

УДК 550.348

О ПРЕОБРАЗОВАНИИ ЭНЕРГИИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

© 2019 г. В. В. Горохов¹, В. И. Карелин¹, В. Д. Селемир^{1*}

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородской обл., Россия

*E-mail: selemir@vniief.ru

Поступила в редакцию 14.01.2019 г.

Принята в печать 24.06.2019 г.

Предложен механизм преобразования энергии геомагнитных возмущений в энергию химически активных продуктов – электролиз на границах раздела сред с различным типом проводимости при протекании теллурических токов, индуцируемых вариациями геомагнитного поля. Выполнена оценка эффективности преобразования энергии возмущений в энергию продуктов электролиза. Проведены оценки потока энергии, поглощаемого Землей, при геомагнитных возмущениях. Показано, что энергия, передаваемая в химическую энергию продуктов электролиза, сопоставима с сейсмической энергией. Выдвинуто предположение о влиянии газообразных химически активных продуктов электролиза на сейсмическую активность. Предполагается также, что электролиз под действием теллурических токов, индуцируемых вариациями геомагнитного поля, является одним из источников дегазации Земли.

Ключевые слова: геомагнитные возмущения, теллурические токи, электролиз, химическая энергия продуктов электролиза, сейсмическая активность.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019613-23>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко обсуждается вопрос о возможном влиянии геомагнитной активности на сейсмичность Земли [Соболев, 2001; Соболев, 2003; Закржевская, 2002; Закржевская, 2004; Сычева, 2011; Адушкин, 2013]. Предполагается, что влияние магнитных бурь на сейсмическую активность обусловлено триггерным эффектом. Основными аргументами для заключения о триггерном характере этого влияния являются низкая эффективность электро-механических преобразований в горных породах ($\leq 10^{-4}$) и низкий коэффициент сейсмической эффективности ($\sim 10^{-2}$) [Соболев, 1980]. Между тем, осторожная сравнительная оценка энергии, закачиваемой на полигонах Казахстана–Киргизии и Кавказа во время магнитных бурь с внезапным началом, и энергии, высвобождаемой в виде землетрясений, показала, что эти энергии по порядку величины сопоставимы [Соболев, 2003]. По данным Геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» сопоставимы также изменения плотности энергии магнитного поля при геомагнитных вариациях и изменения плотности энергии сейсмического фона [Адушкин,

2013]. Это предполагает возможность существования механизма эффективного преобразования энергии геомагнитных вариаций в энергию геоактивности. По нашему мнению, таким механизмом может быть электролиз при протекании теллурических токов, индуцируемых вариациями геомагнитного поля, в коре и мантии, результатом которого является превращение электрической энергии в энергию химически активных газов. Возможность этого механизма обусловлена тем, что породы, слагающие кору, верхнюю мантию и часть переходного слоя, имеют как ионную (электролиты – водные растворы солей и расплавы), так и электронную проводимость (большинство рудных минералов и некоторые соли) [Ковтун, 1997]. Протекание токов через границы проводников с различным типом проводимости сопровождается электролизом.

В данной работе, с целью объяснения наблюдаемой корреляции на сейсмическую активность с геомагнитными вариациями, проведены оценки эффективности преобразования энергии возмущений в химическую энергию продуктов электролиза при протекании теллурических токов и оценки энергии, поступающей в объем Земли от геомагнитных возмущений.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Полная энергия, поступающая в объем Земли от магнитных вариаций, является суммой вкладов энергий всех типов вариаций. Мы ограничились учетом вклада токов от мировых геомагнитных бурь (ГМБ), периодических солнечно-суточных вариаций (ССВ) и вариаций, возникающих в результате движения морской воды в магнитном поле Земли. За исходные приняты данные: для ГМБ и ССВ (амплитуды, частоты, продолжительность, распределение по широте, горизонтальное электрическое поле E на поверхности Земли), представленные в работах [Акасофу, 1975; Афанасьева, 1977; Ляцкий, 1978; Яновский, 1978; Харгривс, 1982; МсКау, 2003; Заболотная, 2004; Каррентан, 2010]; для геомагнитных вариаций, обусловленных периодическим движением морской воды, — в работах [Александров, 1972; Богородский, 1978]; для распределения удельного электрического сопротивления в коре и мантии — в работах [Ротанова, 1982; Ковтун, 1997; Utada, 2003; One-Dimensional..., 2012].

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Для оценки эффективности преобразования энергии геомагнитных возмущений в химическую энергию используем двухфазную модель. Будем полагать, что среда состоит из однородных кубов с электронной проводимостью, между которыми находятся слои электролита. Для удобства расчетов будем считать, что размеры кубов d_n подчинены геометрической прогрессии:

$$d_n = d_1 q^{n-1},$$

где: $n = 1, 2, 3, \dots$; q — знаменатель прогрессии ($q < 1$). Отношение толщины слоя электролита δ_n , окружающего куб размером d_n , положим постоянным:

$$\delta_n / d_n = \zeta.$$

Выделим в среде прямоугольный параллелепипед размерами $a \times l \times h$, где: a — ширина, l — длина, h — мощность. Расположим кубы параллельными рядами в горизонтальных слоях. Положим также, что число кубов одного размера d_n таково, что они полностью заполняют один слой. Тогда знаменатель прогрессии равен:

$$q = 1 - \frac{d_1}{h}(1 + 2\zeta). \quad (1)$$

При выбранном порядке размещения в n -ом слое на ширине a параллельно размещается m_n рядов кубов

$$m_n = \frac{a}{d_n(1 + 2\zeta)},$$

а в каждом ряду на длине l последовательно размещается k_n кубов:

$$k_n = \frac{l}{d_n(1 + 2\zeta)}.$$

Поскольку возбуждаемое медленными вариациями геомагнитного поля электрическое поле E содержит, в основном, горизонтальную компоненту [Ляцкий, 1978; Яновский, 1978], направим вектор E горизонтально и параллельно l . При выбранной структуре среды и направлении E , каждый слой представляет собой k_n последовательно соединенных m_n рядов элементарных ячеек, включающих куб и окружающий его слой электролита. Слои электролита, расположенные в направлении, поперечном E , образуют электролитические зазоры. Ток в ячейке n -го слоя равен сумме токов через кубы и зазор между ними I_{1n} и по электролиту вдоль их поверхности I_{2n} (рис. 1):

$$I_n = I_{1n} + I_{2n}.$$

При средней напряженности поля, равной E , напряжение U_{n1} на элементарной ячейке в направлении протекания тока равно:

$$U_{n1} = E(d_n + 2\delta_n).$$

Для выделения продуктов электролиза на зазоре необходимо обеспечить напряжение, превышающее ЭДС поляризации ε_e , направленной против внешней разности потенциалов [Филиппов, 1980; Новиков, 1988]:

