающая разрушение, является практически постоянной величиной [12].

В настоящее время известно много различных моделей землетрясений. В частных моделях землетрясений ЛНТ, Стюарта, Брэди на первом длительном этапе, когда создаются условия для возникновения землетрясения, происходит рост существующих трещин и образование новых [3]. Электромагнитный предвестник, соответствующий такому процессу, описывается формулами (3), (5)—(6).

По представлениям В. И. Уломова и И. П. Добровольского (МКВ), на первом этапе происходит уменьшение числа трещин, среда консолидируется [4]. Электромагнитный сигнал, сопутствующий процессу консолидации, описывается формулами (3), (7)—(8).

В ДД модели [4] физическое состояние среды на первой стадии практически не меняется, так что на этой стадии электромагнитный предвестник не должен проявляться.

Ясно, что все это позволит на основе эксперимента объективно судить о степени пригодности перечисленных моделей. При этом если будет установлена справедливость моделей ЛНТ, Стюарта, Брэди или Уломова и Добровольского,

то окажется возможным в принципе долгосрочный прогноз землетрясений по электромагнитному предвестнику (при наличии достаточного уровня чувствительности измерительной аппаратуры). Пока же предвестник электромагнитной природы, по-видимому, проявляется на стадии уже начавшегося разрушения незадолго перед магистральным разрывом, что подтверждается рядом полевых наблюдений. Очевидно, на этой стадии все модели землетрясений слабо различимы по предвестнику электромагнитной природы.

Таким образом, предлагаемая модель позволяет качественно и количественно описать совокупность наблюдаемых экспериментально (на основе техники счета импульсов или величины напряженности поля) краткосрочных предвестников разрушения. Не исключается возможность и долгосрочного прогноза сейсмических событий по электромагнитным возмущениям.

В разработанной модели концентрация активных излучателей и концепция изменений условий распространения [4] рассматриваются с единых позиций о природе ЭМС, генерируемых возмущенной средой, так же как модели поверхностных излучателей и источников, расположенных в очаговой зоне.

Литература

- [1] Малышков Ю. П., Гордеев В. Ф. и др. ЖТФ, 1984, т. 54, № 2, с. 336—341.
- [2] Воробьева А. А. Дефектоскопия, 1977, № 3, с. 128—129.
- [3] Электромагнитные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1982. 88 с.
- [4] Голберг М. Б., Моргунов В. А., Герасимович Е. А., Матвеев И. В. Оперативные электромагнитные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985, с. 116.
- [5] Соколов А. А., Тернов И. М. Релятивистский электрон. М.: Наука, 1974, с. 36.
- [6] Финкель В. М. Физика разрушения. М.: Metallургия, 1970, с. 176.
- [7] Брок Д. Основы механики разрушения. М.: Высшая школа, 1980, с. 368.
- [8] Николаевский В. Н. Земная кора, дилатансия и землетрясения / Под ред. Райса Дж. Механика очага землетрясений. М., 1982, с. 133—217.
- [9] Чернышев С. Н. Трещины горных пород. М.: Наука, 1983, с. 240.
- [10] Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978, с. 324.
- [11] Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. М.: Недра, 1976, с. 527.
- [12] Соболев Г. А., Завьялов А. Д. ДАН СССР, 1980, т. 254, № 1, с. 96—71.

Томский политехнический институт
им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию
25 ноября 1986 г.
В окончательной редакции
29 декабря 1987 г.