

ЕДИНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ПОДГОТОВКИ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЕ ЛИТОСФЕРА-АТМОСФЕРА-ИОНОСФЕРА-МАГНИТОСФЕРА

С.А. Пулинец (Институт космических исследований РАН),
Д.П. Узунов (Университет Чэпмена, Оранж, США),
А.В. Карелин (ЦНИИ машиностроения),
К.А. Боярчук (НИИ электромеханики),
А.В. Тертышников (Институт прикладной геофизики),
И.А. Юдин (НИИ «АЭРОКОСМОС»).

Достигнутый в настоящее время прогресс в понимании процессов в сложной системе Литосфера-Атмосфера-Ионосфера, инициируемых на последней стадии подготовки сильных землетрясений, позволяет ставить вопрос о возможности практического применения этих знаний в целях краткосрочного прогноза землетрясений. Одним из основных результатов исследований последних лет является факт, что прогноз, базирующийся на анализе вариаций какого-то одного из параметров окружающей среды, будь то вариации радона, или электрического поля, или электронной концентрации в ионосфере, не может быть достоверным в силу сложности механизма генерации предвестников разного типа. Одновременная регистрация целого ряда признаков, называемых предвестниками, и являющихся проявлением процесса подготовки землетрясения в различных геофизических средах, и является тем фактором, или комплексным предвестником, на базе которого можно строить надежный прогноз. Концепция обнаружения такого комплекса аномальных вариаций окружающей среды в области подготовки землетрясения, основанная на многопараметрических измерениях, рассматривая в рамках синергетического подхода к сложным открытым диссипативным системам, излагается в настоящей работе.

ВВЕДЕНИЕ

История развития исследований в области краткосрочного прогнозирования землетрясений весьма драматична и переживала несколько периодов подъема и спада, от эйфории до отчаяния, а научные дискуссии доходили до взаимных обвинений и угроз. При этом электромагнитные явления, сопровождающие процесс подготовки землетрясения, а также процессы в атмосфере и ионосфере, до сегодняшнего дня остаются предметом острых дискуссий. Условно историю развития этих исследований можно разделить на три периода: 1) период накопления первичных данных и первых обобщающих работ, дающих надежду на возможность прогноза землетрясений с использованием электромагнитных и атмосферных явлений [1, 2]; 2) полное отрицание возможности краткосрочного прогноза землетрясений [3, 4]; 3) наступление спутниковых технологий, создание новых моделей и концепций [4, 5, 6, 7]. Комплексный анализ данных показал, что процессы в атмосфере, в том числе и метеорологические аномалии [8], а также в ионосфере связаны между собой [9], а для пони-

мания их природы нужны фундаментальные знания кинетики ионов в атмосфере [10, 11]. К концу первого десятилетия XXI века стало ясно, что только многопараметрический подход к исследованию краткосрочных предвестников землетрясений [12] может стать залогом решающего прорыва в проблеме краткосрочного прогноза землетрясений. Современный период исследований можно характеризовать как период валидации разработанной модели [7] и разработки практических методов идентификации различных типов предвестников [13-17].

Наибольший интерес в предлагаемом подходе представляет собой связь между тепловыми и ионосферными предвестниками через процесс гидратации ионов. Интенсивная гидратация, с одной стороны, приводит к выделению огромных потоков скрытой теплоты парообразования, а с другой стороны, за счет образования больших кластерных ионов, изменяет проводимость пограничного слоя атмосферы, и через глобальную электрическую цепь меняет электрический потенциал ионосферы над областью подготовки землетрясения.

Прогресс в сейсмологии с точки зрения формального определения форшоковой активности [18], а также в понимании подготовки землетрясения как хаотического самоорганизующегося процесса [19, 20] позволил распространить эту идею на предвестниковые эффекты в атмосфере и ионосфере как части сложной системы «Литосфера-Атмосфера-Ионосфера» [21]. Именно такой подход позволяет говорить о создании единой концепции обнаружения признаков подготовки сильного землетрясения.

КЛАССИФИКАЦИЯ И ИЕРАРХИЯ КРАТКОСРОЧНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ.

