

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗ КОСМОСА АНОМАЛЬНЫХ ВАРИАЦИЙ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СЕРИИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ИТАЛИИ В 2016–2017 гг.

© 2021 г. В. Г. Бондур^{а, *}, М. Н. Цидилина^а, О. С. Воронова^а, Н. В. Феоктистова^а

^аНаучно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 14.09.2021 г.

На основе совместного анализа различных геофизических полей, регистрируемых из космоса, выявлена временная последовательность появления тепловых аномалий, аномалий аэрозольной оптической толщины и полного электронного содержания ионосферы в период подготовки сильных землетрясений с магнитудами $M = 5.2–6.6$, произошедших в Центральной Италии в 2016–2017 гг. Для анализа тепловых полей использовались значения температур поверхности, приповерхностного слоя атмосферы, а также уходящего длинноволнового излучения, зарегистрированные с помощью прибора AIRS (спутник Aqua). Исследования изменений значений аэрозольной оптической толщины проводились с использованием продукта MCD19A2 (спутники Terra и Aqua). Для исследования аномалий в ионосфере использовались глобальные ионосферные карты GIM, полученные по данным глобальных спутниковых навигационных систем и данные наземных GPS-станций, расположенных в радиусе 100 км от эпицентров землетрясений. Установлено, что первые предвестниковые изменения геофизических полей происходили в областях с радиусами 200 км, центры которых совпадали с центрами зон высокого риска возникновения землетрясений, и регистрировались за 11–15 дней до главных сейсмических толчков.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космический мониторинг, предвестники землетрясений, тепловые аномалии, аэрозольная оптическая толщина, ионосфера

DOI: 10.31857/S0205961421060038

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения принадлежат к наиболее опасным природным катастрофам, происходящим как на суше, так и в Мировом океане. Из-за внезапности возникновения, а также масштабов вызываемых последствий они являются наиболее опасными явлениями в природе. Землетрясения представляют собой интенсивные процессы, происходящие в земной коре, вызванные смещениями тектонических плит вдоль линии разломов. Под действием различных физических механизмов они воздействуют на литосферу, атмосферу и ионосферу, вызывая аномальные изменения их параметров и могут служить предвестниками значительных сейсмических событий (Соболев, Пономарев, 2003). Существуют определенные закономерности проявления вариаций параметров различных геофизических полей (Бондур, Зверев, 2005б; Бондур, Смирнов, 2005; Бондур и др. 2007; Пулинец и др., 2010; Pulinets et al., 2015; Бондур, Воронова, 2012, 2020), которые указывают на подготовку землетрясений.

Для прогноза землетрясений используются различные методы долгосрочного (Кейлис-Боррок, Кособоков, 1984), среднесрочного (Davis, et al., 2012) и краткосрочного прогнозирования, в том числе методы сейсмической энтропии (Ако-

пяи и др., 2017), методы, основанные на формировании и использовании геомеханических моделей (Бондур и др., 2016а), анализе связей между вариациями напряженно-деформационного состояния земной коры и сейсмической активностью (Бондур и др., 2010, 2016б). Однако, проблема краткосрочного прогнозирования места и времени будущего сейсмического события до сих пор не решена.

В настоящее время для мониторинга сейсмоопасных территорий перспективно использование космических методов и систем дистанционного зондирования, которые позволяют анализировать временные ряды изменений параметров различных геофизических полей и обнаруживать предвестники землетрясений, в том числе краткосрочные, в период подготовки и протекания землетрясений в различных сейсмоопасных регионах (Бондур, Зверев, 2005а, 2005б; Бондур, Смирнов, 2005; Пулинец и др., 2010; Akhoondzadeh et al., 2019).

Анализ многолетних данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при исследовании сейсмоопасных территорий позволил выявить аномальные вариации различных геофизических параметров, тесно связанных с подготовкой и протеканием землетрясений, в том числе таких,

