

# Многопараметрический мониторинг краткосрочных предвестников землетрясений и его физическое обоснование в приложении к Камчатскому региону

Пулинец С. А.<sup>1</sup>, Узунов Д. П.<sup>2</sup>, Давиденко Д. В.<sup>1</sup>, Петрухин А. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Университет Чэпмена, Оранж, Калифорния, США

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт, Долгопрудный МО, Россия

e-mail: pulse@rssi.ru ouzounov@chapman.edu davidenkoe5@rambler.ru apetruhin93@ya.ru

В последнее время возрождается интерес к использованию физических предвестников землетрясений в целях краткосрочного прогноза, которые активно использовались сейсмологами в 70-х годах XX столетия. Это связано, в первую очередь, с появлением физического обоснования механизмов генерации краткосрочных предвестников в виде комплексной модели Литосферно-Атмосферно-Ионосферных взаимодействий (LAIC) [1]. Ключевым элементом модели является процесс нуклеации кластерных ионов, появляющихся в результате ионизации приземного слоя воздуха радоном, выделяемым из земной коры в области подготовки землетрясения. Этот процесс аналогичен образованию зародышевых капель облаков при воздействии на них галактических космических лучей. Следствием этого процесса является генерация целого ряда предвестников, которые условно можно разделить на две группы: а) тепловые и метеорологические и б) электромагнитные и ионосферные. Синергетика наблюдаемых процессов показывает, что для успешного осуществления краткосрочного прогноза требуется осуществление многопараметрического мониторинга предвестников, описываемых моделью. Эти предвестники появляются с различной заблаговременностью, а размеры наблюдаемых аномалий, их интенсивность и положение в пространстве в совокупности позволяют определить все три ключевых параметра, необходимых для прогноза: место, время и магнитуду ожидаемого землетрясения. Точность прогноза повышается по мере усовершенствования методов наземного и спутникового мониторинга.

Мы рассматриваем заключительный этап цикла подготовки землетрясения как процесс приближения открытой сложной системы к критическому состоянию, при этом атмосфера (и ее ионизированная верхняя оболочка-ионосфера) является неотъемлемой частью этой системы. При таком подходе можно утверждать, что деформации земной коры, форшоковая активность, различные геофизические аномалии, регистрируемые наземными методами мониторинга, атмосферные и ионосферные аномалии являются не независимыми процессами, а как части общей системы синергетического взаимодействия геосфер своим распределением в пространстве, последовательностью появления во времени позволяют выявить то, что называется в синергетике “стрелой времени”, характеризующей необратимость процесса [2]. В случае наличия основного набора ключевых параметров (как это было после анализа многочисленных публикаций по землетрясению в Аквиле 6 апреля 2009 г.) такую направленность можно продемонстрировать экспериментально (Рис. 1). Однако при организации оперативного прогноза большое количество необходимых данных оказывается недоступным, что требует поиска новых подходов. Мы предлагаем использование так называемых обобщенных параметров, характерных для синергетического подхода. Достоинством этих параметров является их доступность, (дистанционный доступ), глобальность (большинство используемых параметров – это данные дистанционного зондирования с ИСЗ) и надежность (согласно нашему опыту, их аномальное поведение проявляется практически в 100% случаев сильных  $M > 6$  землетрясений). Обобщенными эти параметры называются потому, что они характеризуют состояние среды в целом и отражают существенное изменение ее свойств.

