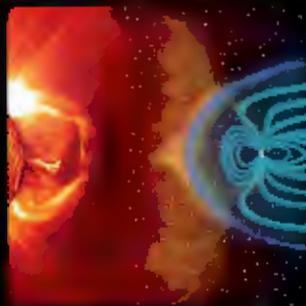


Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации  
Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу  
окружающей среды

ТРУДЫ ИНСТИТУТА ПРИКЛАДНОЙ ГЕОФИЗИКИ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА Е.К. ФЕДОРОВА

Выпуск 89



**55**

**незабываемых лет**

Москва 2011

## **Спутниковым технологиям нет альтернативы. О проблеме мониторинга природных и техногенных катастроф**

С. А. Пулинец<sup>1</sup>, Д. Узунов<sup>2</sup>

*1- Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова, г. Москва*

*2- Университет Чэпмена, Орандж, Калифорния, США*

*e-mail: pulse@ipg.geospace.ru*

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Очень часто появление новых технологий измерения различных процессов приводит не просто к улучшению качества получаемых данных, а к кардинальным изменениям в понимании самих процессов, понимании механизмов, их генерирующих, и общей взаимосвязи явлений на разных уровнях их проявления. Именно это произошло при развитии методов спутникового мониторинга различных проявлений природных и техногенных катастроф. Рассмотрим это на примере тепловых аномалий, наблюдаемых в сейсмоактивных областях перед землетрясениями. Появление инфракрасных радиометров на спутниках и измерения над сейсмоактивными областями [1] поначалу рассматривались как подтверждение известного факта наличия тепловых (или метеорологических) аномалий, обнаруженных с помощью наземных измерений [2]. Однако усовершенствование технологий на наших глазах производит переворот как в понимании процесса подготовки землетрясений, так и в геотектонике. Во-первых, подтверждается упоминающийся в литературе факт, что выделение газов из земной коры играет важную роль в процессе подготовки землетрясения [3,4]. Миграция газов в земной коре, таких как гелий и водород, приводит к изменению ее механических свойств, а вынос на поверхность инертного, но радиоактивного газа радона запускает цепь процессов в атмосфере, ответственных за появление различных типов краткосрочных предвестников. Именно радон стал в последнее время центром дискуссий в среде сейсмологов, а иногда и политических скандалов, как это случилось после землетрясения в Аквиле в Италии в апреле 2009 г. В предложенной нами теории комплексных связей в системе Литосфера-Атмосфера-Ионосфера радон также играет очень важную, если не основную роль, поэтому имеет смысл начать описание модели и предлагаемых методов спутникового мониторинга предвестников землетрясений именно с этой проблемы, поскольку именно интенсивное выделение радона из активных тектонических разломов приводит, в конечном счете, к генерации тепловых аномалий, регистрируемых со спутников.

### **2. РАДОН – ИСТОЧНИК КОНФЛИКТОВ**

Землетрясение 6 апреля 2009 г. вблизи старинного итальянского города Аквила стало не только трагической страницей в истории Италии (около 300 погибших, более 29 тыс. без крова), но и источником грандиозного скандала в научной среде, отголоски которого не утихли до сих пор. Инженер-ядерщик Джоаккино Джулиани, работавший в астрофизической ядерной лаборатории Гран Сассо, расположенной в Аквиле, поместил в своем блоге в интернете сообщение о готовящемся землетрясении и призвал жителей покинуть свои дома 5 апреля. В этот же день государственная комиссия, возглавляемая директором Национального института геофизики и вулканологии в Риме профессором Энцо Боски, заявила, что участвовавшие толчки – явление естественное, и ничего жителям

не угрожает. Джулиани был объявлен шарлатаном и получал угрозы от муниципальных властей вплоть до угрозы ареста. На следующее утро случилось трагическое землетрясение. Шок и возмущение жителей города были настолько велики, что национальной комиссии по прогнозу землетрясений пришлось долго оправдываться, но Джулиани это не спасло: кажется, что весь ученый мир Италии ополчился против него. Ему не могут простить, что вся государственная машина сейсмологии, довольно хорошо финансируемая, была в одно мгновение повержена простым инженером, у которого и публикаций-то нет. Вдобавок, он опроверг так лелеемую сейсмологами в течение последних лет 15 парадигму, сформулированную во время дискуссии на сайте журнала Nature, инициатором которой был профессор Токийского университета Геллер [5]. Парадигма очень простая: краткосрочный прогноз землетрясений невозможен в принципе, а поэтому сейсмология умывает руки.

Что же такое изобрел Джулиани? Он разработал новый тип датчика, который регистрирует не высокоэнергичные альфа-частицы (5.49 МэВ), излучаемые радоном при распаде, а низкоэнергичные бета-линии дочерних продуктов распада – изотопов свинца и висмута с энергиями 351 кэВ и 609 кэВ соответственно (см. Рис. 1). Специальная конструкция датчика и его расположение в изолированной камере под землей позволили исключить шумы метеорологического происхождения (вариации радона, связанные с осадками, изменениями температуры и давления) и получать четкие предвестники даже для очень слабых землетрясений, начиная с магнитуды 2.5. Парадокс ситуации заключается в том, что несмотря на притеснения и травлю, авторитет прогнозов Джулиани настолько велик, что во время саммита глав 8 ведущих государств в Аквиле в июле того же 2009 г., когда сейсмическая активность еще давала о себе знать, к нему тайно обращались за прогнозами сейсмических толчков во время саммита с целью обеспечения безопасности глав государств восьмерки.

