

Ультранизкочастотные вариации магнитного поля при распространении в ионосфере акустико-гравитационных волн

В. Е. Куницын^{1,a}, С. Л. Шалимов^{2,b}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики атмосферы. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

²Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН. Россия, 123995, Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1.

E-mail: ^akunitsyn77@mail.ru, ^bpmsk7@mail.ru

Статья поступила 13.04.2011, подписана в печать 16.06.2011

В рамках простой модели проанализирован эффект генерации УНЧ вариаций магнитного поля при распространении в ионосфере акустико-гравитационных волн (АГВ). Показано, что ионосферные неоднородности, обусловленные АГВ, могут давать заметный вклад в наблюдаемые на поверхности земли вариации магнитного поля. В качестве приложения данного механизма рассмотрен ряд измерений УНЧ вариаций, приуроченных к сейсмическим событиям.

Ключевые слова: акустико-гравитационные волны, ионосфера, ультранизкочастотные магнитные вариации.

УДК: 550.385. PACS: 92.60.hh, 94.20.wg, 94.20.ws.

Введение

Обычными источниками электромагнитных сигналов в диапазоне УНЧ (ультранизкие частоты, 0.01–30 Гц), измеряемых на поверхности земли, считают геомагнитные пульсации Pc1/Pi1, шумановские резонансы, ионосферный альвеновский резонатор, шумовой сигнал увеличенной амплитуды вблизи грозových фронтов и квазипериодические сигналы после спрайтов [1–7]. Во всех этих исследованиях источником УНЧ сигналов считают магнитосферу, ионосферу или атмосферу.

Наряду с этим существуют также измерения в УНЧ диапазоне, приуроченные ко времени подготовки достаточно сильных (с магнитудой $M \geq 7$) землетрясений и рассматриваемые как предвестники приближающегося события [8–10]. Согласно гипотезе, эти сигналы обусловлены разрушением среды в зоне очага или в пределах зоны подготовки [11]. В частности, перед Аляскинским землетрясением 1964 г. ($M = 9.2$) в 440 км от эпицентра в пункте, который находился вблизи глубинного разлома, протянувшегося от эпицентра вдоль дуги Алеутских островов, был зарегистрирован гигантский УНЧ магнитный импульс ~ 100 нТ за час до события [13]. Авторы подобных исследований убеждены в литосферном происхождении регистрируемых сигналов.

Очевидно, что при тестировании гипотезы о литосферном источнике УНЧ сигналов прежде всего необходимо учитывать и четко дискриминировать возможные источники, расположенные вне земной коры. Однако, вполне вероятно, что на сегодняшний день известны еще не все источники подобного рода.

В настоящей работе в рамках простой модели предложен еще один возможный источник УНЧ сигналов, регистрируемых на земле, обусловленный распространяющейся в ионосфере акустико-гравитационной волной (АГВ).

1. Модель

Предполагаем в ионосфере присутствие динамо-поля \mathbf{E}_0 с компонентами вдоль осей x, y . Пусть АГВ

распространяется в ионосфере вдоль меридиана (вдоль оси x , причем ось y направлена на восток, а ось z вертикально вниз вдоль геомагнитного поля \mathbf{B}_0). Выбранная система координат соответствует высоким широтам, а в средних широтах оценки эффектов будут справедливы по порядку величины.

Поскольку АГВ вызывает возмущения только вдоль оси x , соответствующая компонента ионосферного тока равна

$$J_{0x} = \Delta \Sigma_P E_{0x} + \Delta \Sigma_H E_{0y}, \quad (1)$$

где вариации педерсеновской и холловской интегральных проводимостей определены как

$$\begin{aligned} \Delta \Sigma_P &= \Delta \Sigma_{0P} \cos(\omega_0 t - k_0 x), \\ \Delta \Sigma_H &= \Delta \Sigma_{0H} \cos(\omega_0 t - k_0 x), \end{aligned}$$

а ω_0, k_0 — частота и волновое число АГВ.

Уравнение, описывающее замыкание поперечных токов квазистационарными продольными токами, имеет вид [13]

$$\frac{\partial}{\partial z} \sigma_z \frac{\partial \psi}{\partial z} + \sigma_P \Delta_{\perp} \psi = \nabla_{\perp} \cdot (\hat{\sigma} \cdot \mathbf{E}_0),$$

где ψ — скалярный потенциал, $\sigma_z, \sigma_P, \hat{\sigma}$ — продольная и педерсеновская проводимости и тензор полной поперечной проводимости соответственно.

