

УДК 551.510.535+519.25

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ПОЛНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ В ИОНОСФЕРЕ

Е.С. Хлыбов, Б.Г. Гаврилов, Д.В. Егоров

В статье рассматривается возможность использования карт полного электронного содержания (ПЭС), построенных по данным международной сети двухчастотных GPS-приемников, в качестве инструмента для анализа ионосферных возмущений, вызванных сейсмическими событиями.

Существуют свидетельства того, что перед наступлением сейсмической активности происходит поступление приземных электрических полей в атмосферу, эмиссия ионов от земли, влияющих на ионосферную проводимость. Сообщается, что наблюдались вариации электронной плотности [1] и ПЭС ионосферы за несколько дней до сейсмических событий, изменение параметров электромагнитных волн и величины электрического поля в ионосфере и магнитосфере в области землетрясения [2]. Некоторые авторы считают, что возможно обратное воздействие атмосферы, ионосферы и геомагнитных возмущений на литосферу.

По данным [3–5], изменчивость ионосферы над очаговой зоной возрастает за 1–10 сут до сильных землетрясений. Однако нужно учитывать, что используемые обычно методы наблюдений не позволяют проанализировать пространственно-временные характеристики событий. Наблюдения с помощью ионозондов, радаров и спутниковой аппаратуры дают возможность проследить эволюцию ионосферных неоднородностей либо во времени, либо в пространстве. В этом смысле значительные преимущества по сравнению с другими методами исследования ионосферы дают наблюдения за ионосферой, осуществляемые с помощью международной сети приемников навигационной системы GPS.

В ряде случаев информацию о корреляции ионосферных и сейсмических возмущениях удастся получить и с использованием данных одночастотного приемника GPS, полученных в одной точке наблюдения на значительном расстоянии от очага землетрясения [6].

Ниже представлены результаты анализа 20 землетрясений начала 2005 г. с магнитудой около 6. Особое внимание было уделено землетрясению вблизи о. Суматра 28 марта 2005 г., имевшее магнитуду 8.7.

Для исследования ионосферных возмущений при каждом землетрясении были использованы данные в формате Ionex полученные в центре анализа орбит Бернского университета CODE.

Для построения карты ПЭС в CODE использовались данные более 150 станций IGS, оборудованных двухчастотными приемниками GPS. Каждый приемник измеряет расстояние, которое прошел сигнал от спутника GPS или GLONAS до антенны приемника на двух частотах. Разность измеренных расстояний между спутником и приемником пропорциональна коэффициенту преломления в среде, ко-

торый зависит от ПЭС.

Практически каждый приемник способен наблюдать одновременно от четырех до двадцати четырех спутников. Обычно на широте Москвы на открытой местности их видно около десяти. Таким образом, вокруг приемника можно одновременно знать состояние ионосферы в десяти направлениях, а, так как спутники непрерывно движутся, то за два часа накапливаются данные практически со всех направлений в радиусе 1000 км.

Обычно для анализа используется так называемое вертикальное полное электронное содержание (ВПЭС). Значения ВПЭС получаются путем проецирования данных ПЭС по исходному направлению на вертикаль, проходящую через слой F2 ионосферы в точке его пересечения лучом спутник–приемник. Это связано с тем, что слой F2 дает до 90 % ПЭС. Затем данные по ВПЭС экстраполируются на узлы решетки 2×4 град., и такая карта сохраняется в формате Ionex.

По этим данным нами построены карты ПЭС с решеткой 10×10 град. и двухчасовой периодичностью. Анализ показал, что исследование сетки с таким пространственным разрешением достаточно для обнаружения ионосферных неоднородностей, которые могут быть связаны с сейсмическими событиями масштаба крупных землетрясений [6]. Значения ПЭС в узлах решетки за 28 дней, предшествовавших землетрясению, сортировались по возрастанию, и в полученном списке выбирался четырнадцатый элемент. Таким образом, получалась 28-дневная усредненная медианная карта ПЭС на планете. Затем медианные карты сравнивались с соответствующими картами ПЭС в дни до, во время, и после землетрясения. В результате сравнения были получены двухчасовые карты вариаций ПЭС. Их анализ показал, что в ионосфере Земли непрерывно возникают и исчезают достаточно обширные по своим масштабам неоднородности. Значение электронного содержания колеблется от 10–50 ед. ПЭС (1 ед. ПЭС соответствует значению 10^{16} электрон/м²). Нередко при сильных гелиогеофизических возмущениях отклонение от медианного значения электронной концентрации превышает 100 %. Это затрудняет анализ состояния ионосферы, так как уровень превышения плотности электронов, вызванного воздействием землетрясения, над фоном по современным представлениям составляет не более 20–25 %. Очевидно, выделение на таком фоне любых относительно небольших флуктуаций может носить случайный характер, не связанный с литосферными процессами.

