

ЕДИНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ГОТОВЯЩЕГОСЯ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В РАМКАХ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ЛИТОСФЕРА – АТМОСФЕРА – ИОНОСФЕРА – МАГНИТОСФЕРА

Докт. физ.-мат. наук С.А. Пулинец (Институт космических исследований РАН), *канд. физ.-мат. наук Д.П. Узунов* (Университет Чэпмена), *докт. физ.-мат. наук А.В. Карелин* (ЦНИИ машиностроения), *докт. физ.-мат. наук К.А. Боярчук* (НИИ электромеханики), *докт. техн. наук А.В. Тертышников* (Институт прикладной геофизики), *И.А. Юдин* (НИИ аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос»)

Рассматривается вопрос о возможности практического применения имеющихся на сегодняшний день знаний о процессах, происходящих в сложной системе литосфера – атмосфера – ионосфера, в целях краткосрочного прогноза землетрясений. Отмечается, что прогноз, базирующийся на анализе вариаций какого-то одного из параметров окружающей среды, не может быть достоверным в силу сложности механизма генерации предвестников разного типа, вследствие чего надёжный прогноз можно строить на основе одновременной регистрации целого ряда признаков, называемых предвестниками. Представляется концепция обнаружения комплекса аномальных вариаций окружающей среды в области готовящегося землетрясения, основанная на многопараметрических измерениях, в рамках синергетического подхода к сложным открытым диссипативным системам.

Ключевые слова: землетрясение, предвестники, мониторинг, спутниковые технологии, орбитальная группировка.

Common Concept of Oncoming Powerful Earthquake Sign Detection within the Framework of Integrated Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere-Magnetosphere System. S. A. Pulinets, D. P. Ouzounov, A. V. Karelin, K. A. Boyarchuk, A. V. Tertyshnikov, I. A. Yudin. The article analyzes the feasibility of using the now available knowledge on the complex Integrated Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere-Magnetosphere System processes for short-term earthquake prediction. It is noted that the prediction made on the basis of analyzing variations of any one of the environment parameters can't be reliable due to the complexity of the mechanism of generating forerunners of various kinds, thus a reliable prediction can be made concurrently recording a set of signs called forerunners. A concept for detecting a set of abnormal environment variations in the oncoming earthquake zone based on multi-parameter measurements is presented applying the synergetic approach to complex open dissipative systems.

Key words: earthquake, forerunner, monitoring, satellite technologies, orbital constellation.

История развития исследований в области краткосрочного прогнозирования землетрясений весьма драматична, она переживала несколько периодов подъёма и спада, от эйфории до отчаяния, а во время научных дискуссий дело доходило до взаимных обвинений и угроз. Однако процессы в атмосфере и ионосфере, вызванные электромагнитными явлениями, сопровождающими «подготовку» землетрясения, до сегодняшнего дня остаются предметом острых споров. Условно историю развития этих исследований можно разделить на три периода: накопления первичных данных и первых обобщающих работ, дающих надежду на возможность прогноза землетрясений с использованием электромагнитных и атмосферных явлений [1, 2]; полного отрицания возможности краткосрочного прогноза землетрясений [3, 4]; наступления спутниковых технологий, создания новых моделей и концепций [4 – 7].

ПРИМЕЧАНИЕ

В связи с тем, что редакцией в текст статьи были внесены правки, не согласованные с основными авторами, неправильно дана английская транскрипция фамилии иностранного соавтора, данный вариант отличается от версии, опубликованной в журнале, внесены правки, соответствующие оригинальному варианту статьи

Комплексный анализ данных показал, что процессы в атмосфере, в том числе метеорологические аномалии [8], и в ионосфере связаны между собой [9], а для понимания 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 обеспечить решающий прорыв в реализации проблемы краткосрочного прогноза землетрясений. Современный период исследований можно характеризовать как период валидации созданной модели [7] и разработки практических методов идентификации различных типов предвестников [13 – 17].

