

РОЛЬ СТОХАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕХАНИКЕ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

И.В. Попов (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия;
 e-mail: igor-popov39@yandex.ru)

Последнее десятилетие ознаменовалось тем, что, человечество, как никогда, подошло близко к пониманию причин катастрофических явлений на планете Земля в виде землетрясений, извержений вулканов, разрушительных циклонов, смерчей-торнадо и пр. Причина явлений – воздействие внешних слабых полей – магнитного (МП), электрического (ЭП), гравитационного (ГП), с энергиями на порядки меньшими энергии теплового движения частиц конденсированной среды (КС) («проблема kT »), на изменение состояния физических, химических и биологических систем планеты [1].

Известно, что космическая погода (солнечная погода и геомагнитная возмущённость) управляет физико-химическими системами, техносферой и биосферой, но и явлениями природы на планете [2,3]. Согласно [3], виновником всех процессов и явлений является сама Земля – её внушительное внутреннее стохастическое тепловое электромагнитное поле (ТЭМП) – электрическое ($10^9 \div 10^{11}$) В/м (ТЭП) и магнитное $\sim 10^7$ А/м (ТМП) (данные при комнатной температуре), действующие внутри любой её конденсированной среды. ТЭМП КС – результат теплового движения любой частицы с энергией kT . Без ТЭП и ТМП самой КС Земли нет влияний и её геокосмоса – ионосферы и магнитосферы.

Для упрощения первого восприятия доклада будем под КС-ми понимать водные поверхности морей и океанов, туч, песчаные поверхности пустынь, расплавленную магму Земли под литосферными плитами и др., хотя в качестве КС могут быть и любые объекты техносферы и биосферы. Покажем, как на микроскопическом уровне, на примере Земли, зарождаются огромные катастрофические явления, хотя более грандиозные явления совершаются и на Солнце. Как из хаоса (рис. 1) возникает порядок в природе (рис. 5).

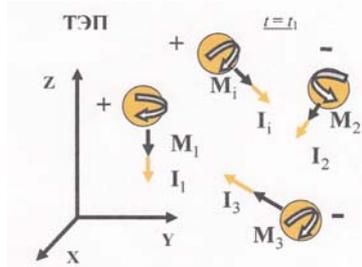


Рисунок 1. Стоп кадр стохастического движения «+» и «-» заряженных свободных частиц с действующими на них со стороны ТЭП вращательными и кинетическими моментами.

Любая КС содержит связанные частицы, образующие сетку межмолекулярных связей (далее – сетка связей), задающие ТЭМП и свободные (массой m и зарядом q), находящиеся в своих индивидуальных ячейках сетки связей, но могут быть с ней и слабо связанными. Свободные частицы в [3] названы **n- частицами**, хотя в [2] им было присвоено неудачное название частица-мицелла. Будем считать КС диамагнитной, т.е. нет спинов у частиц, чтобы не усложнять доказательство. Далее будет показано, что и для парамагнитных КС всё сказанное тоже справедливо.

Стохастическое ТЭМП (температура) КС с напряжённостью $E(t')$ управляет динамическими параметрами: вращательными моментами (\mathbf{M}) связанных и свободных частиц и кинетическими (\mathbf{I}) – свободных n-частиц, средние значения которых без внешних полевых воздействий равны нулю, (рис. 1) [2].

$$\mathbf{M} = q\mathbf{r}_0(t) \times \mathbf{E}^*(t') \Big|_{t' \rightarrow t}, \quad \langle \mathbf{M} \rangle = \frac{1}{n} \langle \sum_i \mathbf{M}_i \rangle = 0; \quad \mathbf{I} = \mathbf{M}\tau, \quad \langle \mathbf{I} \rangle = \frac{1}{n} \langle \sum_i \mathbf{I}_i \rangle = 0.$$

«Включение» пост. МП B_0 , направленного по оси Z вертикально к поверхности Земли B_{0Z} , вызывает,

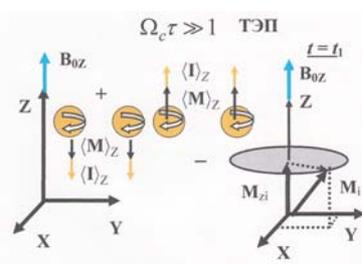


Рисунок 2. а) Поляризация средних вращательных $\langle \mathbf{M} \rangle_Z$ и кинетических $\langle \mathbf{I} \rangle_Z$ моментов в постоянном МП B_{0Z} для «+» и «-» заряженных n-частиц; б) стоп кадр вращательных моментов «-» заряженной n-частицы.

