

Интеллектуальные технологии автоматического распознавания ионосферных предвестников землетрясений

Пулинец С.А.¹, Давиденко Д. В.² Титова М.А.¹

¹ ФГБУ Науки ИКИ РАН, г. Москва, Россия

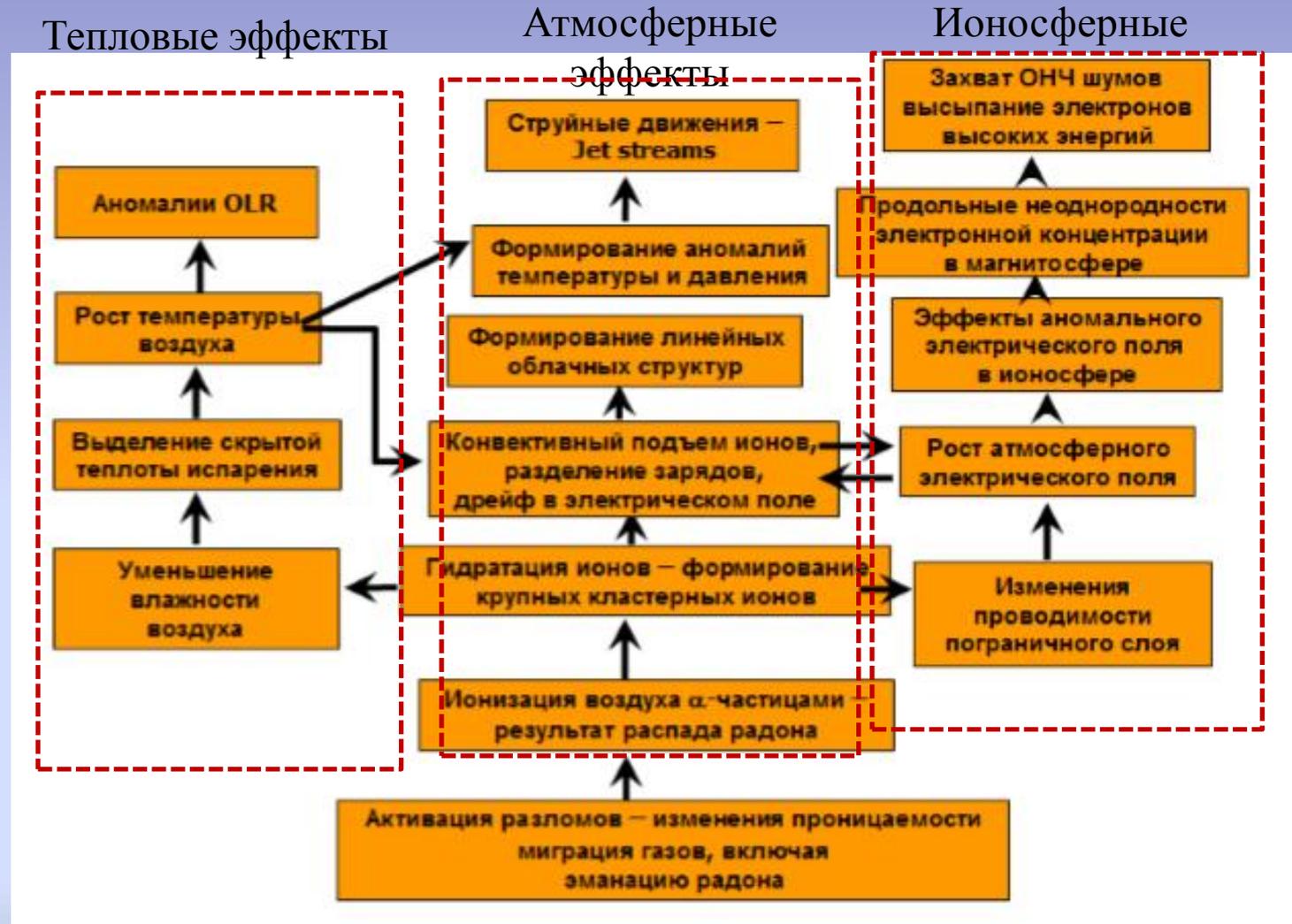
² ПАО "РКК "Энергия", г. Королёв, Россия

