

Проект PRE-EARTHQUAKES – мониторинг предвестников землетрясений: стратегия и первые результаты

РОМАНОВ АЛЕКСЕЙ¹, РОМАНОВ АЛЕКСАНДР¹, ТРАМУТОЛИ В.², ИНАН С.³, ЯКОВСКИ Н.⁴, ПУЛИНЕЦ С.⁵, ФИЛИЦОЛА К.⁶, ШАГИМУРАТОВ И.⁷ ПЕРГОЛА Н.⁸, ГЕНЗАНО Н.¹, СЕРИО С.¹, ЛИСИ М.¹, КОРРАДО Р.¹, ГРИМАЛЬДИ К.¹, ФАРУОЛО М.¹, ПЕТРАЧЧА Р.¹, ЭРГИНТАВ С.², ЗАКИР З.², АЛПАРСЛАН Е.², ГУРОЛ С.², МАЙНУЛ ХОК М.³, МИССЛИНГ К.Д.³, ВИЛКЕН В.³, БОРРИС С.³, КАЛИНИН Ю.⁴, ЦИБУЛЯ К.⁴, ГИНЗБУРГ Е.⁴, ПОХУНКОВ А.⁴, ПУСТИВАЛОВА Л.⁴, ЧЕРНЫЙ И.⁵, ТРУСОВ С.⁵, АДЖАЛОВА А.⁵, ЕРМОЛАЕВ Д.⁵, БОБРОВСКИЙ С.⁵, ПАСИЕЛЛО П.⁶, КОВЬЕЛЛО И.⁶, ФАЛКОНЬЕРИ А.⁶, ЗАХАРЕНКОВА И.⁷, ЧЕРНЯК Ю.⁷, РАДИЕВСКИЙ А.⁷, ЛАПЕННА В.⁸, БАЛАСКО М.⁸, ПИСЦИЕЛЛИ С.⁸, ЛАКАВА Т.⁸, ШИЗО Г.⁸

¹ Университет Базиликата, Потенца, Италия

² Исследовательский центр TUBITAK-MARMARA, Турция

³ DLR, Кельн, Германия

⁴ Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова, Россия,

⁵ ОАО «Российские космические системы», Россия

⁶ Geospazio Italia srl., Италия

⁷ ЗО ИЗМИРАН, Калининград, Россия,

⁸ Институт методологий для анализа окружающей среды Национального исследовательского Совета, Италия

Аннотация

PRE-EARTHQUAKES (Processing Russian and European EARTH observations for earthquake precursors Studies) - проект, поддержанный в рамках программы FP7 европейского союза, направлен на демонстрацию подхода по интеграции различных данных, в том числе ДЗЗ, а также методов анализа информации, с целью постепенного увеличения надежности краткосрочной оценки сейсмического риска. В рамках проекта были выбраны три основных региона исследований (Италия, Турция и Сахалин (Россия)), на которых в период 2010-2012 г.г. сосредоточились усилия команды проекта по интеграции разнородной информации. В конечном счете, для этих областей были использованы следующие источники информации: 80 радоновых и 29 скважинных станции в Турции, 2 магнитотеллурические станции в Италии; интегрированы результаты наблюдений 18 спутниковых систем, использованы 11 методов анализа информации для 7 измеряемых параметров.

Для интеграции, кросс валидации и научной интерпретации полученных результатов была разработана специализированная интегрированная информационная платформа (PEG, Pre-Earthquakes Geoportal), основанная на стандартах OGC (Open Geospatial Consortium).

Введение

Появление аномальных пространственно временных сигнатур геофизических параметров предшествующих землетрясениям (от нескольких недель до нескольких дней до наступления события) часто исследуются в литературе в последние годы. Например, полное электронное содержание (ПЭС) в ионосфере, которое измеряется плотной сетью специализированных приемников, реагируя на прохождение акустно-гравитационной волны, генерируемой в процессе подготовки сильного землетрясения, может кратковременно воз-

растать над регионом подготовки события [1]. Перемещение жидкостей и/или газов, вызванное тектонической активностью, в частности, может приводить к геохимическим аномалиям (СО₂, радона и др.) и к генерации соответствующих электромагнитных сигналов (изменение электрического поля и сопротивления в среде, ОНЧ/УНЧ электромагнитное излучение и т.д., например. [2]). Заявленные связи между аномальными сигналами и сейсмической активностью долгое время рассматривались научным сообществом с некоторой настороженностью. В основном, это происходило вследствие недостаточности данных для валидации, а также наличием других факторов, не связанных с сейсмической активностью, например, метеорологических, которые могли бы привести к возникновению сходных аномалий в исследуемых параметрах.