Прежде чем переходить к обсуждению самих предвестников, необходимо дать определение краткосрочным предвестникам землетрясений как отдельному классу предвестников. В этой связи обычно рассматривается сейсмический цикл между двумя землетрясениями в одно и той же точке. В зависимости от тектоники региона и рассматриваемой магнитуды землетрясения, такой цикл занимает промежуток от нескольких лет до нескольких десятков или даже сотен лет. Например, для землетрясений с магнитудой

больше 7 в регионе недавнего мегаземлетрясения Тохоку 11 марта 2011 г. такой цикл составляет 37 ± 7 лет [22]. При этом цикл делится на несколько периодов, внутри которых и выделяются временные интервалы, определяющие долгосрочные, среднесрочные, и краткосрочные предвестники [23, 24]. На Рис.1 представлены: сверху – физическая схема цикла землетрясения, снизу – обычная схема согласно [24]. Как видим, вторая фаза представляет собой период, когда генерируются среднесрочные и краткосрочные предвестники землетрясений (Добровольский не разделяет их в своей концепции). Однако, до настоящего момента не существует четкого критерия, как определить момент перехода от среднесрочных к краткосрочным предвестникам. Представляется, что таким критерием может служить начало форшоковой активности согласно [18] или превышение порогового значения энтропии согласно [20]. Возможен еще один подход, предложенный в [21]: считать момент перехода системы к генерации краткосрочных предвестников, когда она переходит через точку невозврата, т.е. землетрясение случится обязательно, невзирая ни на какие обстоятельства.

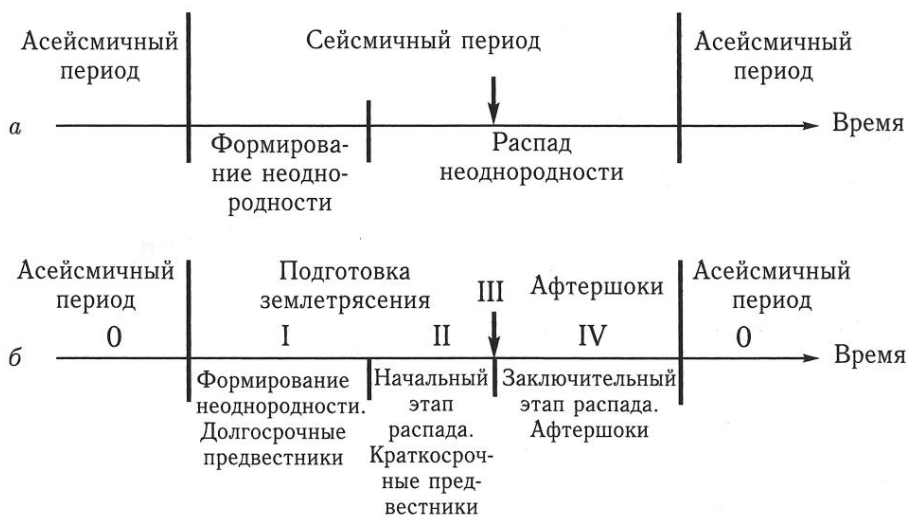


Рис. 1. Физическая (а) и обычная [24] (б) схемы цикла землетрясения.

Обычно принято делить предвестники на тектонические, сейсмические, гидро-геохимические, биологические, электромагнитные, метеорологические и плазменные (или ионосферные) [25]. На наш взгляд, такое деление не дает четкого представления о природе генерации каждого из предвестников. Например, электромагнитные излучения могут генерироваться как в земной коре, так и на земной поверхности, в атмосфере, и в космической плазме. Их природа совершенно различна, а объединение по признаку «электромагнитные излучения» чисто формально. Представляется, что более правильным будет деление на процессы (предвестники) по средам: аномалии, генерируемые в земной коре, на поверхности земли, в атмосфере, ионосфере, и даже магнитосфере. В этом случае, и деформации земной коры, и изменения ее проводимости, и гравитационные, и геомагнитные аномалии, и гидрологические (изменение уровня воды), и геохимические, будут относиться к одной группе, генерируемой в земной коре. Таким же образом можно сгруппировать и другие предвестники, генерируемые в атмосфере, ионосфере и магнитосфере.