С другой стороны, методы GPS позволяют оценить даже малые отклонения параметров ионосферы от регулярного состояния в данной точке пространства в данное время дня и года, а также проследить как временную, так и пространственную динамику этих состояний.

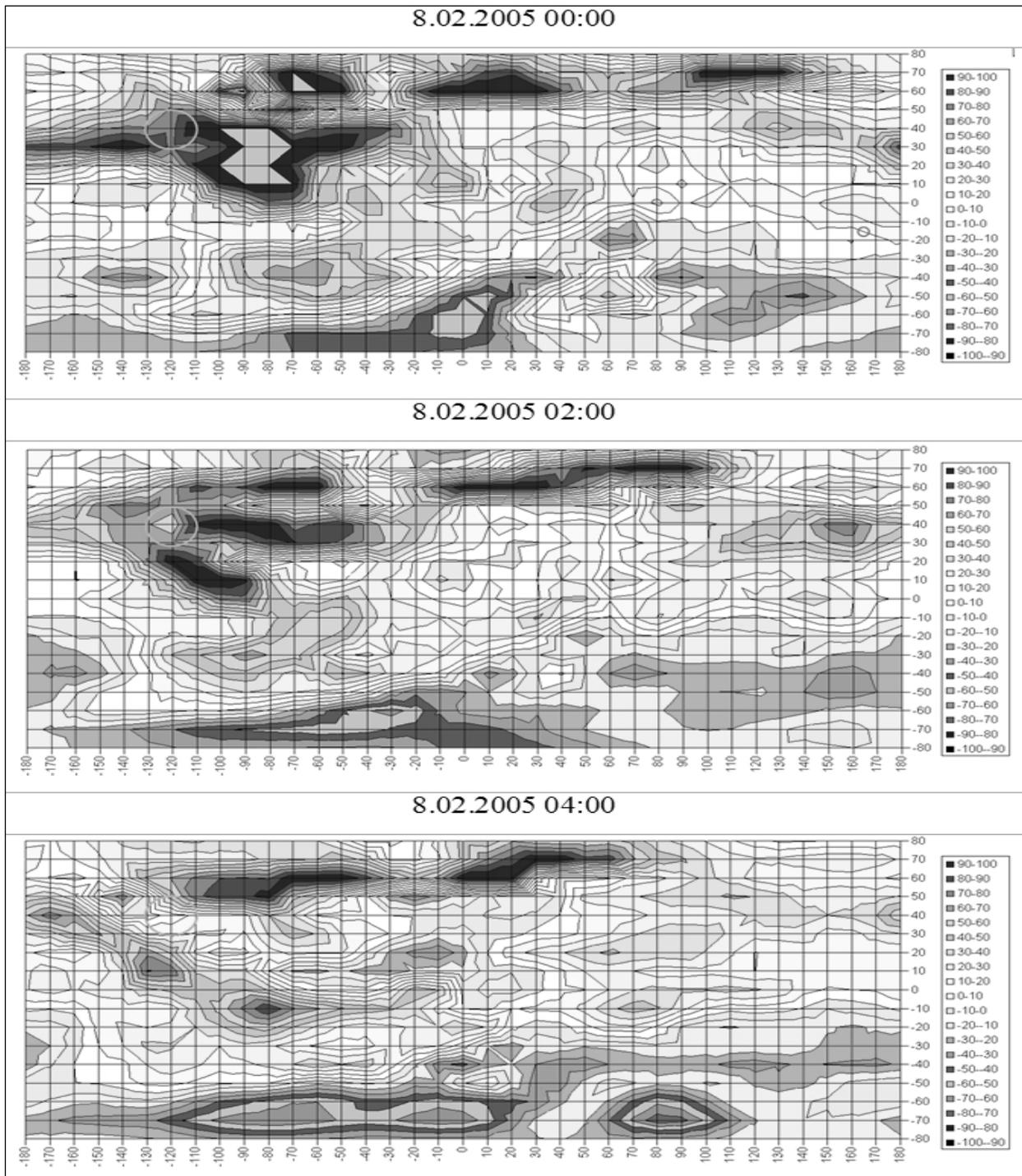


Рис. 1. Распределение отклонения от медианного значения полного электронного содержания ионосферы 8 февраля 2005 г. в 0, 2 и 4 UT. Кружком отмечен район Калифорнии, где произошли землетрясения в 00:25 UT и 01:57 UT. Шкала справа показывает амплитуду вариаций ПЭС в процентах от среднего значения за 28 предшествующих дней.