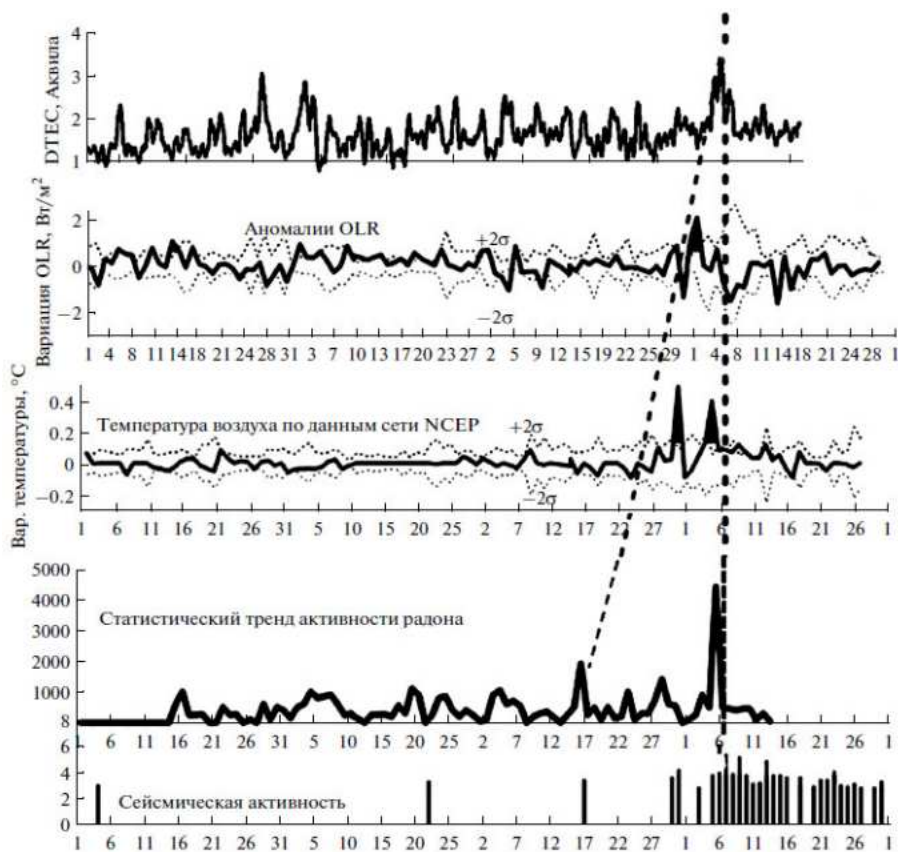


Рис. 1. Временная динамика выделения радона, вариаций атмосферных и ионосферных параметров перед землетрясением в Аквиле.

В качестве обобщенного параметра, являющегося индикатором состояния земной коры и сейсмической активности в регионе мы используем параметр  $b$  из соотношения Гутенберга-Рихтера, и, в частности, уменьшение его значения перед землетрясениями. Уже является практически общепризнанным, что уменьшение величины  $b$  свидетельствует о приближении сейсмического события свидетельством чему является регистрация уменьшенных значений  $b$  на заблокированных участках разломов, формирование неоднородностей (asperities) и увеличенного напряжения [3, 4]. С другой стороны, период уменьшения значения величин  $b$  является одним из признаков формального определения форшоковой активности [5]. Кроме того, есть свидетельства, того, что период уменьшения значений  $b$  совпадает с увеличением активности выделения радона, что уже имеет непосредственное отношение к нашей модели [4]. На Рис. 2 показаны (сверху вниз) вариации сейсмической активности, значений  $b$ , фрактально размерности. И активности радона перед землетрясением в Кобе, Япония. Следует также отметить, что период уменьшения величины  $b$  перед землетрясением в Аквиле (Италия) совпал с периодом времени, когда наблюдались основные физические предвестники (тепловые, электромагнитные, ионосферные).