Ионосфера Земли является открытой системой и служит индикатором различных процессов в системе геосфер

Оперативный мониторинг параметров ионосферы является актуальной задачей, особенно с целью краткосрочного прогноза землетрясений

Машинное обучение — наиболее активно развивающийся в последние годы раздел теории искусственного интеллекта — направлен на создание алгоритмов, способных обучаться, выделять значимые признаки (параметры модели) и даже адаптировать свою структуру на основании обрабатываемой выборки данных в режиме реального или близкого к реальному времени.

Физическая модель LAIC (Lithosphere, Atmosphere, Ionosphere, Coupling)

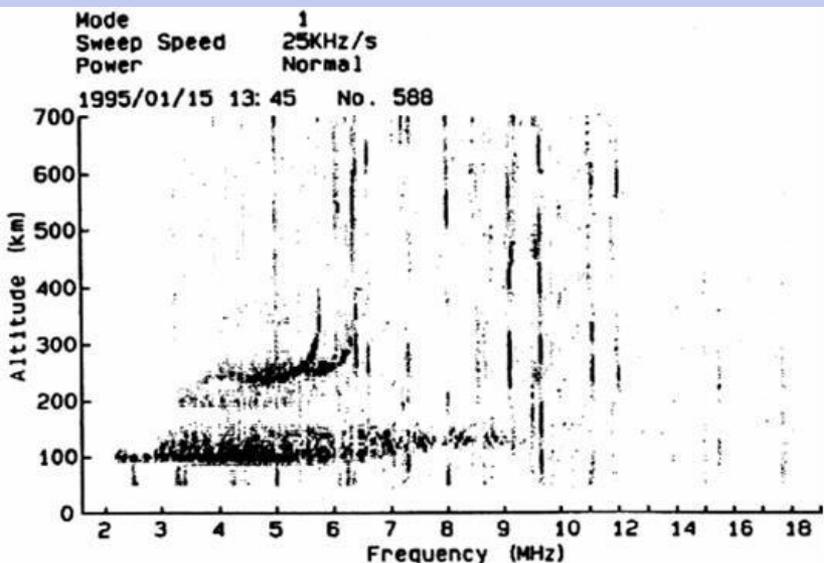


Схематическое представление модели комплексных связей в системе литосфера-атмосфера-ионосфера-магнитосфера [Пулинец и Узунов, 2010; Pulinets and Ouzounov, 2011]

Технологии идентификации ионосферных предвестников

Обнаружение аномальных возмущений в области E перед землетрясениями

Одним из основных признаков готовящегося землетрясения является формирование над зоной подготовки землетрясения аномальных спорадических Es-слоев, отличающихся от стандартных Es-слоев, прежде всего своей высокой электронной концентрацией и высотой расположения (аномальные спорадические слои образуются на высоте 120 км).



крупномасштабная турбулизация (сотни метров) выражается в Es-рассеянии (диффузность следов на ионограммах), мелкомасштабная (десятки метров) оценивается коэффициентом полупрозрачности слоя $fbEs$ – формула

$$fbEs = (foEs - fbEs) / fbEs$$

где $foEs$, $fbEs$ – соответственно, предельная частота и частота экранирования спорадического слоя в (МГц).

Рисунок. Ионограмма 2-ое суток до землетрясения с магнитудой $M=7.8$, произошедшего в Кобе (Япония) 17 января 1995 г. *Ondoh, 2000]

Для большей информативности определять среднее суточное значение коэффициента полупрозрачности Es-слоя согласно формуле:

$$\Delta fbEs_{cp} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta fbEs_i$$

k – количество значений коэффициента полупрозрачности Es-слоя за сутки. При этом расчет коэффициента полупрозрачности Es-слоя $fbEs$ выполнялся только для значений $foEs > fbEs$.

По данным мониторинга было обнаружено регулярное уменьшение коэффициента полупрозрачности за сутки до землетрясения и его последующее резкое увеличение в случае, если станция находилась внутри зоны подготовки землетрясения.

