

От гипотезы подземных гроз к моделям взаимосвязи сейсмичности и электромагнитных эффектов

Богомолов Л.М.

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Россия

bogomolov@imgg.ru

Протекающие в геосреде токи имеют низкую плотность, так что гипотеза о “подземных грозах” [1], возбуждающих упругие волны, оказалась несостоятельной. По сути, это была разновидность модели взрывного очага землетрясения, ЗЛТ. Тем не менее, она стала первым упоминанием “грозы”, что ассоциируется не только с молнией и громом, но и с многостадийными процессами поляризации среды, в которых принимают участие восходящие и нисходящие потоки газов и водяного пара. Аналогичный процесс: дегазация Земли может играть весьма важную роль во всех эффектах геомеханики и геоэлектрики [2], но информации о нем пока недостаточно для построения количественных моделей. К настоящему времени разработано несколько полукачественных моделей механизма влияния электромагнитных (ЭМ) импульсов на неупругое деформирование геосреды (включая сейсмичность). Эти модели указали, что для водонасыщенной среды управляющим параметром может считаться плотность тока, \mathbf{j} , возбуждаемого при ЭМ воздействиях [3,4]. Большое число работ посвящено вопросам возбуждения ЭМ сигналов на разных стадиях сейсмического процесса, и выделение управляющего параметра для прямого механоэлектрического преобразования энергии менее однозначно. Тем не менее, в ряде случаев (включая сейсмоионосферные вариации перед и после землетрясения) роль такого параметра играет массовая скорость \mathbf{v} .

С учетом изложенного, представляет интерес рассмотреть электромеханические взаимосвязи в геосреде с общефизических позиций, а именно как передачу импульса от вещества к ЭМ полю (прямое преобразование) и от поля к веществу (обратное преобразование). Предпосылкой для такого подхода является несущественность тепловых эффектов (тепловыделения при трении на контактах блоков, джоулева нагрева и др) в условиях электромагнитных зондирований или формирования ЭМ предвестников в приповерхностных слоях коры. Известно, что передача импульса при любых взаимодействиях (в том числе вещество - ЭМ поле) оказывается эффективной, когда импульсы взаимодействующих объектов сопоставимы друг с другом, подобно случаю столкновения шаров. Попробуем проанализировать, от каких параметров зависит отношение полевой и механической составляющей обобщенного импульса, который описывается формулой:

$$P = (\rho \mathbf{v} - \rho_e \mathbf{A}) \delta V \quad (1)$$

где ρ - массовая плотность, ρ_e - плотность заряда, \mathbf{A} – вектор потенциал ЭМ поля, δV – элемент объема. Для сравнения приводится известная формула для импульса частицы массы \mathbf{m} с зарядом e $\mathbf{P} = \mathbf{m} \mathbf{v} - e \mathbf{A}$. Для крайне малых скоростей вещественное слагаемое заменяется оператором импульса $\mathbf{P}_1^\wedge = -i \mathbf{h} \nabla$. В выражении (1) подразумевается, что действующее на заряды ρ_e , e само создается другими зарядами или токами, во избежание проблем с самодействием. Уже из самой формы записи (1) следует, при каких условиях можно ожидать эффективности электромеханической взаимосвязи- при очень низких скоростях движения (в данном случае деформирования) и при достаточной плотности избыточных зарядов. Одновременное выполнение этих условий соответствует замедлению скорости деформации зоны с наибольшей электрической поляризацией. Для оценки безразмерного отношения $\rho_e \mathbf{A} / \rho \mathbf{v}$ выразим вектор потенциала \mathbf{A} через параметры источников по формулам электродинамики, [5].

