

УДК 550.388.2

МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ЧТО МЫ ЗНАЕМ СЕЙЧАС И ЧТО ДЕЛАТЬ ДАЛЬШЕ?

М.В. Клименко, В.В. Клименко

FORMATION MECHANISMS OF EARTHQUAKE IONOSPHERIC PRECURSORS: WHAT DO WE KNOW NOW AND WHAT TO DO NEXT?

M.V. Klimenko, V.V. Klimenko

Ионосферные предвестники землетрясений в ПЭС могут формироваться атмосферным электричеством и мелкомасштабными внутренними гравитационными волнами (ВГВ). Представлены результаты численных расчетов действия этих двух механизмов для различных землетрясений на глобальной самосогласованной модели Термосфера, Ионосфера, Протоносфера (ГСМ ТИП).

Ionospheric earthquake precursors in TEC in the epicenter vicinity may be formed by the atmospheric electricity and small-scale internal gravitational waves (IGW). We present results of numerical calculations of effect of these two mechanisms for different earthquakes using the global self-consistent model Thermosphere, Ionosphere, Protonosphere (GSM TIP).

Введение

Ученые многие годы пытаются предсказывать землетрясения. Интенсивные поиски ионосферных предвестников землетрясений стали проводиться в последнее время многочисленными группами исследователей [1–3]. В [4] показано, что за несколько дней до сильных землетрясений эффекты в ПЭС имеют вид локальных изменений электронной концентрации в непосредственной близости от эпицентральной области.

Механизмы формирования ионосферных предвестников землетрясений

Физические модели литосферно-атмосферно-ионосферной связи перед землетрясениями описаны в [1–3, 5]. Однако до сих пор отсутствует единое мнение о механизме формирования локальных крупномасштабных ионосферных предвестников землетрясений. Было предложено несколько основных гипотез.

1. ВГВ с периодом 1–3 ч, генерируемые нестационарным притоком литосферного газа в атмосферу перед землетрясением [6]. Этот механизм может объяснить явления в ионосфере, происходящие на больших расстояниях от эпицентра землетрясения.

2. ВГВ с периодом от единиц до десятков минут [7]. Предполагается, что эти волны могут возникать при подготовке землетрясения, а их вертикальное распространение обеспечивает локальность ионосферных предвестников землетрясений в эпицентральной области.

3. Сейсмогенное электрическое поле с амплитудой от единиц до десятков мВ/м [2, 8], связанное с вертикальным турбулентным переносом заряженных аэрозолей, инжектируемых в атмосферу, и радиоактивных веществ (изотопов радона). Проникновение электрического поля из литосферы в ионосферу перед землетрясениями рассматривалось в [2].

4. Аномальные электромагнитные поля и эмиссии [9]. Этот механизм не может приводить к необходимым изменениям из-за малой интенсивности литосферных радиоэмиссий [5].

Из сказанного следует, что в качестве механизмов формирования крупномасштабных ионосфер-

ных предвестников, локализованных в эпицентральной области, могут рассматриваться мелкомасштабные ВГВ и/или сейсмогенные электрические поля в ионосфере Земли, что также отмечается в [5].

Постановка задачи

В [10] было высказано предположение, что наиболее вероятным механизмом формирования возмущений ПЭС перед землетрясениями является вертикальный перенос плазмы F2-области ионосферы под действием зонального электрического поля. Сильными аргументами в пользу этой гипотезы являются магнитная сопряженность ионосферных предвестников и эффекты в экваториальной аномалии, развитие которой контролируется зональным электрическим полем. Анализ результатов модельных расчетов [11] также говорит в пользу этой гипотезы. Каким же образом эти зональные электрические поля появляются в ионосфере перед землетрясениями? Возможны два варианта: проникновение сейсмогенных электрических полей в ионосферу и генерация зонального электрического поля мелкомасштабными ВГВ. Воспользовавшись этими гипотезами, мы провели численные эксперименты для воспроизведения наблюдаемых изменений в ионосфере перед высоко-, средне- и низкоширотными землетрясениями.