как: деформации линеаментных систем, на основе характеристик которых анализируются изменения геодинамических особенностей регионов (Бондур, Зверев, 2005а, 2005б; Бондур, Гапонова, 2021); аномальные изменения параметров ионосферы (Бондур, Смирнов, 2005; Пулинец и др., 2010); изменения температуры земной поверхности (Вилор, Минько, 2002; Ouzounov and Freund, 2004; Бондур, Воронова, 2020); эманации двуокси углерода CO_2 , приводящие к локальному парниковому эффекту или выделению скрытого тепла из-за образующихся конденсации воды на ионах воздуха (Cervone et al., 2006; Pulinets et al., 2006; Bonfanti et al., 2012); изменения атмосферного давления (Бондур и др. 2007); значительные изменения аэрозольной оптической толщины (Okada et al., 2004; Qin et al., 2004; Akhoondzadeh and Chehrebargh, 2016); образование облачных структур (Pulinets et al., 2015). При этом наиболее эффективно комплексное использование нескольких предвестников, связанных с анализом аномалий характеристик различных геофизических полей (Бондур и др., 2018, 2020). Анализируя время появления и расположение этих аномалий, существует возможность предсказания самого сейсмического события, а также выявления связи между различными предвестниками землетрясений (Бондур и др., 2018, 2020; Akhoondzadeh and Chehrebargh, 2016; De Santis et al., 2020).

Повысить эффективность использования данных космического мониторинга сейсмоопасных территорий возможно за счет уточнения зоны наблюдения, совершенствования алгоритмов обработки данных, расширения набора анализируемых параметров и вариантов их совместного анализа (Бондур и др., 2018, 2020; De Santis et al., 2020).

Сложность интерпретации выявленных аномальных вариаций различных геофизических параметров при подготовке и протекании землетрясений и отсутствие общепринятой точки зрения относительно механизмов возникновения аномалий в системе литосфера-атмосфера-ионосфера при активизации сейсмической деятельности не позволяют осуществлять краткосрочное прогнозирование землетрясений. Поэтому особую актуальность приобретают исследования, в ходе которых осуществляется совместный анализ значимых параметров различных геофизических сред. Совместное использование различных геофизических параметров позволяет уточнять связи между ними при подготовке и протекании землетрясений, а также выявлять предвестники различной физической природы, регистрируемые наземными и космическими средствами (Бондур и др., 2018, 2020; Pulinets and Ouzounov, 2011; Akhoondzadeh et al., 2019; Marchetti et al., 2020).

Анализ последних исследований показал, что выявленные атмосферные и ионосферные аномалии регистрировались не только за несколько дней до сейсмических событий, но и гораздо

раньше. Например, в работе (De Santis et al., 2020) проведен многопараметрический анализ данных о состоянии литосферы, атмосферы и ионосферы при подготовке сильнейшего за последние 20 лет землетрясения в Калифорнии в 2019 г. и в период от 25 до 150 дней выявлены аномальные вариации исследуемых параметров. За несколько дней до землетрясения в Калифорнии в 2019 г. аномалии выявлены в работе (Бондур и др., 2020). Совместные исследования изменений температуры поверхности, концентрации водяного пара и озона в период, предшествующий серии сильных землетрясений в Центральной Италии в 2016 г., представленные в работе (Piscini et al., 2017), позволили выявить аномалию примерно за 40 дней до первого крупного землетрясения с магнитудой $M = 6.0$, произошедшего 24 августа 2016 г.

В настоящей работе представлены результаты исследований изменений тепловых полей, вариаций аэрозольной оптической толщины и полного электронного содержания ионосферы, зарегистрированных из космоса, а также результаты совместного анализа выявленных аномалий геофизических полей, возникающих в процессе взаимодействия литосферы, атмосферы и ионосферы на последней стадии подготовки сильных землетрясений с $M = 5.2-6.6$, произошедших в Центральной Италии 2016–2017 гг.

СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ИССЛЕДУЕМОГО РЕГИОНА

Исследуемый сейсмоопасный регион испытывает субдукцию Адриатической микроплиты под Апенниннами с востока на запад, а также континентальное столкновение Евразийской и Африканской плит и открытие Тирренского бассейна к западу (Martinelli et al., 2020). Для уточнения зоны наблюдения с использованием метода анализа горячих точек был проведен пространственный анализ более 7000 событий-землетрясений с магнитудами свыше 2.5, произошедших в Италии за период 2000–2021 гг. (см. рис. 1, а).

Из анализа рис. 1, а следует, что в рассматриваемом регионе повышенной сейсмической активности, можно выделить 3 статистически значимые зоны с 99% вероятностью возникновения землетрясения с магнитудой более 4 : 1) на севере Италии на границе литосферной плиты; 2) в центральной части Италии на пересечении нескольких коровых разломов; 3) на юге Италии (см. рис. 1, а).

