

УДК 550.343.62

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГЕНЕРАЦИИ КРАТКОСРОЧНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ. КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ЛИТОСФЕРА–АТМОСФЕРА–ИОНОСФЕРА–МАГНИТОСФЕРА, ИНИЦИИРУЕМЫХ ИОНИЗАЦИЕЙ

© 2015 г. С. А. Пулинец¹, Д. П. Узунов², А. В. Карелин³, Д. В. Давиденко^{1,4}

¹Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва

²Университет Чэпмена, г. Оранж, Калифорния, США

³Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИмаш),
г. Королёв (Московская обл.)

⁴Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва (РКК “Энергия”),
г. Королёв (Московская обл.)

e-mails: pulse@rssi.ru; dim.ouzounov@gmail.com; avkarelin@mail.ru; davidenkoe5@rambler.ru

Поступила в редакцию 23.02.2015 г.

В работе изложено современное понимание взаимодействия геосфер в результате развития сложного комплекса физико-химических процессов под воздействием ионизации. К источникам ионизации можно отнести естественную радиоактивность Земли и ее интенсификацию перед землетрясениями в сейсмоактивных областях, антропогенную радиоактивность, связанную с испытаниями ядерного оружия и авариями на атомных электростанциях и хранилищах радиоактивных отходов, воздействие галактических и солнечных космических лучей, а также активные геофизические эксперименты с использованием установок искусственной ионизации. Настоящий подход основан на понимании окружающей среды как открытой сложной системы с диссипацией, рассмотрение процессов в которой возможно в рамках синергетического подхода. Продемонстрирована синергетическая связь между развитием тепловых и электромагнитных аномалий в атмосфере, ионосфере и магнитосфере Земли. Это позволяет определить направленность происходящего процесса взаимодействия, что особенно важно в приложениях, связанных с краткосрочным прогнозом землетрясений. Именно поэтому основное внимание в работе уделено процессам, развивающимся на финальной стадии подготовки землетрясений, а эффекты других источников ионизации будут приводиться для демонстрации универсальности модели и возможности ее применения в геофизике в широком смысле.

DOI: 10.7868/S0016794015040136

1. ВВЕДЕНИЕ. ОБЩАЯ СХЕМА МОДЕЛИ НА ПРИМЕРЕ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Вся история краткосрочного прогноза землетрясений, основанного на так называемых физических предвестниках [Scholz et al., 1973], связана с регистрацией различных аномалий геофизических полей и дискуссиями, что является предвестником, а что не является таковым, и какой из них лучше и надежнее [Cicerone et al., 2009]. Подробно описывались их характеристики, зависимости от времени землетрясения и магнитуды и множество моделей. Практически каждый из предвестников имел собственную модель. При этом возникал естественный вопрос: как один, по сути, процесс деформации земной коры и последующего разрыва может вызывать такое разнообразие совершенно различных процессов, описы-

ваемых разными моделями? При этом часто для одних и тех же предвестников предлагалось сразу несколько моделей [Липеровский и др., 2008]. 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 определенной последовательности, а аномалии имеют свой источник в уже развившейся ранее аномалии, и сами являются источником последующей аномалии [Пулинец и Узунов, 2010; Pulinets and Ouzounov, 2011; Pulinets, 2011a, b]. Такая последовательность процессов представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схематическое представление модели комплексных связей в системе литосфера–атмосфера–ионосфера–магнитосфера.

Если внимательно проанализировать представленную схему, то можно условно разделить наблюдаемые эффекты на три категории: тепловые (левая ветвь рисунка), атмосферные или облачные (средняя ветвь рисунка) и электромагнитные или ионосферно-магнитосферные (правая ветвь рисунка). 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, так как в общем температура воздуха над областью подготовки землетрясения выше, чем вне ее. В результате мелкомасштабная турбулентность вследствие развития обратного каскадного процесса (развитие турбулентности с увеличением пространственного масштаба) [Levina et al., 2000]

приводит к образованию крупномасштабной структуры – теплового пятна на уровне верхней кромки облаков 10–12 км (OLR – уходящее длинноволновое инфракрасное излучение).

Атмосферные и электромагнитные процессы “работают” совместно: вертикальная конвекция, возникающая вследствие выделения скрытой теплоты испарения за счет конденсации паров воды на ионах, выносит кластерные ионы вверх, 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 предзвездные 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 [Морозова, 1993; 2005].

Помимо образования линейных облачных структур, к числу атмосферных аномалий, на-

блюдаемых 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 [Wu and Tikhonov, 2014].

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 к более эффективному взаимодействию ОНЧ-излучений с энергичными электронами радиационных поясов и их стимулированному выпадению перед землетрясениями [Pulinets et al., 2002; Anagnostopoulos et al., 2012].

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 г. Аквила в апреле 2009 г. Этот результат показан на рис. 2, где можно видеть, как последовательно появляются увеличение уровня радона [Giuliani et al., 2009], повышение поверхностной температуры воздуха, появление аномалии OLR и, наконец, появление ионосферной аномалии. Следует также отметить, что все эти аномалии появляются внутри зоны подготовки землетрясения [Dobrovolsky et al., 1979].

Фактически тепловые аномалии, возникающие на поверхности Земли, являются связующим звеном между сейсмологией (которая определяет размер области подготовки землетрясения по сейсмическим и геохимическим данным) и моделью литосферно-атмосферно-ионосферных связей, описывающей предвестниковые эффекты в атмосфере и ионосфере. Мало того, они дают ключ к использованию данных космического мониторинга. Если придерживаться представляемой здесь концепции о том, что тепловые аномалии генерируются в результате выделения скрытой теплоты испарения при конденсации паров воды на ионах, образуемых при ионизации приземного слоя воздуха радоном, мы получаем в руки инструмент, позволяющий отслеживать пространственное распределение и динамику выделения радона перед землетрясениями на громадных площадях в сотни тысяч квадратных километров, что не под силу никаким наземным методам геохимического мониторинга. Таким образом, мы предлагаем эффективный интерфейс между классической сейсмологией и тектонофизикой, которые описывают динамику земной коры в период подготовки сильных землетрясений через геохимию (изменение миграции газов в период подготовки, в том числе — и динамики вариаций радона) к тепловым аномалиям и другим аномалиям вариаций атмосферных и ионосферных параметров. Непрерывность, синхронность и локальность проявления сейсмических [Paradopoulos, 2009], геодинамических [Platino et al., 2010], геохимических [Bonfanti et al., 2012], поверхностных тепловых [Pergola et al., 2010], а также многочисленных аномалий в атмосфере, ионосфере и магнитосфере [Pulinets et al., 2009; Pulinets, 2011a,b; Rozhnoi et al., 2009; Anagnostopoulos et al., 2012; Давиденко, 2013] на финальной стадии подготовки землетрясения в Аквиле, Италия, 6 апреля 2009 г. свидетельствуют о том, что все зарегистрированные аномалии являются звеньями одной цепи — сложного комплексного процесса подготовки катастрофического события, которое можно описать в рамках синергетического подхода [Pulinets, 2011a].

Собственно говоря, аргументированная демонстрация того факта, что многообразные краткосрочные предвестники не являются независимыми, а представляют собой элементы сложной системы на этапе ее приближения к катастрофическому событию и представляет собой основную цель данной работы.

2. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Комплексная модель взаимосвязей геоэффективных явлений в литосфере, атмосфере и ионосфере Земли (LAIC) начала свое развитие в 1998 г.

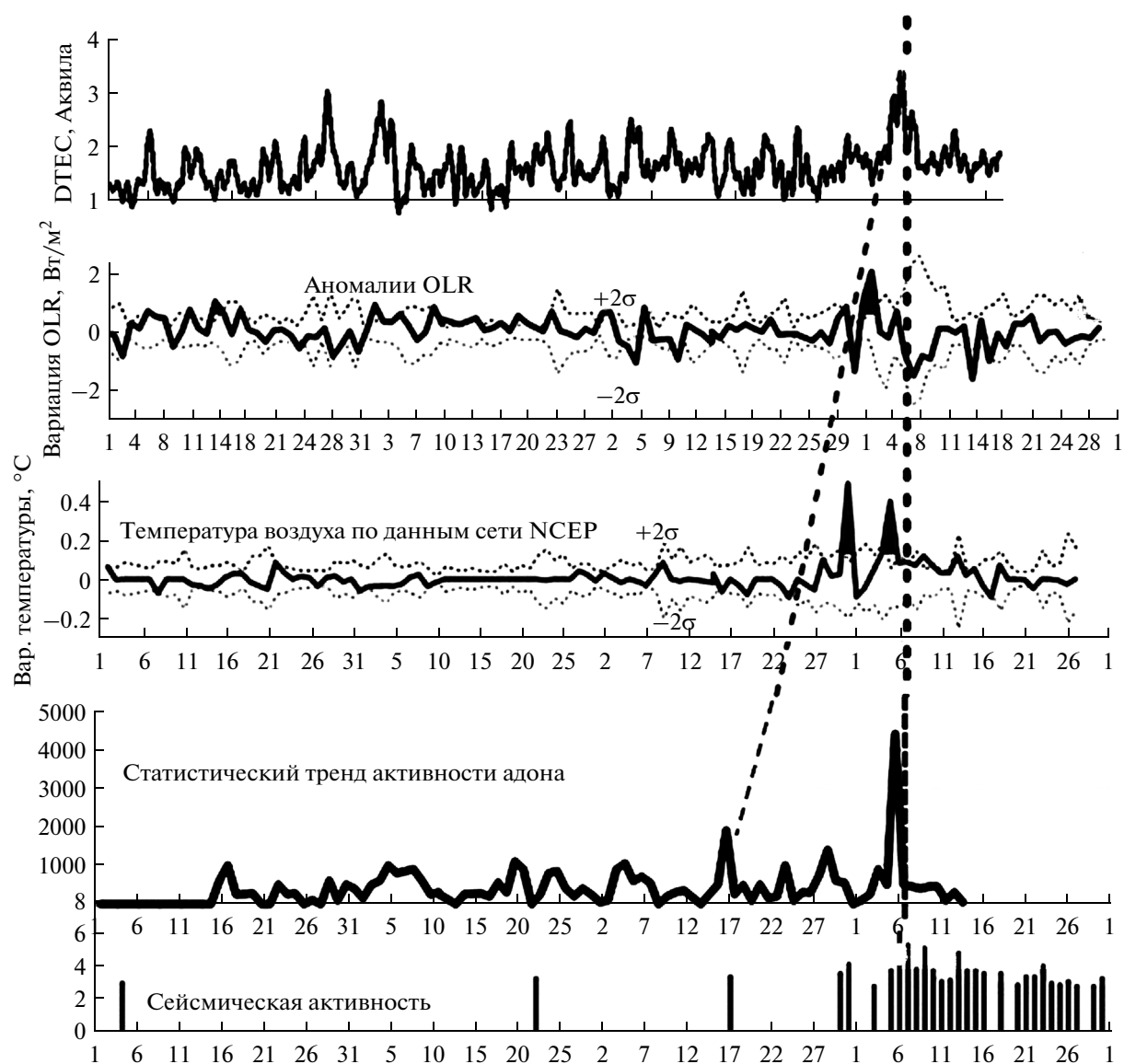


Рис. 2. Временная динамика выделения радона, вариаций атмосферных и ионосферных параметров перед землетрясением в Аквиле.

