

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ АНАЛОГИЯ И СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Натяганов В.Л., Чайка А.А., Чистякова А.А.

(Москва)

В работе предложена физико-математическая модель сейсмоэлектрического эффекта на основе магнитогидродинамической аналогии теории движения крыла самолета.

Гидродинамический аналог этого эффекта восходит к идеям Жуковского о присоединенном вихре крыла при его обтекании потенциальным потоком идеальной жидкости.

Установленная аналогия открывает принципиальную возможность для единообразного объяснения всех основных видов проявления сейсмоэлектрического эффекта по регистрируемым изменениям атмосферного электрического поля перед сильными землетрясениями.

MAGNETOHYDRODYNAMICAL ANALOGY AND SEISMOELECTRICAL EFFECT

Natyaganov V.L., Chaika A.A., Chistyakova A.A.

(Moscow)

The work is offered with the physics and mathematics model of seismoelectrical effect on basis of magnetohydrodynamical analogy of the theory of airplane wing motion.

Hydrodynamic analogue of this effect goes back to the Zhukovski idea about the attached vortex of the wing which flows around with the potential stream of an ideal liquid.

The established analogy discovers a fundamental opportunity for an uniform explanation of all basic kinds of display of seismoelectrical effect with the help of registered changes of an atmospheric electric field before strong earthquakes.

Существующие пояса наиболее сильной сейсмичности обычно объясняются тектоникой литосферных плит. Согласно этому взгляду тепловая конвекция в мантии Земли в сочетании с динамическими эффектами вращения приводит в движение литосферные плиты. На границах плит возникают высокие напряжения, вызывающие разрывы в каменной толще литосферы, образование трещин или их схлопывание, и как следствие – землетрясения.

Возникнув первоначально как кинематическая модель, тектоника плит способствовала быстрому развитию геодинамики – научной дисциплины, занимающейся изучением движений и деформаций земной коры, анализом их причин и взаимосвязи с другими процессами. Ключевую роль в эволюции литосферы Земли играют процессы субдукции (поддвига), когда одна плита при встрече заталкивается под другую; спрединга (растяжения) и скольжения литосферных плит вдоль трансформных разломов, с которыми связано большинство сильных землетрясений.

Теоретическую основу моделей подготовки землетрясений составляют методы механики сплошных сред и физики разрушения горных пород. Наиболее известны три группы моделей, относящиеся к упруго-пластическому деформированию, лавинно-неустойчивому трещинообразованию и дилатантно-диффузионным процессам. К сожалению, адекватно описывая процесс подготовки землетрясений, эти модели не дают достоверных прогностических признаков о времени их начала.

Следует подчеркнуть, что методика долгосрочного (годы – десятилетия) сейсмического прогноза разработана в трудах академика С.А. Федотова, а вот с краткосрочным (недели – месяцы) и, особенно, оперативным (часы – сутки) прогнозом землетрясений дело обстоит неудовлетворительно, несмотря на то, что сегодня известно около трехсот различных предвестников сильных землетрясений. И если долгосрочный прогноз позволяет избегать строительства опасных объектов типа химических производств (или АЭС на Камчатке, которое было прекращено благодаря усилиям С.А. Федотова), то надежный оперативный прогноз позволит спасти человеческие жизни. Сегодня многочисленные опытные данные позволяют идентифицировать различные типы предвестников землетрясений: акустические, све-

товые, гидрогеодинамические, геохимические и электромагнитные.

Если об акустических и световых предвестниках перед началом сильных землетрясений писали исследователи еще в прошлых веках, в числе которых был и М.В. Ломоносов: «Выключая чудесные и маловероятные предсказания, действие так происходило. Вдруг слышен стал во всем городе треск, как от великого пожара... Воздух шумел беспрестанно и показывал в себе разные пламенные виды и умножал страх некоторым визгом» [1], то геохимические и электромагнитные стали усиленно изучаться в последние десятилетия XX века. Поводом к этому послужили инструментальные открытия аномального увеличения: 1) содержания радона в термоминеральной воде глубинного происхождения перед Ташкентским землетрясением в 1966 г. и 2) атмосферного электрического поля (АЭП) в районе Джалалабада на расстоянии 120 км от эпицентра перед Куршабскими землетрясениями в 1924 г., Чаткальским (1946 г.) и Хаитским (1949 г.) землетрясениями [2]. За 5 часов до Ташкентского (1966 г.) землетрясения было зарегистрировано аномальное возмущение АЭП, характеризующееся изменением направления поля на противоположное нормальному ходу.