Наибольший интерес при предлагаемом подходе представляет собой связь между тепловыми и ионосферными предвестниками, обусловленная гидратацией ионов. Интенсивная гидратация, с одной стороны, приводит к выделению огромных потоков скрытой теплоты парообразования, а с другой – к изменению за счёт образования больших кластерных ионов проводимости пограничного слоя атмосферы, в результате чего через глобальную электрическую цепь меняется электрический потенциал ионосферы над областью подготовки землетрясения.

Формальное определение форшоковой активности [18], а также понимание подготовки землетрясения как хаотического самоорганизующегося процесса [19, 20] позволили распространить указанную идею на рассмотрение предвестниковых эффектов в атмосфере и ионосфере как части сложной системы литосфера – атмосфера – ионосфера [21]. Именно такой подход даёт возможность говорить о создании единой концепции обнаружения признаков готовящегося сильного землетрясения.

ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ПОДХОД К КЛАССИФИКАЦИИ КРАТКОСРОЧНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Прежде чем перейти к обсуждению самих предвестников, необходимо дать определение краткосрочных предвестников землетрясений как отдельного класса. С этой целью обычно рассматривается сейсмический цикл между двумя землетрясениями в одной и той же точке, который в зависимости от тектоники региона и определённой магнитуды землетрясения может занимать промежуток от несколь-

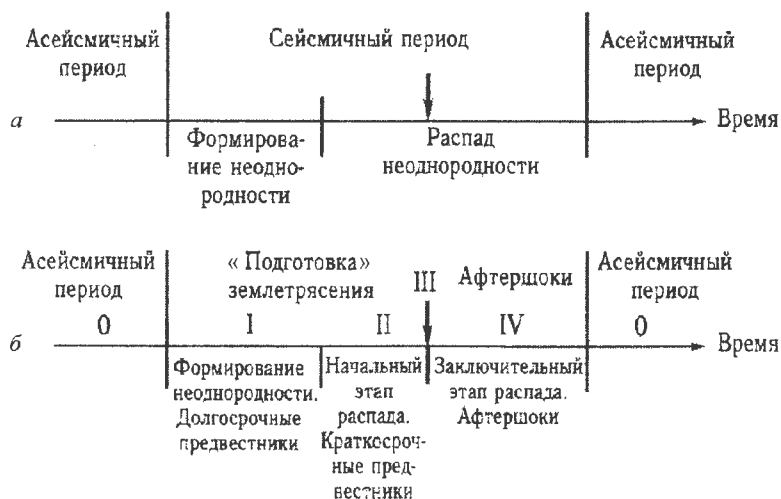


Рис. 1. Физическая (а) и обычная [24] (б) схемы цикла землетрясений

ких лет до нескольких десятков или даже сотен лет. Такой цикл землетрясений с магнитудой больше 7 (например в регионе недавнего мегаземлетрясения Тохоку 11 марта 2011 г.) составляет 37 ± 7 лет [22]. При этом цикл делится на несколько периодов, внутри которых и выделяются временные интервалы, позволяющие определить долгосрочные, среднесрочные, и краткосрочные предвестники [23, 24].

На рис. 1 представлены физическая схема цикла землетрясения и обычная его схема согласно работе [24]. Как видим, вторая фаза представляет собой период, когда генерируются среднесрочные и краткосрочные предвестники землетрясений (И.П. Добровольский в своей концепции их не разделяет).

Однако до настоящего момента не существует чёткого критерия для определения границы перехода от понятия среднесрочных к понятию краткосрочных предвестников. Представляется, что таким критерием может служить начало форшоковой активности [18] или превышение порогового значения энтропии [20]. Возможен ещё один подход, предложенный в работе [21]: считать моментом перехода системы к генерации краткосрочных предвестников прохождение ею точки невозврата, т.е. тот случай, когда землетрясение произойдет обязательно невзирая ни на какие обстоятельства.