[Пулинец и др., 1998] и через несколько модификаций [Pulinets et al., 2000; 2002; 2006; Ким и др., 2002; Pulinets and Boyarchuk, 2004] достигла своей полноты совсем недавно [Пулинец и Узун, 2010; Pulinets and Ouzounov, 2011]. Основным отличием данной модели от многих других является ее междисциплинарный характер, где применяются методы сейсмологии, геохимии, химии атмосферы, метеорологии, термодинамики, атмосферного электричества, физики плазмы, электродинамики космической плазмы и т.д. Процессы, описываемые в модели, развиваются в различных геофизических оболочках, начиная от земной коры, через атмосферу, ионосферу, вплоть до магнитосферы. Для того, чтобы проследить развитие аномалий по мере приближения момента земле-

трясения мы должны наблюдать (или моделировать) множество различных параметров в разных геофизических средах. Это привело к развитию идеи многопараметрического подхода при мониторинге предвестников землетрясений [Ouzounov et al., 2011; 2012; Pulinets, 2012]. Модель демонстрирует существенно нелинейный характер, когда различные ключевые параметры имеют пороговые значения, приводящие к формированию характерных точек ветвления. И что наиболее важно, развитие процессов имеет своего рода направленность, характерную для сложных хаотических процессов, ведущих к критическому состоянию системы. Это свойство присуще большинству природных необратимых процессов (особенно в области биологии) и названо Эддинг-

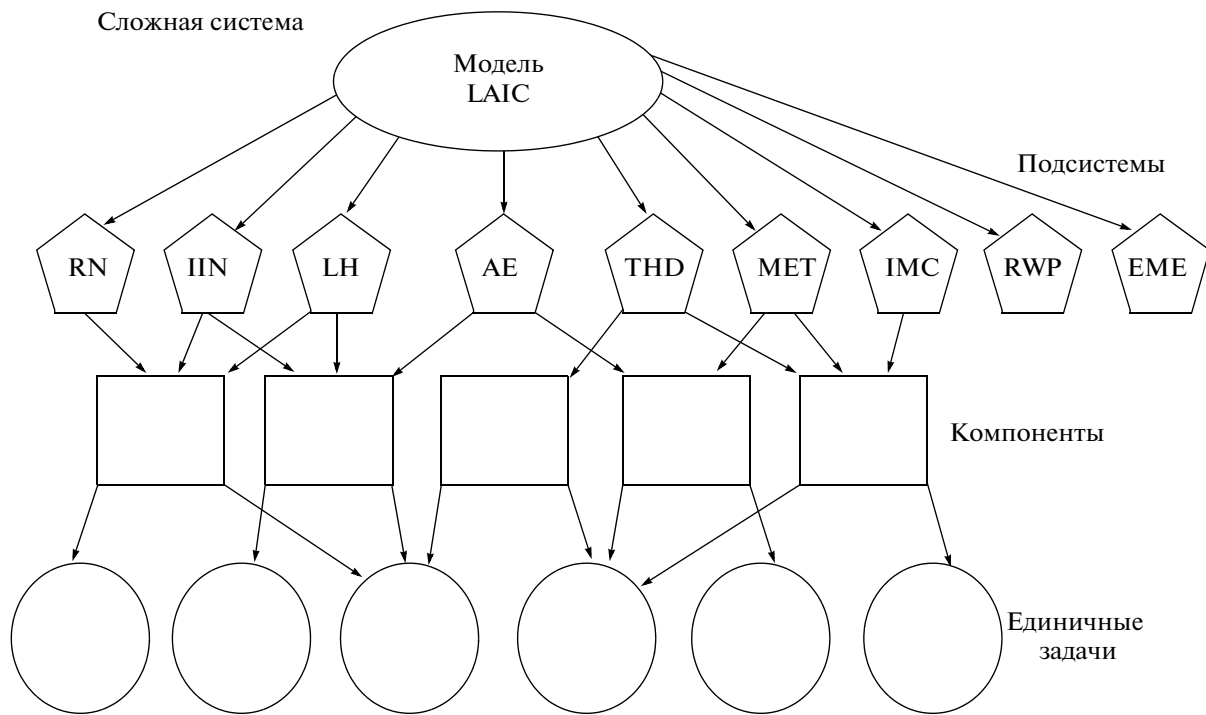


Рис. 3. Представление взаимодействий геосфер в виде комплексной системы (рисунок из работы [Thaker et al., 2004] с изменениями).

тоном “стрелой времени” [Eddington, 1928]. В термодинамике (термодинамические процессы в значительной степени определяют взаимодействие геофизических оболочек в рамках нашей модели) направленность процессов описывается скоростью роста энтропии [Kondepudi and Prigogine, 1998]. Что касается сейсмологии, то метод максимальной энтропии применяется для прогноза землетрясений довольно давно [Акопян, 1998]. Недавно был предложен аналогичный подход для интерпретации динамики *b*-параметра закона Гутенберга–Рихтера с точки зрения метода максимальной энтропии [De Santis et al., 2011]. В рамках этого подхода землетрясение в Аквиле 2009 г. было определено как хаотический процесс [De Santis et al., 2010].

Рассмотрим те аспекты модели, которые демонстрируют синергию различных процессов – взаимодействие подсистем, ведущее к росту одновременно энтропии и самоорганизации (рис. 3). Мы можем разделить комплексную систему генерации предвестников на несколько подсистем, а именно: 1) миграция радона в земной коре и эманиация его в атмосферу (мы назовем ее RN); 2) ионизация пограничного слоя радоном и формирование кластерных ионов через процесс нуклеации (Ion Induced Nucleation – IIN); 3) выделение скрытого тепла вследствие конденсации водяного пара на ионах (LH); 4) изменения в атмосферном электричестве через изменения

проводимости вследствие формирования кластерных ионов и взаимодействие с аэрозолями (AE); 5) термодинамические процессы, ведущие к формированию аномальных потоков скрытого тепла и пятен уходящего длинноволнового излучения (THD); 6) изменения атмосферных параметров, таких как приземная температура воздуха, относительная влажность воздуха, давление воздуха, формирование аномальных линейных облачных структур и струйных течений (MET); 7) ионосферные эффекты (аномальные вариации плазменной концентрации и температуры), изменения состава ионов, оптические излучения, КНЧ и ОНЧ излучения, взаимодействие с магнитосферой трубкой и стимулированное выпадение частиц (IMC); 8) аномалии распространения радиоволн – ОНЧ, ВЧ, и СВЧ диапазонов частот полос путем изменения параметров атмосферы и ионосферы (RWP); 9) генерация электромагнитных излучений в различных частотных диапазонах – КНЧ, ОНЧ, СВЧ (EME).

Таким образом, многокомпонентную сложную систему комплексной модели взаимосвязей геоэффективных явлений в литосфере, атмосфере и ионосфере Земли (рис. 1) мы разбиваем на подсистемы, как это предлагается при верификации и валидации моделей [Thacker et al., 2004]. Представление модели в виде сложного графа (рис. 3) позволяет проследить иерархию подсистем, упомянутых выше, каждая из которых дает вклад в

составляющие более низкого уровня, а каждый из компонентов можно представить отдельными, уже не составными, а единичными задачами. Следует отметить, что компоненты подсистемы могут принадлежать нескольким подсистемам частично или полностью, и это обеспечивает сложный характер взаимодействия между подсистемами. В качестве примера приведем процесс формирования больших ионных кластеров, достигающих размеров аэрозоля (~1–3 мкм). Этот процесс играет важную роль в динамике по крайней мере 7-ми подсистем: 1 – это конечный продукт подсистемы ПН; 2 – формирование больших кластерных ионов приводит к выделению скрытой теплоты испарения (ЛН) из-за конденсации паров воды на ионах; 3 – увеличение концентрации больших кластерных ионов, вытесняющих легкие ионы, приводит к уменьшению проводимости пограничного слоя, изменению локальных параметров глобальной электрической цепи в (АЕ); 4 – формирование больших кластерных ионов приводит к изменению радиационных параметров пограничного слоя и, соответственно, к изменению ее термодинамических свойств (ТНД); 5 – большие кластерные ионы являются ядрами конденсации для формирования линейных облачных структур перед землетрясениями (МЭТ); 6 – большие кластерные ионы через изменения проводимости воздуха в приземном слое изменяют условия для распространения ОНЧ-сигналов в приземном волноводе, приводя к аномалиям распространения ОНЧ-волн; одновременно эти кластеры могут образовывать аэрозольные слои, которые служат как отражающий экран для УКВ-сигналов при их загоризонтном распространении (РВП); 7 – аэрозольные слои при их электрификации могут генерировать электрические разряды, которые регистрируются как импульсные сигналы в широком диапазоне частот (например, Р-Н импульсы), вращательные колебания сложных ионов могут обуславливать непрерывное СВЧ-излучение, а также регистрируемые перед землетрясением ЭМ-излучения (ЕМЕ).

В качестве примеров отдельно стоящих задач мы можем привести расчет концентрации ионов в результате ионизации радоном, или расчеты изменения проводимости воздуха, или оценку выделяемой скрытой теплоты и т.д.

Следует отметить, что подсистемы взаимодействуют через свои компоненты путем создания положительных и отрицательных обратных связей. Например, высокая относительная влажность воздуха способствует формированию крупных кластерных ионов в процессе ПН, в то же время интенсивная конденсация водяного пара на ионах приводит к уменьшению относительной влажности воздуха. Наличие обратных связей автоматически приводит к существованию различных пороговых значений в системе, которые мо-

гут давать в итоге неоднозначные конечные результаты. Размер и стабильность больших кластерных ионов, которые формируются в рамках процесса ПН, зависят главным образом от концентрации ионов и относительной влажности [Pulinets et al., 2006]. Начальная стадия процесса ПН описана в работе [Yu and Turco, 2001] при исследовании ионизации тропосферы галактическими космическими лучами. Можно найти различные версии моделей ПН [Laakso et al., 2002].

3. ПОПРАВКА ХИМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА КАК ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПАРАМЕТР

В соответствии с современной концепцией, финальная стадия подготовки землетрясения представляет собой переход системы от хаотического состояния к самоорганизации, целью которой является достижение критического состояния и переход системы в другое качество. Подобные процессы описываются в рамках нелинейной термодинамики и синергетики [Kondepudi and Prigogine, 1998]. При этом система должна обладать некими интегральными параметрами, которые имеют пороговое значение. Превышение порогового значения означает начало приближения системы к критическому состоянию, а в нашем случае – финальной стадии подготовки землетрясения – разрыву. Кроме того, название “интегральный” подразумевает, что параметр описывает поведение нескольких процессов, одновременно участвующих в переходе системы в критическое состояние. В качестве кандидата рассмотрим поправку химического потенциала паров воды при высоком уровне ионизации.

В работе [Pulinets et al., 2006] было показано, что при фазовых переходах скрытая теплота для молекулы воды равна ее химическому потенциалу или работе выхода при отрыве молекулы от капли воды. В многокомпонентных средах с внешним воздействием относительная влажность может быть представлена в виде

$$H(t) = \frac{\exp(-U(t)/kT)}{\exp(-U_0/kT)} = \exp\left(\frac{U_0 - U(t)}{kT}\right) = \exp\left(-\frac{0.032\Delta U \cos^2 t}{(kT)^2}\right), \quad (1)$$

где $U(t) = U_0 + \Delta U \cos^2 t$, где ΔU – это усредненная по объему величина коррекции химического потенциала, появляющаяся в результате внешнего воздействия окружающей среды. Суточные вариации интенсивности солнечного излучения можно выразить как квадрат косинуса от времени. Принимается во внимание также тот факт, что значение U_0 соответствует температуре кипения. ΔU представляет собой комплексный параметр,

отражающий процесс формирования кластерных ионов. Чем больше ΔU , тем больше энергия связи молекул воды с ионом и тем стабильнее кластерные ионы (больше время жизни до рекомбинации), тем большего размера они могут достичь в результате присоединения к ним молекул воды. Спектры размеров кластерных ионов в атмосфере Земли в настоящее время широко изучены [Högrak et al., 1998; Hirsikko, 2011]. Экспериментальные измерения показывают широкий спектр размеров атмосферных кластерных ионов. В экспериментальных исследованиях атмосферных процессов также доказано, что ионы ускоряют конденсацию водяного пара и сами являются очень хорошими центрами конденсации [Laakso et al., 2003; Svensmark et al., 2007]. В лабораторных экспериментах с коронным разрядом при атмосферном давлении было продемонстрировано, что размер кластеров, сформированных в результате ионизации, почти линейно зависит от относительной влажности воздуха [Sekimoto and Takayama, 2007]. Эти эксперименты также блестяще продемонстрировали, что формируемые частицы представляют собой центральный ион с оболочкой из молекул воды, причем в равной степени гидратируются как положительные, так и отрицательные ионы.