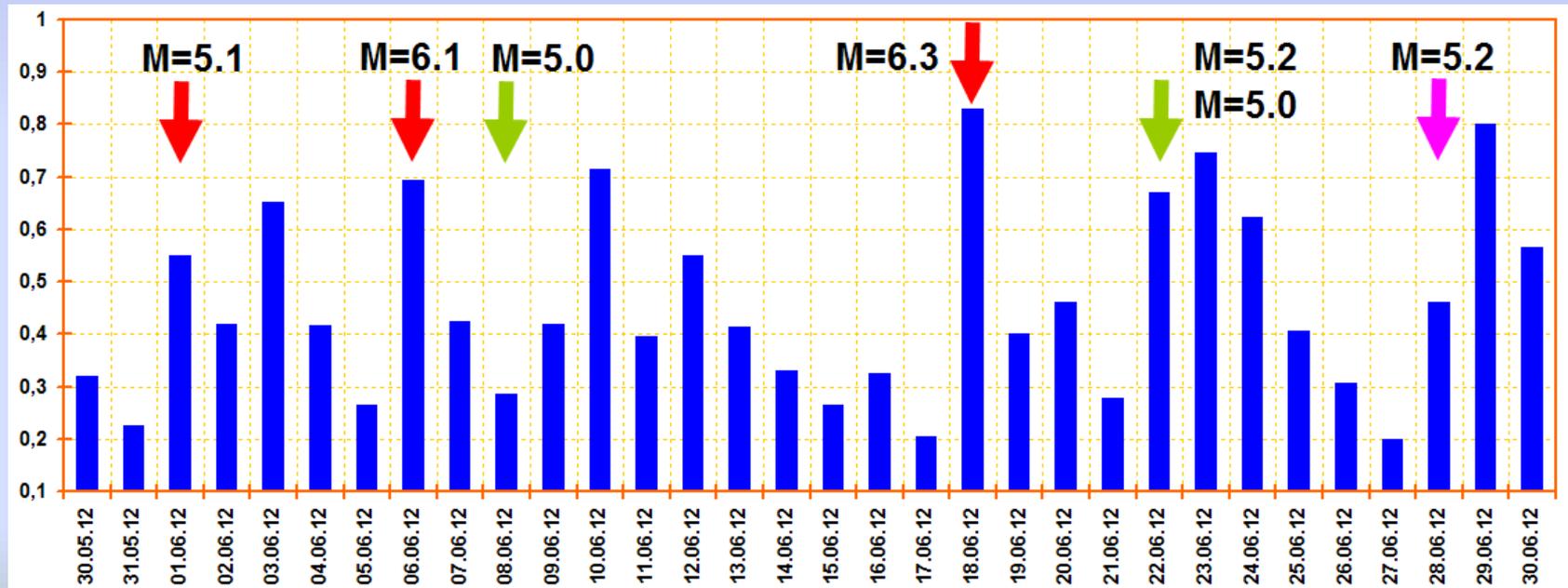


Рисунок. Серии землетрясений в Японии для июня 2012

Обнаружение аномальных возмущений в области F перед землетрясениями

Для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений производится анализ данных по критической частоте слоя F2 – f_oF2 , т.к. она непосредственно связана с концентрацией электронов на высоте главного максимума ионосферы.

$$N_m F 2 = 1.24 \cdot 10^{10} (f_o F 2)^2$$

где $N_m F 2$ – электронная концентрация на высоте главного максимума ионосферы (эл./м³), $f_o F 2$ – критическая частота слоя F2 (МГц).