Расчеты были выполнены на модифицированной ГСМ ТИП [12, 13]. Были рассмотрены два не зависящих друг от друга варианта задания сейсмогенных источников. Они задавались в эпицентральной области в виде дополнительных восточных электрических полей или мелкомасштабных ВГВ, которые не менялись в течение 24 ч. При этом рассматривалась эпицентральной область размером 10° по широте и 30° по долготе.

Источники дополнительного восточного электрического поля в околоэпицентральной области задавались согласно [11] на высоте 175 км в виде положительных и отрицательных потенциалов в 10 кВ для средне- и высокоширотных землетрясений и 5 кВ для низкоширотного землетрясения. ВГВ с периодом 10 мин и амплитудой 10 м/с задавались на нижней границе термосферы (на высоте 80 км) по формулам, приведенным в [14].

Результаты расчетов

Мы рассмотрели четыре сильных землетрясения, для которых экспериментально было показано существование их ионосферных предвестников.

1. Землетрясение на Аляске 27 марта 1964 г.

Это землетрясение стало одним из первых, на которое обратили серьезное внимание исследователи ионосферы [15]. Оно проходило на фоне достаточно спокойных геомагнитных условий. На рис. 1 показаны экспериментальные данные суточных вариаций критической частоты F2-слоя ионосферы, f_0F2 над ст. Anchorage перед землетрясением и для тех же дат следующего года [16]. На рис. 2 показаны суточные вариации f_0F2 над ст. Anchorage, рассчитанные при задании дополнительного восточного электрического поля и ВГВ, а также без дополнительных сейсмогенных источников. Можно отметить хорошее сходство положительных эффектов f_0F2 в модельных расчетах и эксперименте. Дневные эффекты в f_0F2 больше в расчетах с ВГВ, а ночные – в расчетах с восточным электрическим полем.

Вариации ПЭС перед этим землетрясением являются характерными для положительных ионосферных предвестников среднеширотных землетрясений [4]. Сумма K_p в течение двух недель до землетрясения не превышала 20. На рис. 3 показаны ре-

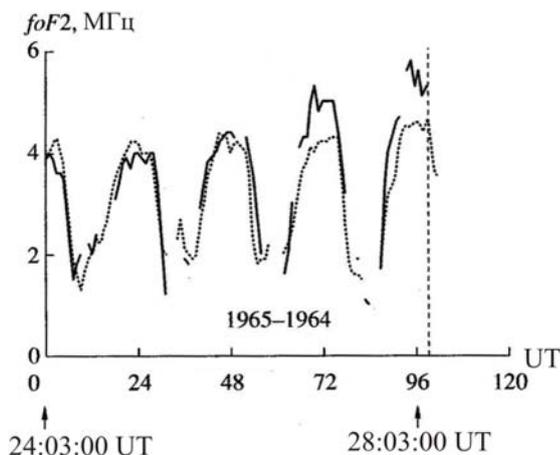


Рис. 1. Данные наблюдений перед землетрясением в Anchorage (толстая линия) и медианные значения (пунктир).

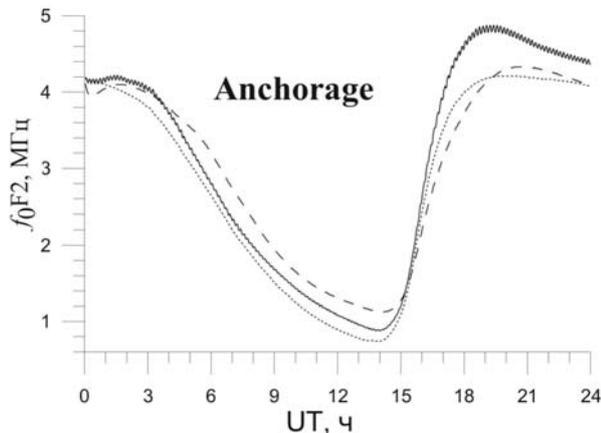


Рис. 2. Результаты расчетов для Anchorage при задании зонального электрического поля (штриховая) и ВГВ (сплошная) и фоновые значения (пунктир).