Хорошо известно также, что размер кластерного иона играет важную роль в определении проводимости пограничного слоя вследствие различия в подвижности ионов разного размера [Högrak, 2001]. Согласно этой публикации мобильности для различных ионов варьируются в нормальных условиях от $3.14 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ для малых ионов до $0.00041 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ для крупных ионов. Увеличение концентрации ионов малого и среднего размеров увеличивает электрическую проводимость в пограничном слое, но при достаточно высокой концентрации крупных кластерных ионов электрическая проводимость пограничного слоя будет существенно уменьшаться.

Концентрация ионов зависит не только от уровня ионизации, но и от потерь, связанных с состоянием погоды и условиями рекомбинации. Размер растущих ионов за счет процесса нуклеации зависит от концентрации ионов, относительной влажности как факторов формирования и погодных условий, а также турбулентной диффузии и электрического поля, которые могут удалять ионы из области формирования и роста. Все эти внешние условия учитываются введением параметра коррекции химического потенциала ΔU . Начиная с определенного критического значения, он изменяет состояние атмосферного электричества, приводящее также и к изменениям вариаций электронной концентрации в ионосфере на 180° (увеличение/уменьшение проводимости пограничного слоя — отрицательные/положи-

тельные вариации концентрации электронной концентрации в ионосфере). Впервые механизм формирования положительных и отрицательных вариаций электронной концентрации в ионосфере был предложен в работе [Pulinets, 2009] и подтвержден экспериментально в работах [Pulinets, 2012; Давиденко, 2013; Pulinets and Davidenko, 2014].

Согласно публикации [Боярчук и др., 2006] величина ΔU может быть выражена с помощью обычных метеорологических параметров: температуры воздуха T_g у поверхности Земли и относительной влажности воздуха H :

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

где ΔU выражено в эВ.

Статистическая обработка данных для большого числа крупных землетрясений за последние несколько лет не выявила определенной величины критического значения для параметра ΔU : она отличается для различных мест и, вероятно, сильно зависит от метеорологических условий, орографии и концентрации радона в данном географическом регионе. Тем не менее, временная динамика параметра ΔU и его пространственное распределение не оставляют сомнения в том, что они связаны с процессом подготовки землетрясения. На рис. 4а показана тектоническая структура в области сильного землетрясения в Китае М7.0 в провинции Сычуань 20 апреля 2013 г. С юго-запада на северо-восток протянулся основной разлом область Сычуань — разлом Лунменшань. На пространственном распределении параметра ΔU (рис. 4б) этот разлом отражается в виде темной полосы, повторяющей конфигурацию разлома на рис. 4а. Положение эпицентра отмечено звездочкой. Параллельно разлому видно темно-серое пятно с белым треугольником внутри, которым отмечен максимум аномалии ΔU за трое суток до землетрясения. На рис. 4в показана временная динамика ΔU в точке, отмеченной белым треугольником. Характерно, что она повторяет стандартный ход динамики выделения радона перед землетрясениями, описанные во многих публикациях, например [Scholz et al., 1973].

4. РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ КАК ОТКРЫТАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Теоретические оценки и экспериментальные данные для более чем ста последних сильных землетрясений, имевших место в течение последнего десятилетия, показали, что перед каждым землетрясением высвобождается огромное количество тепловой энергии. Например, перед катастрофическим землетрясением М9.3 26 декабря 2004 г. вблизи о-ва Суматра поток скрытого тепла $\sim 100 \text{ Вт м}^{-2}$, непрерывно наблюдавшийся в течение 10 дней над площадью из девяти ячеек разме-

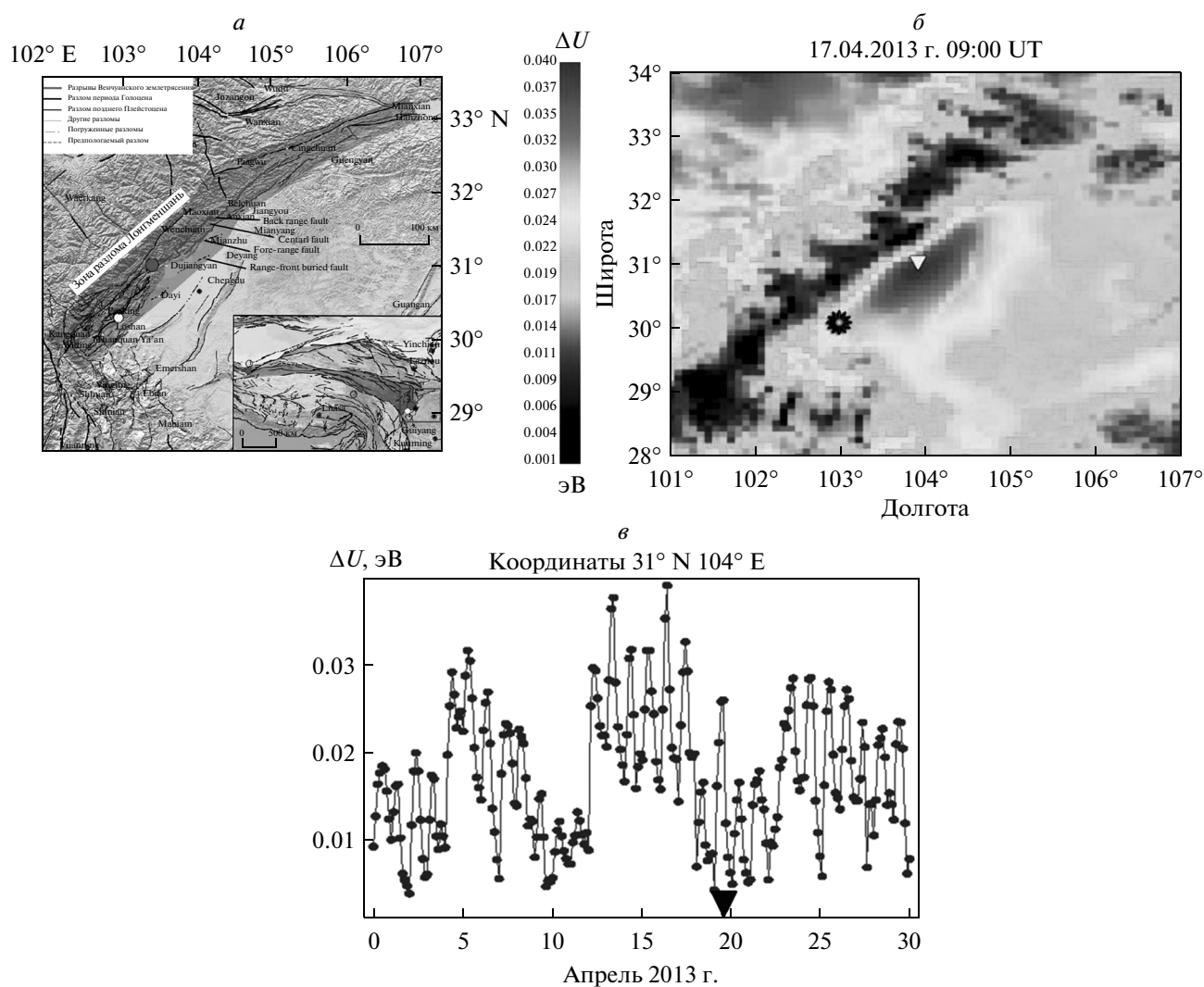


Рис. 4. *a* – тектоническая конфигурация в окрестности эпицентра землетрясения Лушань M7.0 20 апреля 2013 г.; *б* – пространственное распределения поправки химического потенциала за 3 сут до землетрясения Лушань, звездочкой обозначено положение эпицентра; *в* – временная динамика поправки химического потенциала в точке его максимального значения, обозначенной на рис. 4б белым треугольником.

ром 200×200 км выделилось $\sim 3.1 \times 10^{19}$ Дж, что почти на порядок больше, чем механическая энергия, выделившаяся во время самого землетрясения (4.3×10^{18} Дж) [Pulinets et al., 2007]. Также имеются экспериментальные данные о повышении температуры воздуха у поверхности Земли над районами в сотни тысяч квадратных километров [Милькис, 1986; Dunajeska and Pulinets, 2005; Jing et al., 2013]. Аномальные потоки уходящего длинноволнового излучения (OLR) также достигают вполне ощутимых величин (от 10 до 200 Вт m^{-2}) [Ouzounov et al., 2006; 2007; Li et al., 2001]. Возникает законный вопрос: способны ли относительно слабые потоки радона (по мнению некоторых критиков предлагаемой концепции) производить такое огромное количество энергии и каков физический механизм?

Сначала обсудим, так ли слабы потоки энергии при эманации радона из земной коры. Для этого воспользуемся оценками работы [Черногор, 2012], модифицировав их для случая, представленного на рис. 2, землетрясения в Аквиле, Италия, 6 апреля 2009 г. В естественных условиях скорость ионизации молекул воздуха составляет $q_{i0} \approx 10^7$ $m^{-3} c^{-1}$. Перед землетрясениями при увеличении активности радона она может достигать величин $q_i \leq 10^{10}$ $m^{-3} c^{-1}$. Толщина слоя при ионизации не превышает величины 10 м, но благодаря турбулентной диффузии слой воздуха, в котором будет присутствовать радон, может достигать 1 км и более. Мощность радонового предвестника можно оценить как

$$P_q = \varepsilon_i q_i S_{eq} \Delta z_i, \quad (3)$$

где $\Delta z_i = (D_i \Delta t)^{1/2}$ – толщина слоя воздуха, в котором имеет место ионизация, образовавшегося за время Δt в результате турбулентной диффузии; D_i – коэффициент турбулентной диффузии. При $D_i = 10^2 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$, $\Delta t = 10^5 \text{ с}$ мы получим $\Delta z \approx 10^3 \text{ м}$.

Для землетрясения в Аквиле, магнитуда которого составляла М6.3, площадь области подготовки землетрясения, в которой мы можем ожидать выделение радона, согласно Dobrovolsky et al. [1979] для радиуса зоны $R = 10^{0.43M} = 513 \text{ км}$, $S = 8 \times 10^{11} \text{ м}^2$. При $q_i = 10^{10} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ мощность радонового предвестника будет составлять $P_q = 4 \times 10^7 \text{ Вт}$, а за время $\Delta t = 10^5 \text{ с}$ выделится энергия, равная $E_q = P_q \Delta t = 4 \times 10^{12} \text{ Дж}$.

Центральным моментом, объясняющим сущность модели литосферно-атмосферно-ионосферно-магнитосферных связей, является факт, что радон сам по себе не производит тепловую энергию. С помощью процесса ионизации он производит ионы – центры для конденсации водяного пара, и именно конденсация является источником тепловой энергии. На самом деле мы можем сказать, что радон инициирует реакцию гетерогенного катализа, что приводит к изменению соотношения между двумя фазами воды с выделением скрытой теплоты, потому что реакция конденсации является экзотермической, т.е. идет с выделением тепловой энергии. Насколько эффективным в смысле выделения энергии является изменение отношения фазового состояния воды? Laakso et al. [2003] показали, что увеличение выделения энергии имеет место за счет кулоновского взаимодействия между центральным ионом и молекулами воды, и это примерно 5-кратное усиление. Svensmark et al. [2007] продемонстрировали в лабораторных экспериментах, что скорость конденсации пропорциональна концентрации ионов. Однако авторы этих работ не принимают во внимание еще такой фактор, что количество выделенной тепловой энергии пропорционально размеру частицы – кластерного иона, образуемого в результате процесса, называемого нуклеацией, инициируемой ионами (Ion Induced Nucleation – ИИ). Наши оценки показывают, что именно здесь – основной источник высокой энергетической эффективности процесса ИИ.