Тем не менее, сравнительно недавно появилась физическая модель, называемая LAIC (Lithosphere Atmosphere Ionosphere Coupling) [3], в рамках которой предложено связать в единую цепь физических процессов различные геофизические/геохимические параметры (например, тепловые и атмосферные аномалии с сейсмо-ионосферными аномалиями). В этой модели, аномальные сигналы в измерениях нескольких различных параметров (например, термоаномалии на поверхности Земли, температура и относительная влажность приземного воздуха, аномальные потоки скрытой теплоты, аномальная облачность, аномалии уходящего длинноволнового излучения, аномалии электронной концентрации ионосферы и т.д.) могут быть объяснены, как следствие физических процессов, связанных с подготовительными этапами землетрясения.

Тем не менее, до сих пор ни один отдельно взятый измеряемый параметр, также как ни один метод наблюдения не продемонстрировал достаточную надежность и эффективность при использовании в системе оперативного предсказания землетрясений (см., например, [4]). Интеграция различных наблюдений/параметров совместно с совершенствованием методов анализа данных, могут улучшить фактические знания о подготовительных этапах землетрясений и их возможных предвестниках, снизить количество ложных “срабатываний” и повысить надежность и точность (в терминах пространства-времени) при диагностировании и оценке сейсмического риска. В этом контексте проект PRE-Earthquakes был поддержан Европейским Союзом в рамках Седьмой Рамочной Программы в целях:

- значительного улучшения нашего понимания о различных подготовительных фазах землетрясения и его возможных предвестниках;
- обоснования необходимости включения всемирной системы наблюдения землетрясений (EQuOS) в качестве одной из специализированных компонент глобальной системы систем наблюдения Земли (GEOSS);
- разработки и предложения международному научному сообществу интеграционной платформы (PEG) для совместного использования и кросс-валидации различных новых независимых измерений, методик обработки данных, направленных на исследование предвестников землетрясений.

Основная научная цель проекта состояла в исследовании и демонстрации того, до какой степени систематическая интеграция независимых наблюдений может улучшить (возможно, до предоперационного уровня точности и надежности) возможности краткосрочной оценки сейсмического риска, которая в настоящее время базируется в основном на однопараметрических методах наблюдения.

Стратегия проекта основывалась на 3 следующих направлениях:

1. Координация и получение систематических данных, создание продуктов в заранее определенных (стандартизированных) выходных форматах;

2. Определение и реализация единой интеграционной платформы, где разнородные входные данные могут быть ассимилированы, организованы и подвергнуты сравнению;
3. Развитие методов сравнения, проверки и совместного анализа данных в целях дальнейшего расширения ряда одновременно наблюдаемых параметров и улучшения качества сбора и анализа данных.

Результаты

Наблюдения от 18 различных спутниковых систем (ЕКА и Роскосмос) и с более, чем 100 наземных станций были использованы для изучения аномальных вариаций параметров земной поверхности и атмосферы (включая ионосферу) Земли, которые в последнее время (в соответствии с литературой) считаются вероятными предвестниками землетрясений (Рис. 1).

В начальной фазе проекта, разные параметры (от литосферных до ионосферных), измеряемые с помощью различных технологий наблюдений и анализируемые при помощи различных методов, сравнивались для отдельных землетрясений, произошедших в последние годы в Италии (М6.3, Абруццо, 6 апреля 2009 г.), Турции (М6.1, Элазиг, 8 марта 2010 года) и в России (М6.2, Невельск, 2 августа 2007 г.). Вышеперечисленные регионы были выбраны в качестве районов первоначального тестирования на фазе обсуждения заявки проекта. Недавние землетрясения, которые произошли в Японии (Тохоку) и Турции (Ван) были также включены в перечень исследуемых событий проекта.

В рамках проекта были полностью реализованы технологии автоматизированной обработки данных и создания тематических продуктов (Рис. 2) для 7 наблюдаемых параметров, с использованием 20-и независимых технологий наблюдений, 11 методологий анализа данных для 3-х тестовых регионов и для 24 различных тестовых временных периодов. Таким образом, база знаний проекта включает в себя набор из 3000 различных комбинаций параметров, технологий измерения, методов анализа данных, а также районов и периодов исследований, что отражает текущие возможности мониторинга предвестников землетрясений. Потенциал интеграции анализа различных параметров продемонстрирован на примере более 1700 различных сравнений, выполненных с использованием различных параметров, измерительных технологий и методов анализа данных.