1) Случай преимущественно электрического воздействия (через электроды, как практически во всех экспериментах [6]). В силу $\mathbf{E} = \partial\mathbf{A}/\partial t$ с порядковой точностью можно записать $\mathbf{A} \sim \mathbf{E} \delta t$, и отношение равно

$$\mathbf{R}_E = \rho_e \mathbf{E} \delta t / \rho \mathbf{v} \quad (2)$$

Для оценки величины \mathbf{R}_E , которое действительно может быть реализовано, в правую часть (2) будем подставлять завышенное значение скорости \mathbf{v} и заниженное значение плотности заряда ρ_e . Известно, что для образцов гранитоидов типовое значение скорости деформации в испытаниях на ползучесть при сжатии менее 0,95 от максимального составляет порядка $\sim 10^{-6}$ 1/с. С учетом размера образцов $\sim 0,05$ м для скорости \mathbf{v} можно принять оценку $\sim \mathbf{v} \sim 5 \cdot 10^{-8}$ м/с. Плотность ρ - наиболее известный параметр, $\rho \sim 2,2-2,7 \cdot 10^3$ кг/м³. Параметры электрических импульсов в экспериментах [6] были $\mathbf{E} \sim 1000$ В/м (амплитуда при использовании генератора Г5-54), $\delta t \sim 20$ мкс (длительность импульса). Наиболее неопределенный параметр - объемная плотность заряда. Согласно [7], поверхностная плотность заряда в щелочно-галогенных кристаллах с трещинами может достигать $(1-3) \cdot 10^{-4}$ Кл/м². Если взять для образцов гранита на порядок меньшее значение $\sim 10^{-5}$ Кл/м², то после пересчета на объем получится $\rho_e \sim 3 \cdot 10^{-4}$ Кл/м³. Подстановка значений всех этих параметров в (2) приводит к следующему результату: $\mathbf{R}_E \sim 0,005$. Любопытно, что отношение \mathbf{R}_E оказалось близким к известному в квантовой электродинамике фактору $e^2/hc \approx 1/137$ – поправке к атомным уровням из-за энергии-импульса электромагнитного поля (обозначения заряда электрона, e, постоянной Планка, h, и скорости света, с стандартные). Обсудим, а может ли отношение \mathbf{R}_E , с которым связывается эффективность ЭМ воздействий, быть еще выше. Формально, \mathbf{R}_E возрастает, с уменьшением скорости. Но предел $\mathbf{v} \rightarrow 0$ невозможен силу принципа неопределенности Гайзенберга. Для крайне медленных движений классическое выражение для импульса (1) заменяется операторным. Удобно рассмотреть случай, когда длина волны Де-Броиля сравнима с размером объекта, но намного меньше длины волны ЭМ поля. Тогда поле описывается классически. Для оценки отношения составляющих импульса можно градиент ∇ заменить на $1/L$ (L - длина), а для потенциала \mathbf{A} использовать аппроксимации $\mathbf{A} \sim \mathbf{E} \delta t \sim (\varphi/L) \delta t \sim (Z e/L^2) \delta t$. Здесь Z- зарядовое число источника поля, заменяющее амплитуду. Тогда отношение \mathbf{R}_E примет форму

$$\mathbf{R}_{E,qw} \sim e\varphi\delta t/\hbar \sim (e^2/hc)Z(c\delta t/L) \quad (3)$$

которая демонстрирует, что для обычных электромагнитных систем с характерным временем взаимодействия $\delta t \sim L/c$ вклад полевого слагаемого принципиально ограничен. Он должен быть порядка 1/137 относительного вклада механического слагаемого. Можно предположить, переходя от условной простой задачи к геоматериалам, что влияние электромагнитного поля на ход деформирования становится наиболее эффективным, когда скорость ЭМ волны в веществе сильно замедляется.