Обычно принято делить предвестники на тектонические, сейсмические, гидрогеохимические, биологические, электромагнитные, метеорологические и плазменные (или ионосферные) [25]. На наш взгляд, такое деление не даёт чёткого 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) с учётом сред-аномалии, генерируемые в земной коре, на поверхности Земли, в атмосфере, ионосфере и даже магнитосфере. В этом случае и деформации земной коры, и изменения её проводимости, и гравитационные геомагнитные гидрологические (изменение уровня воды) и геохимические аномалии будут относиться к одной группе – генерируемые в земной коре. Таким же образом можно сгруппировать и другие предвестники, наблюдаемые, соответственно, 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 при всех землетрясениях, хотя достаточно стройно вписываются в модель. К таким признакам можно отнести линейные облачные структуры, образующиеся над активными тектоническими разломами за несколько суток (а иногда недель) до сейсмического толчка. Если говорить о месте параметров в модели, то есть такие характеристики, как вариации радона, которые принципиально важны для реализации всей цепи генерации краткосрочных предвестников. По крайней мере, в рамках данной модели наличие таких вариаций, а именно резких изменений в потоке эманации радона из земной коры, является определяющим. И, наконец, следует сказать о реализуемости измерений того или иного параметра. В наборе параметров глобальной электрической цепи, как показали последние исследования, наиболее информативным был бы вертикальный ток в атмосфере, фактически определяющий потенциал ионосферы относительно Земли. Однако в силу малости величины (в нормальных условиях вертикальная плотность тока составляет $\sim 4 \cdot 10^{-12}$ А/м²) его измерение представляет значительные сложности, и для оценки тока приходится определять производные параметры, такие, как вертикальный градиент электрического поля и полная проводимость.

Синергетический подход к проблеме предвестников [20, 21] даёт возможность использовать обобщённые 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].

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.

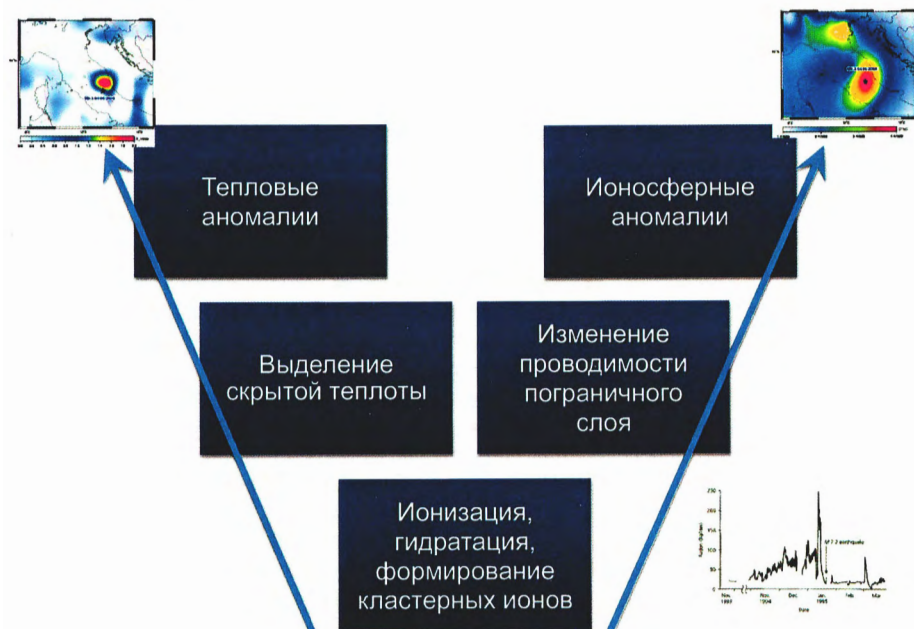


Рис. 2. Схема регистрации трёх основных предвестников землетрясений

На рис. 2 представлена схема регистрации трёх основных предвестников с указанием их места в комплексной модели.

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

Вся история краткосрочного прогноза, основанного на так называемых физических предвестниках [23], связана с регистрацией различных аномалий геофизических полей и представлена в дискуссиях о том, что является предвестником, а что не является, и какой из предвестников лучше и надёжнее [25]. Подробно описывались их характеристики, зависимости от времени землетрясения и магнитуды, а также представлялось множество моделей. Практически каждому из предвестников соответствовала собственная модель. При этом возникал естественный вопрос: как один, по сути, процесс деформации земной коры и последующего её разрыва может вызывать такое разнообразие совершенно различных процессов, описываемых разными моделями. Часто для одних и тех же предвестников предлагалось сразу несколько моделей [30]. Нелепость такого положения 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 определённой последовательности, а аномалии имеют свой источник в уже развившейся аномалии и сами являются источником последующей аномалии. Такая последовательность процессов представлена на рис. 3.