$$E(d_n + 2\delta_n) \geq \varepsilon_e. \quad (2)$$

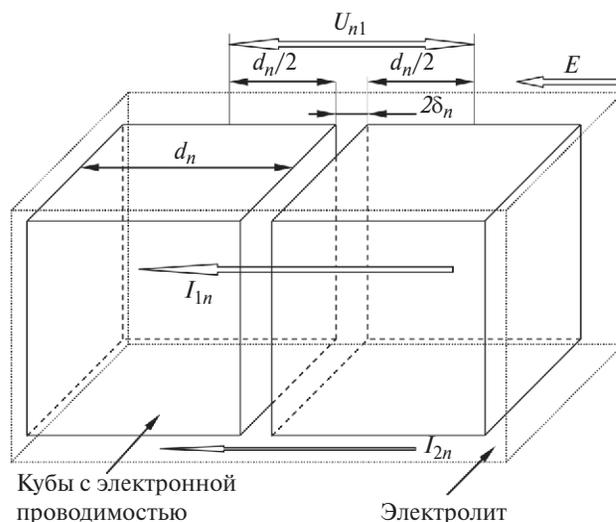


Рис. 1. Распределение токов в элементарной ячейке.

Для оценок будем полагать, что до появления на элементарной ячейке напряжения, превышающего ϵ_e , тока в электролитическом зазоре нет, а в дальнейшем он ограничен сопротивлением кубов и электролита между ними. С учетом этого, эквивалентная электрическая схема ячейки может быть представлена в виде двух параллельных цепей (рис. 2). Для ячейки n -го слоя сопротивление куба равно:

$$R_{1n} = \frac{\rho_1}{d_n}, \quad (3)$$

сопротивление электролита в зазоре между кубами:

$$R_{2n\delta} = 2 \frac{\rho_2}{d_n} \zeta, \quad (4)$$

сопротивление окружающего куб электролита:

$$R_{2n} = \frac{\rho_2}{d_n} \frac{1+2\zeta}{4\zeta(\zeta+1)}, \quad (5)$$

где ρ_1 , ρ_2 – удельное сопротивление вещества куба и электролита, соответственно. Согласно схеме (рис. 2), при $U_{n1} > \epsilon_e$, можно записать:

$$\begin{aligned} E(d_n + 2\delta_n) &= I_{1n}(R_{1n} + R_{2n\delta}) + \epsilon_e \\ E(d_n + 2\delta_n) &= I_{2n}R_{2n}. \end{aligned}$$

Откуда:

$$\begin{aligned} I_{1n} &= \frac{E(d_n + 2\delta_n) - \epsilon_e}{R_{1n} + R_{2n\delta}}, \\ I_{2n} &= \frac{E(d_n + 2\delta_n)}{R_{2n}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляя в (6) выражения для сопротивлений (3)–(5), получим:

$$\begin{aligned} I_{1n} &= d_n \frac{d_n E(1+2\zeta) - \epsilon_e}{\rho_1 + 2\rho_2 \zeta}, \\ I_{2n} &= d_n^2 \frac{4E\zeta(\zeta+1)}{\rho_2}. \end{aligned}$$

Ток, протекающий через кубы и электролитические зазоры n -ого слоя, равен:

$$I_{ne} = I_{1n} m_n = \frac{Ed_n(1+2\zeta) - \epsilon_e}{\rho_1 + 2\rho_2 \zeta} \frac{a}{(1+2\zeta)},$$

а по окружающему кубы электролиту:

$$I_{ns} = I_{2n} m_n = \frac{Ed_n \zeta(\zeta+1)a}{\rho_2(1+2\zeta)}.$$

Используя выражения для d_n и ζ из (2), найдем число слоев N , в которых будет идти элект-

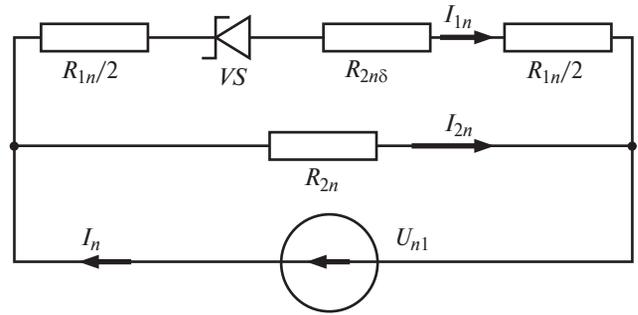


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема элементарной ячейки: R_{1n} – сопротивление куба; $R_{2n\delta}$ – сопротивление электролита в зазоре между кубами; R_{2n} – сопротивление электролита, окружающего куб; VS – стабилитрон с напряжением стабилизации ϵ_e .

ролиз; оно равно целочисленному значению выражения:

$$N = \left\lceil \log_q \frac{\epsilon_e}{d_1 E(1+2\zeta)} \right\rceil + 1. \quad (7)$$

Общий ток равен сумме токов по электролиту и кубам по всем слоям:

$$\begin{aligned} I_0 &= \sum_{n=1}^{\infty} I_{ns} + \sum_{n=1}^N I_{ne} = \\ &= \frac{ahE}{(\rho_1 + 2\rho_2 \zeta)(1+2\zeta)} \times \\ &\times \left(1 + \frac{\zeta(\zeta+1)(\rho_1 + 2\rho_2 \zeta)}{(1+2\zeta)\rho_2} - q^{N-1}(1-q)N - q^N \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Из (8) видно, что удельное сопротивление среды $\rho = ahE/I_0$ зависит от N и является нелинейным, т. е. зависит от E , однако в отсутствие электролиза ($N=0$) оно постоянно и определяется долей и удельным сопротивлением электролита в среде:

$$\rho_0 = \frac{(1+2\zeta)^2}{\zeta(\zeta+1)} \rho_2.$$

Поскольку ток электролиза составляет только часть общего тока, будем полагать, что ρ_0 соответствует приводимым в литературе значениям удельного сопротивления среды.

При $I_{ne} > 0$ электролиз происходит в каждом из k_n зазоров n -слоя, следовательно, в N -слоях ток электролиза I_e равен:

$$I_e = \sum_{n=1}^N I_{ne} k_n = \frac{alE}{(1+2\zeta)(\rho_1 + 2\rho_2 \zeta)} \left(N - \frac{1-q^{N-1}}{1-q} \right). \quad (9)$$

ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ХИМИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ ПРОДУКТОВ ЭЛЕКТРОЛИЗА

Эффективность передачи электрической энергии в химическую энергию продуктов электролиза определим как отношение мощности, затрачиваемой на преодоление ЭДС поляризации, к полной электрической мощности, выделяемой при протекании теллурического тока в выделенном объеме:

$$\eta_e = \frac{I_e \varepsilon_e}{E I I_0}$$

и, используя (1), (7)–(9), выполним оценки $\eta_e(E)$.