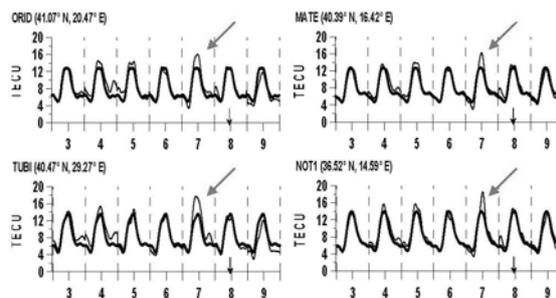


Рис. 3. GPS ПЭС вблизи эпицентра землетрясения в Греции. Медианные значения (тонкая линия), перед землетрясением (толстая линия).

зультаты наблюдений суточных вариаций ПЭС над ближайшими к эпицентру GPS-станциями и средние значения за этот период.

2. Землетрясение в Греции 8 января 2006 г.

За день до землетрясения наблюдается anomalous поведение суточной вариации на всех станциях. Аномалия проявляется в виде повышения ПЭС в суточном ходе в дневные часы, которое достигает 5.5 TECU и более чем в 2 раза превышает уровень нормальной варируемости день ото дня. На рис. 4 показаны результаты расчетов суточной вариации ПЭС над ст. Рим, полученные при задании дополнительного восточного электрического поля и ВГВ, а также без дополнительных сейсмогенных источников. Видно, что электрическое поле вызывает положительное возмущение ПЭС, большее по величине, чем ВГВ. При этом эффекты обоих дополнительных сейсмогенных источников хорошо согласуются с экспериментом.

3. Землетрясение вблизи Vanimo 16 июля 1980 г.

Экспериментальные данные f_0F2 над ст. Vanimo, полученные перед сильным землетрясением на островах Новой Гвинеи [17], представлены на рис. 5. Видно уменьшение f_0F2 за двое суток перед землетрясением. На рис. 6 показаны результаты расчетов над станцией Vanimo с заданием дополнительного восточного электрического поля, которые хорошо согласуются с наблюдениями. Это в очередной раз подтверждает гипотезу о зональных электрических полях в ионосфере, появляющихся в эпицентральных областях за несколько суток до сильных землетрясений.

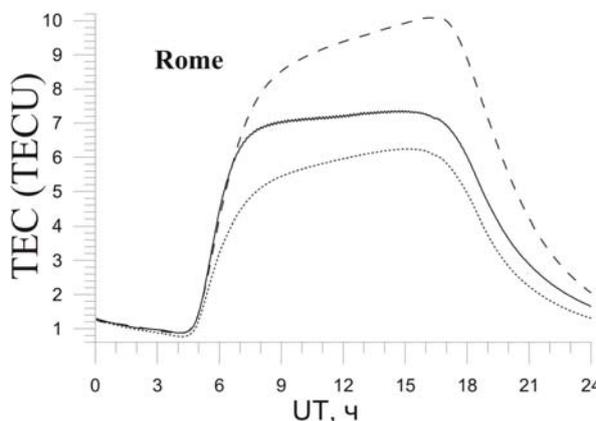


Рис. 4. Результаты расчетов для ст. Рим. Фоновые значения (штриховая), с учетом ВГВ (сплошная) и зонального электрического поля (пунктирная).