В ходе реализации проекта была разработана и внедрена в процесс научной поддержки интерпретации разнородных продуктов, формируемых членами исследовательского консорциума проекта общая информационная платформа PEG, предназначенная для обмена, сравнения и кросс-валидации независимых наблюдений, технологий и методик обработки, а также анализа информации. Исследовательский консорциум не ограничивается первоначальными членами проекта PRE-EARTHQUAKES, он также постоянно подключает новых участников, присоединившихся к проекту в рамках инициативы EQuOS (система наблюдения землетрясений). В настоящее время управляющий комитет проекта рассматривает заявки по участию в EQuOS от более, чем 20 научных организаций.

На последнем этапе реализации проекта PRE-EARTHQUAKES был проведен эксперимент по мониторингу предвестников землетрясений в реальном масштабе времени с использованием всех технологических возможностей проекта. Области первоначальных исследований были значительно расширены на территории Греции и Турции в Европе, а также на п-ов Камчатка и Японию в Азии.

Данные исследования были осуществлены при поддержке Седьмой Рамочной Программы (FP7/2007-2013) Европейского Союза в соответствии с грантовым соглашением № 263502.

	Параметры	Инструменты	Источник	Методология - Партнер	Продукты		
Ионосфера	ПЭС (Полное электронное содержание)	Метеор-М/ТТАК	Роскосмос	Алгоритм корреляции [8, 9, 10] - ИПГ	Карты магнитосферной плазмы и ионосферные аномалии ПЭС		
		GPS	IGS	ESA		РКС	Дифференциальный алгоритм [10] - ИЗМИРАН
			IGS	ESA			Алгоритм вычисления ПЭС по данным GPS [11] - DLR
			IGS	ESA		РКС	Алгоритм восстановления вертикального ПЭС [12]; Алгоритм создания карт ПЭС;
		ГЛОНАСС	Роскосмос	Алгоритм дифференциального преобразования; Алгоритм расчета ГЭС [13]; Алгоритм расчета волнового возмущения [14]; Числовое моделирование - ИЗМИРАН			
		GALILEO и EGNOS	ESA				
		FORMOSAT-3/ COSMIC	UCAR		Алгоритм анализа профилей системы COSMIC - ИЗМИРАН	Вертикальные профили электронной концентрации ионосферы	
		CHAMP	GFZ Postdam		Радиозатменное зондирование [15, 16, 17] - DLR		
		GRACE	NASA GFZ Potsdam				
Космос 2407 Космос 2414 Космос 2429 Космос 2454	Роскосмос		Технология восстановления вертикального распределения электронной концентрации ионосферы [18] - РКС				
Приповерхостная низкая атмосфера	Солнечная отраженное, ИК излучение Земли	Метеор-М/MCY-MP	Роскосмос	Алгоритм обнаружения облаков. Визуальный контроль РКС	Идентифицированные аномалии облачных структур		
	MW тепловое излучение	Метеор-М/MTB3A	Роскосмос	Методики обратного преобразования - ИПГ	Профили температуры и влажности		
	ИК излучение Земли	MSG/SEVIRI	ESA	RST технология [5, 6, 7, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29] - UNIBAS	Карты теплового инфракрасного излучения		
		EOS/MODIS	NASA				
NOAA/AVHRR		NOAA NESDIS					
Визуальные-околоинфракрасные спектральные характеристики отражения	Ресурс-ДК/Геотон-1	Роскосмос	Визуальное определение, экспертная и не экспертная классификации - UNIBAS	Карты земной поверхности			
Литосфера	Концентрация земного радона	Станции определения радона	TUBITAK MAM-EMSI NETWORK	Анализ временных рядов данных [19] - TUBITAK MAM	Аномалии концентрации радона		
	Магнитные и электрические поля, электрическое удельное сопротивление	Постоянные станции	UNIBAS IMAA-CNR	Анализ временных рядов данных [20] - UNIBAS	Профили электрического удельного сопротивления 0-10 км.		