Можно также условно разделить наблюдаемые эффекты на три категории: тепловые (левая ветвь модели), атмосферные или облачные (средняя ветвь) и электромагнитные или ионосферные (правая ветвь). В «тепловой» ветви основным процессом является выделение скрытой теплоты испарения при конденсации паров воды на ионах, образовавшихся после ионизации молекул атмосферных газов радоном. Если вблизи поверхности Земли тепловые аномалии проявляются в виде линейных структур, вытянутых вдоль активных разломов, то далее ввиду наличия горизон-



Рис. 3. Последовательность литосферно-атмосферно-ионосферных связей:
OLR – убегавшее длинноволновое инфракрасное излучение; ОНЧ – очень низкочастотные шумы

тальных градиентов температуры и давления начинается процесс перемешивания, и образуется вертикальный восходящий поток, так как температура воздуха над областью подготовки землетрясения выше, чем вне её. В результате мелкомасштабная турбулентность вследствие развития обратного каскадного процесса (развития турбулентности с увеличением пространственного масштаба) [31] приводит к образованию крупномасштабной структуры – теплового пятна на уровне верхней кромки облаков 10 – 12 км.

Атмосферные и электромагнитные процессы «работают» совместно: вертикальная конвекция, возникающая вследствие выделения скрытой теплоты испарения, «выносит» кластерные ионы наверх, что приводит к вытеснению лёгких 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 обуславливает образование линейных облачных структур – одного из краткосрочных предвестников землетрясений.

Помимо 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 насчитывающие 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 ещё и то, что их положение остаётся неизменным в течение нескольких часов [32].

Основным фактором, приводящим к генерации аномалий в ионосфере и магнитосфере, являются аномалии в атмосферном электричестве, связанные с измене-

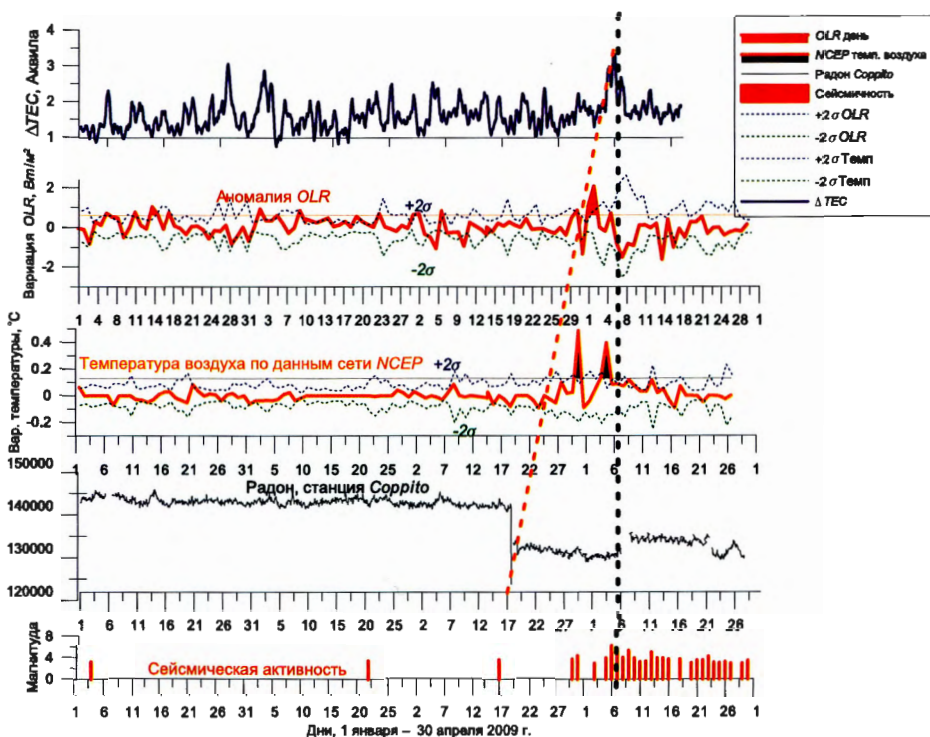


Рис. 4. Зависимости сейсмичности, выхода радона и регистрации параметров мониторинга от времени