через время релаксации $\tau(T)$ (велико и задаётся ТЭП [1]), поляризацию перечисленных моментов, направленных вдоль или против B_{0Z} в зависимости от знака заряда частицы среды (рис. 2). Возникают средние по ансамблю и по времени (далее средние) моменты, отличные от нуля. Таким образом, **постоянное МП** посредством силы Лоренца **управляет движением частиц среды**, и значит ТЭП и ТМП. КС с помощью постоянного МП организована. Работу ТМП, естественно, не совершает, энергия на поляризацию «черпается» из ТЭП. Возникли новые динамические параметры, которые пропорциональны тепловой энергии частицы kT .

$$\langle \mathbf{M} \rangle_z = -2kT \frac{\Omega_c \tau}{1 + \Omega_c^2 \tau^2}; \quad \langle \mathbf{I} \rangle_z = -2kT \frac{\Omega_c \tau^2}{1 + \Omega_c^2 \tau^2}.$$

Средний стохастический кинетический момент подобен спину частицы, и на порядки превышает его [2]. И чем выше температура, тем больше $\langle \mathbf{I} \rangle_z$. Поэтому в этой модели парамагнетизм не рассматривается. КС стохастически диамагнитна.

Роль стохастических резонансов чрезвычайно велика, ибо усиленные с помощью них динамические параметры – вращательный

и кинетический моменты КС вызывают не только изменения в объектах КС, но и катастрофические изменения в природе. Без постоянного B_{0z} не могут возникнуть резонансы. «Подключение» к B_{0z} переменного *коллинеарного* МП (лучше комбинированного МП – постоянное + слабое переменное), переменная составляющая (Ω_1) которого обусловлена магнитным шумом, а также ортогональных B_{0z} переменных ЭП (индекс $k=2$) и/или ГП (индекс $k=3$), $k = \pm(1,2,3\dots)$, обусловленных электрическим (Ω_2) и гравитационным шумом (Ω_3), генерируемых Солнцем и Землёй, через время релаксации $\tau(T)$ вызовет для какой-нибудь n -частицы обобщённый параметрический резонанс

$$\langle \mathbf{M} \rangle_z = -2kT \frac{f(\Omega_c, \Omega_1, \Omega_k, \tau)}{\left[(1/\tau)^2 + (\Omega_c - n\Omega_1 + k\Omega_k)^2 \right]}, \quad \langle \mathbf{I} \rangle_z = -2kT \frac{f(\Omega_c, \Omega_1, \Omega_k, \tau)\tau}{\left[(1/\tau)^2 + (\Omega_c - n\Omega_1 + k\Omega_k)^2 \right]},$$

а при условии $\Omega_c \tau \gg 1$ обобщённый циклотронный резонанс, когда $\Omega_c - n\Omega_1 + k\Omega_k = 0$, либо при отсутствии ЭП и ГП циклотронный резонанс $\Omega_c = n\Omega_1$.

Стохастический кинетический момент, как и вращательный, на резонансе увеличиваются на порядки

$$\langle \mathbf{M}' \rangle_z \approx -2kT \frac{\Omega_c \tau}{1 + \Omega_c^2 \tau^2} \left(1 + \frac{1}{2} \Omega_c' \tau \right); \quad \langle \mathbf{I}' \rangle_z \approx -2kT \frac{\Omega_c \tau^2}{1 + \Omega_c^2 \tau^2} \left(1 + \frac{1}{2} \Omega_c' \tau \right),$$

где Ω_c' – циклотронная частота на амплитуде переменного МП B' $\Omega_c' \ll \Omega_c$, а τ для КС как вода представляет минуты, часы и более (рис.3).

Переменные ЭП и/или ГП (даже без переменного МП) также ответственны за различные катаклизмы и различного рода влияния на КС.