Рис. 1. Перечень инструментов и наблюдаемых параметров в рамках проекта PRE-Earthquakes

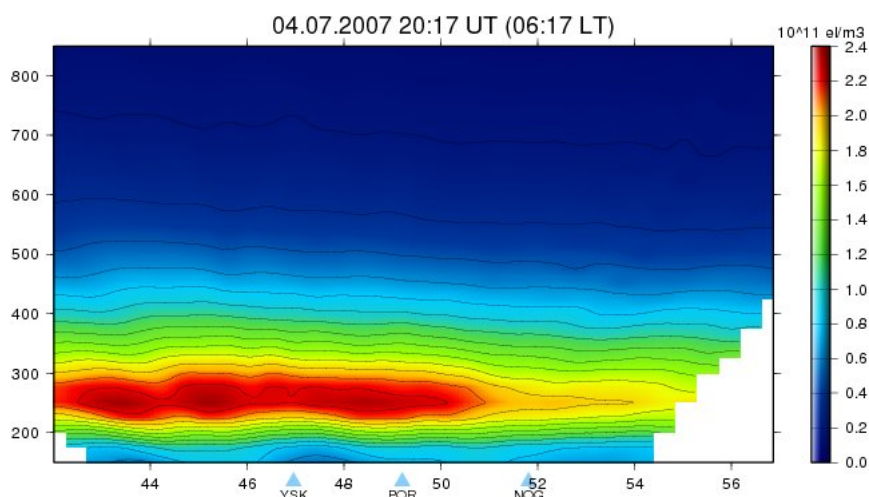


Рис. 2. Пример вертикального распределения электронной концентрации ионосферы над о. Сахалин (Россия). По горизонтали: географическая долгота в град., по вертикали высота в км

Литература

1. *Melbourne T., Carmichael I., DeMets C., Hudnut K., Sanchez O., Stock J., Suarez G., Webb F.* The geodetic signature of the Mw = 8.0 Oct. 9, 1995 Jalisco subduction earthquake // *Geophysical Research Let.* 24. – 1997. – P. 715–718.
2. *Revil A., Glover P.W.J.* “Theory of ionic surface electrical conduction in porous media” // *Phys. Rev. B.* – 55(3). – 1997. P. 1757–1773.
3. *Pulinets S.A.* "Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) Model In Electromagnetic phenomena associated with Earthquakes, Research Signpost, Japan, Chapter 9, 235-253, 2009.
4. *Geller R.J.* Earthquake prediction: a critical review // *Geophys. J. Int.* 131. 1997. P. 425-450.
5. *Tramutoli V.* Robust AVHRR techniques (RAT) for environmental monitoring: theory and applications // *Earth surface remote sensing II in Proceedings of SPIE, Vol. 3496,* pp. 101-113, 1998.
6. *Tramutoli V.* Robust Satellite Techniques (RST) for Natural and Environmental Hazards Monitoring and Mitigation: Theory and Applications // *Proceedings of Multitemp 2007.* Digital Object Identifier 10.1109/MULTITEMP.2007.4293057, 2007.
7. *Tramutoli V., Cuomo V., Filizzola C., Pergola N., Pietrapertosa C.* Assessing the potential of thermal infrared satellite surveys for monitoring seismically active areas: The case of Kocaell (Izmit) earthquake, August 17 1999 // *Remote Sensing Of Environment.* – Vol. 96. 2005. P. 409-426.
8. *Pulinets S.A., Gaivoronska T. B., Leyva Contreras A., Ciraolo L.* Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquakes // *Natural Hazards and Earth System Sciences.* – 4. 2004. P. 697-702.
9. *Pulinets S.A., Boyarchuk K.A.* *Ionospheric Precursors of Earthquakes.* Springer, Berlin, Germany. – 2004. 315 p.