Итак, при распаде радон ^{222}Rn испускает α -частицы с энергией $E_\alpha = 5.46 \text{ МэВ}$. Если принять во внимание, что энергия ионизации атмосферных газов находится в пределах 10–30 эВ, то в среднем каждая α -частица, испускаемая радоном, может создать $\sim 3 \times 10^5$ электрон-ионных пар. Из литературных источников [Segovia et al., 2005; Ínan et al., 2008; Спивак, 2008] известно, что вблизи поверхности Земли средняя активность радона составляет $\sim 2000 \text{ Бк/м}^3$. При этом следует заметить, что

измерения проводились на глубине $\sim 70 \text{ см}$ от поверхности Земли в трех совершенно различных геологических регионах (Мексика, Турция и Россия). И это не были периоды повышенной сейсмической активности. Известно, что радон в 6 раз тяжелее воздуха, поэтому он концентрируется в низинах (овраги, ущелья, складки низменности), что объясняет выбор высоты, на которой проводились измерения. Известно также, что в период подготовки землетрясений активность радона может возрасти на порядок величины, однако мы возьмем все-таки в качестве базового уровня активность радона $\sim 2000 \text{ Бк/м}^3$. Тогда, учитывая ионизационную способность α -частиц радона $\sim 3 \times 10^5$ электрон-ионных пар, скорость ионообразования составит $\sim 6 \times 10^8 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Гидратированный ион размером порядка 1–3 мкм (частицы такого размера наблюдаются с помощью сети AERONET за несколько суток до землетрясения) содержит порядка 0.4×10^{12} молекул воды. Постоянная скрытой теплоты U_0 составляет

$$U_0 \sim 40.68 \times 10^3 \text{ Дж/моль} \quad (1 \text{ моль} = 6.022 \times 10^{23}).$$

При заданной активности радона и формировании гидратированных ионов размером $\sim 1 \text{ мкм}$ выделение скрытой теплоты составит $\sim 16 \text{ Вт/м}^2$, что соответствует экспериментально регистрируемым потокам уходящего длинноволнового инфракрасного излучения [Ouzounov et al., 2007]. Принимая во внимание, что $1 \text{ эВ} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$, то при заданной активности радона 2000 Бк/м^3 затраты на ионизацию составят $1.7 \times 10^{-9} \text{ Дж/м}^3 \text{ с}$. Тогда отношение выделившегося в результате ИИ тепла к затраченной на ионизацию атмосферных газов энергии составит $16 / (1.7 \times 10^{-9}) \sim 10^{10}$, что свидетельствует об исключительно высокой энергетической эффективности этого процесса.

Но до сих пор остается открытым вопрос: где источник энергии? Ответ очень прост: это Солнце. В результате суточного цикла при испарении влаги из водоемов, почвы и пр. огромное количество солнечной тепловой энергии превращается в скрытую теплоту и содержится в свободных парах воды в атмосфере. При появлении большого количества центров конденсации в виде вновь образованных при ионизации ионов начинается каталитическая реакция гидратации ионов с выделением скрытой теплоты в окружающую среду. Таким образом, наша система черпает энергию из окружающей среды, что позволяет определить ее как чисто открытую систему, для которой характерно состояние неустойчивости, приводящее к инициации критических процессов типа ИИ. Повышение температуры воздуха с одновременным уменьшением влажности было подтверждено в лабораторных экспериментах с радоном, инжектируемым в камеру с воздухом, влажность которого составляла $\sim 70\%$, т.е. далеко от насыщения

[Martinelli et al., 2014]. Небольшие абсолютные величины изменений влажности и температуры в лабораторном эксперименте убедительно показывают разницу между открытыми и замкнутыми системами. Объем воздуха в камере $\sim 3 \text{ м}^3$ просто не в состоянии был выделить количество энергии большее, чем содержалось в этом объеме воздуха, независимо от концентрации радона, тогда как в открытой системе количество подводимой к области реакции энергии практически не ограничено.

5. ИОНОСФЕРНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ И ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

История сейсмо-ионосферных эффектов и формирования ионосферных аномалий, наблюдаемых над областями подготовки сильных землетрясений, насчитывает более 50 лет. Исторический обзор исследования сейсмо-ионосферных связей дан в работе [Pulinets and Boyarchuk, 2004]. Если попытаться выделить основной тренд исследований сейсмо-ионосферных связей — это постепенный переход от механизмов, основанных на акустическом воздействии на атмосферу и ионосферу, к механизмам, где основную роль играют электромагнитные эффекты, в первую очередь, электрические токи и поля. Причина этого очень проста: в последние годы мы имели возможность убедиться в исключительно низкой эффективности акустических механизмов. Ионосферные эффекты от гигантских цунами (Суматра 2004 г. и Тохоку 2011 г.) были настолько слабы: 0.1–0.4 TECU для цунами на Суматре [Liu et al., 2006; Astafyeva and Afraimovich, 2006]; и 0.5–1.5 TECU для цунами в Японии после катастрофического землетрясения в Тохоку [Galvan et al., 2012], что достаточно трудно себе представить какие-то механические движения перед землетрясением, способные создать в ионосфере возмущения на порядок больше, чем наблюдались после наибольших из известных в истории цунами. Мы же обычно наблюдаем перед землетрясениями возмущения в ионосфере порядка нескольких TECU и более, что свидетельствует о том, что должен существовать какой-то другой, более эффективный механизм передачи возмущения в ионосферу. Еще один аргумент — это вид наблюдаемых возмущений в ионосфере и их динамика. Вполне естественно, что, если источником возмущения является некоторое волновое воздействие, например, акустико-гравитационная волна, то результат волнового воздействия тоже должен иметь хоть какие-то признаки волнового возмущения: периодическую структуру, двигаться куда-то с какой-то скоростью, например, со скоростью звука. Ничего подобного не происходит. Ионосферные аномалии, наблюдаемые перед землетрясениями, стационарны, существуют в течение нескольких часов, и затем исчезают. По-

этому в дальнейшем мы будем обсуждать только эффекты в ионосфере, связанные с электромагнитным взаимодействием сейсмоактивной области и ионосферы.

Первые версии моделей сейсмо-ионосферных связей были основаны на прямых расчетах эффекта сейсмогенного электрического поля, проникающего с поверхности Земли в ионосферу [Kim et al., 1994; Пулинец и др., 1998; Pulinets et al., 2000; Pulinets et al., 2002]. В основе всех этих моделей лежит методология, развитая в работе [Park and Dejnakarindra, 1973], где проводились расчеты проникновения электрического поля от грозового облака в ионосферу. Самую последнюю версию этого подхода можно найти в работе [Kim et al., 2012], где анизотропия электропроводности ионосферы учитывается более корректно, чем в предыдущих публикациях. Но этот подход является недостаточным с нескольких точек зрения: а) он принимает аномальное электрическое поле как данность, не объясняя его физической природы; б) механизм не работает в экваториальных широтах; в) для более-менее эффективного проникновения электрического поля в ионосферу его величина на поверхности Земли должна быть не менее 1000 В/м, что наблюдается не так часто, в то время как ионосферные аномалии перед землетрясениями регистрируются регулярно, включая аномалии над поверхностью моря [Li and Parrot, 2013].

Одним из современных трендов в моделировании сейсмо-ионосферных связей является произвольное введение электрических токов и полей на разных высотах [Сорокин, 2007; Klimenko et al., 2011; Kuo et al., 2011; Namgaladze et al., 2012]. Сорокин [2007] в качестве драйвера для своего механизма вводит сторонний ток, который генерируется заряженными аэрозолями, возможно, инжектируемыми в атмосферу в сейсмически активных зонах. Существуют две основных трудности, с которыми сталкивается каждый читатель при осмыслении данной концепции: а) на сегодняшний день не существует каких-либо научных публикаций, где бы приводились экспериментальные данные о потоках заряженных аэрозолей, инжектируемых в атмосферу перед землетрясением; б) величина стороннего электрического тока, используемая автором для расчетов ($4 \times 10^{-6} \text{ А/м}^2$), на шесть порядков больше, чем ток хорошей погоды, текущий в глобальной электрической цепи, — это невероятная величина, особенно если представить, что такой ток должен течь над громадными площадями области подготовки землетрясений (сотни тысяч квадратных километров). В сейсмо-ионосферных связях масштаб неоднородности электрического поля играет большое значение. Показано [Pulinets et al., 2000], что при величине области с аномальным электрическим полем с линейными размерами менее 200 км эффектив-

ность проникновения электрического поля в ионосферу чрезвычайно мала.

Подобный подход используют авторы работы [Kuo et al., 2011], где рассматриваются эффекты зонального электрического поля в экваториальной ионосфере, для генерации которого также необходим дополнительный вертикальный электрический ток в атмосфере. Только здесь в качестве источника стороннего тока авторы используют стресс активированную проводимость горных пород, обеспечиваемую за счет дырочной проводимости (*p*-hole — дефицит электрона в кристаллической решетке) [Freund, 2010]. Их произвольный источник (нет ни одного экспериментального измерения) дает сторонний ток, который также намного больше значения вертикального электрического тока хорошей погоды (4×10^{-12} А/м²) и варьируется от 10^{-7} до 10^{-5} А/м². Это означает, что даже минимальная плотность тока, используемого в их модели на 5 порядков больше, чем естественное значение. Кроме того, следует принимать во внимание, что дырки создают на земной поверхности положительный потенциал. В естественных условиях Земля заряжена отрицательно относительно ионосферы. То есть, кроме того, что должен наблюдаться ток аномальной интенсивности, электрическое поле должно “перевернуться” относительно направления вертикального электрического поля хорошей погоды. Фактически должна создаваться ситуация грозового электричества, когда в атмосфере течет обратный ток, заряжающий ионосферу Земли.

Оба описанных выше механизма обладают существенным недостатком: они “привязаны” к суше. Ни потоки аэрозолей, ни выход “дырок” на поверхность не возможны в океане, а это вступает в противоречие с последними данными спутника DEMETER [Li and Parrot, 2013], где показано, что вероятность наблюдения ионосферных предвестников над океаном выше, чем над сушей.

Вторая проблема этих механизмов заключается в том, что они никак не описывают перемену знака сейсмо-ионосферных аномалий, наблюдаемую экспериментально. Стресс-активированная проводимость может обеспечить только положительный заряд на поверхности Земли. Появившиеся в модифицированной версии модели [Kuo et al., 2014] невнятные и никак не определенные ионы M^- только показывает, что авторы понимают проблему, но разрешить это противоречие пока не в состоянии.

Несмотря на замечания выше, следует отметить, что все модельные расчеты [Klimenko et al., 2011; Kuo et al., 2011; Namgaladze et al., 2012] сходятся в одном, главном, что зональное электрическое поле в ионосфере порядка нескольких мВ/м может создавать аномалии, похожие на экспериментально зарегистрированные отклонения

электронной концентрации перед землетрясениями. Этот факт сразу же формирует запрос на физический механизм, который способен производить такие поля в ионосфере на последней стадии цикла подготовки землетрясения. Идея подобного механизма была предложена в работе [Pulinets, 2009]. Это еще не модель, потому что там нет реальных расчетов, в особенности, для наиболее проблемного диапазона высот от 60 км (эта высота принимается за высоту ионосферного слоя в моделях глобальной электрической цепи), но предложенная идея показывает направление, куда должны быть направлены наши усилия, и, по всей видимости, это прорывное направление современной ионосферной физики не только с точки зрения сейсмо-ионосферных связей, но и для всего комплекса проблем взаимодействия атмосферы и ионосферы. Такой подход не требует ни экстраординарных токов, на 5–6 порядков превышающих невозмущенное значение, ни высоких значений электрического поля на поверхности Земли в сейсмоактивных областях.