Следует отметить, что сильные и умеренные землетрясения, произошедшие в августе и октябре 2016 г. и в январе 2017 г. в центральной части Италии, попали в выделенные зоны повышенного риска. Так, землетрясение магнитудой $M = 6.2$ произошло 24 августа 2016 г. в 01:36 по местному времени с эпицентром в точке с координатами 42.714° N , 13.1719° E (рис. 1, б, 1, в). По данным геологической службы США (<http://earthquake.usgs.gov/>) в период с 1 по 23 августа 2016 г. в

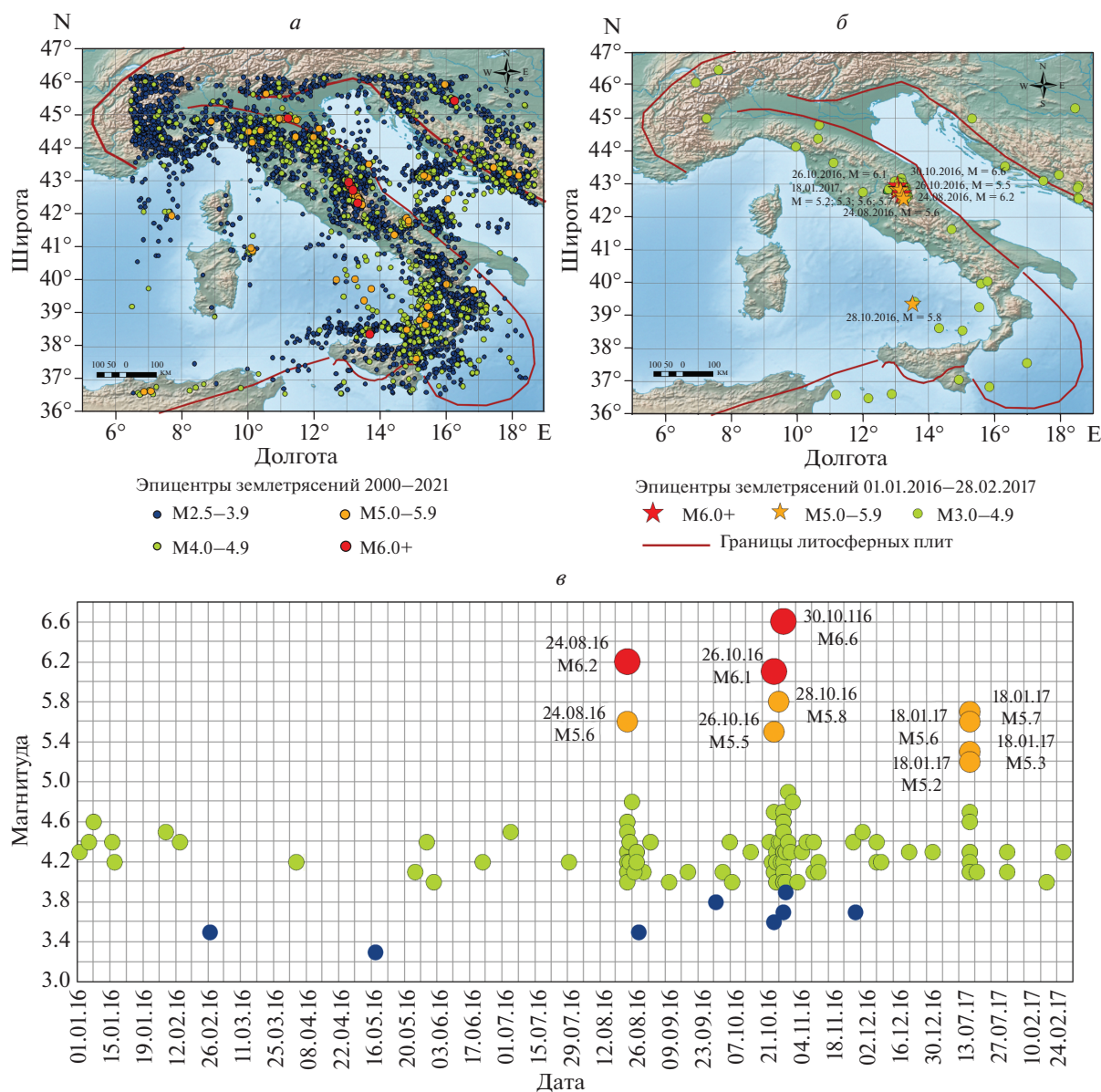


Рис. 1. Сейсмическая активность в Италии: (а) карта эпицентров землетрясений с $M > 2.5$ в период с 2000 по 2021 гг.; (б) карта эпицентров землетрясений с $M > 3$ в период с 1 января 2016 по 28 февраля 2017 гг. в) график распределения землетрясений в период с 1 января 2016 по 28 февраля 2017 гг. [http://earthquake.usgs.gov/].