ЭДС поляризации ε_e зависит от природы веществ, участвующих в процессе электролиза, их активности и температуры. Данных по электролизу в условиях, характерных для глубинных слоев Земли, нет, поэтому мы воспользуемся результатами исследований, выполненных в нормальных условиях. В стандартных условиях ε_e не превышает долей или единиц вольт. Отметим, что при высоких температурах и давлениях, свойственных большим глубинам, ε_e может как возрастать, так и уменьшаться [Филиппов, 1980; Новиков, 1988]. При U_{n1} больше ε_e (при перенапряжении) скорость электролиза резко возрастает. Величины перенапряжений относительно невелики, например, перенапряжения выделения водорода и кислорода в стандартных условиях на электродах из Fe составляют 0.1 и 0.3 В, соответственно, а из Ni – 0.3 и 0.05 В [Новиков, 1988]. В этой связи для оценок ограничимся диапазоном $\varepsilon_e = 0.5 - 2$ В. Входящие в выражение для η_e токи I_e и I_0 зависят от напряженности поля E , следовательно, η_e есть функция E . Расчеты зависимости $\eta_e(E)$ выполнены для характерных значений, возбуждаемых вариациями геомагнитного поля $E \leq 10$ В/км, при $h = 10 - 100$ км, $d_1 = 250 - 5000$ м, $\rho_0 = 10^2 - 10^4$ Ом·м, $\rho_1 = 10^2 - 10^4$ Ом·м, $\rho_2 = 10 - 200$ Ом·м.

Из расчетов следует, что зависимость $\eta_e(E)$ – пороговая и в указанном диапазоне изменений параметров электролиз начинается при $E \sim \varepsilon_e/d_1$. Наиболее значимыми параметрами, влияющими на эффективность преобразования энергии, являются удельные сопротивления ρ_0 (рис. 3), ρ_1 и ρ_2 . Установлено, что эффективность преобразования возрастает с уменьшением отношения ρ_1/ρ_2 . Максимальные значения эффективности при $\rho_1/\rho_2 = 10 - 100$ составляют $\eta_e = 0.1 - 0.4$. Зависимости $\eta_e(E)$ для сред,

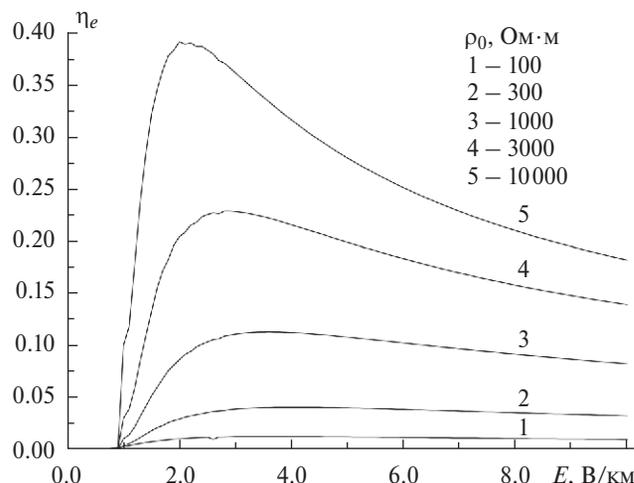


Рис. 3. Зависимости η_e от E при различных ρ_0 : $h = 100$ км, $d_1 = 1$ км, $\rho_1 = 10^3$ Ом·м, $\rho_2 = 10$ Ом·м, $\varepsilon_e = 1$ В.

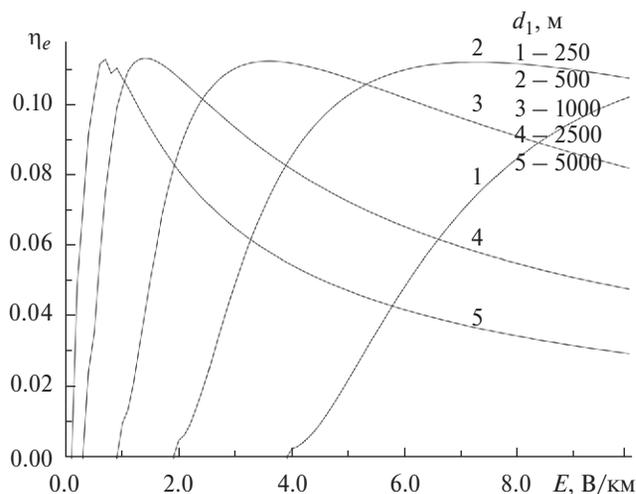


Рис. 4. Зависимости η_e от E для различных d_1 : $h = 100$ км, $\rho_0 = 10^3$ Ом·м, $\rho_1 = 10^3$ Ом·м, $\rho_2 = 10$ Ом·м, $\varepsilon_e = 1$ В.

отличающихся максимальными размерами кубов d_1 , имеют максимумы, которые явно выражены для структур с большими размерами кубов (рис. 4). Максимумы $\eta_e(E)$ расположены в области $E = (3.5 - 3.8)\varepsilon_e/d_1$.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОВКЛАДА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Будем считать, что геомагнитные вариации представляют собой набор плоских монохроматических электромагнитных волн частотой ν , а Земля состоит из M горизонтальных однородных слоев. Каждый слой характеризуется

значением удельного сопротивления ρ_m и мощностью h_m . Значения относительной диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей слоев примем равными единице. На поверхности Земли выберем систему координат таким образом, что ось X направлена с севера на юг, Y – с запада на восток, ось Z направлена сверху вниз. Будем считать, что геомагнитное поле является дипольным, а ось диполя совпадает с осью вращения Земли.

Магнитное поле на поверхности Земли можно представить в виде суммы двух векторов: стационарного магнитного поля Земли \mathbf{B}_o и поля геомагнитных вариаций \mathbf{B}_v . В этом приближении получим выражение для удельной мощности энерговыделения в m -том слое. На глубине z усредненная по периоду вариации плотность энергии волны с частотой ν равна:

$$w_\nu(z) = \frac{(\mathbf{B}_o + \mathbf{B}_v(z))^2}{4\mu_0}, \quad (10)$$

где μ_0 – абсолютная магнитная постоянная. По определению, интенсивность потока энергии волны есть:

$$I_\nu(z) = w_\nu(z) v_\nu(z), \quad (11)$$

где $v_\nu(z) = 2\sqrt{\frac{\pi\rho(z)\nu}{\mu_0}}$ – эффективная скорость распространения волны частотой ν на глубине z [Никольский, 1961]. Удельная мощность энерговыделения $p_\nu(z)$ равна уменьшению интенсивности волны на единице длины:

$$p_\nu(z) = -\frac{dI_\nu(z)}{dz}. \quad (12)$$

При выбранной системе координат и расположении диполя, вектор \mathbf{B}_v содержит три отличных от нуля компоненты B_{vx} , B_{vy} , B_{vz} , а вектор \mathbf{B}_o только две B_{ox} и B_{oz} . Поэтому с учетом того, что $|\mathbf{B}_o| \gg |\mathbf{B}_v|$, из (10)–(12), получаем

$$p_\nu(z) = -\frac{v_\nu(z)}{2\mu_0} \left(B_{ox} \frac{dB_{vx}(z)}{dz} + B_{oz} \frac{dB_{vz}(z)}{dz} \right).$$