5.1. Концепция глобальной электрической цепи и взаимодействие атмосферы и ионосферы

По всей видимости, первым, кто попытался обосновать наличие глобального атмосферно-ионосферного взаимодействия вследствие грозовой активности, создающей постоянную разность потенциалов между поверхностью Земли и ионосферой, был Вильсон [Wilson, 1921]. За более чем 90 лет исследований, в этой области достигнут большой прогресс в понимании физических процессов, но сама концепция глобальной электрической цепи (ГЭЦ) в целом осталась неизменной. Основным драйвером цепи является глобальная грозовая активность и большие конвективные структуры, создающие вертикальный ток, направленный вверх, интегральное значение которого по всей поверхности планеты составляет $\sim 10^3$ А. Обратный ток в цепи течет в областях хорошей погоды. Плотность этого тока очень мала: $\sim 4 \times 10^{-12}$ А/м², а вертикальный градиент электрического поля в областях хорошей погоды составляет 100–150 В/м. Все эти процессы распределены по поверхности Земли, но для некоторых оценок эквивалентную электрическую схему ГЭЦ можно представить в виде сосредоточенных элементов (рис. 5). Более подробную информацию о глобальной электрической цепи можно найти в публикациях [Markson, 2007; Williams, 2009; Мареев, 2010; Rycroft et al., 2012]. Здесь же мы сконцентрируем свое внимание на слое атмосферы от поверхности Земли до высоты 1–2 км, называемым пограничным слоем [Stull, 1988]. На схеме ему соответствует переменное сопротивление R_{BL} . Почему мы уделяем этому слою такое внимание? Потому что согласно работе [Gringel,

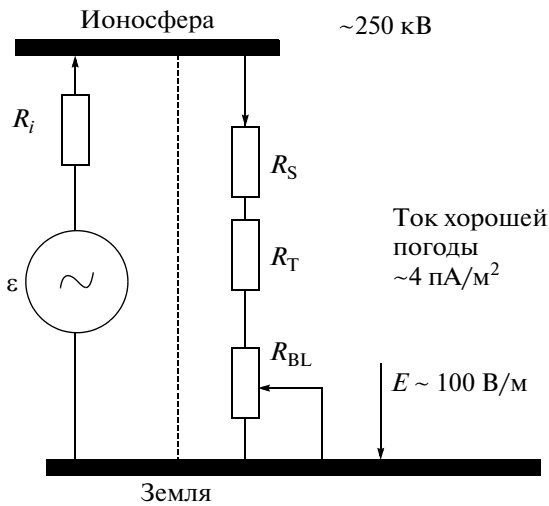


Рис. 5. Эквивалентная электрическая схема глобальной электрической цепи (ГЭЦ).

1986] “вариации сопротивления столба атмосферы от поверхности Земли до высоты 60 км составляют в среднем ~30% и обусловлены изменением уровня ионизации, производимой радиоактивными материалами вблизи поверхности Земли и изменением концентрации аэрозолей в нижней тропосфере. Вклад первых двух километров от поверхности Земли составляет ~50% и первых 13 км ~95% полного сопротивления столба атмосферы от 0 до 60 км”.

Таким образом, изменяя сопротивление пограничного слоя атмосферы и тропосферы, мы изменяем общий ток между ионосферой и Землей, а также ионосферный потенциал V_i . На сегодняшний день имеется большое количество экспериментальных данных, подтверждающих этот

тезис, а также основной результат представляемой в данной публикации модели о связи процессов ионизации и формирования аэрозолей с локальными аномальными вариациями в ионосфере Земли. Фактически, мы имеем дело с очень эффективным механизмом воздействия атмосферы на ионосферу через изменение параметров пограничного слоя.

Markson [2007] показал, что в период испытаний ядерного оружия в атмосфере наблюдались существенные вариации ионосферного потенциала V_i . На рис. 6а эти изменения отмечены овалом в левой части рисунка. Поскольку испытания оказывали существенное влияние на глобальные изменения в ионосфере Земли, их эффект гораздо сильнее, чем эффект от аварии на Чернобыльской атомной станции в 1986 г. (овал в правой части рисунка).

Как известно, одним из источников ионизации атмосферы являются галактические космические лучи (ГКЛ). При этом максимум высотного профиля ионизации приходится на высоты 13–15 км [Gringel, 1986]. Возмущение солнечного ветра в результате увеличения солнечной активности приводит к увеличению скорости солнечного ветра на границе магнитосферы. Это приводит к понижению интенсивности космических лучей, вызванному экранированием окрестностей Земли потоком высокоскоростной плазмы солнечного ветра. Кратковременное уменьшение потока космических лучей должно приводить к уменьшению уровня ионообразования на высотах максимальной релаксации космических лучей и увеличению сопротивления вертикального столба атмосферы, что и представлено на рис. 6б [Gringel, 1986]. Следует заметить, что ионизация, производимая ГКЛ на уровне тропопаузы, также

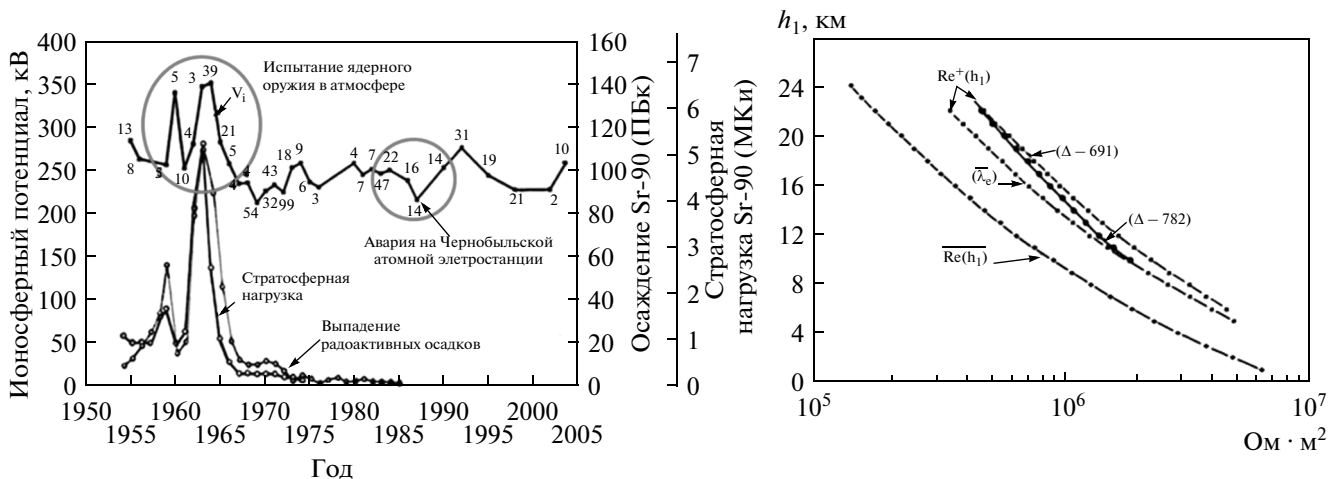


Рис. 6. а – изменения потенциала ионосферы V_i в периоды радиоактивного загрязнения атмосферы; б – нижняя кривая – усредненный профиль удельного сопротивления атмосферы для спокойных условий, верхние кривые – после вспышек на Солнце 08.08.1972 г. (А-691) и 14.04.1978 г. (А-782).

приводит к образованию заряженных кластерных ионов вследствие их гидратации [Svensmark et al., 2007]. Именно эти ионные кластеры приводят к образованию облаков [Svensmark and Friis-Christensen, 1997]. Так же, как и в приземном слое при ионизации радоном, образование ионных кластеров в тропопаузе сопровождается выделением скрытой теплоты, а вариации потоков ГКЛ (например, во время форбуш-понижений) сопровождаются изменениями температуры тропопаузы. Именно понижение температуры тропопаузы в результате магнитной бури 25 августа 2005 г. привело к бурному росту тропической конвекции из-за увеличения разности температур между поверхностью океана и температурой тропопаузы и развитию урагана Катрина [Бондур и др., 2008].

Как мы видели на рис. 6а, изменение проводимости атмосферы приводит к изменениям ионосферного потенциала V_i . Если такие изменения носят локальный характер, то над этой областью должны образовываться крупномасштабные неоднородности электронной концентрации, отличающие эту область от концентрации невозмущенной ионосферы. Природа и человеческая деятельность предоставляет нам возможности для проверки этой гипотезы.

Одним из таких примеров могут служить регулярные потоки пыли и песка из Сахары через Атлантический океан к восточному побережью США во время пылевых бурь в Западной Сахаре. Измерения вертикальных профилей проводимости атмосферы обычно проводятся с помощью шаров-зондов. Пример таких измерений представлен на рис. 7а [Gringel and Mühleisen, 1978]. Аэростат был запущен на расстоянии 2200 км к западу от африканского побережья. Как видно из рисунка, наблюдается существенное уменьшение проводимости воздуха на высотах 1.7–3.7 км. Общее уменьшение проводимости столба атмосферы оценивается в 30–50%. Общее содержание пылевых частиц внутри слоя составляла 1200 г^{-3} . К сожалению, в настоящее время такие измерения практически не проводятся, но мы будем их использовать как оценочные для интерпретации результатов ионосферных измерений над песчаной бурей, имевшей место 1 мая 2012 г. [Давиденко, 2013; Pulinets and Davidenko, 2014; Пулинец и др., 2014]. На рис. 7б представлены дифференциальные карты полного электронного содержания (ПЭС) за период с 14:00 UT 1 мая по 04:00 UT 2 мая. Построение разностных карт производилось по данным полного электронного содержания в виде глобальных карт в формате IONEX (IONosphere map EXchange), находящихся в свободном доступе в сети интернет. Пространственное разрешение карт составляет 2.5° по широте и 5° по долготе. Как видно из рисунка, над пылевым облаком наблюдается долгоживущая положительная аномалия, величина которой

достигает $\sim 10 \text{ TECU}$. Исходя из полученных данных, мы можем сделать следующие выводы: а) при уменьшении проводимости столба атмосферы в ионосфере формируется положительная аномалия электронной концентрации над областью изменения проводимости; б) при уменьшении проводимости столба на 30–50% величина увеличения ПЭС достигает 10 TECU .

Подобные изменения в ионосфере можно наблюдать и после извержения вулканов, когда в атмосферу попадает громадное количество вулканического пепла, также понижающего проводимость пограничного слоя на высоте 5–15 км. Примеры ионосферных вариаций ПЭС после извержения исландского вулкана Эйяфьятлайокудль можно найти в работах [Давиденко, 2013; Pulinets and Davidenko, 2014; Пулинец и др., 2014]. Пониженная проводимость пограничного слоя также создала условия для образования положительных аномалий ПЭС над областями вулканического пепла в Европе.

Было бы интересно проверить противоположный случай: локальное увеличение проводимости атмосферы, которое могло бы приводить к уменьшению электронной концентрации над областью увеличенной проводимости. Обычно такие эффекты связаны с взрывными эффектами ионизации и резким увеличением концентрации легких ионов в атмосфере (когда крупные ионные кластеры не успевают образоваться), которые можно ожидать, например, в результате испытаний ядерного оружия или чрезвычайных ситуаций на атомных электростанциях. Нам удалось зарегистрировать одно из недавних событий такого рода: подземный взрыв ядерного заряда в Северной Корее 12 февраля 2013 г. (рис. 8). Из-за того, что взрыв был под землей, и на поверхность просочилось небольшое количество радиоактивных компонентов, эффект подземного взрыва был очень слабым. Тем не менее, мы зарегистрировали отрицательное отклонение ПЭС. Поскольку дул северо-западный ветер, радиоактивное облако сместилось в сторону японского о-ва Хонсю, над которым и была зарегистрирована ионосферная аномалия.