Следующим обобщенным параметром является поправка химического потенциала паров воды в атмосфере, характеризующая интенсивность процесса ионизации в приземном слое атмосферы вследствие воздействия  $\alpha$ -излучения радона, а также формирования больших ионных кластеров [1]. Именно потому, что ее вариации отражают процесс

нуклеации в целом, она оказалась очень ценным индикатором приближения сейсмического события. Вариации поправки химического потенциала очень напоминают типичные вариации эманации радона перед землетрясениями, когда интенсивность достигает максимума, а само сейсмическое событие происходит на спаде. На левой панели Рис. 3 показаны вариации поправки химического потенциала перед землетрясением у восточного побере-

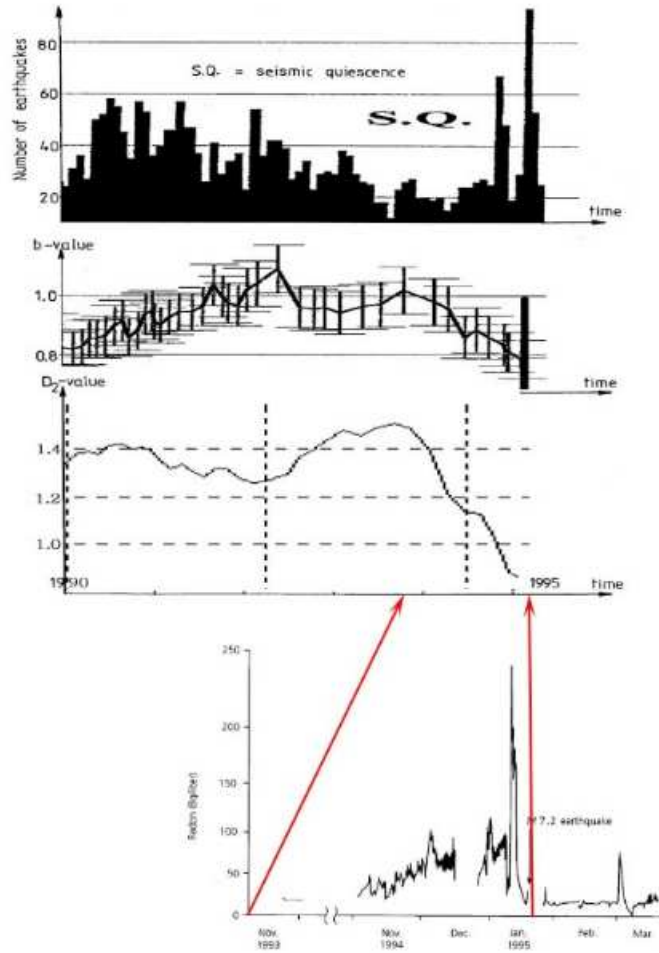


Рис. 2. Сверху вниз: сейсмическая активность в районе г. Кобе, Япония, вариации величины  $b$  в этом же регионе, вариации фрактальной размерности  $D$ , вариации интенсивности выделения радона из земной коры. Красные стрелки показывают соответствующий период на графиках  $b$  и  $D$