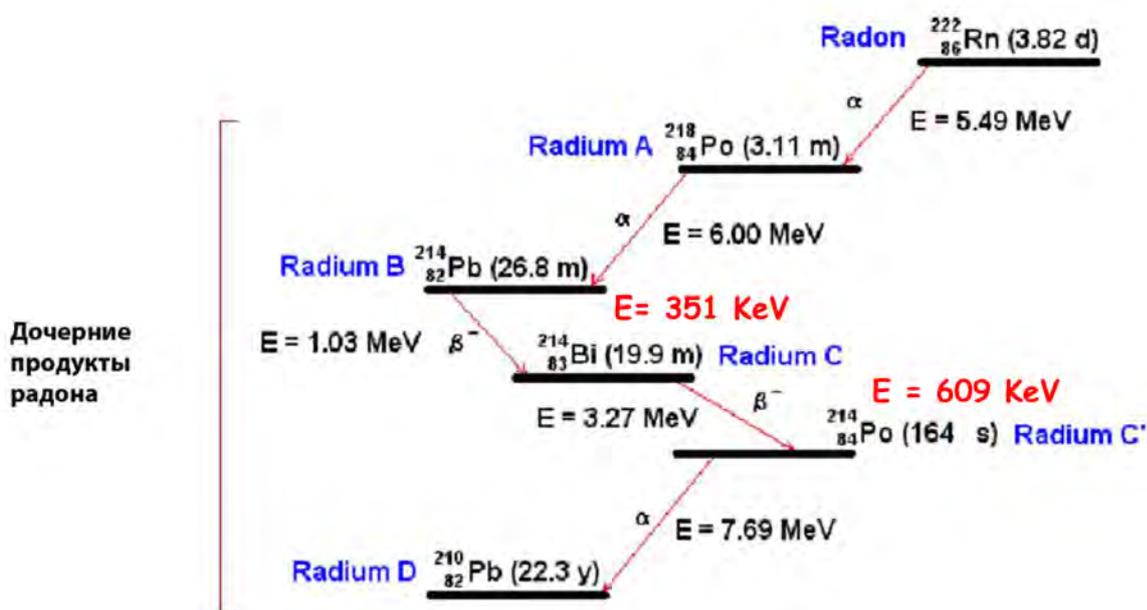


Рис. 1. Схема распада радона  $^{222}\text{Rn}$

Все это было бы смешно, кабы не было так грустно. 12 марта 2010 года тот же Национальный институт геофизики и вулканологии, который преследовал Джулиани, заявил, что учеными института сделано «открытие» о том, что уменьшение или увеличение выделения радона из земной коры может быть предвестником землетрясения!

[<http://www.byoblu.com/post/2010/03/13/Giampaolo-Giuliani-aveva-ragione-l-INGV-scopre-il-radon.aspx>]

### 3. РАДОН, АТМОСФЕРА И КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ЛИТОСФЕРА – АТМОСФЕРА – ИОНОСФЕРА

Первые идеи о возможности связи вариаций радона перед землетрясениями и аномальных вариаций в ионосфере земли были высказаны нами еще в 1997 г. [6]. Однако потребовалось более 10 лет исследований, чтобы в конечном итоге прийти к правильному пониманию проблемы. Необходимо было связать в единую цепь природную радиоактивность в виде эманаций радона, атмосферное электричество, позволявшее объяснить появление аномалий в ионосфере, и тепловые аномалии, которые, как оказались, появляются практически одновременно (с некоторым опережением) с ионосферными. Настоящий прорыв удалось осуществить в результате комплексного исследования атмосферных и ионосферных аномалий для землетрясения в Колиме (Мексика) М7.6, 21 января 2003 г. [7]. Именно в результате этого исследования пришло осознание того, насколько мощными являются тепловые эффекты перед землетрясением, приводящие к изменениям температуры и влажности на больших территориях, что было невозможно объяснить никакими тепловыми потоками тектонического происхождения, термальными водами или инфракрасным излучением в результате механической деформации твердых пород. Стало ясно, что тепло выделяется непосредственно в атмосфере в виде скрытой теплоты испарения, а центрами конденсации для влаги становятся ионы, образуемые в результате ионизации атмосферных газов радоном, выделяемым из земной коры перед землетрясением. Плазмохимические процессы в приземном слое воздуха и проблемы вариаций влажности воздуха были рассмотрены в работе [8], а оценки тепловой энергии, выделяемой в результате ионизации связанной с выделением радона, приведены в работе [9].

Альфа-частицы с энергией порядка 5.49 МэВ, испускаемые радоном, ионизируют молекулы воздуха. Вновь образованные ионы вступают в плазмохимические реакции, образуя новые соединения. Эти соединения или конечные ионы становятся центрами конденсации водяного пара, всегда присутствующего в атмосфере. Конденсация (или точнее, присоединение молекул воды к ионам) делает эти ионы устойчивыми, поскольку высокий дипольный момент молекул воды предохраняет ионы от рекомбинации. Лабораторные эксперименты [10] и измерения аэрозолей, образуемых перед землетрясениями [9] показывают, что ионы являются центрами конденсации водяного пара.

В результате конденсации уменьшается количество свободных молекул водяного пара в воздухе, что при достаточной интенсивности процесса можно зарегистрировать как уменьшение влажности. Молекулы воды, присоединяясь к ионам, изменяют свое фазовое состояние со свободного на связанное, что сопровождается выделением в окружающее пространство скрытой теплоты испарения, являющейся физической константой ( $Q=40.683$  кДж/моль).

Выделение энергии в атмосферу приводит к повышению температуры воздуха. Несмотря на то, что увеличение концентрации радона в воздухе весьма незначительно, энергетическая эффективность процесса ионизации настолько высока ( $> 10^8$ ), что эти изменения приводят к вариациям параметров атмосферы, регистрируемым с помощью как наземной метеорологической аппаратуры, так и методами дистанционного зондирования с борта искусственных спутников Земли. Вторым немаловажным фактором является размер области подготовки землетрясения. Для сильных землетрясений  $M \approx 7$  площадь области подготовки составляет порядка сотен тысяч квадратных километров, что не может остаться незамеченным.

Именно повышение температуры приповерхностного слоя воздуха над активными тектоническими разломами – один из признаков готовящегося землетрясения, регистрируемый с помощью инфракрасных спектрометров, устанавливаемых на спутниках дистанционного зондирования. На Рис. 2 показан пример регистрации

тепловых аномалий перед разрушительным землетрясением М7.9 26 января 2001 г. в Индии в области Гуджарат в сравнении со схемой разломов [11]. Как видно из рисунков, тепловые аномалии точно повторяют конфигурацию разломов.

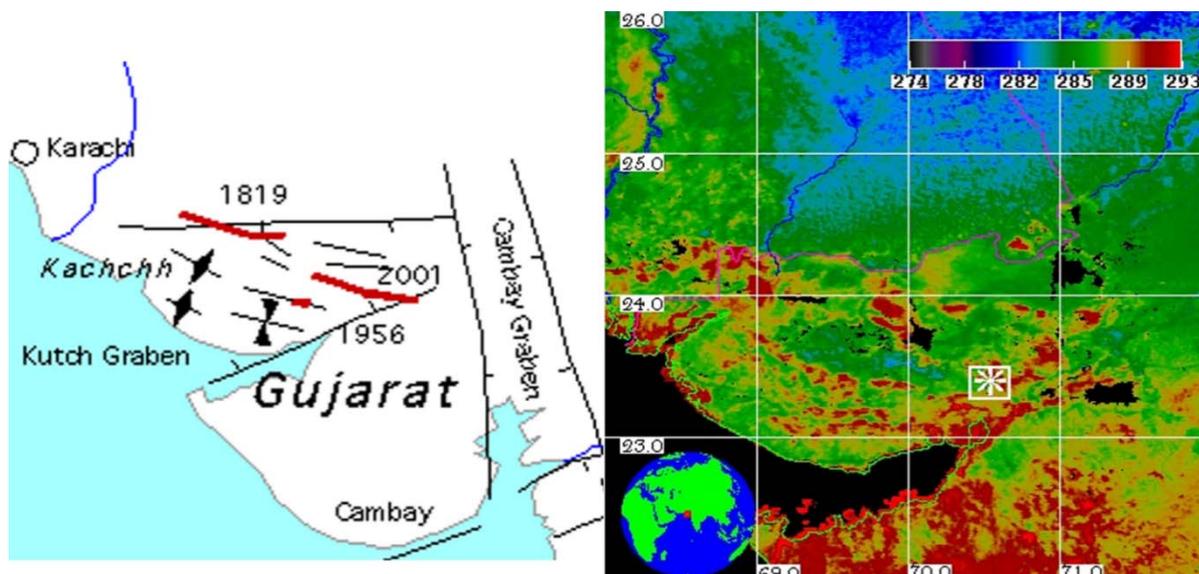


Рис. 2. Левая панель – схема разломов в области Гуджарат, Индия. Правая панель – тепловые аномалии, зарегистрированные с помощью прибора MODIS, спутник AQUA.