В первом приближении по малому параметру $\sigma_P / \sigma_{\parallel} \ll 1$ потенциал ψ зависит только от поперечных координат [13], поэтому из последнего уравнения имеем

$$\Delta_{\perp} \psi = \frac{1}{\Sigma_P + \Sigma_P^*} \int dz \nabla_{\perp} \cdot \mathbf{j}_{0\perp}, \quad (2)$$

где $\Sigma_P = \int \sigma_P dz$ — интегральная педерсеновская проводимость ионосферы, Σ_P^* — интегральная проводимость сопряженной ионосферы.

Интегрируя по z и подставляя (1) в (2), находим для поля поляризации

$$-\frac{\partial \psi}{\partial x} = -\frac{1}{\Sigma_P + \Sigma_P^*} (\Delta \Sigma_P E_{0x} + \Delta \Sigma_H E_{0y}). \quad (3)$$

Соответственно компоненты плотности поляризационного тока $\mathbf{j}_\perp = -\delta \nabla_\perp \psi$ равны

$$j_{px} = -\frac{\sigma_P}{\Sigma_P + \Sigma_P^*} (\Delta \Sigma_P E_{0x} + \Delta \Sigma_H E_{0y}), \quad (4)$$

$$j_{py} = \frac{\sigma_H}{\Sigma_P + \Sigma_P^*} (\Delta \Sigma_P E_{0x} + \Delta \Sigma_H E_{0y}). \quad (5)$$

Проинтегрированная по высоте ионосферы плотность тока складывается из первоначального тока и поляризационного тока, поэтому с учетом (2) и (4), (5) для нее получаем

$$J_{px} + J_{0x} = i_{0x} \cos(\omega_0 t - k_0 x) = \frac{\Sigma_P^*}{\Sigma_P + \Sigma_P^*} (\Delta \Sigma_{0P} E_{0x} + \Delta \Sigma_{0H} E_{0y}) \cos(\omega_0 t - k_0 x), \quad (6)$$

$$J_{py} + J_{0y} = i_{0y} \cos(\omega_0 t - k_0 x) = \left(\Delta \Sigma_{0P} E_{0y} - \Delta \Sigma_{0H} E_{0x} + \frac{\Sigma_H}{\Sigma_P + \Sigma_P^*} (\Delta \Sigma_{0P} E_{0x} + \Delta \Sigma_{0H} E_{0y}) \right) \cos(\omega_0 t - k_0 x). \quad (7)$$

Представим теперь ионосферу в виде слоя с поверхностной плотностью тока \mathbf{i}_0 , имеющего компоненты (6), (7). Пусть ионосфера расположена на расстоянии h от земной поверхности, которую считаем идеально проводящей. Тогда выражение для векторного потенциала в промежутке между ионосферой и землей имеет вид

$$\mathbf{A} = \frac{4\pi}{c} \frac{\mathbf{i}_0}{k_0} \exp(-k_0 z), \quad (8)$$

а на земной поверхности компоненты вариаций магнитного поля будут определяться по формулам

$$B_x = -\frac{\partial A_y}{\partial z} \Big|_{z=h} = \frac{4\pi}{c} i_{0y} \exp(-k_0 h) \cos(\omega_0 t - k_0 x), \quad (9)$$

$$B_z = \frac{\partial A_x}{\partial x} \Big|_{z=h} = -\frac{4\pi}{c} i_{0y} \exp(-k_0 h) \sin(\omega_0 t - k_0 x). \quad (10)$$

Из этих выражений следует, что магнитные вариации, которые обусловлены распространяющейся в ионосфере АГВ, при наблюдении на земле значительно уменьшаются по амплитуде, если длина волны λ_0 мала по сравнению с высотой h .

Для оценки эффекта предположим, что $\lambda_0 \geq h$. Тогда для амплитуды поля имеем

$$B_x = \frac{4\pi}{c} i_{0y},$$

что совпадает с выражением для поля бесконечного линейного тока. Поскольку на высотах динамо-слоя $\Sigma_H \gg \Sigma_P$, в (7) можно пренебречь первыми двумя слагаемыми. Тогда получаем оценку амплитуды

$$B_x = \frac{4\pi}{c} \frac{\Sigma_H}{\Sigma_P + \Sigma_P^*} (\Delta \Sigma_{0P} E_{0x} + \Delta \Sigma_{0H} E_{0y}). \quad (11)$$

Для типичных величин $\Sigma_P \approx 1 \text{ Ом}^{-1}$, $\Sigma_H \approx 3\Sigma_P$, $\Delta \Sigma_{0P} \approx \Delta \Sigma_{0H} \approx 0.1\Sigma_P$, $E_{0x} \approx E_{0y} \approx 1.5 \text{ мВ/м}$ находим $B_x \approx 1 \text{ нТ}$.