исследуемом регионе землетрясения зафиксированы не были (рис. 1, в). После первого главного толчка с $M = 6.2$, произошедшего 24 августа 2016 г., выявлено 14 афтершоков с $M = 3.5-5.6$, а затем с 25 августа по 19 сентября 2016 г. были зафиксированы 11 землетрясений с $4.1 \leq M \leq 4.8$ (см. рис. 1, б, 1, в).

В Центральной Италии 30 октября 2016 г. в 06:40 (UT) было зарегистрировано землетрясение с $M = 6.6$ (рис. 1, б, 1, в). Это землетрясение стало самым сильным в регионе за последние тридцать лет. Ему предшествовало землетрясение с $M = 6.1$, произошедшее 26 октября 2016 г., а также серия из 16 землетрясений с $4.0 \leq M \leq 5.5$, начавшаяся

4 октября 2016 г., причем основная часть этих землетрясений произошла в период с 26 по 29 октября 2016 г. (рис. 1, б, 1, в). После толчка с наибольшей магнитудой, состоявшегося 30 октября 2016 г., произошло 10 афтершоков с $4.0 \leq M \leq 4.7$, затем в течении месяца с 31 октября до 29 ноября 2016 г. произошло еще 12 землетрясений с $4.0 \leq M \leq 4.9$ (рис. 1, б, 1, в).

Подводное землетрясение с $M = 5.8$ было зарегистрировано на юге Италии 28 октября 2016 г. (рис. 1, б, 1, в).

Сильные землетрясения в Центральной Италии с магнитудами больше пяти снова произошли 18 января 2017 г. (рис. 1, б, 1, в). Первым в

09:25:41.610 UTC было зарегистрировано землетрясение с $M = 5.3$, затем – в 10:14:10.980 UTC произошло землетрясение с $M = 5.7$, в 10:25:25.490 UTC с $M = 5.6$ и в 13:33:38.000 UTC с $M = 5.2$. Также 18 января 2016 г. было зафиксировано 8 землетрясений с $4.1 \leq M \leq 4.7$ (рис. 1, б, в).

Таким образом, по данным (<http://earthquake.usgs.gov/>) в период с 24 августа 2016 г. по 21 января 2017 г. на территории Италии произошло три землетрясения с $M > 6$, семь землетрясений с $5.2 \leq M \leq 5.8$ и 72 землетрясения с $4.0 \leq M \leq 4.9$.

МЕТОДИКИ ПРОВОДИМЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Методика исследования тепловых полей

Исследование тепловых полей в период, предшествовавший сильным и умеренным землетрясениям в Италии, произошедшим в августе 2016 г. – январе 2017 г., проводились с использованием данных, полученных прибором AIRS (спутник Aqua). Этот прибор позволяет регистрировать вариации тепловых полей на различных уровнях (от поверхности Земли, до верхней границы облаков), как в дневное, так и в ночное время, в том числе при наличии облачности.

В процессе проведения исследований анализировались следующие информационные продукты 3-го уровня обработки данных прибора AIRS, формировавшиеся с пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$: температура поверхности (SurfSkinTemp); температура приповерхностного слоя атмосферы (SurfAirTemp); уходящее длинноволновое излучение (OLR) (Hearty et al., 2013). Обработка данных для выявления пространственно-временных вариаций значимых параметров тепловых полей (SurfSkinTemp, SurfAirTemp, OLR) проводилась с использованием специально разработанного программного модуля (Бондур, Воронова, 2020; Бондур и др., 2020).

Для анализа использовались данные, полученные в период времени за 20 дней до каждого землетрясения и через 7 дней после него, а также данные прошлых лет (с 2004 г.) для такого же временного периода.

С помощью программного модуля (Бондур, Воронова, 2020) выполнялось разархивирование каждого файла AIRS3STD (Hearty et al., 2013) формата hdf, в котором хранились значимые параметры, а также проводилась проверка целостности данных и устранение ошибочных значений. В используемом программном модуле встроена также функция нормализации данных с помощью стандартного отклонения. Нормализация (нормализованный индекс, Ni) заключалась в определении разностей между текущими и средними арифметическими значениями, а также делении их на стандартные отклонения (Бондур, Воронова, 2012; 2020). Это позволяло преобразовать диапазоны значений числовых признаков, которые не зависят от единиц измерений при со-

поставлении результатов, полученных для различных исследуемых параметров.

Результаты обработки данных визуализировались путем построения тепловых карт. Для выявления изменений температур поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, уходящего длинноволнового излучения в процессе подготовки и протекания исследуемых землетрясений анализировались положительные аномалии нормализованных значений тепловых полей.