2) Случай заданного тока. Для воздействий при разрядах МГД-генераторов и обычных электроимпульсных источников именно ток является задаваемым параметром [4,6]. Используя известные выражения

$$\mu_0 \mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{A}, \text{rot } \mathbf{H} = \mu_0 \mathbf{j} + \partial(\epsilon\epsilon_0 \mathbf{E})/\partial t \quad (4)$$

где \mathbf{H} – напряженность магнитного поля, \mathbf{j} – плотность тока, μ_0 , ϵ_0 – абсолютные магнитная и диэлектрические проницаемости, ϵ – относительная проницаемость, можно оценить величину \mathbf{A} в пренебрежении токами смещения как $\mathbf{A} \sim \mu_0 \mathbf{j} L^2$ (фактически это соотношение размерности). После подстановки этой оценки в (1) следующее выражение для отношения импульсов поля и вещества

$$\mathbf{R}_j = \rho_e \mu_0 \mathbf{j} \mathbf{L}^2 / \rho \mathbf{v} \sim \rho_e \mu_0 \mathbf{I} / \rho \mathbf{v}, \quad (5)$$

где по размерности введено обозначение полного тока, локализованного в области с размером \mathbf{L} . Следует отметить, что ток переносится не только избыточными зарядами, так что ρ_e и \mathbf{j} входят в (5) независимо. Рассмотрим примеры. В экспериментах с водонасыщенными образцами [6] сопротивление между электродами было не менее 10 кОм, так что даже при разрядах индукционного генератора (напряжение порядка 5 кВ) ток не превышал 0,5 А. Если принять значения скорости \mathbf{v} и плотности заряда ρ_e такими же, как и для сухих образцов (последнее маловероятно, реальное ρ_e должно быть ниже), то из (5) получится $\mathbf{R}_j \sim 10^{-8}$. Столь низкое значение этого отношения указывает на то, что в лабораторных условиях эффект отклика образцов на ЭМ воздействия обусловлен только электрической компонентой, ток через образец не может играть роли.

В случае воздействий при электромагнитных зондированиях земной коры с применением мощных источников, полный ток 600-2000 А [4,6], а для тока, локализованного в некоторой области, где формируется первичный отклик естественно допустить, что $I \leq 100$ А. Характерная скорость тектонических подвижек ~ 3 см/год, или 10^{-10} м/с. Если и в этом случае допустить наличие в некоторых зонах избыточных зарядов с плотностью $\rho_e \sim 3 \cdot 10^{-4}$ Кл/м³ (как для вышерассмотренных случаев), то расчет по формуле (5) приводит к оценочному результату $\mathbf{R}_j \sim 10^{-3}$. Если же использовать для подстановки в (5) значение тока ($I=600$ А), то \mathbf{R}_j станет близким к фактору \mathbf{R}_E (2) для экспериментов на образцах. Это обстоятельство может отражать, с новых позиций, аналогию откликов на ЭМ воздействия в натуральных и полевых условиях.

Один из конкретных механизмов, описывающий прямое и обратное преобразование - сейсмоэлектрический (электросейсмический) эффект при смещении проводящего флюида в коллекторах относительно скелетного вещества. Но не исключено, что роль явлений электроинженерии в механизме ЭМ воздействий на среду преувеличивалась. Об этом может свидетельствовать пример "замкнутой" системы [5], в котором электроинженерия не приводит к возникновению градиента давления (вопреки распространенным представлениям). Рассмотрим, следуя [8], особенности электроосмоса. Причина движения – наличие избытка одноименных ионов вблизи твердой поверхности и в стенки в наружной части пристеночного слоя. Электрического поля вынуждает избыточные ионы смещаться. Если ионы, находящиеся непосредственно у стенки и образующие обкладку двойного слоя не перемещаются, возникает перепад давления (рис. 1 а). Это случай очень высокой вязкости либо трения о стенки. В геоэлектрике, как правило, принимается модель рис. 1 а. Другой случай реализуется, когда у стенки возникает встречный поток (из-за избытка ионов другого знака, чем с внутренней стороны двойного слоя, рис. 1 б при одном и том же направлении поля \mathbf{E}). Показанная на рис. 1 б структура течения поясняет, почему в этом случае может не возникать перепада давления по длине капилляра (изменяются только удельные концентрации ионов, как оговорено в [5]).