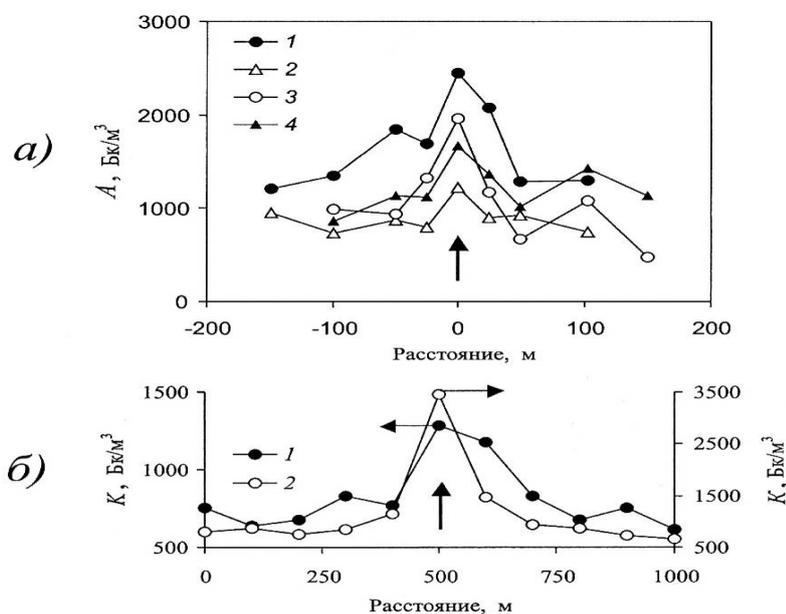


Рис. 3. Объемная активность радона в подпочвенной атмосфере вдоль трасс, пересекающих тектоническое нарушение II ого порядка;  
 а)- пункты 3-6(1-4);  
 б)- пункты 5(1) и 2(2)  
 (вертикальными стрелками обозначено положение тектонического разлома)

Возникает вопрос, почему тепловые аномалии концентрируются в области разломов, если подготовка землетрясения охватывает всю область размером  $R = 10^{0.43M}$ , где R – радиус области подготовки землетрясения, а M – его магнитуда [12]? Ответ дает

наземный мониторинг радона в зонах тектонических нарушений [13]. На Рис. 3 представлены вариации радона при его мониторинге поперек линии тектонического разлома. Как видно, концентрация радона максимальна точно над разломом. Эта закономерность выполняется не только для сейсмоактивных областей, но и для любых разломов в земной коре. Становится понятной линейная структура тепловых аномалий в областях подготовки землетрясений, видимая со спутников, и линейная структура облаков над этими областями [14]. Получают свое объяснение и частые неудачи наземного мониторинга радона. Большинство станций измерений радона стационарны, а мониторинг со спутников выявил высокую временную изменчивость тепловых аномалий: их конфигурация меняется день ото дня [15], и это невозможно отследить с помощью неподвижных датчиков. Таким образом, спутниковый мониторинг не только позволил объяснить парадокс радона при исследовании краткосрочных предвестников землетрясений, но и сыграл решающую роль в разработке комплексной модели процессов в системе Литосфера-Атмосфера-Ионосфера.

Схематически эту модель удобно представить в виде диаграммы (Рис. 4), на которой можно проследить развитие процессов от поверхности земли до ионосферы и магнитосферы. Мы можем также условно разделить наблюдаемые эффекты на три категории: тепловые (левая ветвь модели), атмосферные или облачные (средняя ветвь модели) и электромагнитные или ионосферные (правая ветвь модели).

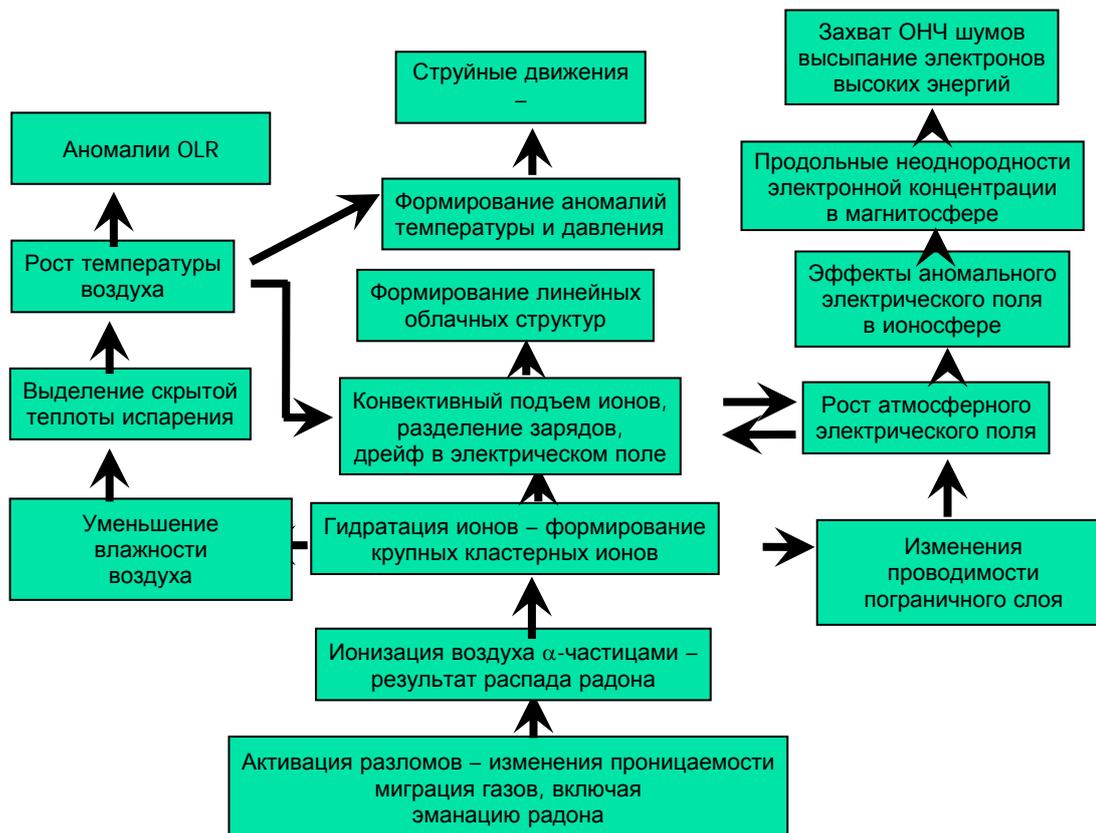


Рис. 4. Схематическое представление комплексной модели связей в системе Литосфера – Атмосфера – Ионосфера