В последние десятилетия внимание многих ученых в разных странах мира обращено к новой загадке атмосферного электричества – сейсмoeлектромагнитному эффекту (СЭМЭ), разгадка механизма и построение физико-математической модели которого сулит человечеству надежный признак для краткосрочного и оперативного прогноза землетрясений.

Систематическое изучение СЭМЭ было начато в 70-х годах А.А. Воробьевым и сформировалось сегодня в отдельное направление геофизики с обширным фактическим материалом [2 – 5]. Накопленные данные позволяют утверждать, что завершающая стадия подготовки сильного землетрясения в литосфере оказывает заметное влияние на электромагнитные и другие явления, развивающиеся в верхних геосферных оболочках. Это сопровождается всплесками акустической эмиссии, аномального электромагнитного излучения (ЭМИ), вариаций квазистатического АЭП и теллурических токов. Несмотря на тридцатилетний срок исследований СЭМЭ эти прогностические параметры

все еще относят к нетрадиционным, ибо до настоящего времени не существует общепринятого физического объяснения различных типов СЭМЭ.

В [3] выделены две основные гипотезы: модель активных поверхностных излучателей и концепция ионосферно-волноводного распространения атмосфериков, тогда как гипотеза о «подземных грозах» отнесена к разряду экзотических. В настоящей работе фактически показано, что гипотеза А.А. Воробьева о «подземных грозах» таковой не является.

Следует подчеркнуть, что регистрируемые типы аномалий ЭМИ и АЭП не укладываются в простую схему, но можно выделить четыре основных вида [3] их проявления во времени.

1. Возмущение обладает характерным образом сигнала-предвестника, проходя последовательно стадии роста, квазинасыщения и сброса до невозмущенного уровня в момент землетрясения.
2. Возмущение с «фазой замирания» масштабом до нескольких суток, которое выходит на фоновый уровень непосредственно перед землетрясением или после резкого всплеска.
3. Возмущение колоколообразной формы со спадом к фоновому значению перед землетрясением.
4. Аналогичное возмущение колоколообразной формы, но момент начала землетрясения на записи сигнала не идентифицируется.

Другие типы возмущений АЭП при единичных землетрясениях получаются простой суперпозицией этих основных видов. При интенсивной форшоковой или афтершоковой активности виды возмущений могут быть сложнее.

В настоящей работе предложена «самолетная» модель сейсмoeлектрического эффекта на основе магнитогидродинамической аналогии (МАГДА) между полями скорости \vec{v} и завихренности $\vec{\omega}$ несжимаемой идеальной жидкости, обтекающей крыло самолета, и геомагнитным полем \vec{H} и соответствующим ему электрическим током \vec{j} . Роль крыла изменяемой геометрии (за счет предкрылков и закрылков) в этой аналогии играет процесс развития магистральной трещины в литосфере и ее разрушение в результате землетрясения. Гидродинамический аналог сейс-

моэлектрического эффекта опирается на теорию крыла самолета, развитую в широко известных трудах аэромехаников советской школы (Чаплыгин – Голубев – Кочин – Седов) [6 – 8] и восходит к идеям Жуковского о присоединенном вихре крыла.

МАГДА следует из простого сравнения краевых задач:

обтекание крыла самолета:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \bar{v} = 0 \\ \operatorname{rot} \bar{v} = 0 & \text{вне } C \\ \operatorname{rot} \bar{v} = \bar{\omega} & \text{внутри } C \end{cases} \quad (1)$$

$$r \rightarrow \infty: \quad \bar{v} \rightarrow \bar{v}_0; \{v_n\}_C = 0$$

сейсмоэлектрический эффект:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \bar{H} = 0 \\ \operatorname{rot} \bar{H} = 0 & \text{вне } C \\ \operatorname{rot} \bar{H} = \vec{j} & \text{внутри } C \end{cases} \quad (2)$$

$$r \rightarrow \infty: \quad \bar{H} \rightarrow \bar{H}_0; \{H_n\}_C = 0$$

где фигурные скобки означают скачок соответствующей величины, индекс n – нормальную компоненту к контуру C профиля крыла самолета или соответствующий ему трещины в «самолетной» модели сейсмоэлектрического эффекта.