нием 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 магнитосопряжённой точке. Рассеяние ОНЧ- шумов в модифицированную магнитосферную трубку приводит к повышению уровня шумов ОНЧ- диапазона внутри этой трубки, а также к более эффективному взаимодействию ОНЧ- излучений с энергичными электронами радиационных поясов и стимулированию их высыпания перед землетрясениями [33, 34].

Таким образом, представленная модель позволяет не просто регистрировать набор различных физических параметров, но и проводить целенаправленный поиск краткосрочных предвестников, возникающих в некой временной последовательности с определённым запаздыванием по мере увеличения высоты проявления регистрируемой аномалии. Впервые такую последовательность удалось зарегистрировать при землетрясении в Аквиле (Италия) в апреле 2009 г. Этот результат показан на рис. 4, где отражены последовательное увеличение уровня радона, повышение поверхностной температуры воздуха, появление аномалии *OLR* и, наконец, появ-

ление ионосферной аномалии. Следует отметить, что все эти аномалии возникают внутри области, называемой зоной проявления предвестников или зоной подготовки землетрясения [24, 35]. Таким образом, один из основных признаков идентификации предвестников – их локализация вблизи эпицентра будущего землетрясения, размер которой определяет его магнитуду.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ НАЧАЛА ФИНАЛЬНОЙ СТАДИИ «ПОДГОТОВКИ» ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

К сожалению, современное состояние доставки спутниковых данных не даёт возможности их анализа в реальном масштабе времени, а для краткосрочного прогноза требуется немедленная оценка развития ситуации, вследствие чего необходима непрерывно поступающая информация, позволяющая определить момент начала финальной стадии «подготовки» землетрясения – прохождения системой точки невозврата. В соответствии с современной концепцией эта стадия представляет собой переход системы от хаотического состояния [19] к самоорганизации, целью которой являются достижение критического состояния и переход системы в другое качество. Подобные процессы описываются в рамках нелинейной термодинамики [36] и синергетики [37] при условии, что система должна обладать некоторыми интегральными параметрами, которые имеют пороговое значение. Превышение порогового значения любого из параметров (а именно энтропии в случае землетрясения в Аквиле [19]) означает начало приближения системы к критическому состоянию, в нашем случае – финальной стадии «подготовки» землетрясения. Попробуем продемонстрировать наличие в рассматриваемой системе краткосрочных предвестников параметров, которые позволяют оперативно определять момент приближения сейсмического события.

Одним из таких индикаторов являются дифференциальные вариации регионального содержания электронов относительно глобального их содержания, введённого в работе [38]. Впервые этот метод был опробован при анализе ионосферных вариаций в период «подготовки» разрушительного землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. [27]. Источником данных служат глобальные карты полного содержания электронов, выпускаемые международной ионосферной группой *IGS* в табличном формате *IONEX*. Глобальное содержание электронов представляет собой среднее значение от суммы всех значений *GPSTEC* за сутки. Следует рассчитать и региональное содержание электронов, представляющее собой также среднее от суммы всех суточных значений, но только над областью «подготовки» землетрясения. Обычно глобальное и региональное содержание электронов имеют достаточно высокий коэффициент корреляции. Однако в случае появления аномальных вариаций, как это имеет место над областью «подготовки» землетрясения, наблюдаются довольно значительные отклонения, которые и являются индикатором начала финальной стадии «подготовки» землетрясения.