Обработку значений критической частоты в реальном масштабе времени предлагается проводить по следующим апробированным методикам:

- оценивать отклонение текущего значения критической частоты от скользящего фонового значения

$$df_o F 2 = 100 \cdot \frac{(f_o F 2 - f_o F 2_{cp})}{f_o F 2_{cp}}$$

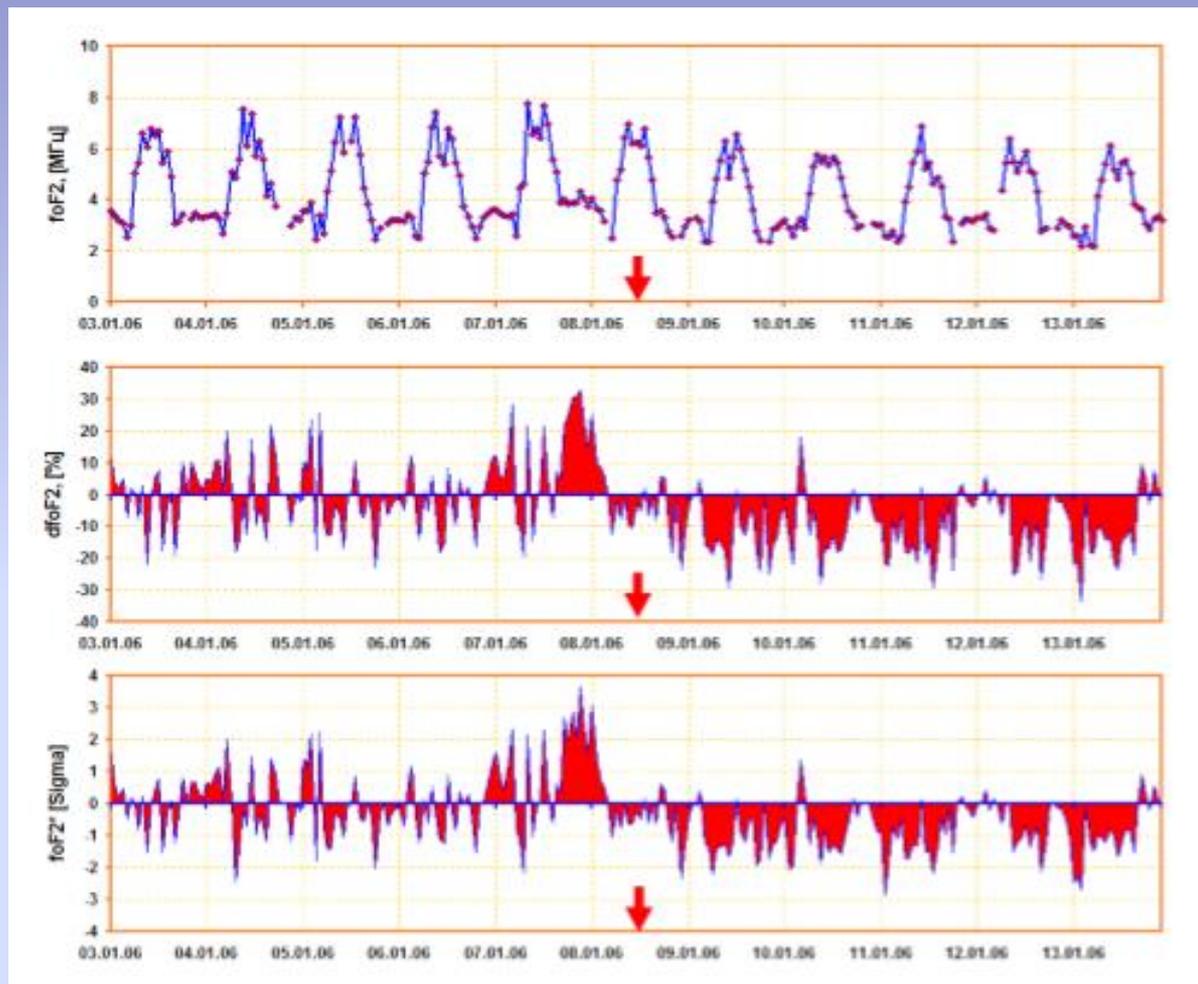
$f_o F 2_{cp}$ – скользящее среднее значение критической частоты

- проводить расчет нормализованного параметра $f_o F 2$

$$df_o F 2 \cdot \sigma = \frac{(f_o F 2 - f_o F 2_{cp})}{\sigma_{f_o F 2}}$$

$\sigma_{f_o F 2}$ – скользящее стандартное отклонение критической частоты

Пример обнаружение аномальных возмущений по критической частоте слоя F2



Вариации значений критической частоты (ионозонд, Афины)

Землетрясение с магнитудой $M=6.7$ произошло в Греции 8 января в 11:34 UT, момент землетрясения на рисунке отмечен красной стрелкой.