В тепловой ветви основным процессом является выделение скрытой теплоты испарения при конденсации паров воды на ионах, образованных после ионизации молекул атмосферных газов радоном. Если вблизи поверхности земли тепловые аномалии проявляются в виде линейных структур, вытянутых вдоль активных разломов, то затем

вследствие наличия горизонтальных градиентов температуры и давления начинается процесс перемешивания и образуется вертикальный восходящий поток, т.к. в общем температура воздуха над областью подготовки землетрясения выше, чем вне нее. В результате мелкомасштабная турбулентность вследствие развития обратного каскадного процесса (развитие турбулентности с увеличением пространственного масштаба) приводит к образованию крупномасштабной структуры – теплового пятна на уровне верхней кромки облаков 10 - 12 км (OLR – убегающее длинноволновое инфракрасное излучение).

Атмосферные и электромагнитные процессы “работают” совместно: Вертикальная конвекция, возникающая вследствие выделения скрытой теплоты испарения, выносит кластерные ионы наверх, что приводит к вытеснению легких ионов и изменению проводимости атмосферы в пограничном слое (толщина пограничного слоя меняется в течение суток от нескольких сот метров в предрассветные часы до нескольких километров в послеполуденное время). В свою очередь, вертикальное электрическое поле над разломами поддерживает линейную структуру потоков кластерных ионов – ядер конденсации, что приводит к образованию линейных облачных структур – одного из краткосрочных предвестников землетрясений.

Помимо образования линейных облачных структур к числу атмосферных аномалий, наблюдаемых перед землетрясениями, следует отнести струйные течения. Это горизонтальные потоки воздуха на высоте от 6 до 30 км, имеющие длину несколько тысяч километров, а в поперечнике – 50 - 100 км. Скорость ветра вблизи оси струйного течения достигает 200 - 300 км/ч. Субтропические струйные течения обычно наблюдаются на уровне 300 мбар, т.е. на той же высоте, что и OLR (9 - 12 км). Пятно OLR по сути представляет собой область пониженного давления, поэтому сейсмогенные струйные течения своим концом указывают на положение эпицентра будущего землетрясения. Отличительным признаком таких течений является еще и тот факт, что их положение остается неизменным в течение нескольких часов [16]. На Рис. 5 показан пример струйного течения, наблюдавшегося перед сильным землетрясением в Пакистане.



Рис. 5. Пример струйного течения, зарегистрированного перед землетрясением ( $M = 6.4$ ) в Пакистане ( $30.65\text{ N}, 67.32\text{ E}$ ) 28 октября 2008 г.

# Аквила, Италия, 06.04.2009

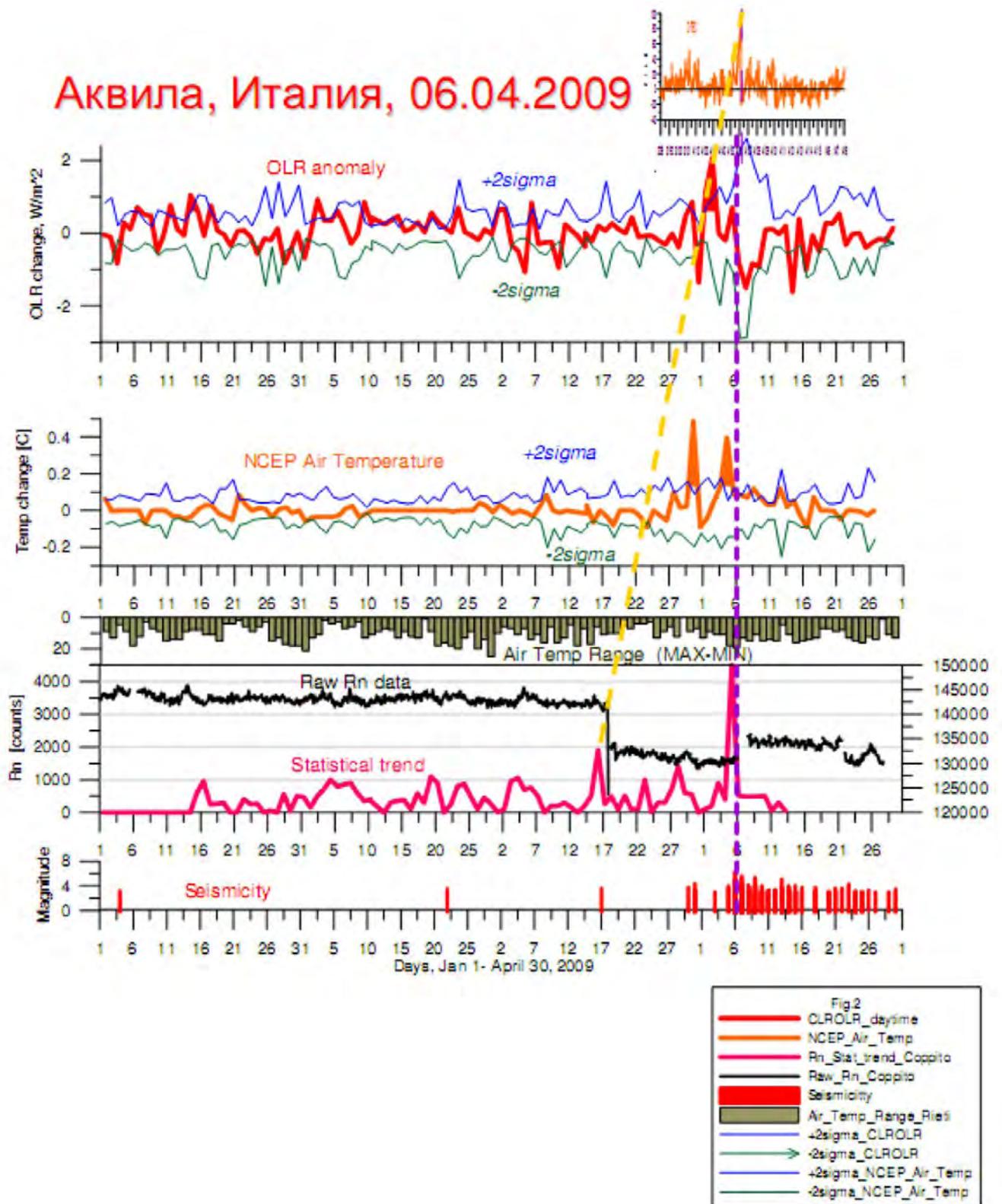


Рис. 6 Развитие атмосферных аномалий перед землетрясением в Аквиле 6 апреля 2009 г.