Заметим, что при сделанных предположениях поле (11) определяется холловским током, и противоречия с теоремой Фукушимы [14] не возникает. Согласно этой теореме, продольный ток, текущий вертикаль-

но в однородной проводящей ионосфере и вызванный им педерсеновский ток не вносят вклада в наземное магнитное поле. Таким образом, в ионосфере с вертикальными силовыми линиями наземные магнитные вариации создаются только холловским током (соленоидальная часть ионосферного тока).

2. Обсуждение результатов

Среди гипотетических электромагнитных предвестников землетрясений измерения в УНЧ диапазоне и даже на более низких частотах занимают особое место. Это связано с тем, что для этого диапазона глубина скин-слоя в земле оказывается порядка нескольких десятков км, и можно надеяться, что если электромагнитное возмущение генерируется в очаге землетрясения, то оно будет зарегистрировано на поверхности земли. Эти же соображения относительно глубины скин-слоя создают трудности при интерпретации электромагнитных предвестников якобы обнаруживаемых в килогерцовом и мегагерцовом диапазонах. В последнем случае получается десятиметровый скин-слой, в котором трудно найти большое число источников радиоизлучения.

Наиболее часто цитируют наблюдения УНЧ вариаций магнитного поля перед землетрясениями в Лома-Приета [8], Спитаке [9] и Гуамо [10] как наиболее надежные. Во временной эволюции УНЧ вариаций перед этими событиями находят даже похожие эпизоды [15] (если бы это было действительно так, то можно было увидеть в этом повторяемость явления, что чрезвычайно важно для построения теории явления). Например, было замечено, что интенсивность сигналов начала возрастать за 3-5 дней до землетрясения в Спитаке (в канале 0.1-1 Гц) и за 12 дней до события в Лома-Приета (в диапазоне 0.01-1 Гц), достигнув максимальных величин порядка 0.2 нТ (130 км от эпицентра) и несколько нанотесла (7 км от эпицентра) за 4 и 3 часа соответственно до указанных событий. При этом электромагнитная активность сохранялась в течение нескольких недель после события в Спитаке и несколько месяцев после землетрясения в Лома-Приета. В чем-то похожую эволюцию демонстрируют измерения УНЧ вариаций и перед землетрясением в Гуамо: плавное возрастание электромагнитной активности (выраженное в виде плавных вариаций отношения Z/H компонент) начинается за месяц до события. При этом максимальной величины Z компонента сигнала достигает за 10 дней до землетрясения, затем следует ее спад и новый рост за несколько дней до события. Сигнал для этого события зарегистрирован в канале 0.01-0.05 Гц и имеет амплитуду около 0.1 нТ (65 км от эпицентра).

Проведенный совсем недавно скрупулезный анализ данных [16, 17], которыми пользовались исследователи [8, 10] для своих выводов, показал, что, по меньшей мере, длиннопериодная модуляция УНЧ вариаций магнитного поля (недели, месяцы) не связана с землетрясениями, а определяется либо технической неисправностью регистрирующей системы (для события в Лома-Приета), либо вариациями геомагнитной активности (для события в Гуамо). В этой связи отметим, что, как следует из приведенных измерений [9], плавный рост интенсивности сигнала перед землетрясением в Спитаке также происходил на фоне умеренной геомагнитной

активности (хотя в день землетрясения геомагнитная активность была низкой).

Таким образом, при интерпретации наблюдений УНЧ вариаций магнитного поля перед землетрясениями следует обращать внимание не на длиннопериодные вариации интенсивности УНЧ сигналов, а на всплески сигналов. Именно такой вид активности УНЧ вариаций был продемонстрирован в наблюдениях перед событием в Спитаке, а именно перед основным толчком и 8 афтершоками были зарегистрированы шумоподобные и квазипериодические всплески сигналов длительностью от нескольких минут до 1.5 часов [9, 15]. Аналогичный вид активности УНЧ вариаций (в диапазоне 0.01–0.02 Гц) был зарегистрирован во время землетрясения в San Juan Bautista 1998 г. (Калифорния, магнитуда $M = 5.1$) и на афтершоках землетрясения Hector Mine, 1999 г. (Калифорния, $M = 7.1$) [18, 19]. Однако в отличие от измерений перед событием в Спитаке в последних двух случаях авторы не связывали всплескообразные сигналы с предвестниками событий, поскольку сигналы не прекращались и после того, как события происходили.