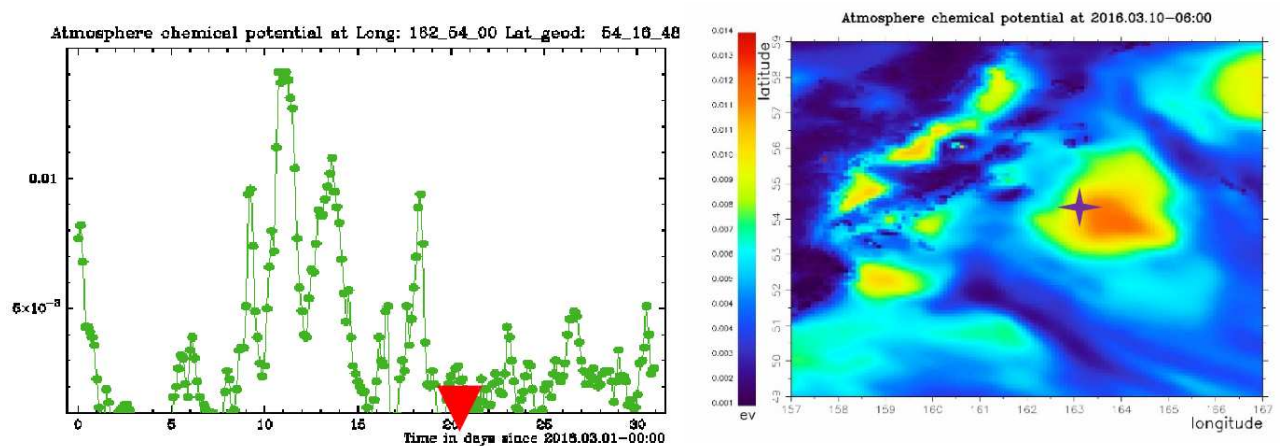


Рис. 3. Левая панель – вариации химического потенциала в эпицентре землетрясения 20 марта 2016 г. правая панель – пространственное распределение 10 марта 2016 г.

жья Камчатки М6.4 20 марта 2016 г. Максимум значения параметра достигается 10-11 марта, а перед самым землетрясением активность спадает практически до нуля. Характерно, что эта активность имеет локальный характер, что видно на правой панели Рис. 3, где показано пространственное распределение параметра. Важно подчеркнуть, что аномалия наблюдается над океаном, что говорит о возможности создания тепловых аномалий не только над сушей и подтверждает, что источником аномалии могут быть только газы, выделяемые из земной коры в области активного разлома.

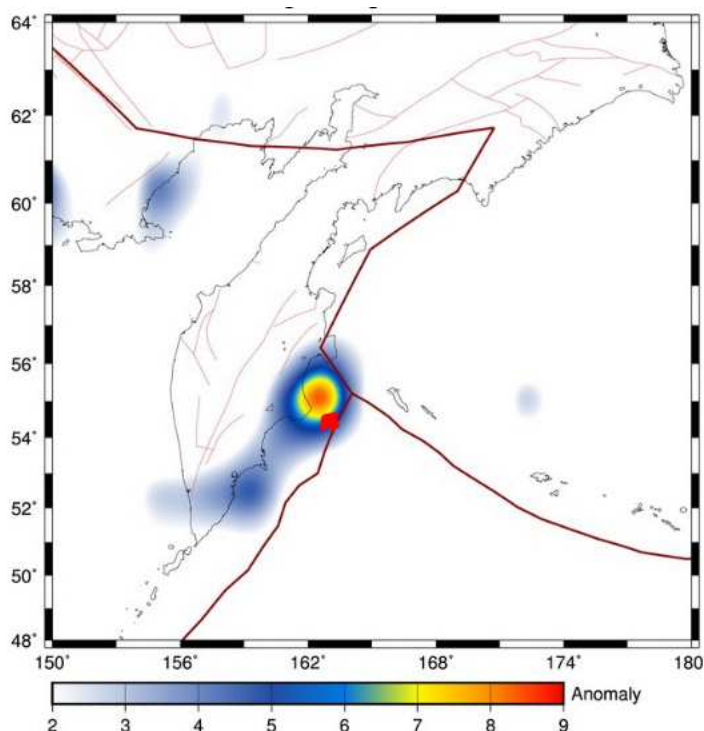


Рис. 4. Аномалия OLR, зарегистрированная за 2 недели до землетрясения 20 марта 2016 г.

Одним из наиболее надежных параметров, используемых нами в оперативном прогнозе, является аномальный поток уходящего длинноволнового инфракрасного излучения (OLR – Outgoing Longwave Radiation). В отличие от поверхностных тепловых аномалий, регистрация которых возможна только при безоблачном небе, измерения OLR производятся на уровне верхней кромки облаков, а потому этот параметр регистрируется при любой погоде. Надежность этого параметра обеспечивается длительной базой непрерывных калиброванных спутниковых измерений (35 лет), что позволяет однозначно отличить аномалию от фонового уровня. На Рис. 4 представлена аномалия OLR, зарегистрированная для того же случая 20 марта 2016 г.