В наблюдаемых при геомагнитных бурях возмущениях доминирующей является X -компонента \mathbf{B}_v ($B_{vx}, 0, 0$) [Афанасьева, 1977], поэтому будем полагать, что вектор геомагнитных возмущений содержит только эту компоненту, что позволит получить оценку снизу. Тогда удельная мощ-

ность p_ν , выделяемая в среде электромагнитной волной с частотой ν , равна:

$$p_\nu(z) = -\frac{v_\nu(z) B_{ox}}{2\mu_0} \frac{d}{dz} B_{vx}(z). \quad (13)$$

При распространении внутри каждого слоя амплитуда волны уменьшается, как в однородной среде по экспоненте, следовательно, в m -том слое среды эта зависимость имеет вид:

$$B_{vxm}(z) = B_{vx}(0) \exp \left(-\sum_{i=1}^{m-1} \frac{h_i}{\delta_i} - \frac{z - \sum_{i=1}^{m-1} h_i}{\delta_m} \right), \quad (14)$$

где: $B_{vx}(0)$ – X -компонента вектора магнитной индукции волны частотой ν на поверхности Земли; $\delta_m = \sqrt{\frac{\rho_m}{\pi\nu\mu_0}}$ – скин-слой вещества m -го слоя. Подставляя (14) в (13), получаем:

$$p_{m\nu}(z) = \frac{\pi\nu}{\mu_0} B_{ox} B_{vxm}(z). \quad (15)$$

Входящие в выражение для $p_\nu(z)$ величины B_{ox} и B_{vxm} зависят от широты φ . В этой связи интенсивность потока энергии, обеспечиваемую возмущениями геомагнитного поля на широте φ , будем вычислять как:

$$I(\varphi) = \sum_\nu \sum_{m=1}^M \int_{h_{m-1}}^{h_m} p_{m\nu}(z, \varphi) dz.$$

Используя (15) и равенство потерь потока энергии и удельной электрической мощности $p = E^2/\rho$, получим выражение для напряженности электрического поля, возбуждаемого волной с частотой ν на глубине z в m -том слое:

$$E_m(z, \nu) = \sqrt{\frac{\pi\nu\rho_m}{\mu_0}} B_{ox} B_{vxm}(z).$$

Для оценок распределения энерговыклада и электрических полей по глубине выберем распределение удельного сопротивления по глубине низменности Святого Лаврентия [One-Dimensional Earth..., 2012], которое представим в виде таблицы (табл. 1).

Спектр и амплитуда геомагнитных возмущений при ГМБ не постоянны во времени и зависят от точки наблюдения. Наиболее интенсивны низкочастотные составляющие с периодом час и более, амплитуды высокочастотных составляющих существенно меньше [Акасофу, 1975;

Таблица 1. Распределение удельного сопротивления по глубине в районе низменности Святого Лаврентия (St. Lawrence Lowlands Physiographic Region, USA)

| № слоя | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----------------|-------|-------|--------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| z_n , км | 0.003 | 0.178 | 10 | 20 | 38 | 98 | 250 | 410 | 520 | 670 | 900 | 1000 |
| h_n , км | 0.003 | 0.175 | 10 | 10 | 18 | 60 | 150 | 160 | 110 | 150 | 230 | 100 |
| ρ_n , Ом·м | 20 | 500 | 10^4 | 650 | 25 | 244 | 158 | 29 | 8 | 2.4 | 0.89 | 0.47 |

Примечание: z_n – глубина расположения слоя, h_n – его мощность, ρ_n – удельное сопротивление.

Яновский, 1978]. Для оценок будем полагать, что спектр возмущений ГМБ содержит четыре спектральные линии, соответствующие периодам $T_1 = 10\,000$, $T_2 = 300$, $T_3 = 100$, $T_4 = 30$ с, с относительными амплитудами $B_{1x} : B_{2x} : B_{3x} : B_{4x} = 0.9 : 0.09 : 0.009 : 0.001$. Результаты расчета амплитуд возмущений этих частот при распространении в среде (табл. 1) представлены на рис. 5. Расчеты распределения удельной мощности по глубине $p_v(z)$ (рис. 6) проведены для умеренной ГМБ с амплитудой возмущения 300 нТл ($B_{1x} = 270$, $B_{2x} = 27$, $B_{3x} = 2.7$, $B_{4x} = 0.3$ нТл). Для каждой из выбранных спектральных линий получены распределения напряженности электрического поля (рис. 7) и интенсивности потока энергии. Из расчетов следует, что наибольшее энерговыделение наблюдается в поверхностных слоях, причем энерговыделение составляющих с $T_3 = 100$ и $T_4 = 30$ с происходит на глубинах до 100 км. Возмущения с периодом $T_1 = 10\,000$ с обеспечивает энерговклад до глубины 600 км. Суммарная удельная мощность энерговыделения достигает $p = 20$ нВт/м³ (рис. 6), а суммарная

величина интенсивности потока энергии равна $I = 2.5$ мВт/м². Распределение напряженности электрического поля по глубине коррелирует с распределением удельного сопротивления в слоях. На поверхности для всех T величина $E \leq 0.5$ В/км. В слое 3 ($z_3 = 10$ км, $h_3 = 10$ км) с наиболее высоким удельным сопротивлением напряженность поля превышает 10 В/км. Для всех T на кривых распределений $E(z)$ при $z = 20\text{--}40$ км наблюдается минимум; здесь E менее 1 В/км. На больших глубинах напряженность поля ≥ 1 В/км наблюдается на $z = 45\text{--}120$ км (рис. 7).