5.2. Ионосферные эффекты изменения проводимости атмосферы перед землетрясениями

Установленная экспериментально зависимость знака аномальных вариаций в ионосфере, как зависимость от знака изменения проводимости пограничного слоя, позволяет понять и интерпретировать сейсмо-ионосферные вариации. Если попытаться развернуть процесс ионизации и формирования кластеров во времени, то, по всей видимости, мы вправе ожидать при резком увеличении выбросов радона формирование отрицательных аномалий в ионосфере, а по мере

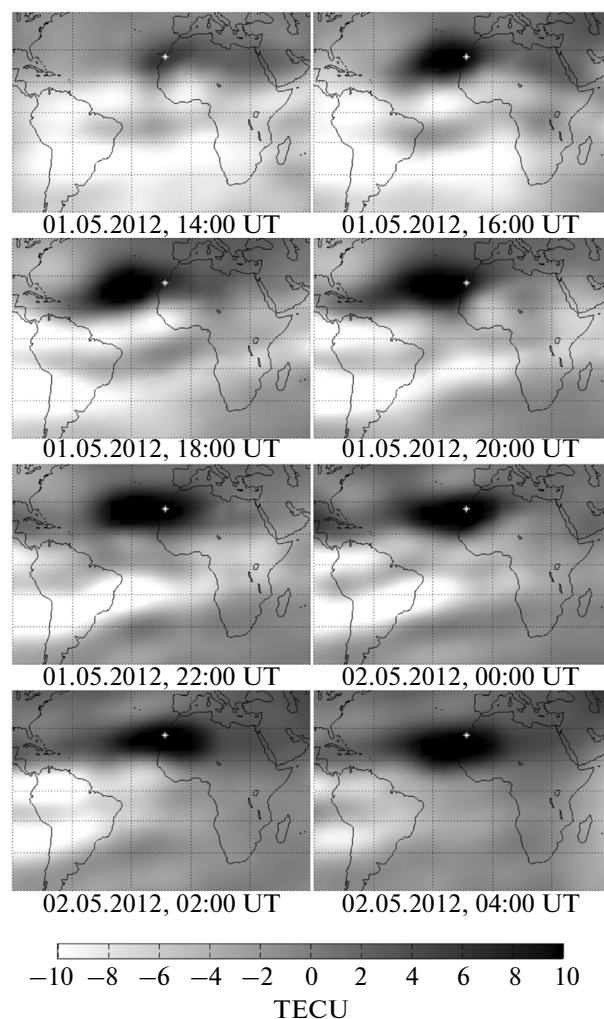
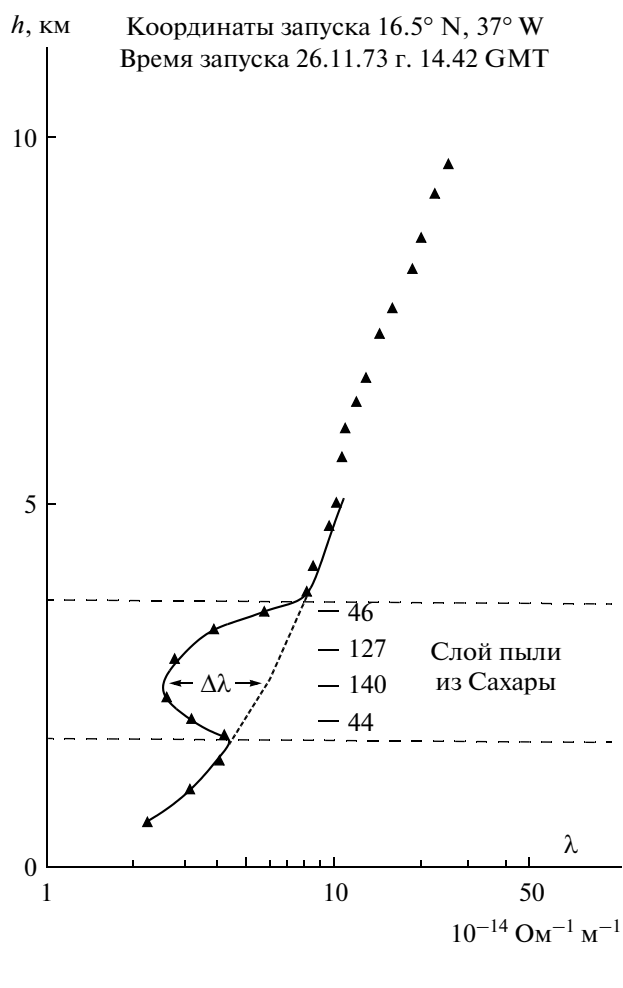


Рис. 7. *a* — вертикальный профиль проводимости атмосферы во время песчаной бури в Западной Сахаре 26 ноября 1973 г.; *b* — дифференциальные карты ПЭС для периода 14 UT 1 мая по 04 UT 2 мая 2012 г. во время песчаной бури в Западной Сахаре.

роста размера кластерных ионов (если атмосферные условия позволяют) — и формирования положительных аномалий. На рисунке 9 показано, как выглядят изменения ПЭС за несколько суток до Венчуаньского землетрясения M7.9, имевшего место 12 мая 2008 г. в провинции Сычуань в Китае [Liu et al., 2011]. Как мы видим, сначала наблюдается отрицательная аномалия (6 мая), а затем — положительная (9 мая), что соответствует нашей концепции изменения проводимости приземного слоя атмосферы над областью подготовки землетрясения.

Конечно, представленная выше картина генерации ионосферных предвестников является сильно упрощенной. На самом деле, в особенности в низкоширотной и экваториальной атмосфере, благодаря присутствию зонального электрического поля начинает проявляться долготный эффект — асимметричность по долготе ионосфер-

ной аномалии относительно вертикальной проекции эпицентра на ионосферу [Pulinets, 2012]. Как это происходит, схематически представлено на рис. 10.

Глядя на рисунок, начнем с левого нижнего квадрата. На рисунке представлено вертикально сечение атмосферы и ионосферы в зональной плоскости (вблизи геомагнитного экватора). Таким образом, ось абсцисс — это долготы. Левая вертикальная ось — высота в километрах, а правая вертикальная ось — потенциал ионосферы в киловольтах. Геомагнитное поле, которое на экваторе горизонтально, направлено перпендикулярно плоскости рисунка и обозначено знаком \otimes . Известно, что в послеполуденное время направленное на восток электрическое поле (обозначено на рисунке белой горизонтальной стрелкой) инициирует $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ вертикальный дрейф ионосферной плазмы (белые вертикальные стрелки) [Kelley,

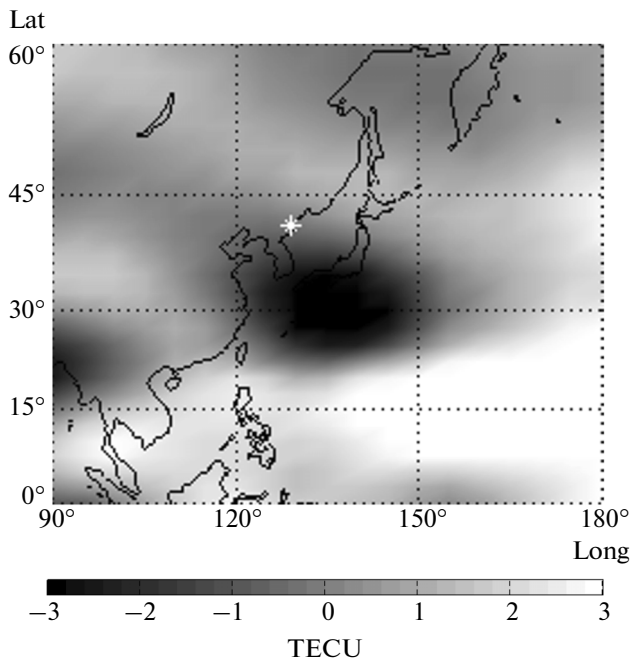


Рис. 8. Образование отрицательной аномалии в ионосфере спустя 1 ч после ядерного взрыва в Северной Корее 12 февраля 2013 г.

2009]. Допустим, что вблизи экватора в приземной атмосфере появляется область повышенной проводимости (темно-серый цилиндр) вследствие ионизации воздуха радоном. Тогда, как было показано выше, потенциал ионосферы над этой областью уменьшается. Ионосфера как высокопроводящая среда будет пытаться восстановить потенциал, что приведет к появлению направленного в центр области аномального градиента электрического поля (горизонтальные

темно-серые стрелки). И в этом случае на запад от аномальной области поле, формирующее экваториальную аномалию, и аномальное поле имеют один знак и складываются, что приводит к усилению вертикального дрейфа плазмы и, соответственно, к интенсификации экваториальной аномалии. На восток от области аномальной проводимости мы наблюдаем противоположную картину. Поля вычитаются, и скорость вертикального дрейфа плазмы падает. Этот факт на рисунке иллюстрируется тем, что вертикальная стрелка справа намного короче вертикальной стрелки слева.

Теперь обратимся к левому верхнему квадрату, где показана дифференциальная карта ПЭС для 08:00 UT (16:00 LT), полученная 3 мая 2008 г., за несколько суток до Венчуаньского землетрясения. Как мы видим, на запад от эпицентра, отмеченного на рисунке черной точкой, экваториальная аномалия развита сильнее, чем на восток от него. С течением времени, приближающим момент землетрясения, кластерные ионы, сформировавшиеся в результате гидратации первичных ионов, достигают размеров аэрозолей, и проводимость приземного слоя падает. И тогда картина меняется на противоположную (правая верхняя панель рис. 10): на восток от эпицентра мы видим усиление экваториальной аномалии, а на запад от него – ее ослабление.

Фактически данная концепция объясняет появление аномального зонального электрического поля, которое используют различные авторы для расчетов ионосферных эффектов землетрясений [Klimenko et al. 2011; Kuo et al., 2011; Namgaladze et al., 2012].

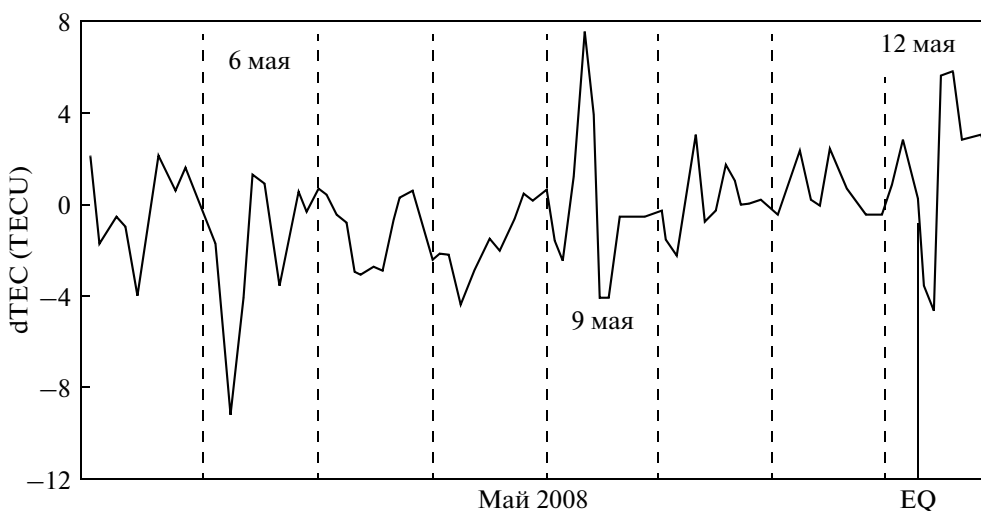


Рис. 9. Вариации ПЭС перед Венчуаньским М7.9 землетрясением 12 мая 2008 г.