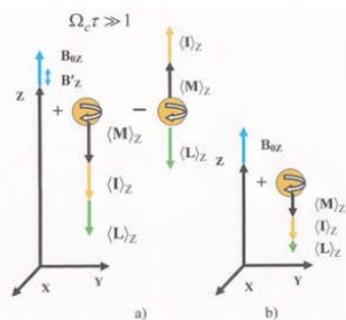


Рисунок 3. а) Усиление средних вращательного, кинетического и магнитного моментов при действии совместно с пост. МП слабого коллинеарного МП; б) нет усиления.

Возникновение большого среднего кинетического момента за счёт ТЭП (на порядки больше спина электрона, ядра; [2]) способствует, за счёт сил «межмолекулярного» трения, вырыванию связанных частиц КС из сетки связей. Кинетический момент через гиромагнитное отношение $\Gamma = q / (2m_n)$, вызванный ТЭП в присутствии пост. МП, даёт средний стохастический магнитный момент $\langle \mathbf{L}^e \rangle$ (рис. 3)

$$\langle \mathbf{L}^e \rangle = \pm g_n \Gamma \langle \mathbf{I}^e \rangle,$$

где $g_n = 2$ – фактор Ланде (как для электронов для чисто спинового движения) для вращательного движения n -частицы вокруг центра инерции, и

$$\langle \mathbf{L}^e \rangle_z = \pm \frac{|q|}{2m} \langle \mathbf{I}^e \rangle_z = -kT \frac{|q|}{m} \frac{\Omega_c'}{\Omega_c} \tau = -kT \frac{\Omega_c'}{B_0} \tau,$$

который увеличивается за счёт вовлечения в вихрь вырванных из сетки связей частиц. **Стохастический магнитный момент всегда направлен в противоположную сторону по отношению к внешнему пост. МП** и также пропорционален тепловой энергии kT .

Но n -частица находится в своей индивидуальной ячейке сетки связей подобно молекуле воды в полости льдоподобной структуры. За счёт действия внешнего пост. МП (силы Лоренца) происходит организация колебаний частиц сетки связей – их вращательных моментов, происходит выстраивание внутренних полей – ТЭП и ТМП. И в ячейке n -частица будет вести себя подобно атому, но без ядра. Размеры этого квазиатома – Δx в соотношении неопределенностей будут определяться как лигандами, т.е. расположением соседей, действующих на n -частицу, так и внутренним огромным флуктуационным ТМП. Это ТМП определяет флуктуационный радиус «орбиты» R_f . Фактически получилось вещество, заполненное такими n -частицами – квазиатомами, которые совершают свои финитные («орбитальные») движения с тепловой скоростью $V^{(T)}$, и финитный кинетический момент, обусловленный ТМП, будет

$$\langle \mathbf{I}^m \rangle_z = m \left[\langle \hat{V}^{(T)}(t) \hat{V}^{(T)*}(t) \rangle \Big|_{t \rightarrow t'} \right]^{1/2} R_f = m^2 \left(\langle V_x^2 \rangle + \langle V_y^2 \rangle \right) / (qB),$$

Рассматривается стационарный случай, когда пост. МП Земли всегда «включено», а действие переменного МП, которое «поставляется» Солнцем, например, в виде магнитного облака, происходит за время $t \geq \tau$. В этом случае все векторы тепловых скоростей свободных n -частиц, а также все векторы скорости и траектории связанных частиц сетки связей лежат в плоскости XY. И на n -частицу действует огромное внутреннее ТМП B , которое в стационарном случае коллинеарно внешнему МП ($B \parallel B_z$). Слабое пост. МП за счёт действия силы Лоренца управляет сильным ТМП, т.е. траекториями всех частиц среды.