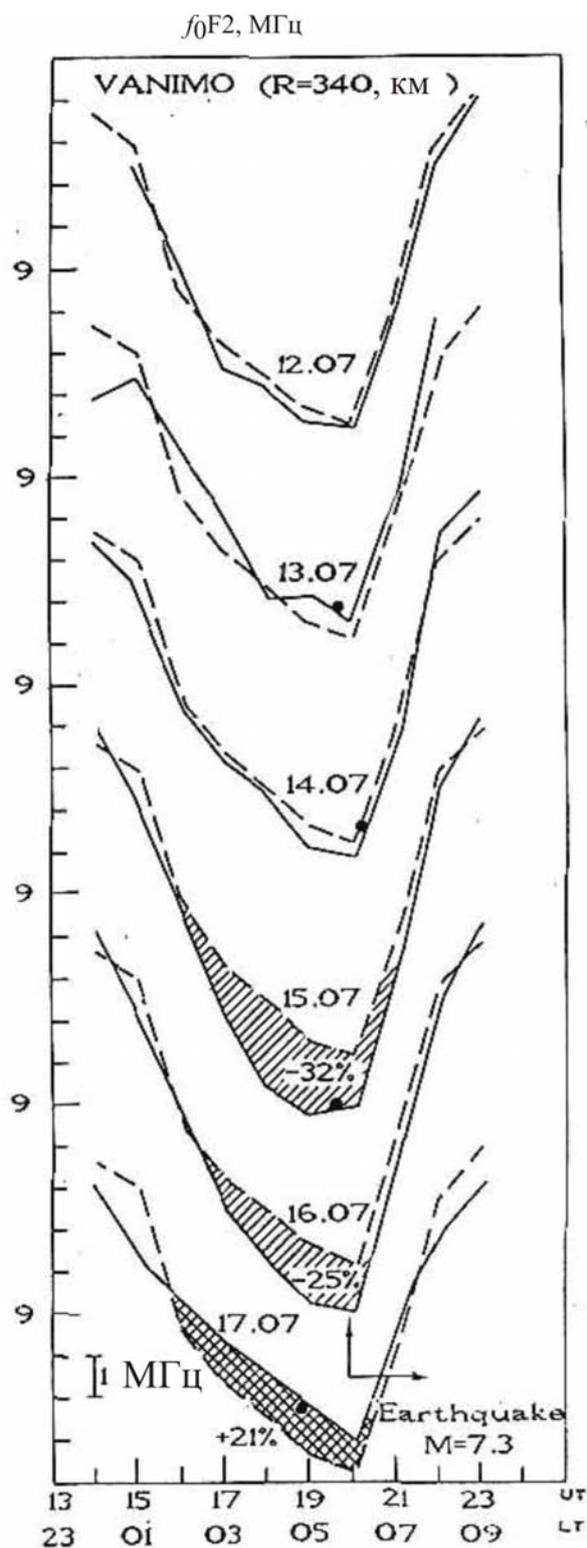


Рис. 5. Данные ионозонда над ст. Vanimo (сплошная) перед землетрясением и медианные значения (штриховая).

4. Землетрясение в Wenchuan 12 мая 2008 г.

Это землетрясение произошло в спокойных геомагнитных условиях. За трое суток до землетрясения ионозонд над ст. Wuhan зафиксировал рост N_mF2 в 2 раза по отношению к средним значениям, что видно из рис. 7 [18]. Рост N_mF2 3 мая связан с небольшой суббурей, имевшей место в этот день. На рис. 8 показаны результаты расчетов с ВГВ, согласующиеся с наблюдениями.

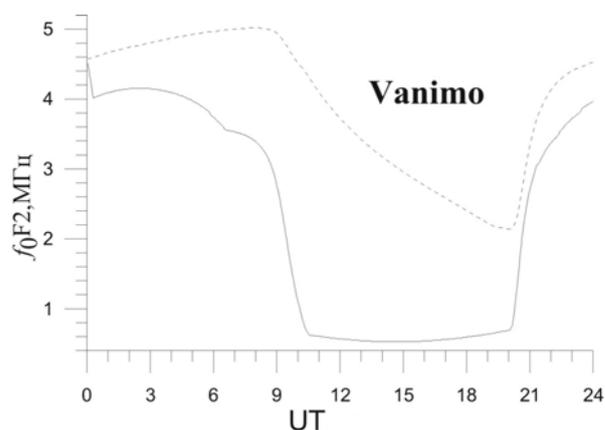


Рис. 6. Результаты расчетов над ст. Vanimo с учетом зонального электрического поля (сплошная) и фоновые значения (пунктирная).

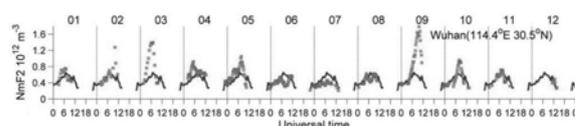


Рис. 7. Данные наблюдений над ст. Wuhan перед сильным землетрясением в Wenchuan.

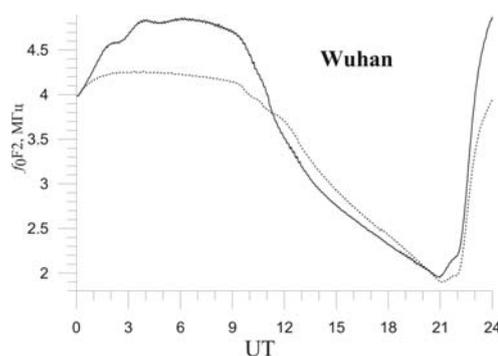


Рис. 8. Результаты модельных расчетов над ст. Wuhan с учетом ВГВ (сплошная) и фоновые значения (пунктирная).