Методика исследования динамики состояния аэрозолей в атмосфере

Для исследования динамики состояния аэрозолей в атмосфере в период подготовки и протекания сильных землетрясений, был выбран параметр аэрозольной оптической толщины (AOD), содержащийся в продукте MCD19A2 уровня L2. Информационный продукт MCD19A2 объединяет данные спутников Terra и Aqua (Lyapustin, Wang, 2018). Каждый файл продукта MCD19A2 содержит данные в формате *hdf. Обработка данных для выявления изменений аэрозольной оптической толщины в период подготовки и протекания сильных сейсмических событий (20 дней до и 7 дней после) осуществлялась путем получения из изображений MCD19A2 усредненных ежедневных композитов значений на территорию исследования. Использовались только безоблачные пиксели над территорией суши.

Методика исследования полного электронного содержания ионосферы (TEC)

Исследования вариаций полного электронного содержания ионосферы (TEC) осуществлялся по данным глобальных ионосферных карт GIM (Noll, 2010) и данным наземных станций UNPG и AQU1, расположенных в эпицентральной зоне исследуемых землетрясений.

Глобальные ионосферные карты GIM были получены для периода с 26 июля 2016 г. по 31 января 2017 г. Они содержат значения TEC (единица измерения 0.1 TECU; 1 TECU = 10^{16} м^2) с разрешением 2.5° по широте (от 87.5° N до 87.5° S) и 5.0° по долготе (180° E до 180° W). Карты были сформированы с двухчасовым интервалом. В итоге, на каждые сутки были получены 13 TEC карт: 12 карт на текущие сутки, 1 карта на следующие сутки. Для исследований вариаций TEC в период подготовки и протекания землетрясений в августе 2016 г. – январе 2017 г. были построены региональные карты TEC в пределах $35\text{--}47.5^\circ \text{ N}$, $5\text{--}20^\circ \text{ E}$ для территории Центральной Италии. Были также рассчитаны относительные значения ΔTEC (в %) для каждого узла сетки по формуле (1):

$$\Delta \text{TEC} = ((\text{TEC} - \text{MTEC}) / \text{MTEC}) \times 100\%, \quad (1)$$

где

ТЕС — значения полного электронного содержания, полученные из глобальных ионосферных карт GIM;

МТЕС — значения медианы, которые рассчитывались для узлов сетки, каждого двухчасового интервала скользящим окном за 10 предшествующих суток.

Результаты расчетов представлялись в виде региональных карт относительных девиаций полного электронного содержания.

Использование Δ ТЕС позволяло отфильтровать ежедневные изменения ТЕС, связанные с колебаниями уровня ультрафиолетового излучения Солнца, которое заметно влияет на формирование ионосферы (Pulinets et al., 2021).

Анализ ТЕС проводился также по данным станций UNPG и AQU1, находящихся в радиусе 100 км от эпицентров землетрясений в Центральной Италии. Для этого ТЕС рассчитывался по методике (Ciraolo, Spalla, 1997) в период времени с 26 июля 2016 г. по 31 января 2017 г., в результате чего значения ТЕС были получены с двухминутным интервалом. С использованием формулы (1) были рассчитаны относительные Δ ТЕС, где в этом случае ТЕС — значения полного электронного содержания, полученные по методике (Ciraolo, Spalla, 1997), МТЕС — значения медианы для каждого двухминутного интервала скользящим окном за 10 предшествующих суток. Результаты приводились в виде графиков ТЕС и суточных карт изменения Δ ТЕС.

Для выявления сейсмоионосферных вариаций в период подготовки землетрясений анализировалась также геомагнитная обстановка (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>) и солнечная активность (<https://spaceweather.gc.ca/solarflux/sx-en.php>).

Методика совместного анализа

Для совместного анализа аномальных вариаций температур поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, уходящего длинноволнового излучения, аэрозольной оптической толщины и полного электронного содержания ионосферы в период активизации сейсмической деятельности использовалась методика, описанная ранее в работе (Cherepanova et al., 2018). Методика заключалась в следующем: при мониторинге сейсмоопасных территорий предполагалось, что аномалия должна появиться недалеко от источника будущего землетрясения (Dobrovolsky et al., 1979), однако точное ее местоположение заранее не известно.