Распределения амплитуд солнечно-суточных вариаций вычислялись для той же среды (табл. 1). Периоды вариаций и их относительные амплитуды определялись из осциллограммы X -компоненты суточного хода напряженности магнитного поля, в отсутствие значимых геомагнитных возмущений, представленной в работе [Адушкин, 2013]. Полученные после разложения в спектр значения длительности наиболее интенсивных колебаний составляют приблизительно $T_1 = 30\,000$, $T_2 = 5000$, $T_3 = 250$, $T_4 = 100$ с при отношении их амплитуд

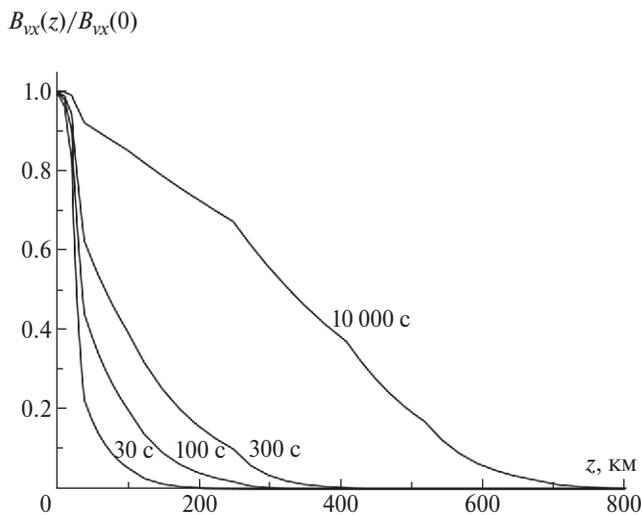


Рис. 5. Изменение амплитуды возмущений ГМБ по глубине.

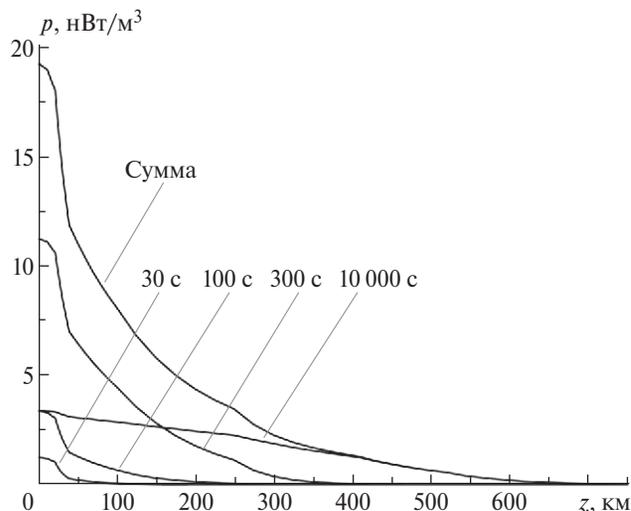


Рис. 6. Распределение удельной мощности по глубине при ГМБ.

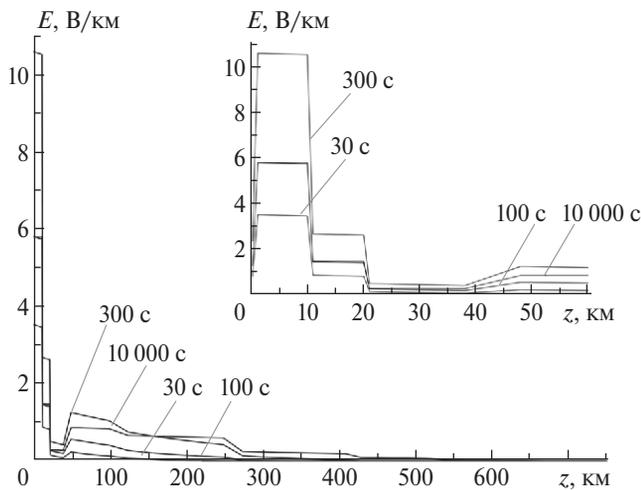


Рис. 7. Распределение напряженности электрического поля по глубине при ГМБ.

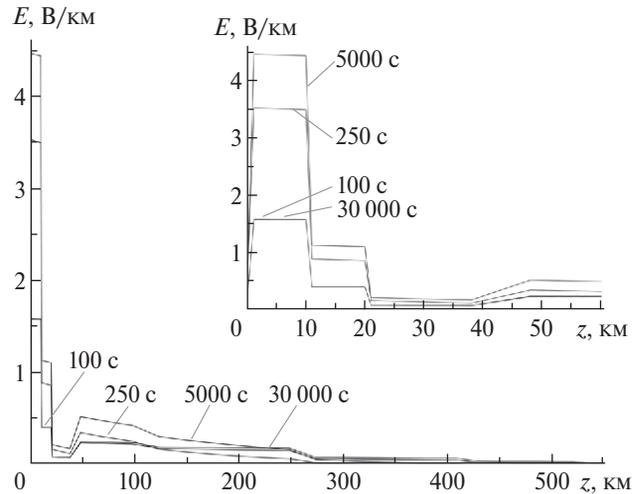


Рис. 8. Распределение напряженности электрического поля по глубине от ССВ.

$B_{1x} : B_{2x} : B_{3x} : B_{4x} \approx 30 : 5 : 2 : 0.5$. Расчеты распределений амплитуд с периодами $T_1 - T_4$ показали, что ССВ распространяются до глубин 300–1000 км. Распределения удельной мощности по глубине $p_{vx}(z)$, напряженности электрического поля и интенсивности потока энергии I_v рассчитывались для вариаций амплитудой $B_{1x} + B_{2x} + B_{3x} + B_{4x} = 75$ нТл ($B_{1x} = 60$, $B_{2x} = 10$, $B_{3x} = 4$, $B_{4x} = 1$ нТл), соответствующих осциллограмме. Как и для ГМБ наибольшее энерговыделение наблюдается в поверхностных слоях, причем энерговыделение составляющих с $T_3 = 100$ и $T_4 = 30$ с происходит на глубинах до 100 км. Суммарная удельная мощность максимальна в верхних слоях и достигает $p = 3$ нВт/м³, вариации с большим периодом дают энерговыклад до глубины 700 км. Суммарная величина интенсивности потока энергии составляет $I = 380$ мкВт/м². Напряженности электрических полей возбуждаемых ССВ, ниже, чем при ГМБ (рис. 8).

ОЦЕНКИ ЭНЕРГОВКЛАДА ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

Существующих данных по распределению удельного сопротивления по глубине и распределению вариаций геомагнитного поля недостаточно для детальных расчетов энерговыклада в объем Земли. Однако в настоящее время выявлены характерные особенности распределения сопротивления в коре и мантии, свойственные различным регионам и континентам: наличие горизонтальных слоев с практически постоянной электропроводностью

и возрастание проводимости с глубиной. Проводимость под океаном менее изучена, но по данным в работах [Богородский, 1978; Ковтун, 1997; Utada, 2003] особенности слоистого распределения сопротивления свойственны и для подстилающего основания океанов. Толщина скин-слоя электромагнитных волн с периодом более 100 с превышает среднюю глубину океана [Богородский, 1978], поэтому для оценок мы полагали распределение удельного сопротивления по глубине для всех регионов, включая океан, одинаковым (табл. 1).

Наблюдаемые возмущения геомагнитного поля $B_{vx}(0)$ имеют выраженную зависимость от географической широты φ . В силу дипольности геомагнитного поля, B_{ox} также зависит от φ . Учтем зависимость B_{ox} и B_{vx} от широты. В выбранном приближении, при совмещении оси диполя с осью вращения Земли, компонента B_{ox} зависит от широты φ как $B_{ox}(\varphi) = B_o \cos \varphi$, где $B_o = 5 \times 10^{-5}$ Тл – модуль вектора индукции геомагнитного поля [Яновский, 1978].