Из равенства центробежной силе Лоренца $m \left(\langle V_x^2 \rangle + \langle V_y^2 \rangle \right) / R_f = q \left(\langle V_x^2 \rangle + \langle V_y^2 \rangle \right)^{1/2} B$, где $B = \mu \mu_0 H$ – индукция и напряжённость внутреннего ТМП, определяется финитный кинетический момент, считая для диамагнитных и парамагнитных сред внутри ячейки сетки связей $\mu = 1$,

$$\langle \mathbf{I}^m \rangle_z \approx \pm \frac{m}{|q|} \frac{2kT}{\mu_0 H}.$$

Получены средние финитные кинетические моменты, которые поляризованы в среде при действии пост. МП. А средний финитный магнитный момент, связан через гиромагнитное отношение $\Gamma = q / (2m)$ со средним кинетическим моментом:

$$\langle \mathbf{L}^m \rangle_z = \pm g_m \Gamma \langle \mathbf{I}^m \rangle_z = \pm \frac{|q|}{2m} \langle \mathbf{I}^m \rangle_z = - \frac{kT}{\mu_0 H},$$

где g-фактор для орбитального движения $g_m = 1$.

Полный вектор стохастического среднего кинетического момента, как и вектор стохастического среднего магнитного момента, представляет векторную сумму стохастического (подобно спиновому) и финитного (подобно орбитальному) соответствующих моментов

$$\langle \mathbf{I} \rangle = \langle \mathbf{I}^e \rangle + \langle \mathbf{I}^m \rangle; \quad \langle \mathbf{L} \rangle = \langle \mathbf{L}^e \rangle + \langle \mathbf{L}^m \rangle.$$

Поскольку проекции их на ось Z складываются, то полная проекция магнитного момента, будет

$$\langle \mathbf{L} \rangle_z = \langle \mathbf{L}^e \rangle_z + \langle \mathbf{L}^m \rangle_z = -kT \left[\frac{|q|}{m} \frac{\Omega_c \tau^2}{1 + \Omega_c^2 \tau^2} + \frac{1}{\mu_0 H} \right]$$

Проекция полного магнитного момента независимо от знака заряда, всегда направлена противоположно слабому внешнему пост. МП \mathbf{B}_0 . Такое поведение магнитного момента относительно направления пост. МП соответствует диамагнетизму.

А магнитные моменты \mathbf{L}_x и \mathbf{L}_y при $t \leq \tau$ флуктуационно прецессируют относительно оси Z так, что $\langle \mathbf{L} \rangle_x = \langle \mathbf{L} \rangle_y = 0$. Полный же магнитный момент такой n-частицы будет флуктуационно прецессировать вокруг направления Z, подобно кинетическому моменту (рис. 2б).

Средний полный (стохастическо-финитный) магнитный момент n-частицы сохраняет основное свойство вращательного и кинетического моментов – пропорциональность энергии теплового движения kT вплоть до её разрушения. При условии $\Omega_c \tau \gg 1$ полный магнитный момент

$$\langle \mathbf{L} \rangle_z \approx -kT \left[\frac{|q|}{m} \frac{1}{\Omega_c} + \frac{1}{\mu_0 H} \right] = -kT \left[\frac{1}{B_0} + \frac{1}{\mu_0 H} \right],$$

и может представлять в слабом внешнем пост. МП значительную величину.

В случае действия комбинированного МП суммарный средний магнитный момент составит

$$\langle \mathbf{L} \rangle_z = -kT \left[\frac{|q|}{m} \frac{\Omega'_c}{\Omega_c} \tau + \frac{1}{\mu_0 H} \right] = -kT \left[\frac{\Omega'_c}{B_0} \tau + \frac{1}{\mu_0 H} \right].$$

Итак, n-частицы, находящиеся в комбинированном МП, приобретают не только стохастические кинетические за счёт ТЭП и финитные за счёт ТМП моменты, но неизбежно приобретают и магнитные моменты и становятся элементарными магнитиками. Их поведение должно быть чувствительным к внешнему МП.

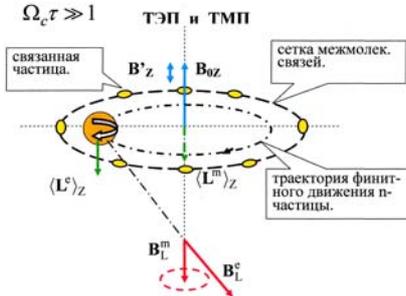


Рисунок 4. Образование локального вихревого МП

Здесь приходим к вихревому характеру МП. Действительно, ТЭП заставляет вращаться любую (даже нейтральную, но стохастически заряженную) n-частицу вокруг своего центра инерции. Возникает стохастический кинетический момент, отсюда и магнитный момент. Но n-частица, в самом общем случае – объёмный, протяжённый объект, по крайней мере – не электрон. В тоже время ТМП заставляет вращаться эту заряженную частицу по «орбите» в сетке связей, создавая своё МП (рис.4).