Для изучаемого сейсмоопасного региона в зависимости от пространственного разрешения анализируемых исходных данных, а также плотности размещения зон высокого риска возникновения сильных землетрясений происходила настройка пространственного домена, в пределах которого осуществлялись исследования. В рас-

сматриваемом регионе были выделены три зоны высокого риска возникновения сильных землетрясений, расположенные на расстоянии 300–400 км друг от друга. В качестве центра зоны осреднения выбирался медианный центр зоны высокого риска возникновения сильных землетрясений, далее строились 3 зоны с радиусом 150, 200 и 350 км и анализировались полученные значения (Cherepanova et al., 2018). Результаты обработки по данной методике представлялись в виде графиков изменения значимых параметров в период 20 дней до и 3 после свершившегося землетрясения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты исследований тепловых полей

Для анализа вариаций тепловых полей (температур поверхности, приповерхностного слоя атмосферы и уходящего длинноволнового излучения) с использованием описанной выше методики были построены карты тепловых аномалий, полученных по данным спутника Aqua (прибор AIRS) (рис. 2–4).

На рис. 2 представлена динамика изменения аномалий температуры поверхности на территории Центральной Италии с августа 2016 г. по январь 2017 г.

Анализ рис. 2 показал, что перед главными сейсмическими событиями были выявлены аномалии температуры поверхности (значение нормализованного индекса составило $N_i = 1.45$), которые фиксировались в районе тектонического разлома 19 августа 2016 г., за 5 дней до землетрясения, произошедшего 24 августа 2016 г., а также 21 августа 2016 г. ($N_i = 1.9$) и 23 августа 2016 г. ($N_i = 2.2$) в этом же месте. За 2 дня до землетрясения, состоявшегося 26 октября 2016 г., над той же областью тектонического разлома была зафиксирована тепловая аномалия ($N_i = 2.6$). Максимальное значение нормализованного индекса ($N_i = 3$) было выявлено в день землетрясения, произошедшего 26 октября 2016 г., когда положительная аномалия температуры поверхности располагалась южнее эпицентра сейсмического события (см. рис. 2). До землетрясения, состоявшегося 30 октября 2016 г., также наблюдались аномалии температуры ($N_i = 1.45$) над тектоническим разломом. За 8 дней до землетрясения, произошедшего 18 января 2017 г. аномалия температуры поверхности ($N_i = 2.5$) располагалась над той же областью тектонического разлома.

Результаты обработки данных, полученных в процессе регистрации значений температуры приповерхностного слоя атмосферы в периоды с 4 по 31 августа, с 10 октября по 6 ноября для 2004–2016 гг. и с 29 декабря по 25 января для 2004–2017 гг., приведены на рис. 3.