И, наконец, последним параметром, используемым нами в оперативном прогнозе, являются вариации электронной концентрации в ионосфере. Механизм их генерации перед землетрясениями подробно описан в работе [6]. Поскольку существует много наземных и спутниковых методов измерения вариаций электронной концентрации в ионосфере, нами разработано несколько техник выделения сейсмо-ионосферных вариаций на фоне ежедневной изменчивости ионосферы различной природы. Одним из наиболее простых и достаточно надежных приемов является кросс-корреляционный анализ данных ионосферных станций или приемников GPS/ГЛОНАСС, находящихся на различных расстояниях от эпицентра будущего землетрясения [7]. При этом используется вполне очевидный факт, что интенсивность аномальных вариаций, связанных с землетрясением, спадает по мере удаления от эпицентра. Учитывая большой радиус корреляции ионосферы (500-700 км), коэффициент кросс-корреляции между двумя станциями, находящимися в пределах ради-

уса корреляции ионосферы, довольно велик ( $>0.8$ ), но падает перед землетрясением при различных расстояниях от станции до эпицентра при нахождении станции в зоне подготовки землетрясения. На Рис. 5 представлены изменения коэффициента кросс-корреляции между измерениями вертикального полного электронного содержания (ПЭС) на станциях Петропавловск-Камчатский и Южно-Сахалинск в период повышенной сейсмической активности на Камчатке в течение июня-июля 2012 г. Как видно из рисунка, за 3-5 суток до каждого землетрясения коэффициент кросс-корреляции уменьшается. Учитывая, что радиус подготовки землетрясения с магнитудой  $>6$  составляет более 380 км, приемник в Петропавловске-Камчатском “реагирует” практически на каждое камчатское землетрясение.

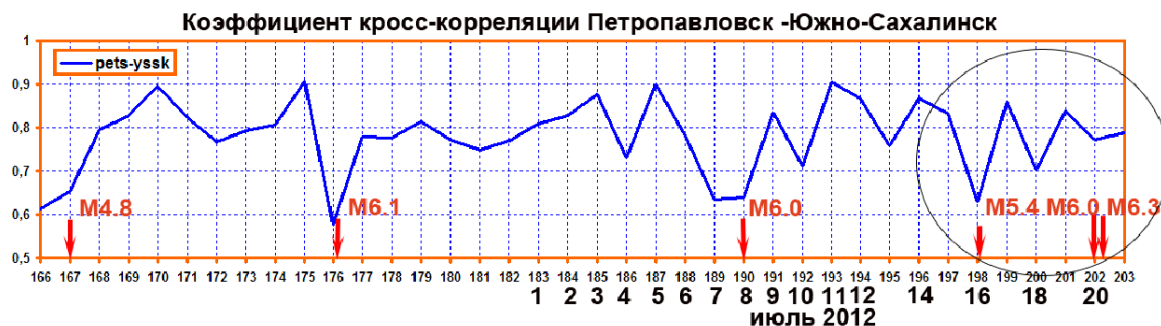


Рис. 5. Коэффициент кросс-корреляции между станциями Южно-Сахалинск – Петропавловск-Камчатский за период июнь-июль 2012 г.