На рис. 1 показаны карты распределения вариаций ПЭС ионосферы 8 февраля 2005 г. Кружком отмечен район Калифорнии, где в 00:25 UT и 01:57 UT произошли землетрясения. В 0 ч, т. е. до обоих землетрясений, в районе регистрируется положительная ионосферная буря, где плотность ионосферы на 70–90 % выше фоновых (медианных) значений. В 2 ч в центре района, совпадающего с областью очагов землетрясений, видно локальное понижение плотности ионосферы на 50–60 %. В 4 UT, т. е. через два часа после второго землетрясения, локальное ионосферное возмущение пропадает, и область ионосфе-

ры над очагом не имеет заметных отличий от окружающих районов. Однако представленное выше совпадение ионосферной бури и очага землетрясения может быть обнаружено только в режиме постобработки при наличии априорной информации о месте расположения очага.

На рис. 2 показано распределение отклонений от медианного значения ПЭС ионосферы 27 и 28 марта 2005 г. Кружком отмечен район Индонезии, где 28 марта в 16:09 UT произошло землетрясение с магнитудой 8.7. В 16 UT (за сутки до события) на границе района будущего землетрясения наблюдается

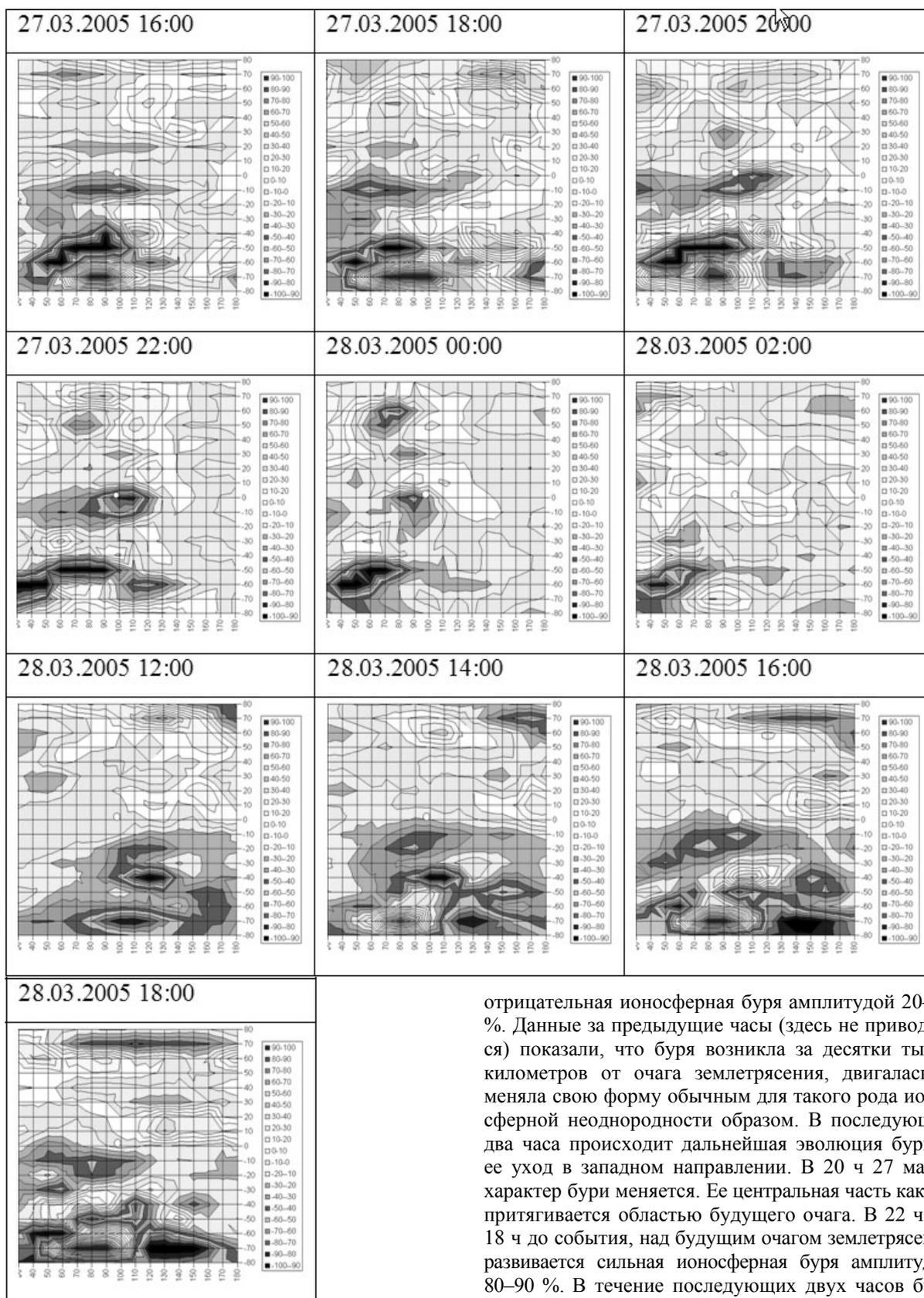


Рис. 2. Распределение отклонений от медианного значения полного электронного содержания ионосферы 27 и 28 марта 2005 г. Кружком отмечен район Индонезии, где в 16:09 UT произошло землетрясение с магнитудой 8.7. Шкала справа показывает амплитуду вариаций ПЭС в процентах от медианного значения за 28 предыдущих дней. Над каждой панелью показано время, для которого построено распределение ПЭС.

отрицательная ионосферная буря амплитудой 20–30 %. Данные за предыдущие часы (здесь не приводятся) показали, что буря возникла за десятки тысяч километров от очага землетрясения, двигалась и меняла свою форму обычным для такого рода ионосферной неоднородности образом. В последующие два часа происходит дальнейшая эволюция бури и ее уход в западном направлении. В 20 ч 27 марта характер бури меняется. Ее центральная часть как бы притягивается областью будущего очага. В 22 ч, за 18 ч до события, над будущим очагом землетрясения развивается сильная ионосферная буря амплитудой 80–90 %. В течение последующих двух часов буря разваливается. В 12 ч (за четыре часа до события) примерно в двух тысячах километров от зоны будущего очага возникает новая буря, которая снова имеет тенденцию приближаться к очагу землетрясения. В момент времени, наиболее близкий к землетрясению, над очагом наблюдается отрицательная буря амплитудой 30–40 %. По характеру это возмущение близко показанному на рис. 1. После земле-