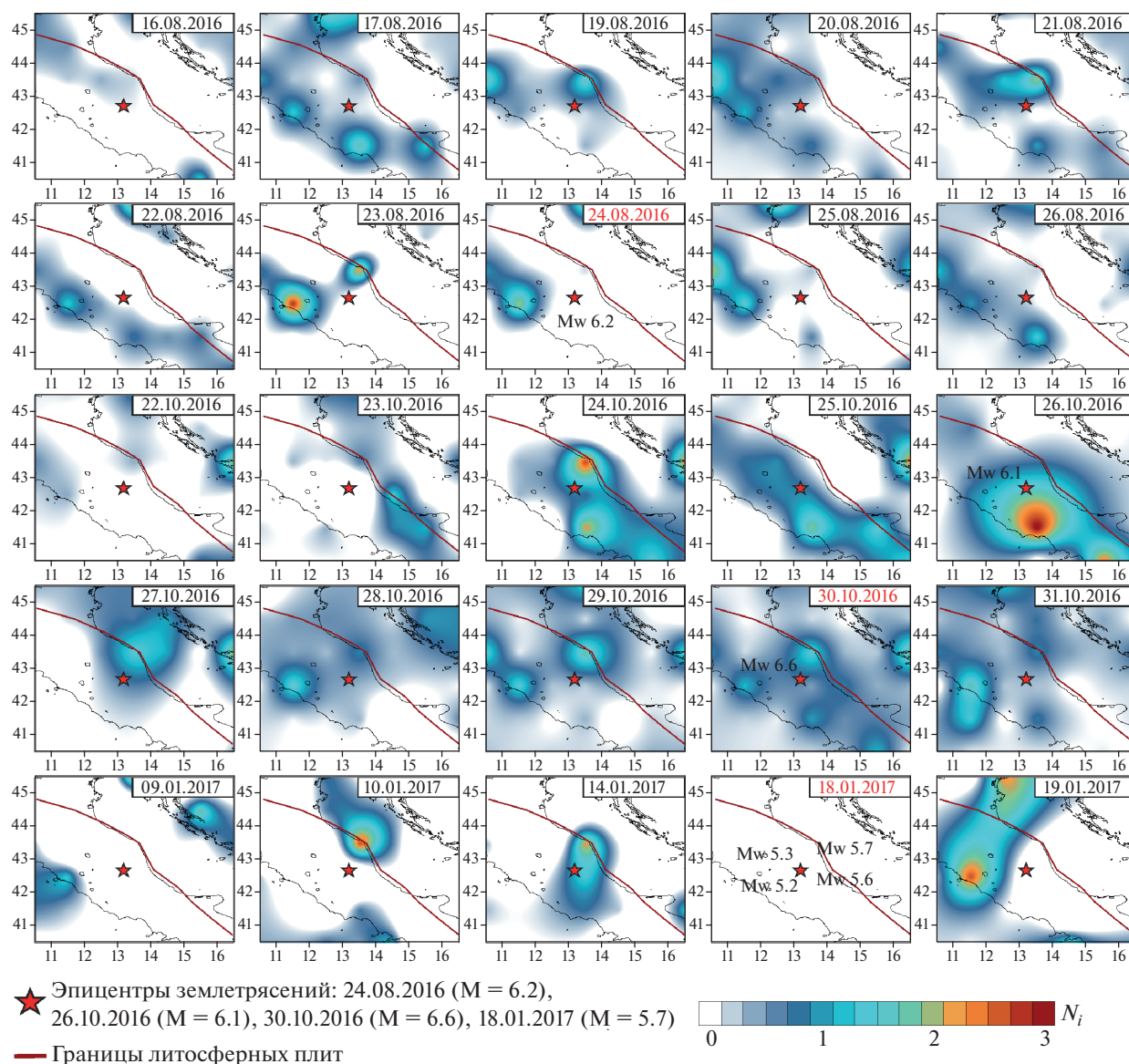


Рис. 2. Аномалии температуры земной поверхности, результат нормализации данных с использованием среднеквадратического отклонения в период подготовки серии сильных землетрясений в Италии в 2016–2017 гг. по данным спутника Aqua (прибор AIRS).

Анализ рис. 3 позволил выявить появление аномалии температуры приповерхностного слоя атмосферы ($N_i = 1.6$) 20 августа 2016 г., которая возникла за 4 дня до землетрясения, произошедшего 24 августа 2016 г. Аномалия располагалась над областью тектонического разлома. На следующий день (21 августа 2016 г.) ее интенсивность увеличилась до значения нормализованного индекса $N_i = 2$. Положительная аномалия температуры приповерхностного слоя атмосферы высокой интенсивности ($N_i = 3$) наблюдалась 15 октября 2016 г. над областью тектонического разлома. При этом 16, 17, 19 и 20 октября 2016 г. данная аномалия сохранила свое местоположение, но ее интенсивность снизилась до $N_i = 1.6$.

За день до землетрясения, состоявшегося 26 октября 2016 г., интенсивность аномалии температуры приповерхностного слоя атмосферы повысилась до значения нормализованного индекса $N_i = 2.8$.

Совместный анализ рис. 2 и 3 показал, что в день землетрясения (26 октября 2016 г.) расположение аномалий температур поверхности (рис. 2) и приповерхностного слоя атмосферы (рис. 3) полностью совпало.

За день до землетрясения, произошедшего 30 октября 2016 г., наблюдалась аномалия температуры приповерхностного слоя атмосферы в области тектонического разлома. Из анализа рис. 3 следует, что перед сейсмическим событием, со-