Результатом является векторная сумма двух вихревых полей – вихревое локальное МП (ЛМП), направленное противоположно B_{0z} , независимо от заряда n-частицы. В каждой точке пространства в окрестности сетки связей величина ЛМП, обусловленная n-частицей, меняется во времени.

От известных стохастических спиновых и орбитальных кинетических, и соответствующих магнитных, моментов квантовой физики стохастические полные магнитные моменты наиболее чувствительны к внешним МП – постоянному и переменному, переменному ЭП и/или ГП, зависят от времени (большая часть – процесс нестационарный), увеличиваются с временем воздействия, и увеличиваются с ростом температуры до значения, когда возникает параметрический или циклотронный, или обобщённый циклотронный, резонанс, когда большей частью происходит разрушение среды [2], при котором величины всех моментов резко падают. Всё это происходит при условии $\Omega_c \tau \gg 1$ и времени t действия переменной коллинеарной составляющей \mathbf{B}'_{0z} $t > \tau$. Такой стохастический диамагнетизм прерывист. Он возникает и исчезает.

Все циклоны, смерчи-торнадо, вихри в магме, которые вызывают землетрясения, извержения вулканов – это всё вихри, которые уже развиты из элементарного ЛМП для частиц морей и океанов, магмы Земли и пр.

Образование элементарного вихря из частиц КС Земли происходит, как бы, в два этапа: 1) образование вихревого МП у одной n-частицы, у которой динамические параметры оказались близки к резонансным значениям (рис. 4); 2) образование элементарного вихря частиц при вырывании их за счёт ТЭП и особенно ТМП из сетки связей, что способствует увеличению ЛМП в число частиц (раз), вовлечённых в вихрь. Это вихревое локальное МП (ВЛМП) за счёт увеличивающейся силы Лоренца всё больше вовлекает частиц (нейтральные – стохастически положительны), несущих каждая тепловую энергию kT . И ВЛМП становится ловушкой для всех частиц, входящих в окрестность действия вихря. Каждая частица вносит свою лепту в ВЛМП. ВЛМП растёт.

Возникает вихрь (циклон, смерч-торнадо, смерч-тромб) на поверхности Земли, а также вихрь в магме Земли со своими ВЛМП \mathbf{V}_{LZ} , которые противоположны направлению вертикальной составляющей ГМП \mathbf{V}_{0z} (рис. 5). Не зарождаются циклоны, смерчи-торнадо на полюсах Земли – низкое kT , и зарождаются, где это kT достаточно. Они не зарождаются вблизи магнитного экватора Земли, где нет \mathbf{V}_{0z} ортогональной к поверхности Земли. **Все вихри в Южном полушарии (Северный магнитный полюс) вращаются по часовой стрелке, а в Северном (Южный магнитный полюс) – против, независимо от заряда частицы.**