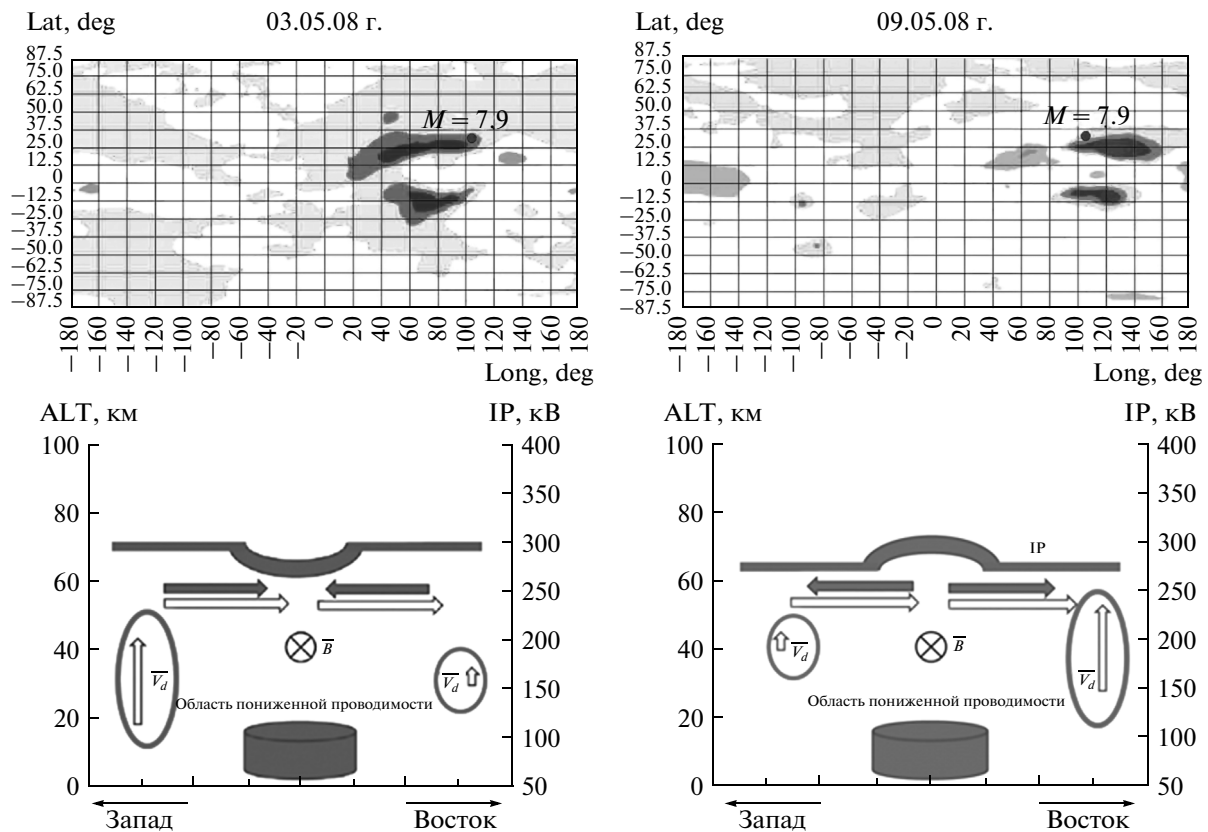


Рис. 10. Нижняя панель – схематическое представление взаимодействия атмосферы и ионосферы через глобальную электрическую цепь: левая панель – для условий увеличенной проводимости воздуха; правая панель – для условия уменьшения проводимости воздуха. Верхняя панель – дифференциальные карты GIM GPS TEC, полученные перед Венчуанским землетрясением 12 мая 2008 г.: левая панель – двумерное распределение, полученное 3 мая; правая панель – распределение для 9 мая.

6. СИНЕРГЕТИКА ПРЕДВЕСТНИКОВ

Объем журнальной статьи не позволяет рассмотреть все процессы, связанные с генерацией предвестников, показанных на схеме рис. 1. Поэтому в заключение хотелось бы остановиться еще на одном немаловажном факте, часто уходящем от внимания исследователей. Предвестники, показанные на рис. 1, не просто механически связаны между собой в некую общую схему, но являются составными частями единого процесса развития финальной стадии подготовки землетрясения. Синергетика их взаимодействия проявляется в синхронизме их появления, пространственном распределении, связанном с зоной подготовки землетрясения, причем синхронизм означает не просто их одновременное появление, но появление с некоторой задержкой друг относительно друга, отражающее процесс развития финальной стадии. Это, в частности, отражено в публикации [Pulinets et al., 2014], где рассмотрен синхронизм появления аномалий поправки химического потенциала ΔU , формирования кластерных ионов-аэрозолей и формирования линейных облачных структур для трех случаев землетрясений в раз-

личных сейсмических областях планеты. При этом облачные структуры всегда появляются после формирования крупных кластерных ионов, что свидетельствует о том, что так же, как и в случае образования облаков под воздействием ГКЛ, кластерные ионы, выносимые из приповерхностного слоя атмосферы на высоты формирования облаков, являются теми центрами нуклеации, которые приводят к образованию крупных частиц, формирующих облака.

7. ВЫВОДЫ

В данной работе описана концепция модели литосферно-атмосферно-ионосферно-магнитосферных связей (ЛАИМС), которая была представлена как сложная диссипативная открытая система. Более подробно мы остановились на физических основах генерации тепловых и ионосферных предвестников. Однако, как было показано в ходе обсуждения, модель имеет более широкую применимость, поскольку описывает наблюдаемые аномалии и для других природных и антропогенных процессов, таких как пылевые

бури, извержения вулканов, генерация тропических циклонов, радиоактивное загрязнение среды, формирование облаков и пр. Она может иметь широкое применение в различных приложениях, например, при организации оперативного мониторинга краткосрочных предвестников землетрясений, экологии, и других областях контроля окружающей среды.

Авторы хотели бы выразить благодарность Международному институту космической физики (ISSI) в Берне за поддержку коллектива проекта “Multi-instrument Space-Borne Observations and Validation of the Physical Model of the Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere-Magnetosphere Coupling”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– *Акопян С.Ц.* Количественное описание сейсмических процессов на основе сейсмической энтропии // Изв. РАН. Физика Земли. № 1. С. 11–26. 1998.

– *Бондур В.Г., Пулинец С.А., Ким Г.А.* О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Катрина // ДАН. Геофизика. Т. 422. № 2. С. 244–249. 2008.

– *Боярчук К.А., Карелин А.В., Широков Р.В.* Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы. М.: ВНИИЭМ, 203 с. 2006.

– *Давиденко Д.В.* Диагностика ионосферных возмущений над сейсмоопасными регионами. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: Изд-во ФГБУ “ИПГ”, 26 с. 2013.

– *Ким В.П., Пулинец С.А., Хегай В.В.* Теоретическая модель возможных изменений в ночной среднеширотной области D ионосферы над зоной подготовки сильного землетрясения // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 45. № 4. С. 289–296. 2002.

– *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. Т. 48. № 6. С. 831–843. 2008.

– *Мареев Е.А.* Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // Успехи физ. наук. Т. 180. № 5. С. 527–534. 2010.

– *Милькис М.Р.* Метеорологические предвестники сильных землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. № 3. С. 36–47. 1986.

– *Морозова Л.И.* Облачные индикаторы геодинамики земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. № 10. С. 108–112. 1993.

– *Морозова Л.И.* Спутниковый мониторинг землетрясений. Владивосток: Дальнаука, 136 с. 2005.

– *Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М.* Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // Успехи физ. наук (Научная Сессия ООФА РАН 29 октября 1997 г.). Т. 168. № 5. С. 582–589. 1998.

– *Пулинец С.А., Узунов Д.* Спутниковым технологиям нет альтернативы. О проблеме мониторинга природных и техногенных катастроф // Тр. ин-та при-

кладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова. Вып. 89. С. 173–185. 2010.

– *Пулинец С.А., Узунов Д.П., Давиденко Д.В., Цадиковский Е.И., Дудкин С.А.* Прогноз землетрясений возможен?! Интегральные технологии многопараметрического мониторинга геоэффективных явлений в рамках комплексной модели взаимосвязей в литосфере, атмосфере и ионосфере Земли. М.: Тривант, 144 с. 2014.

– *Сорокин В.М.* Плазменные и электромагнитные эффекты в ионосфере, связанные с динамикой заряженных аэрозолей в нижней атмосфере // Хим. физика. Т. 26. № 4. С. 45–80. 2007.

– *Спивак А.А.* Объемная активность подпочвенного радона в зонах тектонических нарушений / Геофизика межгеосферных взаимодействий. М.: ГЕОС, С. 235–247. 2008.

– *Черногор Л.Ф.* Физика и экология катастроф. Харьков: Изд-во Харьковского национального ун-та им. В.Н. Каразина, 555 с. 2012.

– *Anagnostopoulos G.C., 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 // Ann. Geophysicae. V. 55. № 1. P. 21–36. doi: 10.4401/ag-5365. 2012.

– *Astafyeva E.I., Afraimovich E.L.* Long-distance traveling ionospheric disturbances caused by the great Sumatra-Andaman earthquake on 26 December 2004 // Earth Planets Space. V. 58. № 8. P. 1025–1031. 2006.

– *Bonfanti P., Genzano N., Heinicke J., Italiano F., Martinelli G., Pergola N., Telesca L., Tramutoli V.* Evidence of CO₂-gas emission variations in the central Apennines (Italy) during the L’Aquila seismic sequence (March–April 2009) // B. Geofis. Teor. Appl. V. 53. № 1. P. 147–168. 2012.

– *Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J.* A systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. V. 476. № 3. P. 371–396. 2009.

– *De Santis A., Cianchini G., Qamili E., Frepoli A.* The 2009 L’Aquila (Central Italy) seismic sequence as a chaotic process // Tectonophysics. V. 496. № 1. P. 44–52. 2010.

– *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 // B. Seismol. Soc. Am. V. 101. № 3. P. 1386–1395. 2011.

– *Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Myachkin V.I.* Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pure Appl. Geophys. V. 117. № 5. P. 1025–1044. 1979.

– *Dunajevka M., Pulinets S. A.* Atmospheric and thermal anomalies observed around the time of strong earthquakes in Mexico // Atmosfera. V. 18. № 4. P. 233–247. 2005.

– *Eddington A.* The nature of the physical world. Cambridge: Cambridge University Press, 361 p. 1928.

– *Freund F.* Toward a unified solid state theory for pre-earthquake signals // Acta Geophys. V. 58. № 5. P. 719–766. doi:10.2478/s11600-009-0066-x. 2010.