Заметим, что этот кинематический вид МАГДА достаточно хорошо известен еще со времен Гельмгольца, который в 1858 г. установил аналогию между вихревыми и токовыми нитями, а чуть позднее Кирхгоф, Максвелл и Томпсон с ее помощью получили и динамическое подобие во взаимодействии между вихревыми и токовыми кольцами. В теории электромагнетизма решение системы (2) обычно заменяется нахождением магнитного поля по заданному распределению тока в соответствии с законом Био-Савара. Именно в таком виде этот вид МАГДА изложен в известном учебнике [9] при решении задачи нахождения поля скоростей, индуцированного заданной системой вихрей. Не останавливаясь подробно на предположениях, принятых в теории крыла самолета [6 – 8], отметим несколько принципиальных моментов.

1. Вне крыла течение имеет потенциальный характер, однако, если крыло заменить присоединенными вихрями Жуковского и непрерывно продолжить течение на всю плоскость, то внутри контура крыла получим вихревое течение [6 – 9].
2. Переход от граничного условия $v_n = 0$ к $\{v_n\} = 0$ на контуре крыла соответствует выдвиганию пред- и закрылков, что сопровождается изменением характера обтекания (в том числе интегральной циркуляции Γ вокруг крыла и интенсивности завихренности γ на его профиле). В сейсмoeлектрическом эффекте этому процессу соответствует явление выталкивания силовых линий магнитного поля \vec{H} дифференциальным вращением среды [10] внутри растущей магистральной трещины и образования токовых слоев вдоль ее границ.
3. Для осуществления этого необходимым условием является существенное превышение электропроводности этой среды по сравнению с проводимостью неразрушенной горной породы, в которой и растет магистральная трещина; подобное требование является достаточно правдоподобным и имеет несколько различных обоснований [2, 5].
4. При заданной форме контура S краевая задача (1) относится к стандартному типу, хотя и требует, как правило, численного счета. Однако для сильно деформируемого или неизвестного контура (а в случае магистральной трещины это всегда так) эта задача сводится к сложной проблеме склейки потенциального и вихревого течения на заранее неизвестной границе. Для подобных задач до сих пор нет доказательства существования, единственности и устойчивости возможных решений [11]. Более того, имеются примеры подобных задач (течение над траншеей), для которых при численном счете обнаружено несколько различных решений!
5. Важно подчеркнуть, что уравнения систем (1) и (2) инвариантны относительно преобразований Галилея вида $x' = x - v \cdot t$. Для крыла это позволяет рассматривать не только задачу обтекания крыла, но и его движения относительно неподвижной среды, когда сходящие с крыла вихри

остаются на месте своего возникновения. В силу МАГДА для сейсмoeлектрического эффекта это позволяет перейти от пространственной координаты к развертке по времени изменений АЭП, что и фиксируется приборами перед землетрясениями.

Задача стационарного обтекания профиля крыла с контуром С (для простоты будем считать С отрезком действительной оси координат xOy : $0 \leq x \leq b$, $y = 0$) сводится к решению сингулярного интегрального уравнения с ядром Коши

$$v_y = \frac{1}{2\pi} \int_0^b \frac{\gamma(s)ds}{x-s}, x \in [0, b]. \quad (3)$$

В общем случае, когда $v_y = f(x)$ является некоторой заданной функцией x , уравнение (3) допускает три различных решения [12]:

ограниченное на одном и неограниченное на другом конце отрезка $0 \leq x \leq b$

$$\gamma_1(x) = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{b-x}{x}} \int_0^b \sqrt{\frac{s}{b-s}} \frac{f(s)}{s-x} ds,$$

неограниченное на обоих концах отрезка

$$\gamma_2(x) = \frac{1}{\sqrt{x(b-x)}} \left[\frac{2}{\pi} \int_0^b \frac{f(s)\sqrt{s(b-s)}}{s-x} ds + \text{Const} \right],$$

и ограниченное на обоих концах отрезка

$$\gamma_3(x) = \frac{2}{\pi} \sqrt{x(b-x)} \int_0^b \frac{f(s)}{\sqrt{s(b-s)(s-x)}} ds \text{ при } \int_0^b \frac{f(s)}{\sqrt{s(b-s)}} ds = 0.$$

Сингулярные интегралы для $\gamma_1(x)$, $\gamma_2(x)$ и $\gamma_3(x)$ понимаются в смысле главного значения, для их вычисления удобно сделать замену

$$s = \frac{b}{2}(1 + \cos\theta), \quad x = \frac{b}{2}(1 + \cos\mu), \quad \text{где } \theta, \mu \in [0, \pi].$$