Альтернативой традиционным моделям электроинженерии может быть новая модель, формулируемая по аналогии с другими средами, содержащими заряженные частицы. И в физике плазмы (случай ионизированных газов) и в микроэлектронике (случай полупроводников с электронно-дырочными носителями зарядов) известен эффект возбуждения колебаний электрическим током. Для плазмы полупроводников известен эффект возбуждения колебаний электрическим током, т.е. акустоэлектронное усиление звуковых волн [9]. Это происходит, если средняя направленная скорость пучка электронов (пропорциональная \mathbf{j}) больше тепловой скорости ионов. Аналогичный эффект возбуждения ионно-звуковых волн пучком электронов имеет место и в газоразрядной плазме. Ну а влияние колебаний на высвобождение накопленной энергии и трещинообразование в геосреде хорошо известно.

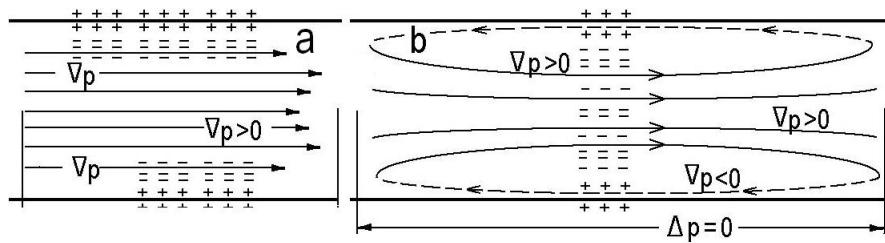


Рис. 1. Схема стационарного течения, вызванного потоком ионов в случае широких капилляров, с возникновением обратного потока у стенки (а), и потока в узких капиллярах (б), когда из-за адсорбции (трения о стенки) движение у стенок исключено

Рассмотрим возможность реализации такого эффекта при зондировании земной коры мощными импульсами тока от МГД-генераторов или генераторной установки ЭРГУ-600-2. Плотность токов в электролите в поро-трещинном пространстве при зондировании, заведомо меньше ионного тока насыщения, даже вблизи первичного диполя. При этом средняя токовая скорость всегда меньше звуковой, и, казалось бы, эффект возбуждения волн невозможен. Однако в системах с узкими водозаполненными каналами могут распространяться интерфейсные волны, скорость которых значительно меньше обычного звука [10,11]. Простейшим примером интерфейсных волн является волна Рэлея на поверхности жидкости, скорость распространения которой, $v_R = (gh)^{1/2}$ может быть весьма малой при тонком слое жидкости, h (v_R составляет около 0,1 м/с для слоев с $h \sim 1$ мм). Согласно расчетам [10,11], скорость интерфейсных волн в среде с узким каналом может быть того же порядка или меньше, т.е. несколько см/с. Для таких скоростей вполне возможен эффект “накачки”: двигаясь со средней токовой скоростью ионы догоняют “медленную” интерфейсную волну и передают ей часть своей энергии. Проведем численную оценку пороговой плотности тока, j_0 , соответствующей скорости волны $\sim 10^{-2}$ м/с. Для однозарядных ионов при их концентрации n_i в растворе порядка 10^{18} 1/м³ это значение составляет

$$j_0 = e n_i v_R \sim 2 \cdot 10^{-3} A/m^2 \quad (6)$$

Такая плотность тока может достигаться при проведении зондирований на Бишкекском геодинамическом полигоне вблизи источника - первичного диполя. Эффекту способствует естественная концентрация инжектируемых в землю токов в каналах с жидкостью, образованных полостями трещин.