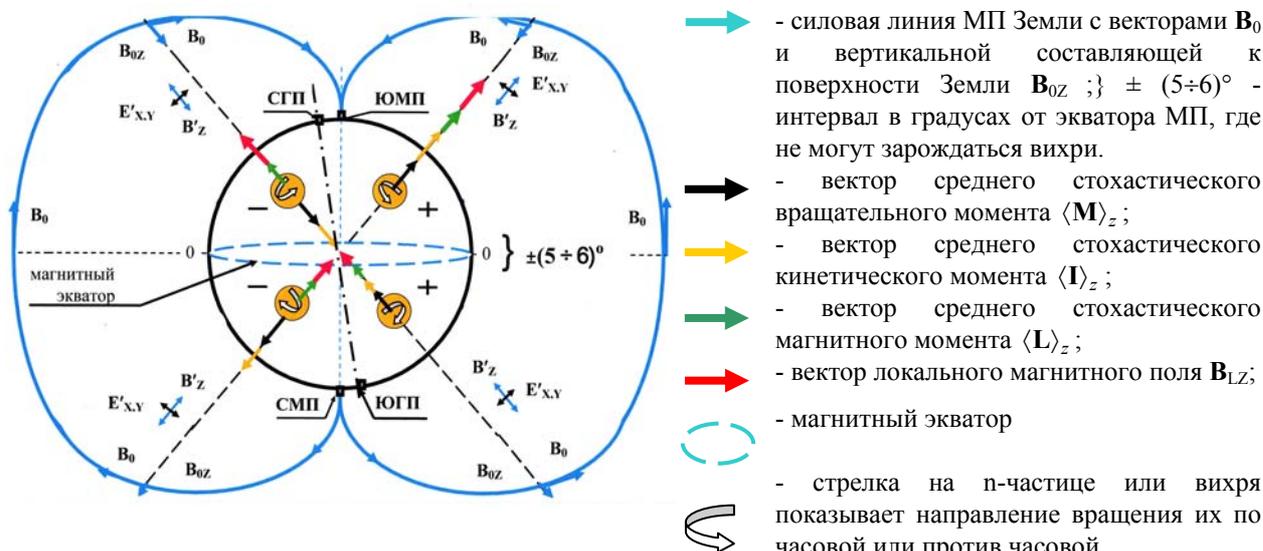


Рисунок 5. Схематическое представление стохастических моментов (показаны в виде разноцветных стрелок), действующих на свободные n-частицы с разными зарядами (+, -) или (вихрей) (O), и образуемые ими ЛМП (ВЛМП) \mathbf{V}_{LZ} , в Северном и Южном полушариях Земли, вызванных действием вертикальной составляющей МП \mathbf{V}_{0z} постоянного МП \mathbf{V}_0 :

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| СГП – Северный географический полюс | } Северное (верхнее) полушарие |
| ЮМП – Южный магнитный полюс | |
| ЮГП - Южный географический полюс | } Южное (нижнее) полушарие |
| СМП – Северный магнитный полюс | |

Циклон в виде громадных туч зарождается над большими, хорошо нагретыми, водными пространствами, где большое kT частиц (молекулы, кластеры воды). На вращение, даже элементарного вихря, требуется энергия, которая поступает из туч (туча – КС). Окрестность вихря, как и сам вихрь, охлаждается. ТЭП тучи падает. И нагревателем служат хорошо прогретые водные пространства. Циклон высоко энергетичен – несёт с собой высокую тепловую энергию. Максимум ВЛМП в циклоне находится в его центре – это глаз циклона, в центре циклона, где давление будет понижено за счёт действия центробежных сил, как правило, дождя не бывает, поскольку нет соответствующей концентрации частиц. Дождь возникает на окраинах вихря, где концентрация отброшенных ВЛМП частиц максимальна. Взаимодействие окраины циклона с холодным антициклоном и вызывает дождь, а если происходит кристаллизация воды – идёт снег.

Смерч-торнадо возникает также там, где хорошо прогрета поверхность воды, земли (высокое kT). В качестве «зачинщика» может выступать вода океанов, морей, озёр, туч, а могут выступать и мелкие песчинки пустынь, известняковая пыль разработок. Максимум ВЛМП в смерчи-торнадо находится на его оси вращения. Внутри вихря из-за сил Лоренца возникает достаточно большое разряжение. Внутрь идёт естественный подсос всего того, что попадёт на пути его перемещения. Возникает поперечный вращению вихрь из всосанных частиц. Чаше смерч-торнадо



Фото 1. Вихри между тучами.
<https://iwanticewater.wordpress>

возникает в хорошо прогретых тучах, где зарождается элементарный ЛМП. Возникает ВЛМП, о котором можно судить по рукаву (хоботу), выходящем из тучи (фото 1,2). Узкая часть рукава устремляется за счёт гравитации к поверхности Земли. Узость рукава тем больше, чем больше ВЛМП \mathbf{V}_{LZ} , которое увеличивается с увеличением вовлечённых во вращение частиц. \mathbf{V}_{LZ} может пронизывать и поверхность океана, из которого также, только против сил гравитации, будет расти рукав (фото 3).