Если $f(x)$ задать в виде разложения по $\cos(n\theta)$ или полиномам Чебышева, то все вычисления сводятся к комбинации известных интегралов вида [8]

$$J_n = \int_0^{\pi} \frac{\cos(n\theta)d\theta}{\cos\theta - \cos\mu} = \pi \frac{\sin(n\mu)}{\sin\mu}.$$

В частности, при $f(x)=1$ выражения для $\gamma_1(x)$ и $\gamma_2(x)$ можно получить в простом явном виде:

$$\gamma_{1b}(x) = 2\sqrt{\frac{b-x}{x}}, \gamma_{10}(x) = 2\sqrt{\frac{x}{b-x}}, \gamma_2(x) = \frac{2(2x-b)}{\sqrt{x(b-x)}}.$$

Где $\gamma_{1b}(x)$ ограничено при $x \rightarrow b$, $\gamma_{10}(x)$ ограничено при $x \rightarrow 0$ и удовлетворяют условию Чаплыгина-Жуковского на этих концах отрезка, тогда как $\gamma_2(x)$ этому условию не удовлетворяет. Если теперь у $\gamma_{10}(x)$ «обрезать хвост», уходящий в бесконечность при $x \rightarrow b$ как некоторую идеализацию, то сравнительный анализ характерного сигнала-предвестника АЭП с последовательными стадиями постепенного роста, квазинасыщения и резкого сброса в момент землетрясения [3] и «обрезанного» графика $\gamma_{10}(x)$ показывает явное сходство, что и должно следовать из установленной МАГДА и отмеченной выше галилеевой инвариантности.

Следует подчеркнуть, что приведенный анализ претендует лишь на качественное объяснение. Однако подобное объяснение единообразным способом можно провести и для оставшихся трех других видов сигналов-предвестников (в т.ч. и с «фазой замирания»), используя все три решения $\gamma_1(x)$, $\gamma_2(x)$ и $\gamma_3(x)$ интегрального уравнения (3), что было представлено в обзорном докладе В.Л. Натяганова «Ломоносов и загадки атмосферного электричества». Таким образом, похоже, установлена единая природа различных видов проявления сейсмoeлектрического эффекта, что ранее в других источниках [2 – 4] ставилось под сомнение. Необходимо подчеркнуть, что уравнение (3) в нестационарном случае обтекания крыла с предкрылками и закрылками дает лишь нулевое приближение и надо использовать некоторое обобщение уравнения Бирнбаума [8] для более точных оценок, однако это можно сделать лишь численно и при известном законе изменения контура S разрезного крыла. Так как закон изменения формы магистральной трещины принципиально неизвестен, то подобные математические изыскания для пони-

мания сейсмоэлектрического эффекта ничего нового не дадут. А вот термодинамический и энергетический анализ процессов происходящих в магистральной трещине, особенно с учетом фазовых переходов при разрушении горной породы, представляется перспективным [5]. Однако это выходит за рамки данной работы.

В заключении авторы выражают глубокую признательность академику Е.И. Шемякину и В.А. Дубровскому за постановку проблемы интерпретации сейсмоэлектрического эффекта, полезное обсуждение и внимание к данной работе.

Литература.

1. Ломоносов М.В. О слоях земных. Избранные произведения. Т.1. Естественные науки и философия. – М.: Наука, 1986, стр. 361 – 434.
2. Электрические и магнитные предвестники землетрясений. Под ред. Головкова В.П. – Ташкент: ФАН, 1983.
3. Моргунов В.А. и др. Методы анализа сейсмоэлектромагнитных процессов. – М: Из-во ИФЗ, 1991.
4. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмоэлектромагнитные явления. – М.: Наука, 1988.
5. Воробьев А.А. Равновесие и преобразование видов энергии в недрах. – Томск, 1980.
6. Голубев В.В. Лекции по теории крыла. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1949.
7. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1950.
8. Некрасов А.И. Теория крыла в нестационарном потоке. – М.-Л.: Из-во АН СССР, 1947.
9. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т.2. – М.: Наука, 1973.
10. Moffat Н.К. Magnetic field generation in electrically conducting fluids. – London – New York – Melbourne: Cambridge V.P., 1978.
11. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. – М.: Наука, 1973.
12. Мусхелишвили Н.И. Сингулярные интегральные уравнения. – М.-Л.: Гостехиздат, 1946.