Вторым интегральным индикатором может служить поправка химического потенциала, впервые введённая в работах [10, 11] и затем подробно исследованная [13 – 15, 26]. Химический потенциал представляет собой усреднённую по объёму энергию связи молекулы воды в процессе гидратации. Как было показано [11], при высокой концентрации ионов ($n_i > 10^6 \text{ см}^{-3}$) энергия связи возрастает, что приводит к увеличению стабильности ионных кластеров, а соответственно, к увеличению их времени жизни и повышению концентрации тяжёлых заряженных частиц с низкой подвижностью в пограничном слое атмосферы, что обуславливает снижение её электрической проводимости. Увеличение энергии связи можно выразить в виде поправки химического потенциала [10, 26]

$$\Delta U (eV) = 5,8 \cdot 10^{-10} (20 \cdot T_g + 5463)^2 \ln(100/H),$$

где T_g – температура воздуха, °C, а H – относительная влажность, %.

Как видно из приведённой формулы, поправка химического потенциала может быть легко получена в результате использования доступных данных метеорологических измерений, что резко повышает оперативность оценки.

Процесс образования крупных кластерных ионов может быть обнаружен также оптическими средствами с помощью международной сети фотометров *AERONET* в том случае, когда частицы достигают аэрозольных размеров. Именно такие частицы образуются перед сильными землетрясениями за несколько суток [7].

Комплексный анализ этих трёх параметров был проведён при исследовании землетрясения M7.2 вблизи турецкого города Ван 23 октября 2011 г. (рис. 5).

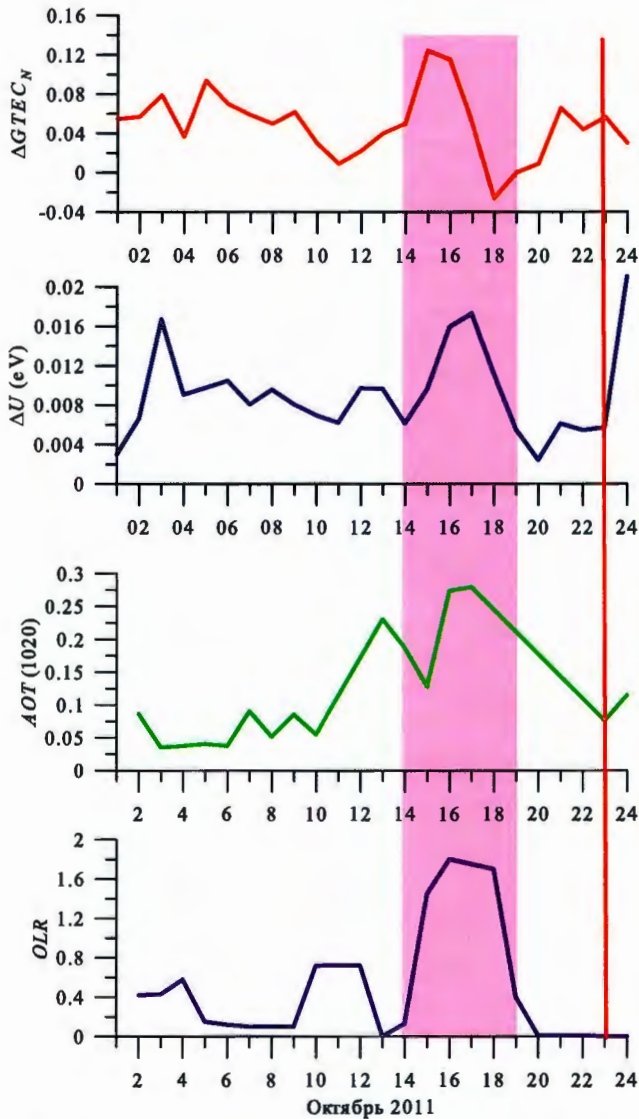


Рис. 5. Зависимости параметров мониторинга от времени

Как видно из рисунка, максимальные значения всех параметров регистрировались в период с 14 по 18 октября. При этом наибольшее значение оптической толщи аэрозолей за весь месяц было достигнуто 17 октября.

Следует отметить, что землетрясение произошло в отдалённом и незаселённом регионе Турции, где не имелось никаких средств наземного геофизического мониторинга несмотря на довольно плотную сеть станций измерения вариаций радона в этой стране. Ионосферные метеорологические данные, полученные с помощью *WEB*- технологий, и данные *AERONET* позволили в течение нескольких часов опре-

делить период начала критических изменений в области «подготовки» указанного землетрясения.

ОРГАНИЗАЦИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В соответствии с изложенным для наибольшей точности обнаружения и надёжности идентификации предвестников землетрясений необходим регулярный мониторинг из космоса обширных сейсмоопасных территорий и контроль параметров атмосферы и ионосферы: температуры, относительной влажности и теплового излучения приземного воздуха, концентрации электронов в F_2 -слое ионосферы, – а также наличия и формы облачных структур в зоне тектонических разломов. Для решения указанных задач требуется 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 приборы для зондирования атмосферы (МТВЗА). Такая аппаратура в настоящее время разрабатывается различными организациями. С помощью этих приборов можно создавать поля с необходимыми параметрами, а затем на основании полученных результатов делать выводы о времени и месте надвигающегося землетрясения.

Однако надо иметь в виду, что не все перечисленные приборы совместимы: они имеют различные разрешение, полосу захвата и рабочую высоту, а значит, 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, ещё один малый (масса не более 1000 – 2000 кг) низкоорбитальный (400 – 500 км) КА, оснащённый 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. В случае 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 заключение перечислим основные методы многопараметрического мониторинга предвестников землетрясений и укажем приборы целевой аппаратуры 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. Сейсмoeлектромагнитные явления. Отв. ред. М.А. Садовский. М.: Наука, 1988, 169 с.
2. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992, 303 с.
3. Geller R. J., Jackson D. D., Kagan Y. Y. et al. Earthquakes Cannot be Predicted. – Science, 1997, v. 275, pp. 1616 – 1618.
4. Пулинец С. А., Хегай В. В., Боярчук К. А. и др. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы. – Успехи физических наук, 1998, № 41 (5), с. 515 – 522.
5. Pulinets S. A., Boyarchuk K. A. Ionospheric Precursors of Earthquakes. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2004.
6. Пулинец С. А., Узунов Д. П. Спутниковым технологиям нет альтернативы. О проблеме мониторинга природных и техногенных катастроф. – Труды ИПГ, 2010, вып. 89, с. 173 – 185.
7. Pulinets S., Ouzunov D. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) Model - an Unified Concept for Earthquake Precursors Validation. – Journal of Asian Earth Sciences, 2011, v. 41, pp. 371 – 382.