– *Galvan D.A., Komjathy A., Hickey M.P., Stephens P., Snively J., Tony Song Y., Butala M.D., Mannucci A.J.* Ionospheric signatures of Tohoku-Oki tsunami of March 11, 2011: Model comparisons near the

- epicenter // *Radio Sci.* V.47. № 4. RS4003. doi: 10.1029/2012RS005023. 2012.
- *Giuliani G.G., Giuliani R., Totani G., Eusani G., Totani F.* Radon observations by Gamma Detectors “PM-4 and PM-2” during the seismic period (January–April 2009) in L’Aquila Basin. Abstr. V.1. P.03. AGU Fall Meeting, San Francisco, December 14–18. ID# U14A-03. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009AGUFM.U14A..03G>. 2009.
- *Gringel W., Rosen J.M., Hoffman D.J.* Electrical structure from 0 up to 30 kilometers / *The Earth’s electrical environment*. Washington DC: National Academic Press. P. 166–182. 1986.
- *Gringel W., Mühleisen R.* Sahara dust concentration in the troposphere over the North Atlantic derived from measurements of air conductivity // *Beitraege zur Physik der atmosphaere* V. 51. № 2. P. 121–128. 1978.
- *Hirsikko A.* On formation, growth and concentrations of air ions // Report series of aerosol science. N:o (2011). Helsinki Universtiy, 64 p. 2011.
- *Hörrak U., Mirme A., Salm J., Tamm E., Tammet H.* Air ion measurements as a source of information about atmospheric aerosols // *Atmos.Res.* V. 46. № 3. P. 233–242. 1998.
- *Hörrak U.* Ch. 10. Contribution of air ion mobility classes to air conductivity / Air ion mobility spectrum at a rural area: Abstrahit de dissertationibus geophysicales universitatis Tartuensis. 15. Tartu University, 81 p. 2001.
- *İnan S., Akgül T., Seyis C., Saatçılar R., Baykut S., Ergintav S., Baş M.* Geochemical monitoring in the Marmara region (NW Turkey): A search for precursors of seismic activity // *J. Geophys. Res.* V. 113. № B03401. doi: 10.1029/2007JB005206. 2008.
- *Jing F., Shen X.H., Kang C.L., Xiong P.* Variations of multi-parameter observations in atmosphere related to earthquake // *Nat. Hazard Earth Sys.* V. 13. № 1. P. 27–33. 2013.
- *Kelley M.* (Ed.) *The Earth’s ionosphere plasma physics and electrodynamics*. Ch. 3. Dynamics and electrodynamics of the equatorial zone // *International Geophysics*. V. 96. P. 71–129. 2009.
- *Kim V.P., Hegai V.V., Illich-Svitych P.V.* On one possible ionospheric precursor of earthquakes // *Izv. – Phys. Solid Eart.* V. 30. P. 223–226. 1994.
- *Kim V.P., Liu J.Y., Hegai V.V.* Modeling the pre-earthquake electrostatic effect on the F region ionosphere // *Adv. Space Res.* V. 50. № 11. P. 1524–1533. 2012.
- *Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Pulnits S.A., Zhao B., Tzidilina M.N.* Formation mechanism of great positive TEC disturbances prior to Wenchuan earthquake on May 12, 2008 // *Adv. Space Res.* V. 48. № 3. P. 488–499. 2011.
- *Kondepudi D., Prigogine I.* *Modern thermodynamics: From heat engines to dissipative structures*. Wiley & Blackwell, 508 p. 1998.
- *Kuo C.L., Huba J.D., Joyce G., Lee L.C.* Ionosphere plasma bubbles and density variations induced by pre-earthquake rock currents and associated surface charges // *J. Geophys. Res.* V. 116. № A10. Article ID A10317. doi: 10.1029/2011JA016628. Article ID A10317. 2011.
- *Kuo C.L., Lee L.C., Huba J.D.* An improved coupling model for the lithosphere-atmosphere-ionosphere system // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 119. № A4. P. 3189–3205. doi: 10.1002/2013JA019392. 2014.
- *Laakso L., Mäkelä J. M., Pirjola L., Kulmala M.* Model studies on ion-induced nucleation in the atmosphere // *J. Geophys. Res.* V. 107. № D20. P. AAC 5-1-AAC 5-19, doi: 10.1029/2002JD002140. 2002.
- *Laakso L., Kulmala M., Lehtinen K.E.J.* Effect of condensation rate enhancement factor on 3-nm (diameter) particle formation in binary ion-induced and homogeneous nucleation // *J. Geophys. Res.* V. 108. № D18. doi: 10.1029/2003JD003432. 2003.
- *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, D.N. Riahi. 2. P. 111–162. 2000.
- *Li M., Parrot M.* Statistical analysis of an ionospheric parameter as a base for earthquake prediction // *J. Geophys. Res.* V. 118. № A6. P. 3731–3739. doi: 10.1002/jgra.50313. 2013.
- *Li K.C., Feng J., Pan X., Chunyan Q.* Application of multi-parameter infrared remote sensing in seismic monitoring / Abstr. Intern. Workshop of Earthquake Anomaly Recognition. 18–20 September, 2001. Shenyang, China. 2001.
- *Liu J.-Y., Tsai Y.-B., Ma K.-F., Chen Y.-I., Tsai H.-F., Lin C.-H., Kamogawa M., Lee C.-P.* Ionospheric GPS total electron content (TEC) disturbances triggered by the 26 December 2004 Indian Ocean tsunami // *J. Geophys. Res.* V. 111. № A5. doi:10.1029/2005JA011200. 2006.
- *Liu Z., Luo W., Ding X., Chen W.* The new characteristics of ionospheric Total Electron Content (TEC) disturbances prior to four large earthquakes / Abstr. 7th Annual seminar on Spatial Information Science and Technology (ASSIST 2011), Hong-Kong. 2011.
- *Markson R.* The global circuit intensity: its measurement and variation over the last 50 years // *B. Am. Meteorol. Soc.* V. 88. № 2. P. 223–241. doi: 10.1175/BAMS-88-2-223. 2007.
- *Martinelli G., Solecki A.T., Tchorz-Trzeciakiewicz D.E., Piekarczyk M., Grudzinska K.K.* Laboratory experiments on radon 222 exposure effects on local environmental temperature: implications for satellite TIR measurements / Abstr. EGU General Assembly 27 April–2 May, 2014. Vienna, Austria. Id. 3175. 2014.
- *Namgaladze A.A., Zolotov O.V., Karpov M.I., Romanovskaya Y.V.* Manifestations of the earthquake preparations in the ionosphere total electron content variations // *Natural Science*. V. 4. № 11. P. 848–855. 2012.
- *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*. V. 431. № 1. P. 211–220. 2007.
- *Ouzounov D., Pulnits S., Hattori K., Liu J.-Y., Kafatos M.* Validation of atmospheric signals associated with major earthquake’s by a synergy of multi-parameter space and ground observations / Abstr. Asia Oceania Geosciences Society 2011 Meeting (AOGS2011), 8–12 August, 2011. Taipei, Taiwan. IWG13-A011. 2011.
- *Ouzounov D., Pulnits S., Davidenko D., Hattori K., Kafatos M., Taylor P.* Multi-sensor observations of earthquake related atmospheric signals over major geohazard

- validation sites / Abstr. AGU's 45th Annual Fall Meeting, 3–7 Dec., 2012. San Francisco, CA, United States. NH44A-05. 2012.
- *Papadopoulos G.A.* Real-Time Seismicity Evaluation for Operational Earthquake Forecasting: Recent Experiences from Italy and Greece / Lecture at Chapman University. Dec., 2009. Orange, CA. 2009.
 - *Park C.G., Dejnakarindra M.* Penetration of thundercloud electric fields into the ionosphere and magnetosphere: 1. Middle and subauroral latitudes // *J. Geophys. Res.* V. 78. № 28. P. 6623–6633. 1973.
 - *Pergola N., Aliano C., Coviello I., Filizzola C., Genzano N., Lacava T., Lisi M., Mazzeo G., Tramutoli V.* Using RST approach and EOS-MODIS radiances for monitoring seismically active regions: a study on the 6 April 2009 Abruzzo earthquake // *Nat. Hazard. Earth Syst.* V. 10. № 2. P. 239–249. doi:10.5194/nhess-10-239-2010. 2010.
 - *Plastino W., Povinec P., De Luca G., Doglioni C., Nisi S., Ioannucci L., Balata M., Laubenstein M., Bella F., Coccia E.* Uranium groundwater anomalies and L'Aquila earthquake, 6th April 2009 (Italy) // *J. Environ. Radioactiv.* V. 101. № 1. P. 45–50. 2010.
 - *Pulinets S., Kafatos M., Cervone G., Ouzounov D., Singh R.* Energies associated with the Sumatra Earthquakes of December 26, 2004 and March 28, 2005 / Abstr. AGU 2007 Fall Meeting, San Francisco. USA. P. S42B-04. 2007.
 - *Pulinets S.A.* Physical mechanism of the vertical electric field generation over active tectonic faults // *Adv. Space Res.* V. 44. № 6. P. 767–773. 2009.
 - *Pulinets S.A.* The synergy of earthquake precursors // *Earthquake Science.* V. 24. № 6. P. 535–548. 2011a.
 - *Pulinets S.* A Multi-parameter approach to earthquake forecasting // *Executive Intelligence Review.* 22 April 2011. V. 38. № 16. P. 26–35. 2011b.
 - *Pulinets S.* Low-latitude atmosphere-ionosphere effects initiated by strong earthquakes preparation process // *International Journal of Geophysics.* Article ID 131842. V. 2012. 14 p. 2012.
 - *Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Hegai V.V., Kim V.P., Lomonosov A.M.* Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling // *Adv. Space Res.* V. 26. № 8. P. 1209–1218. 2000.
 - *Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Hegai V.V., Karelin A.V.* Conception and model of seismo-ionosphere-magnetosphere coupling / *Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling.* Eds. M. Hayakawa, O.A. Molchanov. Tokyo: TERRAPUB. P. 353–361. 2002.
 - *Pulinets S.A., Boyarchuk K.A.* Ionospheric Precursors of Earthquakes. Berlin: Springer, 315 p. 2004.
 - *Pulinets S., Ouzounov D.* Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model – an unified concept for earthquake precursors validation // *J. Asian Earth Sci.* V. 41. № 4–5. P. 371–382. 2011.
 - *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 // *Phys. Chem. Earth.* V. 31. № 4–9. P. 143–153. 2006.
 - *Pulinets S.A., Ouzounov D.P., Giuliani G.G., Ciralo L., Taylor P.T.* Atmosphere and radon activities observed prior to Abruzzo M6.3 earthquake of April 6, 2009 / AGU Fall Meeting, 14–18 December, 2009. Abstract: U14A-07. 2009.
 - *Pulinets S., Davidenko D.* Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit // *Adv. Space Res.* V. 53. № 5. P. 709–723. 2014.
 - *Pulinets S.A., Morozova L.I., Yudin I.A.* Synchronization of atmospheric indicators at the last stage of earthquake preparation cycle // *Research in Geophysics.* V. 4. № 1. P. 45–50. 2014.
 - *Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O., Schwingenschuh K., Boudjada M., Biagi P.F., Maggipinto T., Castellana L., Ermini A., Hayakawa M.* Anomalies in VLF radio signals prior the Abruzzo earthquake (M = 6.3) on 6 April 2009 // *Nat. Hazard. Earth Syst.* V. 9. № 5. P. 1727–1732. 2009.
 - *Rycroft M.J., Nicoll K.A., Aplin K.L., Harrison R.G.* Recent advances in global electric circuit coupling between the space environment and the troposphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 90–91. P. 198–211. 2012.
 - *Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P.* Earthquake prediction: A physical basis // *Science.* № 4102. P. 803–810. 1973.
 - *Segovia N., Pulinets S.A., Leyva A., Mena M., Monnin M., Camacho M.E., Ponciano M.G., Fernandez V.* Ground radon exhalation, an electrostatic contribution for upper atmospheric layers processes // *Radiat. Meas.* V. 40. № 2–6. P. 670–672. 2005.
 - *Sekimoto K., Takayama M.* Influence of needle voltage on the formation of negative core ions using atmospheric pressure corona discharge in air // *Int. J. Mass Spectrom.* V. 261. № 1. P. 38–44. 2007.
 - *Stull R.B.* An introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 666 p. 1988.
 - *Svensmark H., Friis-Christensen E.* Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage—a missing link in solar-climate relationships // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 59. № 11. P. 1225–1232. 1997.
 - *Svensmark H., Pedersen J.O.P., Marsch N.D., Enghoff M.B., Uggerhøj U.I.* Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions // *P. R. Soc. A.* V. 463. P. 385–396. 2007.
 - *Thacker B.H., Doebling S.W., Hemez F.M., Anderson M.C., Pepin J.E., Rodriguez E.A.* Concepts of model verification and validation // Report № LA-14167-MS. Los Alamos National Laboratory. 41 p. 2004.
 - *Williams E.R.* The global electrical circuit: A review // *Atmos. Res.* V. 91. № 2–4. P. 140–152. 2009.
 - *Wilson C.T.R.* Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms // *Philos. T. R. Soc. A.* V. 221. P. 73–115. 1921.
 - *Wu H.C., Tikhonov I.N.* Jet streams anomalies as possible short-term precursors of earthquakes with M > 6.0 // *Research in Geophysics.* V. 4. № 1. P. 12–18. 2014.
 - *Yu F., Turco R.P.* From molecular clusters to nanoparticles: The role of ambient ionization in tropospheric aerosol formation // *J. Geophys. Res.* V. 106. № D5. P. 4797–4814. 2001.