Обычно заблаговременность появления струйных течений составляет несколько недель.

Основным фактором, приводящим к генерации аномалий в ионосфере и магнитосфере, являются аномалии в атмосферном электричестве, связанные с изменением проводимости пограничного слоя атмосферы. Они способствуют генерации аномальных электрических полей в ионосфере, приводящих к дрейфу ионов и образованию крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации и вариациям температуры ионов и электронов. Модификация всей магнитосферной трубки, опирающейся на область подготовки землетрясения, приводит к образованию ионосферных неоднородностей не только над областью подготовки землетрясения, но и в магнитосопряженной точке. Рассеяние ОНЧ шумов в модифицированную магнитосферную трубку приводит к повышению уровня шумов ОНЧ диапазона внутри данной трубки, а также более эффективному взаимодействию ОНЧ излучений с энергичными электронами радиационных поясов и их стимулированному высыпанию перед землетрясениями.

Если попытаться сформулировать главный вывод из данного раздела, то можно утверждать следующее: после периода резкого увеличения уровня эманации радона из активного тектонического разлома должны регистрироваться аномалии атмосферных и ионосферных параметров, причем, в некой временной последовательности с определенным запаздыванием по мере увеличения высоты проявления регистрируемой аномалии. Впервые такую последовательность удалось зарегистрировать для землетрясения в Аквиле в апреле 2009 г. Этот результат показан на Рис. 6, где можно видеть, как последовательно появляются увеличение уровня радона, повышение поверхностной температуры воздуха, появление аномалии OLR, и наконец, появление ионосферной аномалии. Пространственное совпадение аномалий OLR и в ионосфере показано на Рис. 7.

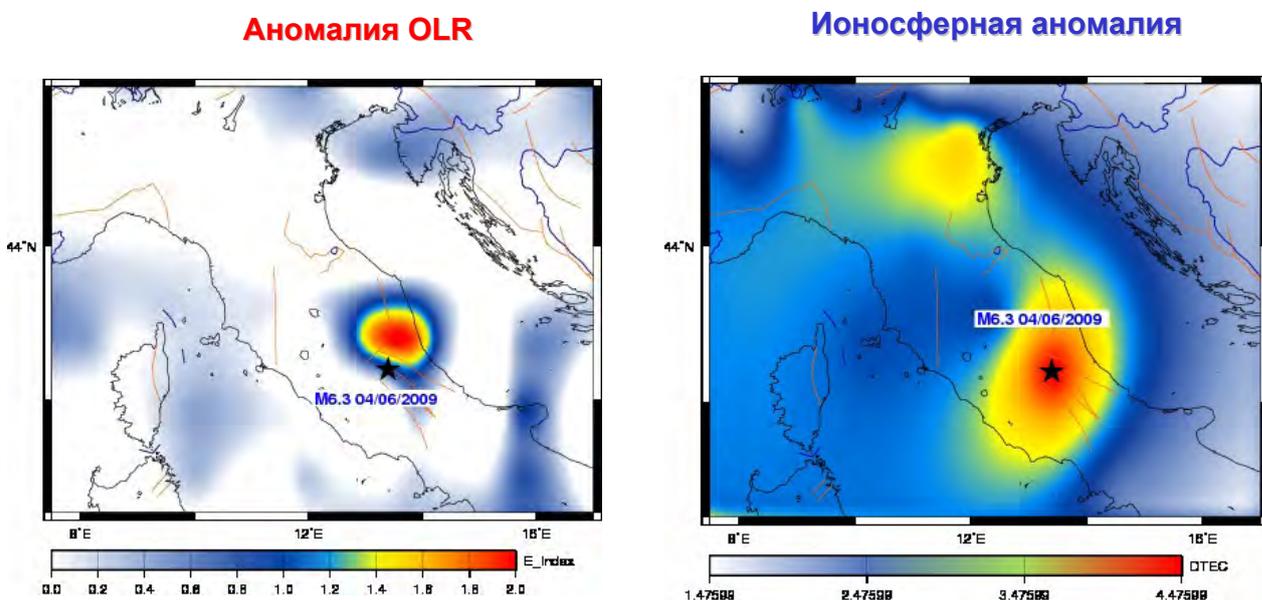


Рис. 7. Аномалии OLR (слева) и GPS TEC (справа) перед землетрясением в Аквиле 6 апреля 2009 г.

#### 4. МОЖНО ЛИ НАЗЫВАТЬ НАБЛЮДАЕМЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКАМИ?

Основная критика, поступающая со стороны официальной сейсмологии, касается того, что большинство публикаций по различным так называемым предвестникам является описанием отдельных случаев без проведения тщательного статистического анализа. На самом деле это абсолютно не соответствует действительности. Уже в 1999 г. был проведен полный анализ (без единого пропуска) данных вертикального зондирования ионосферы на Тайване за несколько лет [17], где было убедительно показано, что вероятность наблюдения аномалий в течение 5 суток перед сейсмическим толчком весьма велика (см. Табл. 1), а для магнитуды, превышающей 6, приближается к 100%. Для ионосферных предвестников была выдвинута концепция «маски» предвестника [18].

Таблица 1.

Вероятность обнаружения ионосферных аномалий с течение 5 суток перед сильным землетрясением как зависимость от магнитуды

	M ≥ 5		M ≥ 5.5		M ≥ 6	
	P(i)	Σ <sup>j</sup> P(i)	P(i)	Σ <sup>j</sup> P(i)	P(i)	Σ <sup>j</sup> P(i)
1 день до ЗТ	28%	28%	44%	44%	56%	56%
2 дня до ЗТ	14%	42%	21%	65%	11%	67%
3 дня до ЗТ	22%	64%	15%	80%	11%	78%
4 дня до ЗТ	9%	73%	9%	89%	11%	89%
5 дней до ЗТ	0.8%	73.8%	6%	95%	11%	100%

Эта концепция позволяет говорить о схожести аномальных ионосферных вариаций для каждого геофизического региона и возможности строить прогноз на базе подхода распознавания образов. Период 5 суток был получен и для статистического анализа ионосферных аномалий, регистрируемых с помощью навигационной спутниковой системы GPS [19]. Различные подходы описаны в книге [20].

В ходе развития методов мониторинга тепловых аномалий были проведены статистические исследования тепловых предвестников (OLR) для нескольких десятков крупных землетрясений, имевших место в течение 2003 - 2008 гг. Оказалось, что и для тепловых предвестников характерен интервал 5 суток, когда наиболее высока вероятность обнаружения тепловой аномалии.