Фото 2. Смерч над сушей. Отчётливо виден его рукав.
www.lenta.kz



Фото 3. 11.09.2011 Краснодарский край, п. Лазаревское
Начал зарождаться смерч, сверху из облака и снизу из моря, но до конца так и не соединились верх и низ, и тихо рассыпалось.
<http://images.yandex.ru>

Смерч может возникнуть и в песках (фото 4). Действие переменного B'_{0z} в присутствии B'_{0z} на циклотронном резонансе вызовет большой средний вращательный и средний кинетический, а затем и магнитный момент в песчинке, под действием которых она сорвется со своего места и начнёт закручиваться, вовлекая трением, своим ЛМП во вращение новые частицы, которые создают ВЛМП. Возникает вихрь частиц – смерч..

Извержение вулканов, землетрясения – результат «работы» вихрей магмы, у которых большое kT . Магма – расплавленное вещество преимущественно силикатного состава, Механизм зарождение вихрей тот же, что и у циклонов, торнадо-смерчей с той лишь разницей, что n -частицей служат частицы силикатного состава. Максимум ВЛМП вихря магмы находится далеко от извержений вулканов(а), поскольку они – это периферия вихря, где действуют максимальные скорости частиц, где возникает большее динамическое давление на шлаковый конус вулкана. В этом случае может возникнуть цепь действующих вулканов. Землетрясения – тоже работа вихрей(я) магмы. Механизмов может быть

несколько. Например, центр вихря находится под одной плитой литосферы, а периферия вихря под другой, лежащей на первой. Разность давлений приводит к поднятию одной плиты над другой. Возникает разлом – землетрясение.

До сих пор разговор шёл о поверхностных вихрях, образуемых с помощью переменной B'_{0z} . Но в глубине морей, океанов, разных по направлению поверхностей туч, в глубине магмы, где B'_0 отлично от B'_{0z} , также могут образовываться вихри при выполнении условий $\Omega_c \tau \gg 1$ и $t > \tau$. Могут возникать вихри и их ВЛМП в глубинах морей и океанах, в глубине магмы. Смерчи-торнадо могут возникать на боковых поверхностях туч. А извержения вулканов будут более локальны.

При времени воздействия переменного МП B'_{0z} $t < \tau$ также возникают элементарные ЛМП. Но образоваться ВЛМП не могут. Поэтому вихри в виде циклонов, смерчей-торнадо на поверхности Земли – морей, океанов, тучи, а также вихрей в виде магмы Земли, не возникают, но магнитно шумят.

Вихри в фотосфере Солнца (пятна на Солнце) и магме Земли – один и тот же механизм, только масштабы и вероятности образования разные [3].

Все явления природы – пятна на Солнце с их выбросами МП в виде магнитных облаков, протонного ветра, магнитного шума и пр., которые формируют космическую погоду, Земля со своим магнитным шумом с извержениями вулканов и землетрясениями (цунами), образованием циклонов, смерчей-торнадо – всё это результат работы огромных вихрей с их огромными ВЛМП.

Геокосмос является промежуточным звеном между Солнцем и Землёй, управляющим «поведением» Земли. Он собирает все сведения в виде магнитных, электрических (протонный ветер) и пр. сигналов Солнца, которые задаются его ТЭМП, постоянным и шумовым гелиоМП, а также собирает сведения в виде шумовых магнитных и электрических и прочих сигналов Земли (возмущённость), «обрабатывает» эти сведения и направляет на всю геосферу. Только те переменные сигналы» эффективно будут «работать», которые продолжительны (t), т. е. $t > \tau$, чтобы мог выполняться один из видов стохастических резонансов.

Подобное происходит и со всеми другими планетами солнечной системы, и не только солнечной, которые обладают постоянным собственным МП и достаточным ТЭМП.



Фото 4. Смерч-торнадо
babruisk.ru

Список литературы

1. Владимирский Б.М., Брунс А.В. Космическая погода, физико-химические системы и техносфера / Геофизические процессы и биосфера, 2010. Т. 9, № 1, с.34-62.
2. Попов И.В. Принципы физики слабых воздействий на конденсированные среды. 2011. С-Пб.: Из-во Политехн. университета. – 288 с.
3. Попов И.В. Механизмы космофизических явлений природы, (рабочее название, в печати), 2014.