Если подходить к вопросу с точки зрения практической реализации прогноза, то следует обратить внимание на регулярность появления предвестников, их место в физической модели Литосферно-Атмосферно-Ионосферных связей, а также на реализуемость физической регистрации параметра. Существует ряд предвестников, которые, правильнее было бы называть признаками, поскольку они появляются не для всех землетрясений, хотя достаточно стройно вписываются в модель. К таким признакам можно отнести линейные облачные структуры, образуемые над активными тектоническими разломами за несколько суток (а иногда недель) до сейсмического толчка. Если говорить о месте в модели, то есть такие параметры, как вариации радона, которые принципиально важны для реализации всей цепи генерации краткосрочных предвестников. По крайней мере, для данной модели наличие таких вариаций, а именно, резкие изменения в потоке эманации радона из земной коры является определяющим. И, наконец, о реализуемости измерений того или иного параметра. В наборе параметров глобальной электрической цепи, как показали последние исследования, наиболее информативным параметром был бы вертикальный ток в атмосфере, фактически определяющий потенциал ионосферы относительно земли. Однако его измерение представляет значительные сложности в силу его малости

(в нормальных условиях вертикальная плотность тока составляет $\sim 4 \cdot 10^{12}$ А/м²), и для оценки тока приходится измерять производные параметры, такие как вертикальный градиент электрического поля и полную проводимость.

Синергетический подход к проблеме предвестников [20, 21] позволяет использовать обобщенные или интегральные параметры, которые позволяют быстро сориентироваться относительно стадии подготовки землетрясения и начала предвестникового периода. Такими параметрами являются поправка к химическому потенциалу [26] и вариации регионального содержания электронов относительно глобального содержания электронов [27]. Эти параметры будут обсуждены ниже.

Если говорить о ключевых и регулярно обнаруживаемых предвестниках землетрясений, то к таким следует отнести вариации радона [28], тепловые аномалии в виде убегающего потока длинноволнового инфракрасного излучения [29], и ионосферные предвестники [5]. Эти параметры обеспечивают «охват» практически всего диапазона активности предвестников на уровнях от поверхности земли до ионосферы и позволяют оценить наличие синхронизма в генерации предвестников, что чрезвычайно важно для их идентификации.

На Рис. 2 представлена схема регистрации трех основных предвестников и их место в комплексной модели.

МОДЕЛЬ ЛИТОСФЕРНО-АТМОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНО-МАГНИТОСФЕРНЫХ СВЯЗЕЙ КАК ОСНОВА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ КРАТКОСРОЧНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Вся история краткосрочного прогноза, основанная на так называемых физических предвестниках [23], связана с регистрацией различных аномалий геофизических полей и дискуссиями, что является предвестником, а что не является, и какой из них лучше и надежнее [25]. Подробно описывались их характеристики, зависимости от времени землетрясения и магнитуды, и множество моделей. Практически каждый из предвестников имел собственную модель. При этом возник естественный вопрос: как один, по сути, процесс деформации земной коры и последующего разрыва может вызывать такое разнообразие совершенно различных процессов, описываемых разными моделями. При этом часто для одних и тех же предвестников предлагалось сразу несколько моделей [30]. Нелепость такого по-

ложения вполне очевидна, и поэтому при создании модели литосферно-атмосферно-ионосферно-магнитосферных связей мы с самого начала ставили задачу описания всех наблюдаемых аномалий в рамках единой концепции подготовки сейсмического события как сложной открытой диссипативной системы, в которой все процессы развиваются в определенной последовательности, а аномалии имеют свой источник в уже развившейся аномалии, и сами являются источником последующей аномалии. Такая последовательность процессов представлена на рис.3.

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). В тепловой ветви основным процессом является выделение скрытой теплоты испарения при кон-

денсации 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 мелко-масштабная турбулентность вследствие развития обратного каскадного процесса (развитие турбулентности с увеличением пространственного масштаба) [31] приводит к образованию крупномасштабной структуры – теплового пятна на уровне верхней кромки облаков 10-12 км (OLR – убегающее длинноволновое инфракрасное излучение).