Статистический анализ распространения ОНЧ сигналов над областями подготовки сильных землетрясений показал аналогичную зависимость вероятности обнаружения предвестника [21]. Таким образом, 4 различных метода регистрации краткосрочных предвестников (вертикальное зондирование, измерений полного электронного содержания с помощью системы GPS, тепловые аномалии убегающего потока инфракрасного излучения OLR, аномалии распространения ОНЧ сигналов над область подготовки землетрясения) показывают один и тот же результат, что подтверждает общность процессов, ответственных за появление регистрируемых предвестников, и справедливость представленной физической модели (см. Рис. 8).

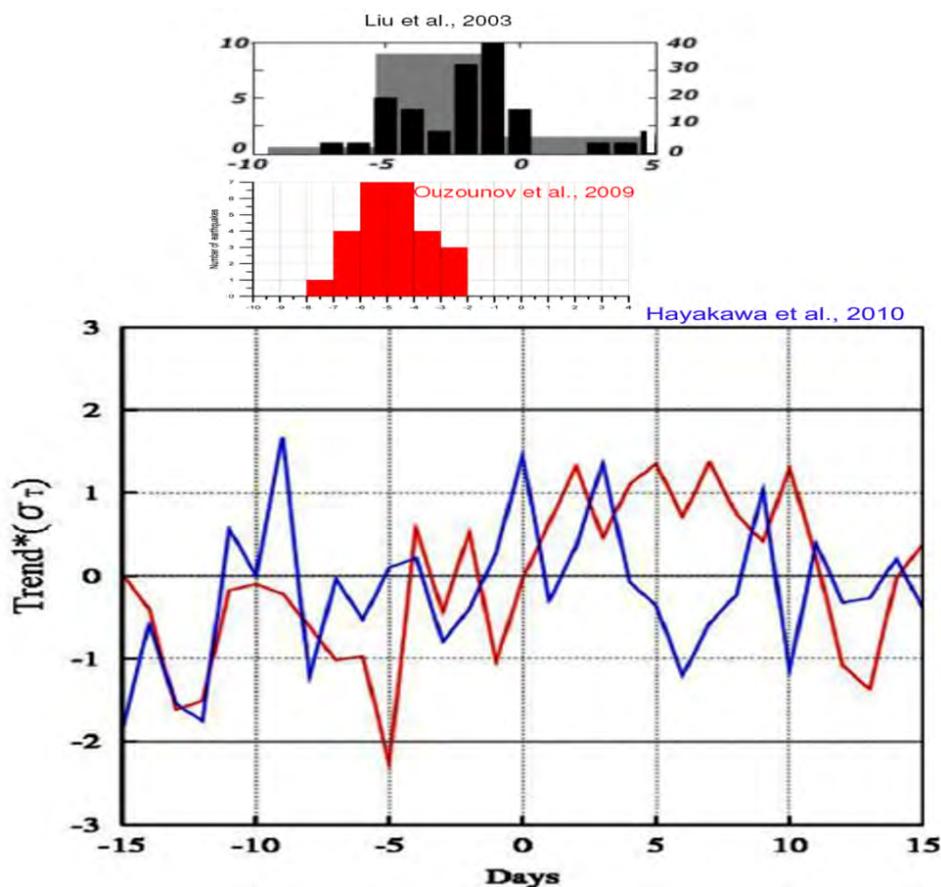


Рис. 8. Сверху вниз:  
 вероятность обнаружения ионосферных предвестников с помощью навигационной системы GPS,  
 вероятность обнаружения тепловых аномалий убегающего потока инфракрасного излучения OLR,  
 вероятность обнаружения аномалий распространения ОНЧ сигналов (красная линия)

## 5. ЧТО И КАК МОЖНО ИЗМЕРЯТЬ НА СПУТНИКЕ

Вопрос организации спутникового мониторинга предвестников землетрясений рассматривался в недавней публикации [22], однако развитие технологии и теории сейсмо-ионосферных связей идет настолько стремительно, что позиция, изложенная в цитируемой работе, требует уточнения. Прежде всего, это касается иерархии предвестников и предложения совместить на одном спутнике измерения атмосферных и плазменных параметров. Согласно последней версии модели [9] для надежного прогноза, а точнее, раннего предупреждения, необходимо проследить развитие процесса от поверхности земли до ионосферы и магнитосферы, включая такие параметры как: поверхностная температура, вертикальный профиль температуры и влажности, конфигурация облачного покрова, потоки скрытой теплоты испарения, ветры на высоте 9-12 км, потоки убегающего инфракрасного излучения на высоте верхней кромки облаков, концентрация электронов в ионосфере, включая вертикальные профили электронной концентрации, локальные параметры ионосферной плазмы (концентрация, температура электронов и ионов), ионный состав, КНЧ и ОНЧ излучения, квазипостоянные ЭМ поля, потоки частиц и их энергетические спектры. В принципе, идеальным был бы вариант спутника «Метеор» с добавлением аппаратуры спутника «Ионосфера» проекта «Ионозонд». Даже при раздельном существовании этих систем, по-видимому, удастся

решить основные задачи спутникового мониторинга предвестников и проверить основные положения модели уже в 2012 - 2015 годах, когда на аппарате «Метеор-М» №2 прибор МСУ-МР будет работать в полном объеме, включая инфракрасные каналы.

Определяющим фактором в предлагаемом комплексе измерений будет одновременность измерения целого ряда параметров, связанных общим физическим механизмом, их когерентность во времени и пространстве. Однако еще одним немаловажным обстоятельством, определяющим успех миссии, являются параметры орбиты спутника и конфигурация спутниковой системы, если она состоит из нескольких аппаратов. С этой точки зрения следует проанализировать результаты французского специализированного спутника «ДЕМЕТЕР», запущенного в 2004 г. [23]. Его основной задачей была регистрация электромагнитных предвестников землетрясений. За годы существования спутника на орбите (спутник " в 2010 года) накоплен богатый статистический материал, который позволяет сделать вполне определенные выводы. Основной вывод – это безусловный успех миссии: практически по всем видам измерений на спутнике были получены положительные результаты в смысле наличия предвестников сильных землетрясений. В то же время удивляет очень малая абсолютная величина наблюдаемых аномалий по сравнению с другими имеющимися данными измерений предвестников землетрясений (как наземными, так и спутниковыми). По некоторым видам измерений на спутнике ДЕМЕТЕР (например, в ОНЧ диапазоне) положительный результат был получен только после статистической обработки большого массива данных за длительный период измерений. Это связано с тем, что морфология предвестников (амплитуда, фаза, знак отклонения от нормы) существенно зависит от местного времени [24]. Рассмотрим эту особенность на примере регистрации ионосферных предвестников землетрясений на Тайване [17], см. Рис. 9.