8. Милькис М. Р. Метеорологические предвестники сильных землетрясений. – Изв. АН СССР. Физика Земли, 1986, с. 36 – 47.
9. Pulinetts S. A., Ouzounov D., Ciruolo L. et al. Thermal, Atmospheric and Ionospheric Anomalies Around the Time of the Colima M7.8 Earthquake of 21 January 2003. – *Annales Geophysicae*, 2006, v. 24, pp. 835 – 849.
10. Боярчук К. А., Карелин А. В., Широков Р. В. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы. М.: ВНИИЭМ, 2006.
11. Pulinetts S. A., Ouzounov D., Karelin A. V. et al. The Physical Nature of the Thermal Anomalies Observed before Strong Earthquakes. – *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, v. 31, pp. 143 – 153.
12. Pulinetts Sergey. A Multi-Parameter Approach to Earthquake Forecasting. – *Executive Intelligence Review*, 2011, v.38, No. 16, pp. 26 – 35.
13. Боярчук К. А., Карелин А. В., Надольский А. В. 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. Боярчук К. А., Карелин А. В., Надольский А. В. Дистанционное зондирование предвестников землетрясений из космоса на основе метода «химического потенциала» по данным метеопараметров. – *Космонавтика и ракетостроение*, 2010, вып. 2 (59), с.142 – 150.
15. Боярчук К. А., Карелин А. В., Надольский А. В. Результаты детектирования предвестников землетрясений по данным метеонаблюдений на основе метода «химического потенциала». – *Космонавтика и ракетостроение*, 2011, вып. 2 (63), с.93 – 99.
16. Pulinetts S. A., Gaivoronska T. B., Leyva Contreras A. et al. Correlation Analysis Technique Revealing Ionospheric Precursors of Earthquakes. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2004, v. 4, pp. 697 – 702.
17. Pulinetts S. A., Kotsarenko A. N., Ciruolo L. et al. Special Case of Ionospheric Day-to-day Variability Associated with Earthquake Preparation. – *Adv. Space Res.*, 2007, № 39 (5), pp. 970 – 977.
18. Papadopoulos G. A., Charalampakis M., Fokaefs A. et al. Strong Foreshock Signal Preceding the L'Aquila (Italy) Earthquake (Mw 6.3) of 6 April 2009. – *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2010, v. 10, pp. 19 – 24.
19. De Santis A., Cianchini G., Qamili E. et al. The 2009 L'Aquila (Central Italy) Seismic Sequence as a Chaotic Process. – *Tectonophysics*, 2010, v. 496, pp. 44 – 52.
20. De Santis A., Cianchini G., Favali P. et al. The Gutenberg – Richter Law and Entropy of Earthquakes: Two Case Studies in Central Italy. – *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011, v. 101, pp. 1386 – 1395.
21. Pulinetts S. A. The Synergy of Earthquake Precursors. – *Earthquake Science*, 2011, v. 24, pp. 535 – 548. doi:10.1007/s11589-011-0815-1.
22. Kanamori Hiroo, Miyazawa Masatoshi, Mori Jim. Investigation of the Earthquake Sequence off Miyagi Prefecture with Historical Seismograms. – *Earth Planets Space*, 2006, v. 58, pp. 1533 – 1541.
23. Scholz C. H., Sykes L. R., Aggarwal Y. P. Earthquake Prediction: A Physical Basis. – *Science*, 1973, v. 181, pp. 803 – 809.
24. Добровольский И. П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: Физматлит, 2009, 235 с.
25. Cicerone R. D., Engel J. E., Britton J. A Systematic Compilation of Earthquake Precursors. – *Tectonophysics*, 2009, v. 476, pp. 371 – 396.
26. Боярчук К. А., Карелин А. В., Надольский А. В. Статистический анализ зависимости поправки химического потенциала паров воды в атмосфере от удаленности эпицентра землетрясения. – *Вопросы электромеханики*, 2010, т. 116, с. 39 – 45.
27. Ouzounov Dimitar, Pulinetts Sergey, Romanov Alexey et al. Atmosphere-Ionosphere Response to the M9 Tohoku Earthquake Revealed by Joined Satellite and Ground Observations: Preliminary Results. – *Earthquake Science*, 2011, v. 24, pp. 557 – 564.
28. Toutain J.-P., Vaubron J.-C. Gas Geochemistry and Seismotectonics: a Review. – *Tectonophysics*, 1998, v. 304, pp. 1 – 27.
29. Ouzounov D., Liu D., Chunli K. et al. Outgoing Long Wave Radiation Variability from IR Satellite Data Prior to Major Earthquakes. – *Tectonophysics*, 2007, v. 431, pp. 211 – 220.
30. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Мейстер К. В. и др. Физические модели связей в системе литосфера – атмосфера – ионосфера перед землетрясениями. – *Геоматематизм и аэрономия*, 2008, т. 48, с. 831 – 843.

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, 2000, v. 2, pp. 111 – 162.
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. Pulinets S. A., Boyarchuk K. A., Hegai V. V. et al. Conception and Model of Seismo-Ionosphere-Magnetosphere Coupling, in Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling. Eds. M.Hayakawa and O.A. Molchanov. TERRAPUB, Tokyo, 2002, pp. 353 – 361.
34. Anagnostopoulos G., Vassiliadis E., Pulinets S. 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. – Annales Geophysicae, 2012, v. 30.
35. Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Myachkin V. I. Estimation of the Size of Earthquake Preparation Zones. – PAGEOPH., 1979, v. 117, pp. 1025 – 1044.
36. Kondrupi D., Prigogine I. Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures, Wiley&Blackwell, 1998, 508 p.
37. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980, 405 с.
38. Афраимович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд. ИСЗФ, 2006, 480 с.
39. Pulinets S. A. Space Technologies for Short-term Earthquake Warning. – Advances in Space Research, 2006, v. 37, pp. 643 – 652.