Заключение

Анализ ранее выполненных исследований показал, что формирование локальных крупномасштабных ионосферных предвестников сильных землетрясений в ПЭС в окрестности эпицентра можно объяснить только атмосферным электричеством и мелкомасштабными ВГВ. Модельные расчеты с заданием этих дополнительных сейсмогенных источников подтверждает сделанный вывод. Для понимания механизмов формирования мелкомасштабных ВГВ и/или зональных электрических полей в эпицентральной области необходимо проведение более тщательных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
2. Pulinet S.A., Boyarchuk K. Ionospheric precursors of earthquakes. Berlin: Springer. 2004. 315 p.
3. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Мейстер К.-В., Липеровская Е.В. Физические модели связей в системе литосфера-атмосфера-ионосфера перед землетрясениями // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. С. 831-843.
4. Zakharenkova I.E., Shagimuratov I.I., Krankowski A., Lagovsky A.F. Ionospheric precursors observed during the

- Mediterranean region earthquakes // Proc. 18th Int. Wrocław Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility. 2006. P. 85–90.
5. Hayakawa M. VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes // Sensors. 2007. V. 7. P. 1141–1158.
6. Перцев Н.Н., Шалимов С.Л. Генерация атмосферных гравитационных волн в сейсмически активном регионе и их влияние на ионосферу // Геомагнетизм и аэронавигация. 1996. Т. 36. С. 111–118.
7. Mareev E.A., Iudin D.I., Molchanov O.A. Mosaic source of internal gravity waves associated with seismic activity // Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere / Ed. M. Hayakawa and O. A. Molchanov. TERRAPUB, Tokyo, Japan. 2002. P. 335–342.
8. Сорокин В.М., Чмырев В.М. Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф // Геомагнетизм и аэронавигация. 2002. Т. 42. С. 821–830.
9. Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere / Ed. M. Hayakawa and O.A. Molchanov. TERRAPUB, Tokyo, Japan. 2002. 313 с.
10. Намгаладзе А.А. О возможных физических механизмах формирования ионосферных предвестников землетрясений // Материалы Международной научно-технической конференции «Наука и образование–2007», Мурманск: МГТУ. 2007. С. 358–362.
11. Намгаладзе А.А., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаренкова И.Е. Физический механизм и математическое моделирование ионосферных предвестников землетрясений, регистрируемых в полном электронном содержании // Геомагнетизм и аэронавигация. 2009. Т. 49. С. 267–277.
12. Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В. и др. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 1990. Т. 30. С. 612–619.
13. Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – динамо-поле и экваториальный электроджет // Геомагнетизм и аэронавигация. 2006. Т. 46. С. 485–494.
14. Klimentko M.V., Klimentko V.V., Karpov I.V., Zakharenkova I.E. Generation of zonal electric fields in the Earth's ionosphere by internal gravity waves prior strong middle-latitude earthquakes // Int. J. Remote Sensing. 2009 (in press).
15. Davies K., Baker D.M. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964 // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 2251–2253.
16. Херай В.В., Легенька А.Д., Пулинец С.А., Ким В.П. Изменения в F2-области ионосферы перед катастрофическим землетрясением на Аляске 28.03.1964 г. по данным наземных станций вертикального зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. 2002. Т. 42. С. 360–365.
17. Pulnits S.A., Legen'ka A.D., Karpachev A.T., Kochenova N.A., Migulin V.V., Oraevsky V.N., Fligel M.D. The earthquake prediction possibility on the base of topside sounding data // Preprint IZMIRAN, M., 1981. № 34a(981).
18. Zhao B., Wang M., Yu T., Wan W., Le J., Liu L., and Ning B. Is an unusual large enhancement of ionospheric electron density linked with the 2008 great Wenchuan earthquake // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. doi:10.1029/2008JA013613.

Западное отделение ИЗМИРАН, Калининград