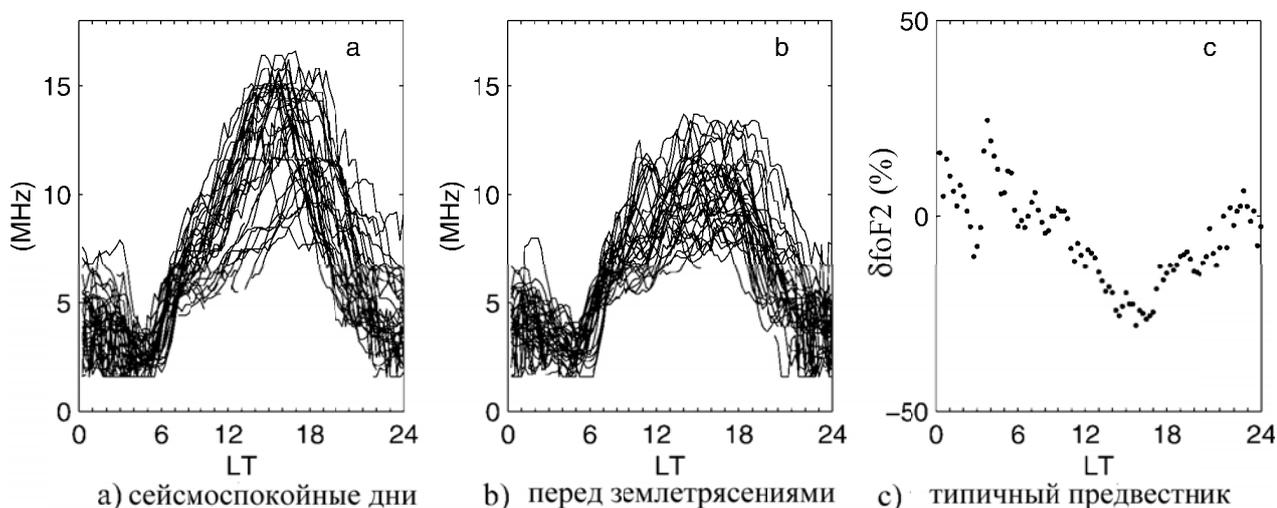


Рис. 9.

- а) – суточные вариации критической частоты ионосферы  $foF2$  в сейсмически спокойные периоды на Тайване;
- б) – суточные вариации критической частоты ионосферы  $foF2$  в интервале времени 5 суток до землетрясений на Тайване;
- в) – разность между б) и а) – ионосферный предвестник как зависимость от местного времени

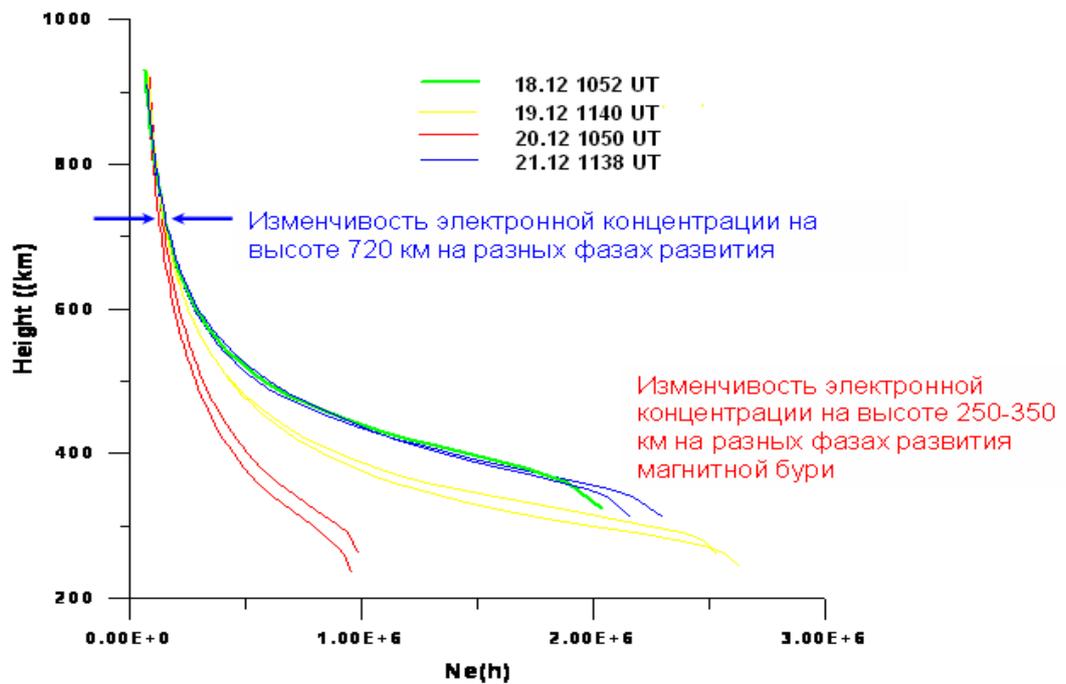


Рис. 10. Изменчивость электронной концентрации по высоте по данным спутникового зондирования со спутника Интеркосмос-19

Как видно из рисунка, максимальные отклонения вариаций критической частоты приходятся на послеполуденный интервал, когда вариации значительны. В то же время спутник ДЕМЕТЕР находится на солнечно-синхронной орбите вблизи меридиана 10 – 22 LT. Из Рис. 9 можно понять, что в эти интервалы местного времени амплитуда вариации предвестника близка к нулю, что не позволяет спутнику зарегистрировать сильные вариации в ионосфере перед землетрясениями на Тайване. Учитывая тот факт, что сейсмо-ионосферные вариации на Тайване типичны для большинства низкоширотных землетрясений, очевидно и объяснение слабых вариаций, регистрируемых на спутнике ДЕМЕТЕР. Следует подчеркнуть, что это не вина разработчиков спутника: они были поставлены в такие условия предложенным вариантом попутного запуска.

Второе очень важное обстоятельство – зависимость изменчивости параметров ионосферы от высоты. На Рис. 10 показаны несколько профилей вертикального распределения электронной концентрации во внешней ионосфере, полученных с помощью спутникового ионозонда, установленного на спутнике Интеркосмос-19.

Из рисунка хорошо видно, насколько изменчивость параметров ионосферы больше на высотах 250 - 350 км вблизи максимума электронной концентрации, чем на высоте орбиты спутника ДЕМЕТЕР ~ 740 км. Вполне естественно, что сейсмо-ионосферные вариации, получаемые с помощью спутникового ионозонда, который измеряет весь вертикальный профиль электронной концентрации от высоты орбиты спутника до максимума электронной плотности, в несколько раз больше вариаций, регистрируемых локальными датчиками типа зонда Лэнгмюра.

Что касается количества спутников и конфигурации орбит системы, то все эти вопросы были рассмотрены в работе [22], и можно только подтвердить выводы, сделанные в цитируемой работе. Для успешной работы системы достаточно 4 спутников, расположенных на орбитах с высоким наклоном ~ 83° (или на солнечно-синхронных орбитах в секторах местного времени, чувствительных к ионосферным предвестникам). Высота орбиты должна быть в пределах от 600 до 800 км.