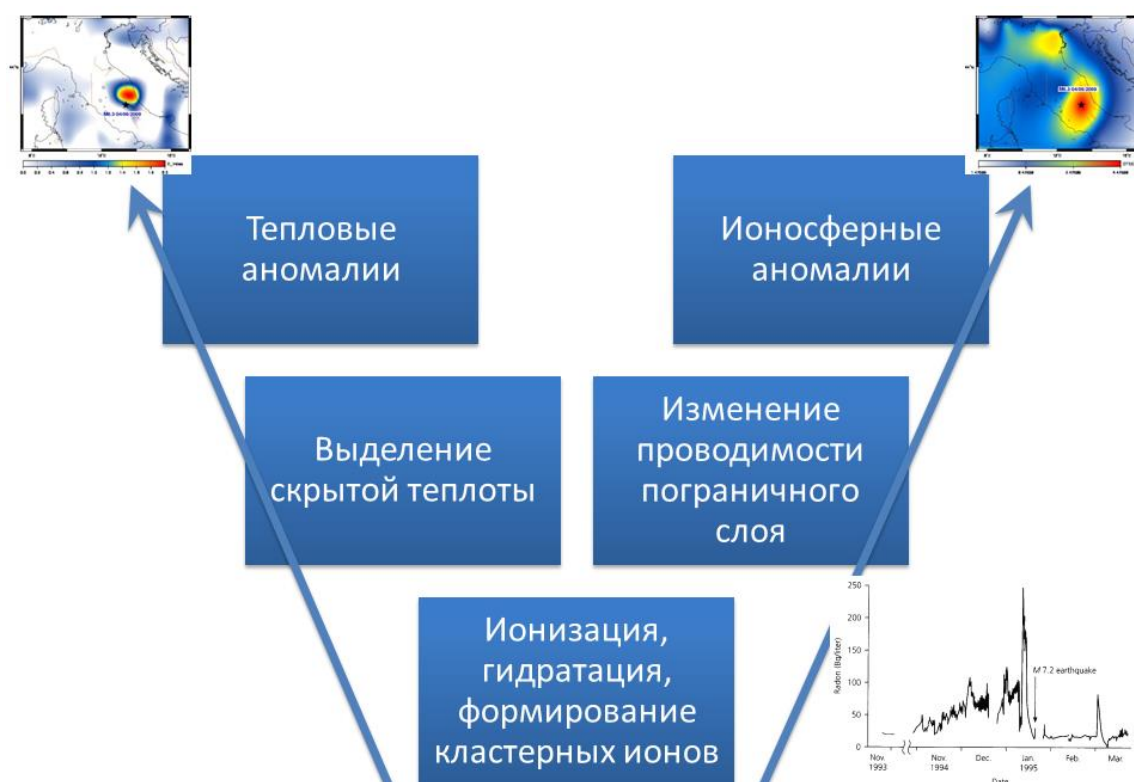


Рис. 2. Схема регистрации трех основных предвестников землетрясений.

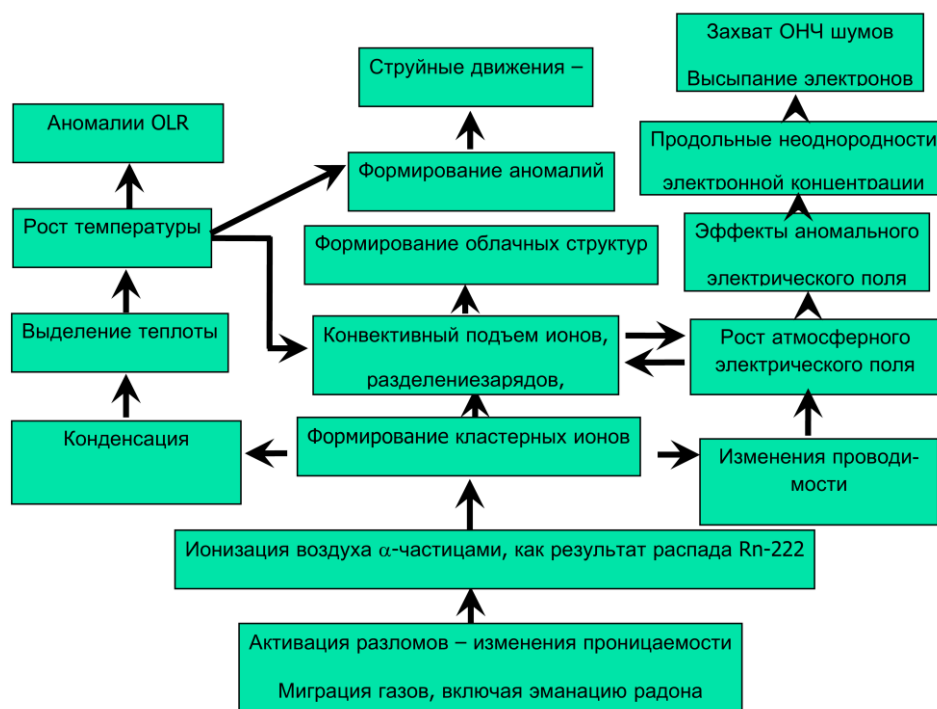


Рис. 3. Последовательность литосферно-атмосферно-ионосферных связей.

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 давле-

ния, 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 [32].

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 [33, 34].

Аквила, Италия, 06.04.2009



Рис. 4. Зависимости сейсмичности, выхода радона и параметров мониторинга от времени.