Распределения $B_{vx}(0)$ для ГМБ по широте определялось по данным в работе [Афанасьева, 1977], согласно которым максимумы амплитуд компоненты $B_{vx}(0)$ находятся в высоких широтах $\varphi = 60^\circ - 70^\circ$ и вблизи экватора. Распределения амплитуд до полюсов были экстраполированы, исходя из предположения о симметрии распределения магнитного поля токового слоя широтного направления, появляющегося при ГМБ в высоких широтах в холловском слое ионосферы. Из расчетов следует, что ГМБ обеспечивает энерговыклад на всех широтах кроме полюсов

(рис. 9). Максимальные значения интенсивности потока энергии I реализуются на широтах $\varphi = 60^\circ - 70^\circ$ и экваториальной зоне, где достигают нескольких мВт/м².

Для получения распределения амплитуд ССВ по широте были использованы данные [Яновский, 1978] для периода равноденствия, когда амплитуда суточных вариаций $B_{\text{вхс}}$ максимальна на экваторе ($B_{\text{вхс}} = 75$ нТл). На широте $\varphi = 30^\circ$ она близка к нулю, а в высоких широтах ($\varphi = 60^\circ$) достигает примерно трети от значения на экваторе. В связи с этим, для описания распределения суточных вариаций поля по широте использована аппроксимирующая функция

$$B_{\text{вх}}(\varphi) = B_{\text{вхА}} \cos^2 \varphi |\cos 3\varphi|. \quad (16)$$

На рис. 10 приведены значения амплитуд наблюдаемых вариаций на равноудаленных от экватора широтах и зависимость (16). Результаты расчета распределения интенсивности потока энергии от ССВ по широте представлены на рис. 11. Интенсивность потока энергии, обеспечиваемая ССВ, примерно на порядок ниже, чем ГМБ. Вместе с тем, усредненное за год значение I от ГМБ (20 бурь умеренной интенсивности длительностью 1 сутки [Афанасьева, 1977; Яновский, 1978]) меньше, чем от ССВ (рис. 12).

Из расчетов следует, что распределение энергоклада от ГМБ и ССВ по широте неоднородно. Дополнительный фактор, который вносит локальную неоднородность в распределение потока энергии, — вариации магнитного поля, обусловленные приливо-отливными течениями в прибрежных районах и крупномасштабными океаническими течениями. Эти вариации возникают в результате появления электрических токов и полей при движении морской воды в магнитном поле Земли. Период приливо-отливных течений равен лунным полусуткам, а амплитуда вариаций достигает 40–80 нТл. Следовательно, в прибрежных областях эти вариации обеспечивают поток энергии больший, чем суточные вариации [Богородский, 1978]. Вариации магнитного поля сопоставимые с ССВ создают и крупномасштабные океанические течения [Богородский, 1978].

Вклад в особенности распределения потока энергии вносят и геомагнитные вариации, обусловленные ветровыми волнами. Малый период и низкое удельное сопротивление морской воды не позволяют вариациям проникать глубже 1 км. Однако на меньших глубинах волны обеспечивают дополнительный энергоклад в донные слои. Для выяснения возможности

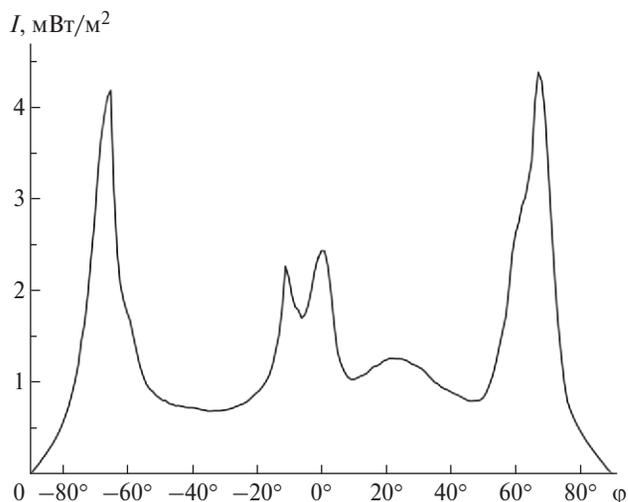


Рис. 9. Распределение интенсивности потока энергии по широте для главных дней семейств умеренных бурь.

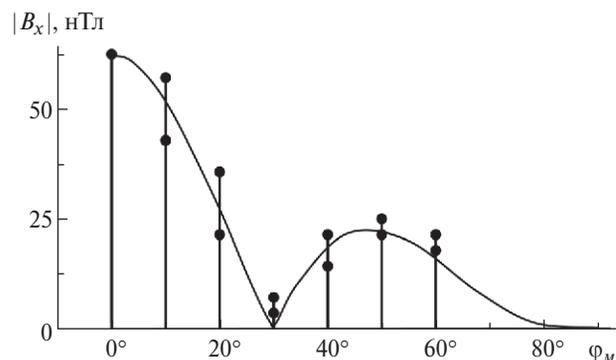


Рис. 10. Характерные значения наблюдаемых суточных вариаций и зависимость (16). Точки — амплитуды вариаций по широтам [Яновский, 1978].

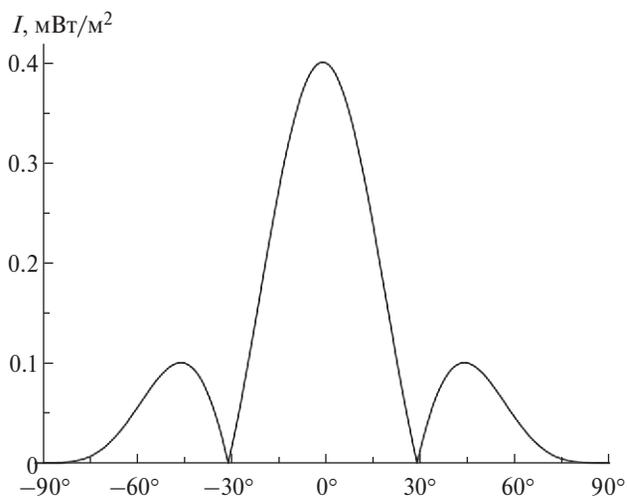


Рис. 11. Распределение интенсивности потока энергии от ССВ по широте.