## 6. ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ КАТАСТРОФЫ КАК ОБЪЕКТ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА

Отметим еще одно очень важное обстоятельство. Процессы ионизации и последующая цепочка процессов, связанных с конденсацией, выделением тепла и атмосферным электричеством, характерны не только для землетрясений. Тепловые и ионосферные аномалии были зарегистрированы после аварий на атомных электростанциях Три-Майл Айлэнд, США (Three-Mile Island) 28 марта 1979 г. и Чернобыльской атомной электростанции 26 апреля 1986 г., над тропическими ураганами (Катрина), и над областями активных натуральных экспериментов с ионизацией в Мексике [25]. Мало того, по-видимому, ионизация верхних слоев атмосферы галактическими космическими лучами является одним из факторов, стимулирующих образование и развитие тропических ураганов [26].

Таким образом, описанный выше механизм и предложенные методы спутникового мониторинга имеют универсальный характер, и могут использоваться не только для краткосрочного прогноза землетрясений, но и для мониторинга природных и техногенных катастроф различного происхождения.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа не ставила своей задачей подготовку подробного обзора спутниковых методов мониторинга краткосрочных предвестников разрушительных землетрясений и других видов природных и техногенных катастроф, а скорее, стремилась отразить современные тенденции, наметившихся в этой области в последние годы. Приведенные примеры и аргументация, скорее, могут служить источником оптимизма для создателей спутниковых систем, а также серьезным аргументом, доказывающим актуальность таких систем, и невозможность построения любых систем мониторинга природных и техногенных катастроф без использования спутниковых технологий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горный В. И., Сальман А. Г., Тронин А. А., Шилин Б. В. Уходящее инфракрасное излучение Земли – индикатор сейсмической активности // ДАН СССР. 1988. Т. 301. № 1. С. 67–69.
2. Милькис М. Р. Метеорологические предвестники сильных землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. С. 36–47.
3. Khilyuk L. F., Chillingar G. V., Robertson J. O. Jr., Endres B. 2000, Gas migration. Events preceding earthquakes, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 390 p.
4. Гуфельд И. Л. Нас ещё ждут сюрпризы природы. Калининградская правда, №15 (17586), 11 февраля 2010 г., г. Королев, Московская обл.
5. Geller R. J. Earthquake prediction: a critical review, Geophys. J. Int. 131, 1997, 425-450.
6. Pulinets S. A., Alekseev V. A., Legen'ka A. D., Khagai V. V. Radon and metallic aerosols emanation before strong earthquakes and their role in atmosphere and ionosphere modification, Adv. Space Res., 20, N11, 1997, pp. 2173-2176
7. Pulinets S. A., Ouzounov D., Ciralo L., Singh R., Cervone G., Leyva A., Dunajacka M., Karelin A. V., Boyarchuk K. A., Kotsarenko A., Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003, Annales Geophysicae, 24, 835-849, 2006
8. Pulinets S. A., Ouzounov D., Karelin A. V., Boyarchuk K. A., Pokhmelnikh L. A., The physical nature of the thermal anomalies observed before strong earthquakes, Physics and Chemistry of the Earth, 31, 143-153, 2006
9. Pulinets S., Ouzounov D., Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model - an unified concept for earthquake precursors validation, Asian Journal of Earth Sciences, 39, 2010, doi:10.1016/j.jseaes.2010.03.005

10. Svensmark H., Pedersen J. O. P., Marsh N. D., Enghoff M. B., Uggerhøj U. I., Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions, *Proc. R. Soc. A*, 463, 385–396, 2007
11. Ouzounov D., Freund F. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. *Advances in space research*. 2004 33, pp. 268-273.
12. Добровольский И. П., Теория подготовки тектонического землетрясения // АН СССР. Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. 224 с. 1991.
13. Спивак А. А., Объемная активность подпочвенного радона в зонах тектонических нарушений, в кн. Геофизика межгеосферных взаимодействий, Москва, ГЕОС, 2008, с. 235-246
14. Doda L., Pulinets S., 2006. Earthquake clouds and physical mechanism of their formation, *EOS Trans, AGU*, 87(52) T31A-0426
15. Genzano N., Aliano C., Filizzola C., Pergola N. and Tramutoli V. 2007, A robust satellite technique for monitoring seismically active areas: The case of Bhuj–Gujarat earthquake, *Tectonophysics* 431, 221-230
16. Wu H.-C., Relationship between Jet Streams and M>6.0 Earthquakes at Latitude >30°N between 2006/05/22-2008/10/28, *Physics and Chemistry of the Earth*, 2010 (in press)
17. Chen Y. I., Chu J. Y., Liu Y. J., Pulinets S. A., Statistical study of ionospheric precursors of strong earthquakes at Taiwan area, *Proceedings of XXVth General Assembly URSI*. University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada. August 13-21, 1999. GH1.7. 1999. p. 745
18. Пулинец С. А., Боярчук К. А., Ломоносов А. М., Хегай В. В., Лью Й. Е., Ионосферные предвестники землетрясений: предварительный анализ критических частот  $f_oF2$  на наземной станции вертикального зондирования ионосферы Чунг-Ли (остров Тайвань), *Геомagnetизм и аэрономия*, 42, № 4, с.508-513. 2002.
19. Liu J. Y., Chuo Y. J., Shan S. J., Tsai Y. B., Chen Y. I., Pulinets S. A., Yu S. B., Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements, *Annales Geophysicae*, 22 (5), pp. 1585-1593, 2004
20. Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., *Ionospheric Precursors of Earthquakes*, Springer, Berlin Heidelberg, Germany, 315 p., 2004
21. Hayakawa M., Kasahara Y., Nakamura T., Muto F., Horie T., Maekawa S., Hobara Y., Rozhnoi A. A., Solovieva M., and Molchanov O. A., A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes, *Journal Geophysical Research*, 2010, in press
22. Pulinets S. A., Space technologies for short-term earthquake warning, *Advances in Space Research*, 37, 643-652, 2006
23. Parrot M., The micro-satellite DEMETER, *Journal of Geodynamics*, 33, 535-541, 2002
24. Пулинец С. А., Легенька А. Д., Зеленова Т. И. Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя F от местного времени, *Геомagnetизм и аэрономия*, 38, №3, 188-193, 1998
25. Pulinets S., Ouzounov D., An overview of the development and progress in the lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling (LAIC) model, 2009 AGU Fall Meeting, *Eos Trans. AGU*, 90(52), Fall Meet. Suppl., Abstract NH11B-02.
26. Бондур В. Г., Пулинец С. А., Ким Г. А., О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Катрина, *Доклады академии наук*, 422, №2, 244-2496 2008
27. Ouzounov D., Pulinets S. Methodology and techniques for monitoring the short term ionospheric and near infrared precursory activities prior to main earthquake, *International Workshop “Early Warning Systems for Earthquake Monitoring by Using Space Technology”*, Feb. 1-2, 2005, Istanbul, Turkey