Практически за сутки до момента землетрясения – 7 января – происходит значительное увеличение значений критической частоты более 20 % ($>2\sigma$) в условиях спокойной гелиогеомагнитной обстановки.

Продолжительность подобного аномального увеличения составила более 12 часов.

Восстановление значений вертикального ПЭС по данным приемников спутниковых навигационных систем GPS/ГЛОНАСС

Комбинация регистрируемых фаз L_1 и L_2 используется в методе измерения ПЭС (англ. total electron content – TEC)

$$TEC = \frac{1}{40.308} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \cdot [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + K + nL],$$

где f_1 и f_2 - рабочей частоты

- оценивать отклонение текущего значения ПЭС фонового значения

$$dTEC = 100 \cdot \frac{(TEC - TEC_{cp})}{TEC_{cp}}$$

TEC_{cp} – скользящее среднее значение, вычисленное по 15 предшествующим значениям вертикального ПЭС для того же момента времени;

- проводить расчет нормализованного параметра ПЭС

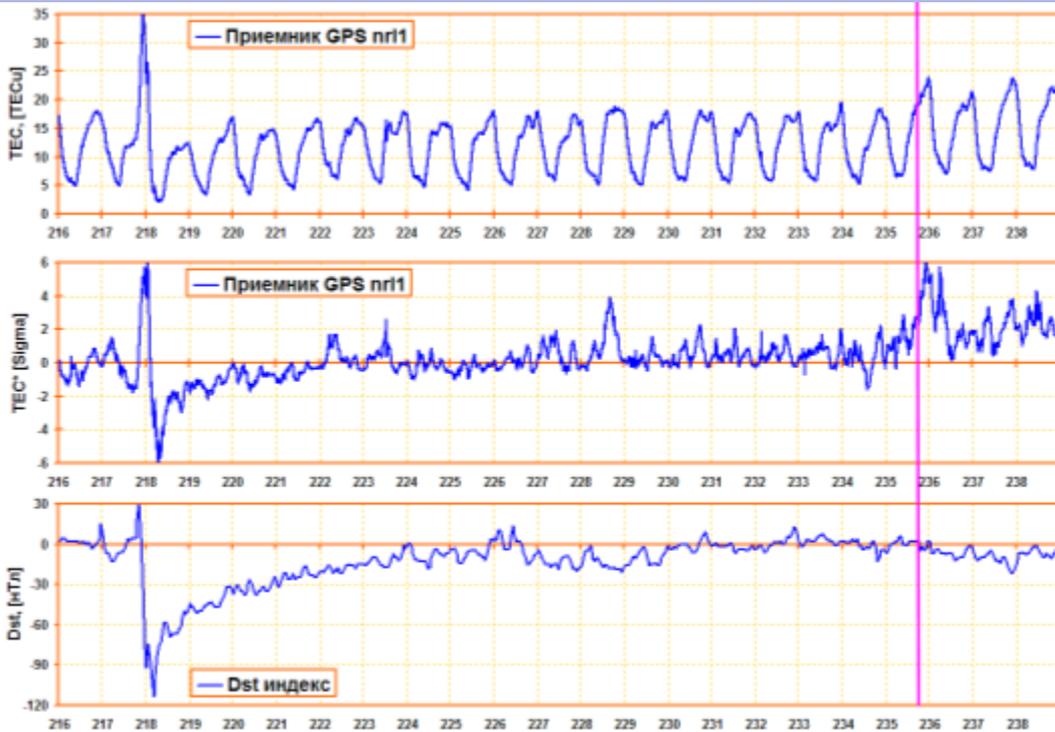
$$TEC \cdot \sigma = \frac{(TEC - TEC_{cp})}{\sigma_{TEC}}$$

σ_{TEC} – скользящее стандартное отклонение, вычисленное по 15 предшествующим значениям вертикального ПЭС для того же момента времени;

$dTEC$ и σ_{TEC} – соответственно, отклонение от фонового значения, выраженное в (%), и нормализованное значение вертикального ПЭС.