Таким образом, представленная модель позволяет не просто регистрировать набор различных физических параметров, а проводить целенаправленный поиск краткосрочных предвестников, появляющихся 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. 4, где можно видеть, как последовательно появляются увеличение уровня радона, повышение поверхностной температуры воздуха, появление аномалии OLR, и наконец, появление ионосферной аномалии. Следует также отметить, что все эти аномалии появляются внутри области, называемой зоной проявления предвестников или зоной подготовки землетрясения [24,35]. Таким образом, одним из основных признаков идентификации предвестников является их локализация вблизи эпицентра будущего землетрясения, а ее размер определяют его магнитуду.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ НАЧАЛА ФИНАЛЬНОЙ СТАДИИ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

К сожалению, современное состояние доставки спутниковых данных еще далеко от возможностей их анализа в реальном масштабе времени. В то же время, краткосрочный прогноз требует немедленного анализа развития ситуации, для чего необходима непрерывно поступающая информация, позволяющая определить момент начала финальной стадии подготовки землетрясения – прохождения системой точки невозврата. В соответствии с современной концепцией, финальная стадия подготовки землетрясения представляет собой переход системы от хаотического состояния [19] к самоорганизации, целью которой является достижение критического состояния и переход системы в другое качество. Подобные процессы описываются в

рамках нелинейной термодинамики [36] и си-
нергетики [37]. При этом система должна обла-
дать некими интегральными параметрами, кото-
рые имеют пороговое значение. Превышение
порогового значения (как это имело место с эн-
тропией в случае землетрясения в Аквиле [19])
означает начало приближения системы к крити-
ческому состоянию, а в нашем случае – финаль-
ной стадии подготовки землетрясения. Мы по-
пытаемся продемонстрировать наличие таких
параметров в нашей системе краткосрочных
предвестников, которые позволяют оперативно
определять момент приближения сейсмического
события.

Одним из таких индикаторов являются диф-
ференциальные вариации регионального содер-
жания электронов относительно глобального
содержания электронов, введенного в [38].
Впервые этот метод был опробован при анализе
ионосферных вариаций в период подготовки
разрушительного землетрясения в Японии 11
марта 2011 [27]. Источником данных служат
глобальные карты полного электронного содер-
жания, выпускаемые международной ионосфер-
ной группой IGS в табличном формате IONEX.
Глобальное содержание электронов представ-
ляет собой среднее значение от суммы всех значе-
ний GPSTEC за сутки. Затем рассчитывается ре-
гиональное электронное содержание, представ-
ляющее собой также среднее от суммы всех су-
точных значений, но только над областью под-
готовки землетрясения. Обычно глобальное
электронное содержание и региональное элек-
тронное содержание имеют достаточно высокий
коэффициент корреляции. Но в случае появле-
ния аномальных вариаций, как это имеет место
над областью подготовки землетрясения, наблю-
даются довольно значительные отклонения, ко-
торые и являются индикатором начала финаль-
ной стадии подготовки землетрясения.

Вторым интегральным индикатором может
служить поправка химического потенциала,
впервые введенная в [10, 11], и затем подробно
исследованная в [13-15, 26]. Химический потен-
циал представляет собой энергию связи молеку-
лы воды с ионом, к которому она присоединяет-
ся в процессе гидратации. Как было показано в
[11], при высокой концентрации ионов ($n_i > 10^6 \text{ см}^{-3}$)
энергия связи увеличивается, что приводит к
увеличению стабильности ионных кластеров, а

соответственно увеличению их времени жизни и
повышению концентрации тяжелых заряженных
частиц с низкой подвижностью в пограничном
слое атмосферы, что приводит к уменьшению ее
электрической проводимости. Увеличение энер-
гии связи можно выразить в виде поправки хи-
мического потенциала. Согласно [10, 26] она
может быть выражена в виде:

$$\Delta U \text{ (eV)} = 5.8 \times 10^{-10} (20T_g + 5463)^2 \ln(100/H), \quad (1)$$

где T_g – температура воздуха, °C; а H – отно-
сительная влажность, %.

Как видно из приведенной формулы, по-
правка химического потенциала может быть
легко получена путем использования доступных
данных метеорологических измерений, что резко
повышает оперативность оценки.

Процесс образования крупных кластерных
ионов может быть обнаружен также оптически-
ми средствами с помощью международной сети
фотометров AERONET в случае, когда частицы
достигают размеров аэрозолей. Как было пока-
зано в [7], именно такие частицы образуются
перед сильными землетрясениями за несколько
суток.