Следует отметить, что длительность сигналов вполне соответствует периодам АГВ, и это обстоятельство в свете результатов, полученных в настоящей работе, наводит на мысль о том, что источник сигналов, возможно, находится в ионосфере, а не в земной коре, как принято считать [11].

При таком предположении магнитные сигналы, наблюдаемые перед землетрясениями на поверхности земли, могут быть интерпретированы в рамках модели ионосферных предвестников землетрясений, по которой любые ионосферные аномалии перед событиями обусловлены АГВ, генерируемыми в эпицентральной зоне готовящегося землетрясения и распространяющимися на ионосферные высоты [20–22].

При распространении АГВ в ионосфере будет генерироваться квазипериодический сигнал с амплитудой, которую можно оценить по формулам (9), (10). В отличие от квазипериодического, шумоподобный сигнал в точке наблюдения формируется случайными полями от ионосферных неоднородностей масштаба λ . Оценивая число случайных неоднородностей, излучающих сигнал на частоте f как $N \approx c/f\lambda$, для результирующей амплитуды сигнала в точке наблюдения с учетом (9) получим

$$B \approx \frac{2\pi}{c} i_{0y} \exp(-k_0 h) \sqrt{N},$$

откуда при $\lambda \approx \lambda_0 \approx 10^2$ км вблизи частоты 0.01 Гц находим $B \approx 0.6$ нТ, что соответствует наблюдениям [18, 19].

Для интерпретации шумоподобных магнитных сигналов, наблюдаемых вблизи 0.1 Гц, необходимо было бы привлекать инфразвуковые волны. Однако длина волны этих волн слишком мала, чтобы давать заметный вклад в магнитные вариации УНЧ диапазона. Кроме того, авторы [9, 15] отвергают возможность регистрации геомагнитных пульсаций на том основании, что отношение вертикальной и горизонтальной компоненты было больше единицы, что не характерно для пульсаций. Поэтому наиболее вероятным источником магнитных вариаций на этих частотах могут стать

турбулентные движения нейтральной компоненты на ионосферных высотах. Как известно [23], в области перехода от мезосферы к нижней термосфере (высоты вблизи 100 км) происходит разрушение распространяющихся вверх АГВ, что и приводит к турбулизации этой области. Оценим частотный диапазон, который занимают турбулентные пульсации из инерционного интервала, предполагая, что они имеют колмогоровский спектр. Тогда для частот пульсаций в инерционной области находим [24]

$$\frac{u}{l} \ll \omega \ll \frac{u}{l} \text{Re}^{3/4},$$

где u, l — скорость и масштаб основного движения соответственно, $\text{Re} = \Delta u \cdot l/\nu$ — число Рейнольдса движения в целом, Δu — изменение средней скорости на масштабе l , ν — кинематическая молекулярная вязкость. Согласно оценке [23], около поверхности земли вязкость имеет величину 0.1 см²/с, а на высоте около 100 км — на 7 порядков больше. Тогда для величин $\Delta u \approx 100$ м/с, $l \approx 100$ км получаем оценку числа Рейнольдса $\text{Re} \approx 10^5$. Следовательно, частоты турбулентных пульсаций занимают интервал 10^{-3} Гц $\ll \omega \ll 6$ Гц.

Частоты ионосферного альвеновского резонатора, как известно, находятся в диапазоне 0.1–6 Гц [3], и близкие к ним частоты турбулентных пульсаций способны возбуждать резонатор, в результате чего, согласно [25], на поверхности земли в диапазоне 0.1–1 Гц будут наблюдаться магнитные вариации порядка 0.1–0.3 нТ, что согласуется с экспериментом [9, 15].

Другим возможным источником всплесков УНЧ магнитных вариаций может стать дальняя грозовая активность, обусловленная положительными разрядами облако-земля (в частности, спрайтами) [26].

Заключение

Таким образом, в рамках простой модели показано, что ионосферные неоднородности, обусловленные распространяющимися и диссипирующими в ионосфере АГВ, могут давать заметный вклад в наблюдаемые на поверхности земли УНЧ вариации магнитного поля. Это обстоятельство необходимо учитывать, в частности, при интерпретации УНЧ вариаций как предвестников землетрясений.