Пример обнаружение аномальных возмущений по возмущениям ПЭС

Показаны суточные вариации значений вертикального ПЭС за период с 4 по 26 августа (с 216 по 238 день) 2011 г. Момент землетрясения отмечен вертикальной розовой линией.

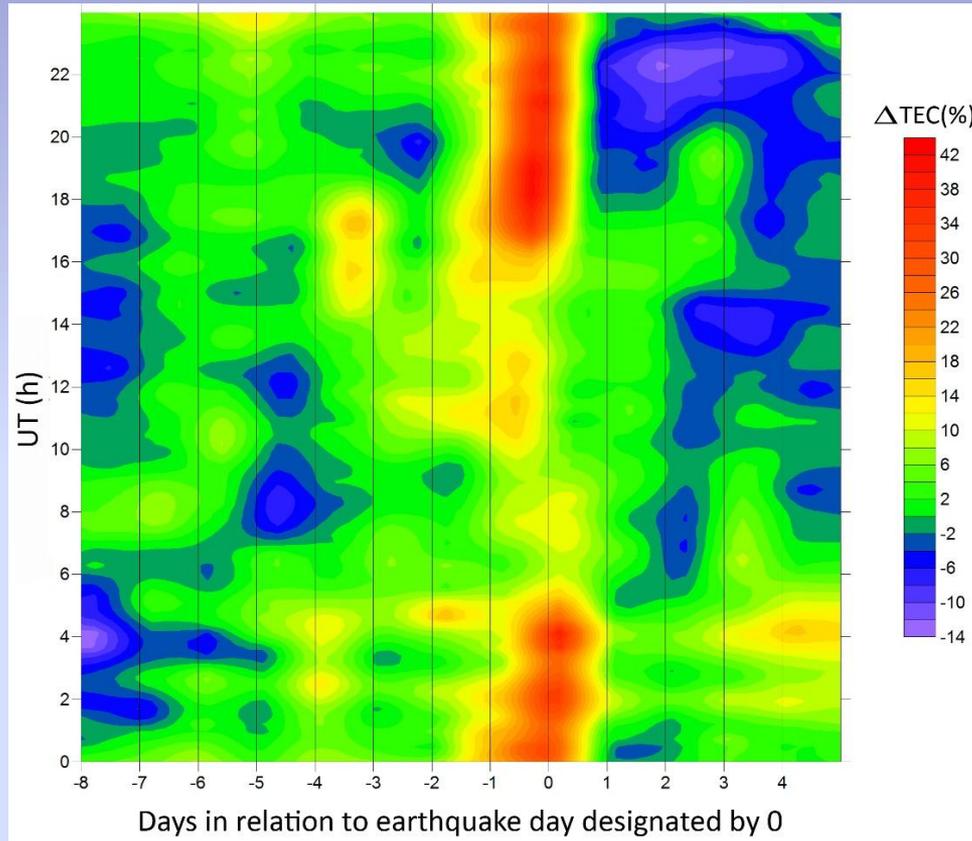


Ионосферная и геомагнитная обстановка перед землетрясением в штате Вирджиния

Анализ ионосферных аномалий, зарегистрированных перед землетрясениями средней и большой интенсивности, показал, что отклонения полного электронного содержания могут превышать 50 %, что сравнимо по интенсивности вариаций с эффектами сильных геомагнитных бурь. Продолжительность существования локализованных аномалий в ионосфере над зоной подготовки землетрясения может составлять более 12 часов. В процессе подготовки одного и того же землетрясения могут наблюдаться аномалии различных знаков (положительные и отрицательные).

Визуальное представление массивов суточных значений $dTEC$

«Маска» ионосферного предвестника землетрясения для греческого региона



Цветовая шкала - величина отклонений $dTEC$ в положительную (красным) и отрицательную (синим) стороны.

По оси абсцисс откладывались сутки, по оси ординат – время (UT).