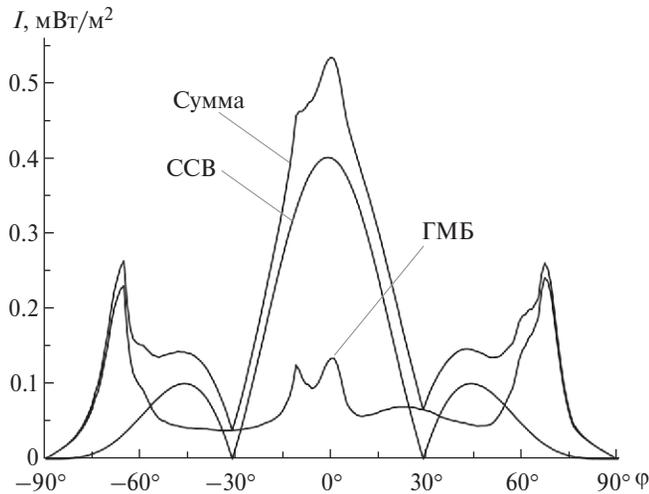


Рис. 12. Распределение усредненной за год интенсивности потока энергии по широте.

электролиза во время волнений в прибрежных зонах была проведена оценка электрических полей в донных слоях. Оценка проводилась по 2-х слойной модели: 200-метровый слой воды с $\rho_1 = 0.25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и подстилающие слои с $\rho_2 = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ или $\rho_2 = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. За исходные данные приняты напряженности электрических полей в воде $E_1 = 1.4 \times 10^{-2}$ и $E_2 = 6.7 \times 10^{-2} \text{ В/км}$, возбуждаемые движением волн с периодами от $T_1 = 2.4$ (длина волны $L = 6 \text{ м}$, амплитуда $A = 0.18 \text{ м}$) и до $T_2 = 7.0 \text{ с}$ ($L = 51 \text{ м}$, $A = 2.5 \text{ м}$) [Богородский, 1978]. Амплитуды вариаций выбирались по совпадению этих полей и расчетных и составили $B(T_1) = 0.015$ и $B(T_2) = 1 \text{ нТл}$. Расчеты показали, что для $B(T_1)$ максимальные поля на границе слоя воды и подстилающего слоя составляют $E = 0.2 \text{ В/км}$ для $\rho_2 = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $E = 0.57 \text{ В/км}$ для $\rho_2 = 1000 \text{ Ом}$. Для $B(T_2)$ реализуются поля, при которых электролиз возможен: $E = 1.1 \text{ В/км}$ для $\rho_2 = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $E = 3.4 \text{ В/км}$ для $\rho_2 = 1000 \text{ Ом}$.

Энерговклад W в объем Земли от ГМБ и ССВ за год оценивался по формуле $W = Pt_y$, где:

$$P = 2\pi R^2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (I_{ГМБ}(\varphi) + I_{ССВ}(\varphi)) \cdot \cos \varphi d\varphi - \text{мощность}$$

потока энергии, поступающая в объем Земли через поверхность; $I_{ГМБ}(\varphi)$, $I_{ССВ}(\varphi)$ – интенсивность потока энергии от ГМБ и ССВ; R – радиус Земли; t_y – продолжительность года. Для выяснения влияния особенностей распределения удельного сопротивления по глубине на энерговклад были выполнены расчеты по двум моделям: 12-ти слойной (табл. 1) и 2-х слойной. В 2-х слойной модели до $z = 500 \text{ км}$ удельное сопротивление полагалось равным $\rho_1 = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а ниже $\rho_2 = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Установлено удовлетворительное согласие результатов расчетов по обеим моделям (табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные оценки позволяют сделать некоторые предположения о механизмах взаимосвязи между геомагнитной и сейсмической активностью. Сравним энергию, поступающую в объем Земли при ГМБ и ССВ W_Σ , энерговыделение при землетрясениях $W_{\Sigma q}$ и энергию, вкладываемую в продукты электролиза W_c . Воспользуемся результатами расчетов по 12-ти слойной модели, из которой следует, что за год энерговклад от ГМБ и ССВ составляет $W_\Sigma \sim 4 \times 10^{18} \text{ Дж}$. Положим $\eta_e = 0.1$. Тогда в химическую энергию продуктов электролиза за год передается $W_c = \eta_e W_\Sigma \sim 0.4 \times 10^{18} \text{ Дж}$. Эта величина одного порядка с общим энерговыделением при землетрясениях $W_{\Sigma q} \sim 10^{18} \text{ Дж/год}$ [Трухин, 2005]. Учет других источников вариаций, в частности, генерируемых приливо-отливными течениями, крупномасштабными океаническими течениями и ветровыми волнами, делает $W_{\Sigma q}$ и W_c сопоставимыми. В связи с этим логично предположить, что геомагнитные вариации являются не триггером, а основным источником энергии геоактивности.

Таблица 2. Результаты расчета энерговклада

| Модель | 12-ти слойная | 2-х слойная |
|--------------------------|----------------------|----------------------|
| W от ССВ, Дж | 2.5×10^{18} | 4.6×10^{18} |
| W от ГМБ, Дж | 1.2×10^{18} | 1.8×10^{18} |
| W_Σ суммарный, Дж | 3.7×10^{18} | 6.4×10^{18} |

Из расчетов следует, что η_e достигает наибольших значений в слоях с высоким удельным сопротивлением, в которых реализуются максимальные значения E . В слоях с низким сопротивлением энергия расходуется, в основном, на нагрев. Это обуславливает неоднородность наработки продуктов электролиза по глубине.

Используемая в оценках модель учитывает только интегральные характеристики среды и позволяет получить усредненные картины распределений. Вместе с тем минеральный состав, фазовое состояние, пористость и другие свойства горных пород, и химический состав флюидов могут влиять на распределение теллурических токов. Концентрация токов в зонах с повышенной проводимостью обуславливает локализацию областей интенсивного электролиза: повышение плотности тока ведет к росту напряжения на электролитических зазорах. Следствием этого является некоторое снижение эффективности передачи электрической энергии в химическую и расширение состава продуктов электролиза. Продукты электролиза разнообразны. Во влагонасыщенных породах электролитом являются водные растворы солей, при разложении которых будут выделяться газы (это, прежде всего, водород, а также галогены и кислород) и металлы. Электролиз в расплавах солей происходит при высоких температурах. Здесь в газообразные продукты добавятся новые вещества, например, сера.

Градиент давления задает преимущественно вертикальное движение газов, однако горизонтальная слоистость недр создает условия и для горизонтального растекания. Это делает возможным накопление энергии в виде химически активных продуктов под слоями с низкой газопроницаемостью. В скоплениях активных газов возможно развитие быстрых (взрывных) реакций, которые могут проявляться как сейсмическая активность [Gilat, 2012; Натяганов, 2015]. Запаздывание изменения сейсмоактивности на несколько суток после геомагнитных бурь [Соболев, 2003], по-видимому, определяется временем переноса газов из области электролиза в зоны накопления, при этом активность в одних районах может усиливаться, в других, за счет перетока газов, ослабляться.