Комплексный анализ этих трех параметров
был проведен для случая землетрясения M7.2
вблизи турецкого города Ван 23 октября 2011 г.
На рис. 5 показаны все три параметра.

Как видно из рисунка, максимальные значе-
ния всех параметров регистрировались в период
с 14 по 18 октября. При этом максимальное зна-
чение оптической толщи аэрозолей за весь ок-
тябрь было достигнуто 17 октября.

Следует отметить, что землетрясение имело
место в отдаленном и незаселенном регионе
Турции, где не имелось никаких средств назем-
ного геофизического мониторинга, несмотря на
довольно плотную сеть станций измерения вари-
аций радона в этой стране. WEB технологии, с
помощью которых были получены ионосфер-
ные, метеорологические данные и данные AER-
ONET позволили в течение нескольких часов
определить период начала критических измене-
ний в области подготовки землетрясения 23 ок-
тября в Турции.

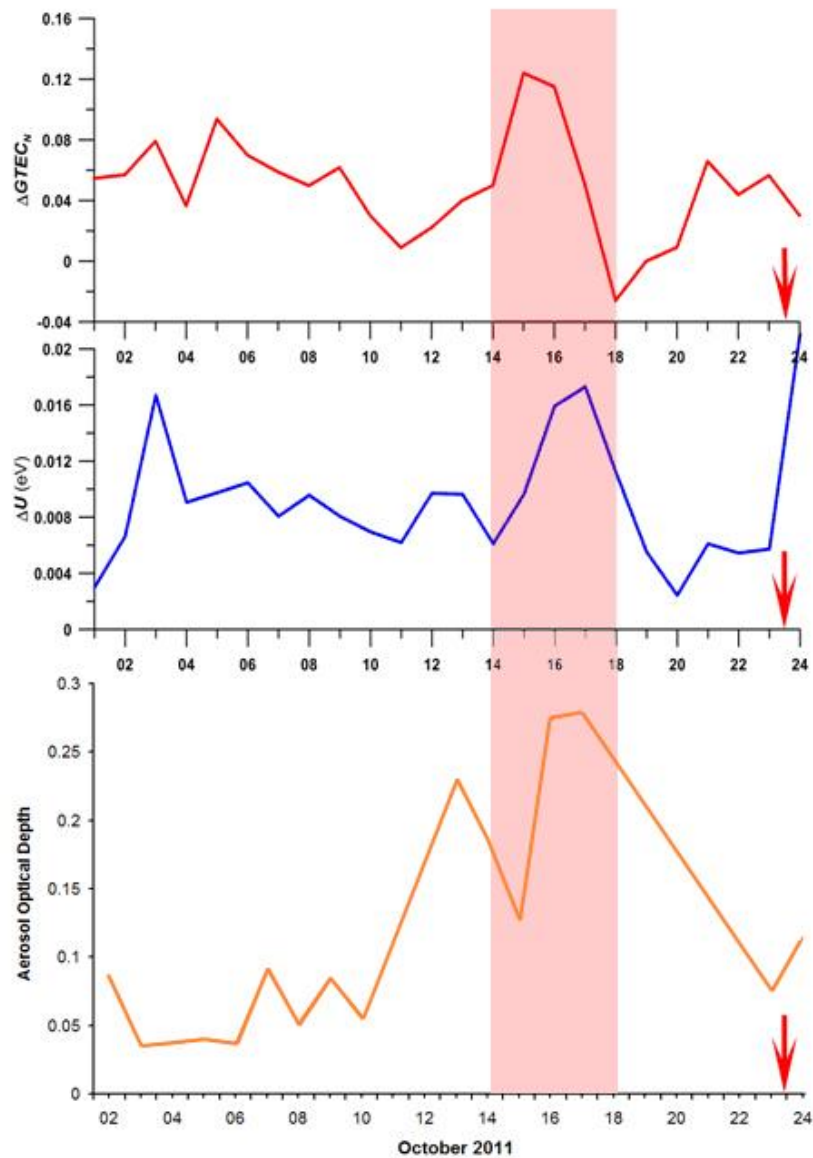


Рис. 5. Зависимости параметров мониторинга от времени

ОРГАНИЗАЦИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.