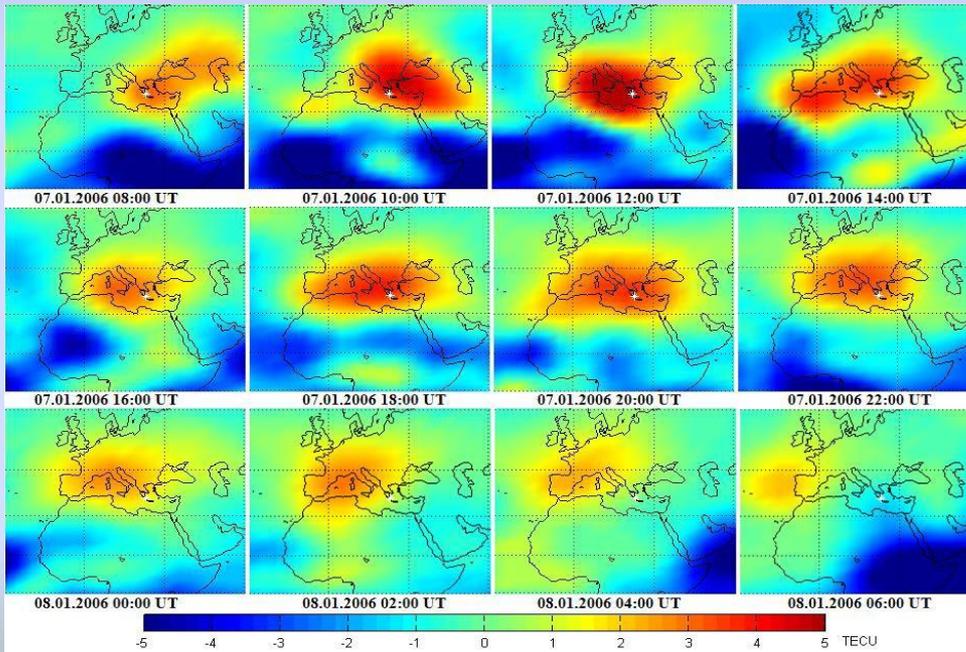
Основной особенностью предвестника является значительное увеличение ПЭС (более 20 %) в ионосфере над зоной подготовки землетрясения, проявляющееся в определенный момент времени.

Отрицательные значения на оси абсцисс соответствовали суткам до момента землетрясения, нулевые сутки соответствовали суткам, в которые произошло землетрясение, положительные – суткам после землетрясения

Картирование ионосферы с целью определения положения эпицентра будущего землетрясения

Позволяет выделять области с локальными возмущениями в ионосфере, оценивать их размер и продолжительность существования. Именно локальность аномального возмущения в ионосфере, привязанность его к положению эпицентра будущего землетрясения является основным морфологическим признаком ионосферного предвестника землетрясения