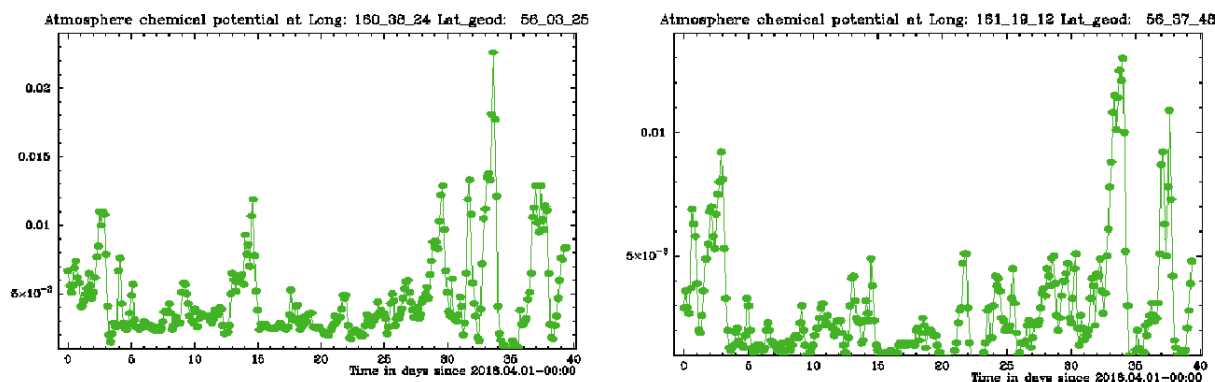


Рис. 6. Вариации поправки химического потенциала над вулканами Ключевская сопка (левая панель) и Шивелуч (правая панель).

Анализ данных, проводившихся нами в течение последних месяцев, показал, что ряд параметров, в частности, химический потенциал и OLR, реагируют также на вулканическую активность, причем локальные максимумы химического потенциала появляются в области эпицентра вулкана за сутки-двое до его извержения. На Рис. 6 показаны вариации поправки химического потенциала в области вулканов Ключевская сопка и Шивелуч в апреле-мае 2016 г.

Можно заметить определенную синхронность в активности обоих вулканов с резким усилением активности в конце апреля-начале мая. При этом интенсивность параметра для Ключевской сопки выше.

Подводя итог, следует сказать, что оперативный мониторинг, проводимый на основе разработанной комплексной модели, позволяет надежно определить период подготовки сильных землетрясений в Камчатском регионе с заблаговременностью от 1 суток до месяца. Точность определения эпицентра будущего землетрясения составляет  $\pm 2^\circ$  по широте

и долготе и может быть увеличена по мере усовершенствования технологий обработки. Статистический анализ различных параметров, проводимый в настоящее время, позволит калибровать вариации предвестников с целью определения магнитуды будущего землетрясения. При наличии в открытом доступе данных сети приемников GPS на Камчатке и возможности их анализа в реальном времени возможно увеличение точности определения даты будущего землетрясения до 1 суток. Увеличение точности прогноза возможно также при комплексировании спутниковых наблюдений с данными наземных измерений, в том числе: вариаций активности радона, вертикального электрического поля и проводимости атмосферы, данных наземного вертикального зондирования ионосферы.

#### Литература

1. Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В., Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера-атмосфера-ионосфера-магнитосфера, стимулируемых ионизацией, Геомагнетизм и аэрономия, 55, Вып. 4, 521-538, 2015
2. Pulinets S.A., The synergy of earthquake precursors, Earthquake Science, 24, 535-548, 2011, doi:10.1007/s11589-011-0815-1
3. Schorlemmer D., Wiemer S., Wyss M., Earthquake statistics at Parkfield: 1. Stationarity of b-values, Journal of Geophysical Research, 109, B12307, doi:10.1029/2004JB003234, 2004
4. Enescu B, Itu K., Values of  $b$  and  $p$ : their Variations and Relation to Physical Processes for Earthquakes in Japan, Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.46 B, 2003
5. Papadopoulos G.A., Charalampakis M., Fokaefs A., Minadakis G., Strong foreshock signal preceding the L'Aquila (Italy) earthquake (Mw 6.3) of 6 April 2009, Natural Hazards and Earth System Sciences, 10, 19–24, 2010
6. Pulinets S., Davidenko D., Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit, Advances in Space Research, 53, 709-723, 2014
7. Pulinets S.A., Gaivoronska T.B., Leyva Contreras A., Ciruolo L., Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquakes, Natural Hazards and Earth System Sciences, 4, pp. 697-702, 2004