трясения бура ослабевает и еще через четыре часа полностью разваливается.

Формально, результаты приведенного выше анализа (появление и распад ионосферного возмущения за сутки (несколько суток) до землетрясения, новое возмущение за 10–20 ч до события, распад после землетрясения) близки к предсказываемому другими исследователями поведению ионосферы над очагом землетрясения. Однако, несмотря на то, что приведенные данные относятся к одному из рекордных по величине сейсмических событий, нельзя однозначно утверждать, что зарегистрированные ионосферные неоднородности связаны с подготовкой очага землетрясения. Аналогичные исследования, выполненные для других землетрясений, не показали корреляции ионосферных возмущений с сейсмическими событиями.

Таким образом, проведенные исследования не дают основания уверенно утверждать, что данные, полученные с использованием карт вариаций ПЭС, могут давать однозначную информацию о сейсмической активности в заданном регионе. В то же время совместное использование описанного метода с другими методами экспериментальных наблюдений представляется перспективным для изучения литосферно-ионосферных связей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hayakawa M. Electromagnetic phenomena associated with earthquakes // Bulletin of the University of Electro-Communications. 2000. 13–1. P. 1–6.
2. Molchanov O., Hayakawa M., Rafalsky V. Penetration characteristics of electromagnetic emissions from an underground seismic source into the atmosphere, ionosphere, and magnetosphere // JGR. 1995. V. 106, N A2. P. 1691–1712.
3. Ouzounov D., Freund F. Ground-atmosphere-ionosphere interactions related to earthquakes: How can earthscope help? // Earthscope Workshop: Making and Breaking a Continent. REPORT SNOWBIRD, UT, 2001.
4. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
5. Liu Y., Chuo Y.J., Pulinets S.A., Tsai H.F. A study on the TEC perturbations prior to the Rei-Li, Chi-Chi and Chia-Yi earthquakes // Geophys. Res. Lett. 2000.
6. Гаврилов Б.Г., Горелый К.И., Егоров Д.В. и др. Результаты исследования взаимосвязи сейсмических событий, геомагнитных возмущений и состояния ионосферы в обсерватории Михнево // Сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: Геос, 2005. С. 209–241.

*Институт динамики геосфер РАН, Москва,
khlybov@idg.chph.ras.ru*