В соответствии с вышеизложенным, для наиболее надежного обнаружения и идентификации предвестников землетрясений необходим регулярный мониторинг из космоса обширных сейсмоопасных территорий с контролем следующих параметров атмосферы и ионосферы: температура, относительная влажность и тепловое излучение приземного воздуха, концентрация электронов в F2 слое ионосферы; наличие и форма облачных структур в зоне тектонических разломов. Для решения перечисленных задач

необходима следующая целевая аппаратура (ЦА) – бортовые многозональные сканирующие устройства среднего или малого разрешения видимого и ИК диапазонов спектра (МСУ-МР или СР), ионозонды и микроволновые температурно-влажностные зондировщики атмосферы (МТВЗА). Такие приборы в настоящее время разрабатываются и создаются различными организациями. С помощью этих приборов можно создавать поля необходимых параметров, а затем делать выводы о времени и месте надвигающегося землетрясения.

Однако надо иметь в виду, что не все перечисленные приборы совместимы между собой, имеют различные разрешение, полосу захвата и рабочую высоту. Стало быть, не все они могут

быть размещены на одном космическом аппарате (КА). Следовательно, для многопараметрического мониторинга должно быть не менее двух КА – один высокоорбитальный КА с ионозондом и, по крайней мере, еще один малый (масса не более 1000 кг) низкоорбитальный (400-500 км) КА, оснащенный МСУ-МР или –СР с рабочим диапазоном длин волн 0.4-13.5 мкм и МТВЗА. При этом надо иметь в виду, что для обеспечения достаточно высокой скорости обновления космической информации в ИК и СВЧ диапазонах спектра (не менее 4 раз в сутки) при полосе захвата ЦА 2500 км требуется не менее 8 КА. Для аналогичного покрытия ионосферы с помощью бортовых ионозондов, работающих на

высоте 800 км, требуется не менее 3 КА [39]. Таким образом, общая численность орбитальной группировки для глобального многопараметрического мониторинга предвестников мощных ($M > 5$) землетрясений составляет 11 КА.

В заключении перечислим основные методы для многопараметрического мониторинга предвестников землетрясений и приборы ЦА для их реализации – метод «химического потенциала» (МТВЗА), «ионосферный отклик» (ионозонд), метод «длинноволнового инфракрасного излучения» (МСУ), метод «линейных облачных структур» (МСУ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмоэлектромагнитные явления, Отв. ред. М.А. Садовский; АН СССР, Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта, 169 с., М. Наука 1988
2. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений, 303 с., М. Наука 1992
3. Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F., Earthquakes cannot be predicted, *Science*, 275, 1616-1618, 1997
4. Тертышников А.В. Сейсмоозонные эффекты и проблема прогнозирования землетрясений. – СПб.: ВИКА, 2000. 304 с.
5. Тертышников А.В. Организация прогнозирования природных чрезвычайных ситуаций. Учебное пособие. – Москва, 2011. 268 с.
6. Пулинец С. А., Узун Д. П., Спутниковым технологиям нет альтернативы. О проблеме мониторинга природных и техногенных катастроф, *Труды ИПГ*, Вып. 89, 173-185, 2010
7. Pulinets S., Ouzounov D., Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model - an unified concept for earthquake precursors validation, *Journal of Asian Earth Sciences*, 41, 371-382, 2011
8. Тертышников А.В. Основы мониторинга чрезвычайных ситуаций. Учебное пособие. – Москва, 2011. 261 с.
9. 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
10. К. А. Боярчук, А. В. Карелин, Р. В. Широков, Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы, М., ВНИИЭМ, 2006. – 203 с. - ISBN 5-903194-01-X
11. Pulinets S. A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K. A., Pokhmelnykh L. A., The physical nature of the thermal anomalies observed before strong earthquakes, *Physics and Chemistry of the Earth*, 31, 143-153, 2006
12. Sergey Pulinets, A Multi-Parameter Approach to Earthquake Forecasting, *Executive Intelligence Review*, 22 April 2011, v.38, No 16, p. 26-35, 2011
13. К.А. Боярчук, А.В. Карелин, А.В. Надольский, Статистическая оценка предвестников землетрясений на основе метода поправки химического потенциала, Материалы VII научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли», М., 2010, с.201 – 208.
14. К.А. Боярчук, А.В. Карелин, А.В. Надольский, Дистанционное зондирование предвестников землетрясений из космоса на основе метода «химического потенциала» по данным метеопараметров, *Космонавтика и ракетостроение*, №2(59), С.142-150, 2010.
15. К.А. Боярчук, А.В. Карелин, А.В. Надольский, Результаты детектирования предвестников землетрясений по данным метеонаблюдений на основе метода «химического потенциала», *Космонавтика и ракетостроение*, № 2(63), С.93-99, 2011.
16. S. A. Pulinets, T. B. Gaivoronska, A. Leyva Contreras, L. Ciralo, Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquakes, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, pp. 697-702, 2004
17. S. A. Pulinets, A. N. Kotsarenko, L. Ciralo, I. A. Pulinets, Special case of ionospheric day-to-day variability associated with earthquake preparation, *Adv. Space Res.*, 39 (5), 970-977, 2007
18. G. A. Papadopoulos, M. Charalampakis, A. Fokaefs, and G. Minadakis, Strong foreshock signal preceding the L'Aquila (Italy) earthquake (Mw 6.3) of 6 April 2009, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 19–24, 2010
19. De Santis A., Cianchini G., Qamili E., Frepoli A., The 2009 L'Aquila (Central Italy) seismic sequence as a chaotic process, *Tectonophysics*, 496, 44–52, 2010
20. De Santis A., Cianchini G., Favali P., Beranzoli L., Boschi E., The Gutenberg–Richter Law and Entropy of Earthquakes: Two Case Studies in Central Italy, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, 1386–1395, 2011