Используются данные абсолютного ПЭС, предоставляемые IGS в формате IONEX

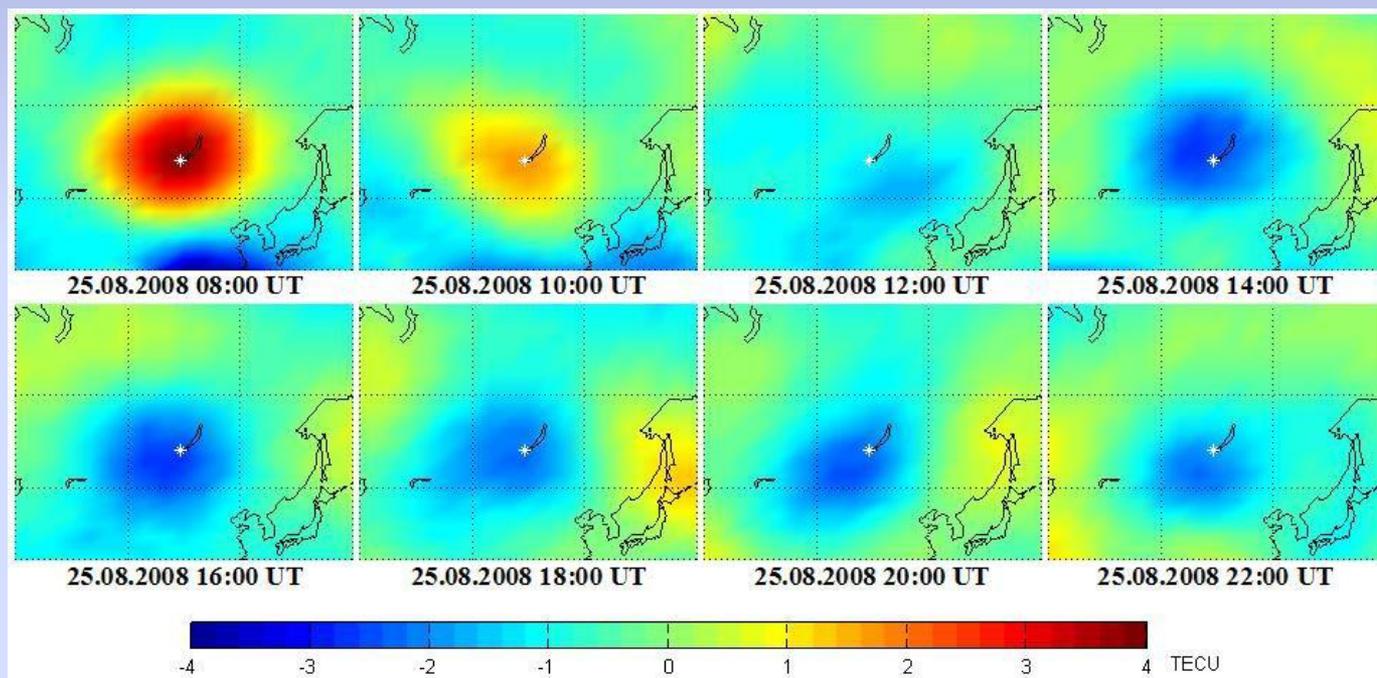


Разрешение матрицы составляет 2,5 градуса по широте и 5 градусов по долготе. Значения ПЭС рассчитываются IGS каждые 2 часа.

Регистрация положительных аномалий в ионосфере перед землетрясением с магнитудой $M=6.7$ в Греции 8 января 2006 г. в 11:34 UT [Давиденко, 2013]

Одной из особенностей ионосферного предвестника землетрясения является также смена знака ионосферного возмущения, локализованного над местом готовящегося землетрясения.

Представлена последовательность разностных карт, на которых отчетливо видно, как ионосферная аномалия изменяла свой знак, превращаясь из положительной в отрицательную.



Смена знака ионосферной аномалии перед Култукским землетрясением с магнитудой $M=6.3$ [Давиденко, 2013]

В ходе многолетних экспериментальных исследований ионосферных предвестников землетрясений [Pulinets et al., 2003; Pulinets and Boyarchuk, 2004] установлено:

- ионосферные возмущения над сейсмоактивными регионами являются локализованными, а область локализации ионосферных возмущений связана с положением готовящегося землетрясения;
- возмущение может наблюдаться также в магнитосопряженной области;
- время существования аномальных возмущений в ионосфере может превышать 14 часов;
- возмущения бывают как положительными, так и отрицательными (относительно невозмущенного уровня);
- перед одним и тем же землетрясением может наблюдаться смена знака аномального возмущения;

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ КРАТКОСРОЧНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ И СОЗДАНИЕ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В настоящее время очевидно, что краткосрочный прогноз невозможен на основании анализа какого-то одного предвестника.

Только многопараметрический мониторинг может приблизить нас к решению задачи краткосрочного прогноза землетрясений. Но выбор предвестников нельзя осуществлять по принципу «чем больше, тем лучше». В основу должна быть положена физическая модель процесса подготовки землетрясения на его финальной стадии.

В качестве такой основы разработана комплексная модель литосферно-атмосферно-ионосферных связей. Все выбранные в модели параметры атмосферы и ионосферы обнаруживают синергетическую связь, указывающую на направление развития процесса («стрела времени») и четкую пространственно-временную зависимость. Задачей современного мониторинга краткосрочных предвестников является обеспечение регистрации ключевых параметров модели.