Список литературы

1. Троицкая В.А., Гульельми А.В. // УФН. 1969. **97**. С. 453.
2. Sentman D.D. Schumann resonances // Handbook of Atmospheric Electrodynamics / Ed. by H. Volland. V. 1. Boca Raton, Florida, 1995. P. 267.
3. Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengerts V. // J. Atmos. Terr. Phys. 1990. **52**. P. 781.
4. Fraser-Smith A.C. // Geophys. Res. Lett. 1993. **20**. P. 467.
5. Fukunishi Y., Takahashi Y., Sato M. et al. // Geophys. Res. Lett. 1997. **24**. P. 2973.
6. Fullekrug M., Fraser-Smith A.C., Reising S.S. // Geophys. Res. Lett., 1998. **25**. P. 3497.
7. Shalimov S., Bosinger T. // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2006. **68**. P. 814.
8. Fraser-Smith A.C., Bernardi A., McGill P.R. et al. // Geophys. Res. Lett. 1990. **17**, N 9. P. 1465.

9. *Kopytenko Y.A., Matiashvili T.G., Voronov P.M. et al.* // Phys. Earth Planet. Int. 1993. **77**. P. 85.
10. *Hayakawa M., Kawate R., Molchanov O.A., Yumoto K.* // Geophys. Res. Lett. 1996. **23**, N 3. P. 241.
11. *Сурков В.В.* Электромагнитные эффекты при взрывах и землетрясениях. М., 2000.
12. *Moore G.W.* // Nature. 1964. **203**. P. 508.
13. *Gurevich A.V., Krylov A.L., Tsedilina E.E.* // Space Sci. Rev. 1976. **19**. P. 59.
14. *Fukushima N.* // Rep. Ionosphere Space Res. Japan. 1976. **30**, N 1/2. P. 35.
15. *Molchanov O.A., Kopytenko Yu. A., Voronov P.M. et al.* // Geophys. Res. Lett. 1992. **19**, N 14. P. 1495.
16. *Thomas J.N., Love J.J., Johnston M.J.S.* // PEPI. 2009. **173**. P. 207.
17. *Thomas J.N., Love J.J., Johnston M.J.S., Yumoto K.* // Geophys. Res. Lett. 2009. **36**. L16301. doi: 10.1029/2009GL039020.
18. *Karakelian D., Beroza G.S., Klemperer S.L., Fraser-Smith A.C.* // BSSA, 2002. **92**. N 4. P. 1513.
19. *Karakelian D., Klemperer S.L., Fraser-Smith A.C., Thompson G.A.* // Tectonophysics. 2002. **359**. P. 65.
20. *Shalimov S.L.* // Int. Geosci. Newsmag. Episodes. 1992. **15**, N 4. P. 252.
21. *Шалимов С.Л.* // Изв. РАН. Физика Земли. 1992. № 7. С. 89.
22. *Перцев Н.Н., Шалимов С.Л.* // Геомагнетизм и аэронавигация. 1996. **36**, № 2. С. 111.
23. *Госсард Э., Хук У.* Волны в атмосфере. М., 1978.
24. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М., 1986.
25. *Surkov V.V., Pokhotelov O.A., Parrot M. et al.* // Ann. Geophys. 2004. **22**. P. 2877.
26. *Shalimov S., Bosinger T.* // J. Geophys. Res. 2008. **113**. A02303. doi:10.1029/2007JA012614.

Ultra low frequency magnetic field variations caused by propagation of acoustic-gravity waves in the ionosphere

V. E. Kunitsyn^{1,a}, S. L. Shalimov^{2,b}

¹Department of Physics of Atmosphere, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

²O. Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Science, Moscow 123995, Russia. E-mail: ^akunitsyn77@mail.ru, ^bpmsk7@mail.ru.

Effect of generation of ULF magnetic field variations caused by propagating acoustic-gravity wave (AGW) in the ionosphere has been considered. It has been shown that ionospheric irregularities produced by AGW can contribute to the magnetic field variations observed on the ground. Recent measurements of ULF variations confined to seismic events have been analyzed as an application of the mechanism.

Keywords: acoustic-gravity waves, ionosphere, ultra-low frequency magnetic variations.

PACS: 92.60.hh, 94.20.wg, 94.20.ws.

Received 13 April 2011.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2011).

Сведения об авторах

1. Куницын Вячеслав Евгеньевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-38-06, e-mail: kunitsyn77@mail.ru.

2. Шалимов Сергей Львович — докт. физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник; тел.: (499) 254-91-50, e-mail: pmsk7@mail.ru.