10. *Pulinets S.A., Kotsarenko A.N., Ciraolo L., Pulinets I.A.* Special case of ionospheric day-to-day variability associated with earthquake preparation // *Adv. Space Res.* – 39 (5). – 2007. P. 970-977.
11. *Jakowski, N., Sardon, E. and Schlueter S.* GPS-Based TEC Observations in Comparison with IRI-95 and the European TEC Model NTCM2 // *Adv. in Space Res.* – 22. 1998. P. 803-806.
12. *Baran L.W., Shagimuratov I.I., Tepenitzina N.J.* The use of GPS for ionospheric studies // *Artificial Satellites.* – 32. 1997. P. 49-60.
13. *Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V., Yasukevich Yu.V., Zhivetiev I.V.* Global electron content as a new index of solar activity. Comparison with IRI modeling results // *IRI News.* – V.13. – №1. 2006.
14. *Krankowski A., Shagimuratov I.I., Baran L.W. and Ephishov I.I.* Study of TEC fluctuations in Antarctic ionosphere during storm using GPS observations // *Acta Geophys. Polonica.* – V. 53. – №2. 2005. P. 205–218.
15. *Jakowski N. Wehrenpfennig A., Heise S., Reigber C., Luhr H.* GPS Radio Occultation Measurements of the Ionosphere on CHAMP: Early Results // *Geophys. Res. Lett.* – 29. – №10. – 2002. 10.1029/2001GL014364.
16. *Jakowski N., Stankov S.M., Schlueter S., Klaehn D.* On developing a new ionospheric perturbation index for space weather operations // *Adv. Space Res.* 2005. doi:10.1016/j.asr.2005.07.043.
17. *Jakowski N.* Ionospheric GPS Radio Occultation measurements on board CHAMP // *GPS Solution* 9:pp. 88–95, DOI 10.1007/s10291-005-0137-7, 2005.
18. *Romanov A.A., Urlichich U.M., Pulinets S.A., Romanov A.A., Selin V.A.* A pilot project on the comprehensive diagnosis of earthquake precursors on Sakhalin Island // *Experiment results from 2007//PICES Scientific Report №36.* – 2009. P. 208-214.
19. _nan, S., S. Ergintav, R. Saatçılar, B. Tuzel, and Y. _ravul, "Turkey Makes Major Investments in Earthquake Research *EOS Transactions*, 88, pp. 333-334, 2007.
20. *Balasco M., Lapenna V., Romano G., Siniscalchi A., Telesca, L.* A new magnetotelluric monitoring network operating in Agri Valley (Southern Italy): study of stability of apparent resistivity estimates // *Annals of Geophysics.* – 51(1). – 2008. P. 265-273.
21. *Aliano C., Corrado R., Filizzola C., Genzano N., Pergola N., Tramutoli V.* // *TIR Satellite Techniques for monitoring Earthquake active regions: limits, main achievements and perspectives*, *Ann. Geoph.*, 51(1). – 2008. P. 303–317.
22. *Aliano C., Corrado R., Filizzola C., Pergola N., Tramutoli V.* Robust satellite techniques (RST) for the thermal monitoring of earthquake prone areas: the case of Umbria-Marche October, 1997 seismic events // *Ann. Geoph.* – 51. – 2/3. – 2008. P. 451–459.
23. *Corrado R., Caputo R., Filizzola C., Pergola N., Pietrapertosa C., Tramutoli V.* Seismically active area monitoring by robust TIR satellite techniques: a sensitivity analysis on low magnitude earthquakes in Greece and Turkey // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5. –2005. P. 101–108.

24. *Filizzola C., Pergola N., Pietrapertosa C., Tramutoli V.* Robust Satellite Techniques for seismically active areas monitoring: a sensitivity analysis on September 7, 1999 Athens's earthquake // *Phys. Chem. Earth.* – 29. – 2004. P. 517–527.
25. *Genzano N., Aliano C., Corrado R., Filizzola C., Lisi M., Mazzeo G., Paciello R., Pergola N., Tramutoli V.* RST analysis of MSG-SEVIRI TIR radiances at the time of the Abruzzo 6 April 2009 earthquake // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 9. – 2009. P. 2073–2084.
26. *Genzano N., Aliano C., Filizzola C., Pergola N., Tramutoli V.* A robust satellite technique for monitoring seismically active areas: The case of Bhuj-Gujarat earthquake // *Tectonophysics.* – 431. – 2007. P. 197–210.
27. *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. Hazards Earth Syst. Sci.*, – 10. – 2010. P. 239–249.
28. *Lisi M., Filizzola C., Genzano N., Grimaldi C.S., Lacava T., Marchese F., Mazzeo G., Pergola N., Tramutoli V.* A study on the Abruzzo 6 April 2009 earthquake by applying the RST approach to 15 years of AVHRR TIR observations. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 10. – 2010. P. 395-406.
29. 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) // *BGTA* 53. – 1. – 2012. P. 147-168.

Project PRE-EARTHQUAKES - monitoring earthquake precursors: strategy and first results

Romanov Aleksey, Romanov Aleksandr

JSC Russian Space Systems, Russia

PRE-EARTHQUAKES (Processing Russian and European EARTH observations for earthquake precursors Studies) EU-FP7 project is devoted to demonstrate - integrating different observational data, comparing and improving different data analysis methods - how it is possible to progressively increase reliability of short term seismic risk assessment. Three main testing area were selected (Italy, Turkey and Sakhalin) in order to concentrate observations and integration efforts starting with a learning phase on selected events in the past devoted to identify the most suitable parameters, observations technologies, data analysis algorithms. For these areas, different ground (80 radon and 29 spring water stations in Turkey region, 2 magneto-telluric in Italy) and satellite (18 different systems) based observations, 11 data analysis methods, for 7 measured parameters, have been compared and integrated.

A specific integration platform (PEG, Pre-Earthquakes Geoportal) based on OGC (Open Geospatial Consortium) standards, was developed to operate a products integration, cross-validation and scientific interpretation.