Резюме. Продемонстрировано, что для анализа закономерностей реакции среды на электромагнитное воздействие наряду с имеющимися “наиболее правдоподобными” моделями могут также быть полезными и другие подходы. Эти подходы позволили получить некоторые новые результаты (скейлинги для эффективности воздействия ЭМ поля). При общефизическом подходе обоснована целесообразность проведения измерений сейсмоакустической эмиссии на разных расстояниях от источника ЭМ импульсов.

Литература

1. Воробьев А.А. Равновесие и преобразование видов энергии в недрах. Томск: Изд-во ТГУ. – 1980. - 211с
2. Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико -химические аспекты. Королёв: ЦНИИМаш. 2007. - 160 с.
3. Зейгарник В.А, Конев Ю.Б., Новиков В.А. Тепловое действие мощного тока на флюидонасыщенные среды. // Триггерные эффекты в геосистемах. / под ред. В.В. Адуш-

кина, Г.Г. Кочаряна. - М: ГЕОС. 2010. - С. 202 - 209.

4. *Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Рыбин А.К., Сычева Н.А.* Влияние электромагнитных зондирований Земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинамического полигона // Триггерные эффекты в геосистемах. / под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. - М: ГЕОС. – 2010. – С. 316 - 325.
5. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. Т.8. Изд. 2. М.: Наука.1982. - 620 с.
6. *Богомолов Л.М., Закупин А.С., Сычев В.Н.* Электровоздействия на земную кору и вариации слабой сейсмичности. Saarbrucken: Lambert Academic Publishing. 2011. - 410 с. ISBN 978-3-8465-1436-8
7. *Финкель В.М.* Физические основы торможения разрушения.-М.: Металлургия. – 1977. – 359 с.
8. *Григоров О.Н.* Электрокинетические явления. Л.: Изд-во ЛГУ. – 1973. – 196 с.
9. *Красильников В.А., Крылов В.В.* Введение в физическую акустику. М.: Наука. – 1984. – 400 с.
10. *Виноградов Е.А.* Реакция геофлюидных систем на сейсмическое воздействие. Авт-реф. дис. ... канд. физ.-мат. Наук.- Москва: Ин-т динамики геосфер РАН. 2011. - 24 с
11. *Ferrazzini V., Aki K.* Slow waves trapped in a fluid-filled infinite crack: implication for volcanic tremor // J. Geophys. Res. – 1987. – V.92. – P. 9215-9225.

From hypothesis of underground discharges towards models of relationship of seismicity and electromagnetic effects

Bogomolov L.M.

Institute of Marine Geology and Geophysics, Russia

Up till now the analysis of mechanisms of occurrence of electromagnetic (EM) anomalies before earthquakes (ionospherical perturbations being involved), and the mechanisms of electromagnetic action (EMA) on the seismicity have been carried out independently from each other. Several models describing energy conversion from mechanical form to electromagnetic one (the physics of precursors), and vise versa were discussed during the 5-th Conference on Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors. The unified approach to the problem of seismic electromagnetic relationship is of interest. This implies the integration of models, describing unilateral nondissipative energy conversions. The fundamental for such approach is the expression for generalized pulse of EM field and substance, the interaction being considered as partial pulse transfer from the substance with charged particles to EM field, or vise versa. One can derive by dimensions method (immediately from the structure of Electrodynamics equation) the frame estimates of limiting value of telluric current density, for which the excitation of acoustic and seismo-acoustic waves is expected. These waves are able to play triggering role for seismic shifts. The values of mass velocities have been also estimated, for which the occurrence of EM anomalies in solid Earth becomes possible. The comparison with the results on ionospherical perturbations, caused by internal gravitational waves or acoustic gravitational waves propagating from the Earth surface through atmosphere, has revealed the

following. The order of above evaluation of mass velocity is in agreement with the typical level of amplitude (~ 10 cm) at cyclic frequency ~ 0.01 1/s. Beside the approach of general Physics, some scenarios of seismoelectric or electromagnetic - seismic effects have been analyzed in the paper as well.