Зависимость распределения теллурических токов от частоты геомагнитных вариаций, электропроводности и особенностей геологического строения среды приводит к неоднородности выделения продуктов электролиза. Местами резкого изменения однородности строения коры и электропроводности являются побережья океанов, горные хребты и разломы, расположенные как на суше, так и в океанах. В этих местах электролиз более интенсивен, что

возможно является причиной повышенной сейсмичности. Возможность протекания электролиза на неоднородностях структуры литосферных плит позволяет объяснить и внутриплитную сейсмичность. Отметим, что энерговклад, обусловленный глобальными возмущениями, имеет широтную зависимость с минимумом вблизи полюсов, а вклад, связанный с движением морской воды, локализован вдоль побережий и мелководий.

Можно предполагать также, что именно электролиз под действием теллурических токов является одним из источников постоянной водородно-метановой дегазации Земли [Войтов, 1986].

ВЫВОДЫ

Предложен механизм преобразования энергии геомагнитных возмущений в энергию химически активных продуктов – электролиз при протекании теллурических токов, возбуждаемых вариациями магнитного поля. Представлены расчетные зависимости эффективности преобразования от напряженности электрического поля, индуцируемого геомагнитными вариациями. Показано, что эффективность преобразования при электролизе существенно превышает эффективность электро-механических преобразований.

Показано, что теллурические токи возбуждаются до глубин ~ 1000 км и выполнены оценки распределения наводимых электрических полей и мощности энерговклада геомагнитных вариаций.

Для геомагнитных бурь и солнечно-суточных вариаций оценена энергия, передаваемая в продукты электролиза за год, и получено ее широтное распределение. Рассмотрено влияние движения морской воды на распределение потока энергии геомагнитных вариаций.

Показано, что энергия, передаваемая в химическую энергию продуктов электролиза, сопоставима с сейсмической энергией. Выдвинуто предположение, что энерговыделение быстрых химических реакций газообразных химически активных продуктов электролиза является причиной сейсмической активности, а выход на поверхность части продуктов электролиза и продуктов реакций с их участием является одним из источников дегазации Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров М.С., Бакленева З.М., Гладштейн Н.Д. и др.* Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ. М.: Наука. 1972. 197 с.
Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А., Харламов В.А. О возможном влиянии геомагнитных вариаций на

- сейсмический фон. Триггерные эффекты в геосистемах / Под ред. Адушкина В.В., Кочаряна Г.Г. М.: ГЕОС. 2013. С. 208–219.
- Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Ч. 2. М.: Мир. 1975. 512 с.
- Афанасьева В.И., Бычкова А.К. Каталог семейства геомагнитных бурь периода 1965–1975 гг. и статистические закономерности геомагнитной активности. М.: ИЗМИРАН. 1977. 156 с.
- Богородский В.В., Гусев А.В., Доронин Ю.П., Кузнецова Л.Н., Шифрин К.С. Физика океана. Л.: Гидрометеоиздат. 1978. 296 с.
- Войтов Г.И. Химизм и масштабы современного потока природных газов в различных геоструктурных зонах Земли // Журнал Всесоюзного химического общества. 1986. Т. 31. № 5. С. 533–539.
- Заболотная Н.А. Индексы геомагнитной активности. М.: Гидрометеоиздат. 2004. 83 с.
- Закржевская Н.А., Соболев Г.А. О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // Физика Земли. 2002. № 4. С. 3–15.
- Закржевская Н.А., Соболев Г.А. Влияние магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность в различных регионах // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 63–75.
- Ковтун А.А. Электропроводность Земли // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 10. С. 111–117.
- Ляцкий В.Б. Токовые системы магнитосферно-ионосферных возмущений. Л.: Наука. 1978. 198 с.
- Натяганов В.Л., Нечаев А.М. Возможные механизмы взаимозависимости сейсмической и вулканической активности // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. Вып. № 25. № 1. С. 66–71.
- Никольский В.В. Теория электромагнитного поля. М.: Высшая школа. 1961. 370 с.
- Новиков Г.И. Основы общей химии. М.: Высшая школа. 1988. 431 с.
- Ротанова Н.М., Пушков А.Н. Глубинная электропроводность Земли. М.: Наука. 1982. 296 с.
- Соболев Г.Л., Демин В.М. Механоэлектрические явления в Земле. М.: Наука. 1980. 203 с.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.Л., Харин Е.П. О связи сейсмичности с магнитными бурями // Физика Земли. 2001. № 11. С. 6–15.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 268 с.
- Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н. О геоэффективных солнечных вспышках и вариациях уровня сейсмического шума // Физика Земли. 2011. № 3. С. 55–71.
- Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е. Общая и экологическая геофизика. М.: Физматлит. 2005. 570 с.
- Филиппов Ю.В., Попович М.П. Физическая химия. М.: изд-во: МГУ. 1980. 400 с.
- Харгривс Дж. К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Л.: Гидрометеоиздат. 1982. 351 с.
- Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: изд-во: ЛГУ. 1978. 592 с.
- Gilat A., Vol A. Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes // Geoscience Frontiers. 2012. P. 1–11.
- Kappenman J. Geomagnetic Storms and Their Impacts on the U.S. Power Grid. Report Metatech Corporation MetaR-319. Goleta, California. 2010. 197 p.
- McKay A.J. Geoelectric Fields and Geomagnetically Induced Currents in the United Kingdom University of Edinburgh. 2003. 238 p.
- Utada H., Koyama T., Shimizu H., Chave A.D. A semi-global reference model for electrical conductivity in the mid-mantle beneath the north Pacific region // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. № 4. P. 1194. doi:10.1029/2002 GL016092.
- One-Dimensional Earth Resistivity Models for Selected Areas of Continental United States and Alaska. EPRI, Palo Alto, CA. 2012. 1026430.

On Transformation of Energy of Geomagnetic Disturbances

V. V. Gorokhov^a, V. I. Karelin^a, and V. D. Selemir^{a,*}

^aThe Russian Federal Nuclear Center—All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region, 607188 Russia

*E-mail: selemir@vniief.ru

Received January 14, 2019

A mechanism responsible for the transformation of energy of geomagnetic disturbances into the energy of chemically active products is proposed. According to this mechanism, this transformation is implemented by electrolysis at the interfaces between the media with a different type of conduction under the passing of telluric currents induced by the variations of the geomagnetic field. The efficiency of the transformation of disturbance energy into the energy of electrolysis products is estimated. The energy flux absorbed by the Earth under geomagnetic disturbances is estimated. It is shown that the energy transferred to the chemical energy of the products of electrolysis is comparable with seismic energy. It is suggested that chemically active gaseous products of electrolysis affect seismic activity. It is also hypothesized that the electrolysis under the action of telluric currents induced by the variations of the geomagnetic field is one of the sources of outgassing of the Earth.

Keywords: geomagnetic perturbations, telluric currents, electrolysis, chemical energy of electrolysis products, seismicity