21. Pulinets S.A., The synergy of earthquake precursors, *Earthquake Science*, 24, 535-548, 2011, doi:10.1007/s11589-011-0815-1
22. Hiroo Kanamori, Masatoshi Miyazawa, and Jim Mori, Investigation of the earthquake sequence off Miyagi prefecture with historical seismograms, *Earth Planets Space*, 58, 1533–1541, 2006
23. Scholz C.H., Sykes, L.R., and Aggarwal Y.P., Earthquake prediction: A physical basis, *Science*, 181, 803-809, 1973
24. Добровольский И.П., Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения, Москва: Физматлит, 2009. 235 с.
25. Cicerone R. D., Engel J. E., Britton J., A systematic compilation of earthquake precursors, *Tectonophysics*, 476, 371–396, 2009
26. К.А. Боярчук, А.В. Карелин, А.В. Надольский, Статистический анализ зависимости поправки химического потенциала паров воды в атмосфере от удаленности эпицентра землетрясения, *Вопросы электромеханики*, 116, 39-45, 2010
27. Dimitar Ouzounov, Sergey Pulinets, Alexey Romanov, Alexander Romanov, Konstantin Tsybulya, Dmitri Davidenko, Menas Kafatos, Patrick Taylor, Atmosphere-Ionosphere Response to the M9 Tohoku Earthquake Revealed by Joined Satellite and Ground Observations: Preliminary Results, *Earthquake Science*, 24, 557-564, 2011
28. Toutain J.-P., Baubron J.-C., Gas geochemistry and seismotectonics: a review, *Tectonophysics*, 304, 1-27, 1998
29. Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M., Taylor P., Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes, *Tectonophysics*, 431, 211–220, 2007
30. 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*, 48, 831-843, 2008
31. Levina G.V., Moiseev S.S., Rutkevich P.B., Hydrodynamic alpha-effect in a convective system. Series: *Advances in Fluid Mechanics. Nonlinear Instability, Chaos and Turbulence*, Eds. L. Debnath and D.N. Riahi, 2, 111-162, 2000
32. Wu H.C. Preliminary findings on perturbation of jet stream prior to earthquakes. *EOS Trans.AGU* 85(47), Fall meeting, T51B-0455, 2004
33. S. A. Pulinets, K. A. Boyarchuk, V. V. Hegai and A. V. Karelin, Conception and model of seismosphere-magnetosphere coupling, in *Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*, Eds. M.Hayakawa and O.A.Molchanov, TERRAPUB, Tokyo, 2002, pp. 353-361
34. G. Anagnostopoulos, E. Vassiliadis and S. Pulinets, Characteristics of flux-time profiles, temporal evolution and spatial distribution of radiation belt electron precipitation bursts in the upper ionosphere before great and giant earthquakes // *AnnalesGeophysicae*, 30, 2012 (в печати)
35. Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Myachkin V.I., Estimation of the size of earthquake preparation zones, *Pageoph.*, 117, 1025-1044, 1979
36. Kondepudi D., Prigogine I., *Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures*, Wiley&Blackwell, 508 p., 1998
37. Хакен Г., Синергетика. – М.: «Мир», 1980. 405 с.
38. Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: Изд. ИСЗФ, 2006, 480 с.
39. S.A. Pulinets, Space technologies for short-term earthquake warning// *Advances in Space Research*, 37, 2006, p. 643–652.