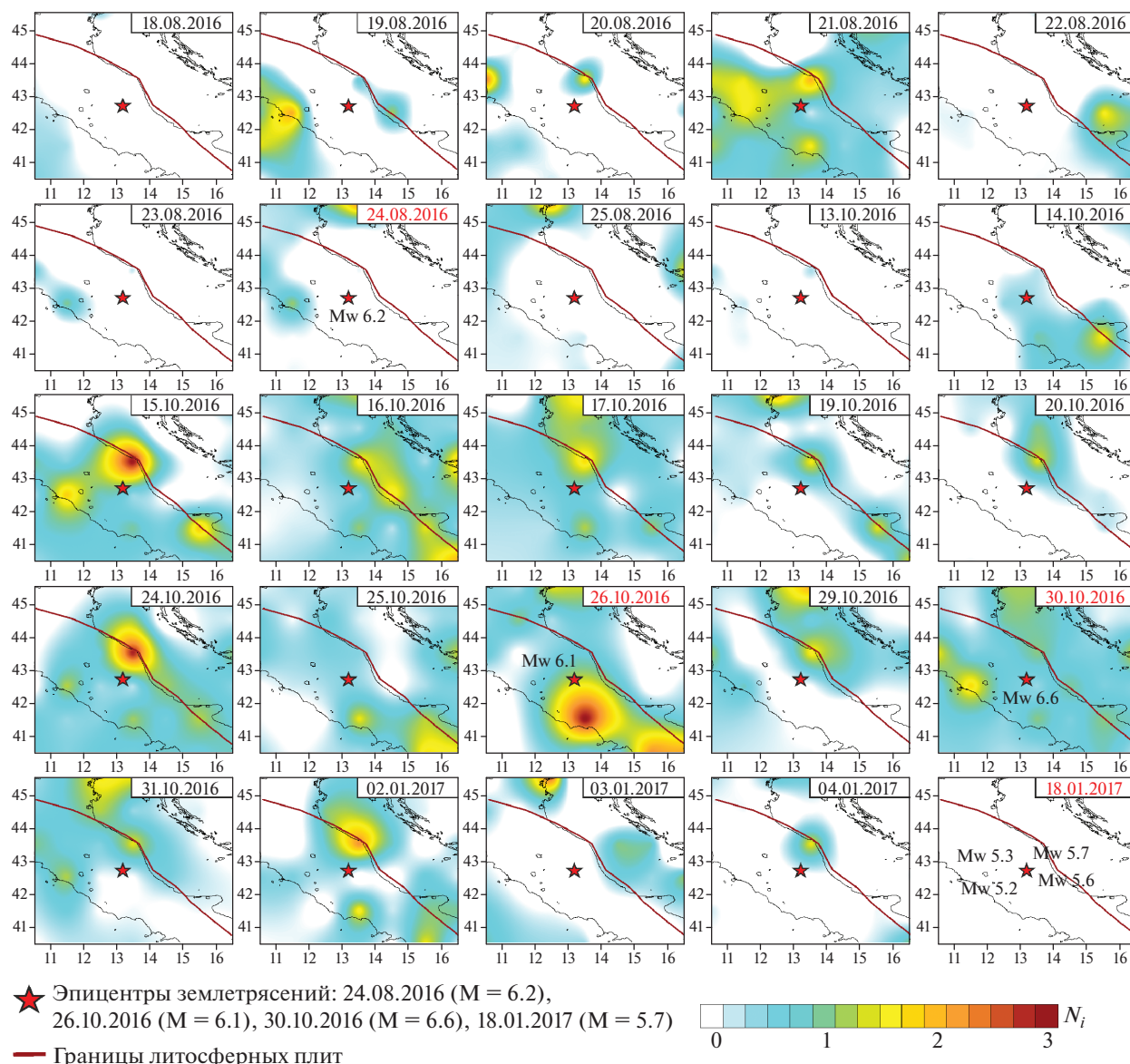


Рис. 3. Аномалии температуры приповерхностного слоя атмосферы, результат нормализации данных с использованием среднеквадратического отклонения в период подготовки серии сильных землетрясений в Италии в 2016–2017 гг. по данным спутника Aqua (прибор AIRS).

стоявшимся 18 января 2017 г., положительные аномалии температуры приповерхностного слоя атмосферы выявлены 2, 3 и 4 января 2017 г.

Динамика изменения аномалий уходящего длинноволнового излучения, возникших в процессе подготовки сильных сейсмических событий над Центральной Италией представлена на рис. 4. Анализ этого рисунка показал, что до землетрясения, произошедшего 24 августа 2016 г., обширные положительные аномалии длинноволнового уходящего излучения наблюдались в исследуемом регионе за 14 дней (10 августа) и за 9 дней (15 августа). При этом 21 августа 2016 г. аномалия сохранялась (см. рис. 3), но уже с более низкими значениями нормализованного индекса.

Из анализа рис. 4 следует, что за 10 дней до землетрясения, состоявшегося 26 октября 2016 г., в южной части Италии зафиксирована положительная аномалия уходящего длинноволнового излучения высокой интенсивности ($N_i = 3$). В дни 20, 22 и 25 октября 2016 г. в эпицентральной области готовящегося землетрясения выявлены аномалии уходящего длинноволнового излучения меньшей интенсивности (значения нормализованного индекса N_i снизились до 1.8).

В день сильного землетрясения ($M = 6.6$), произошедшего 30 октября 2016 г., в исследуемой области проявлялись повышенные значения нормализованного индекса, изменявшегося от 0.1 до 1.9. На следующий день после этого землетрясе-

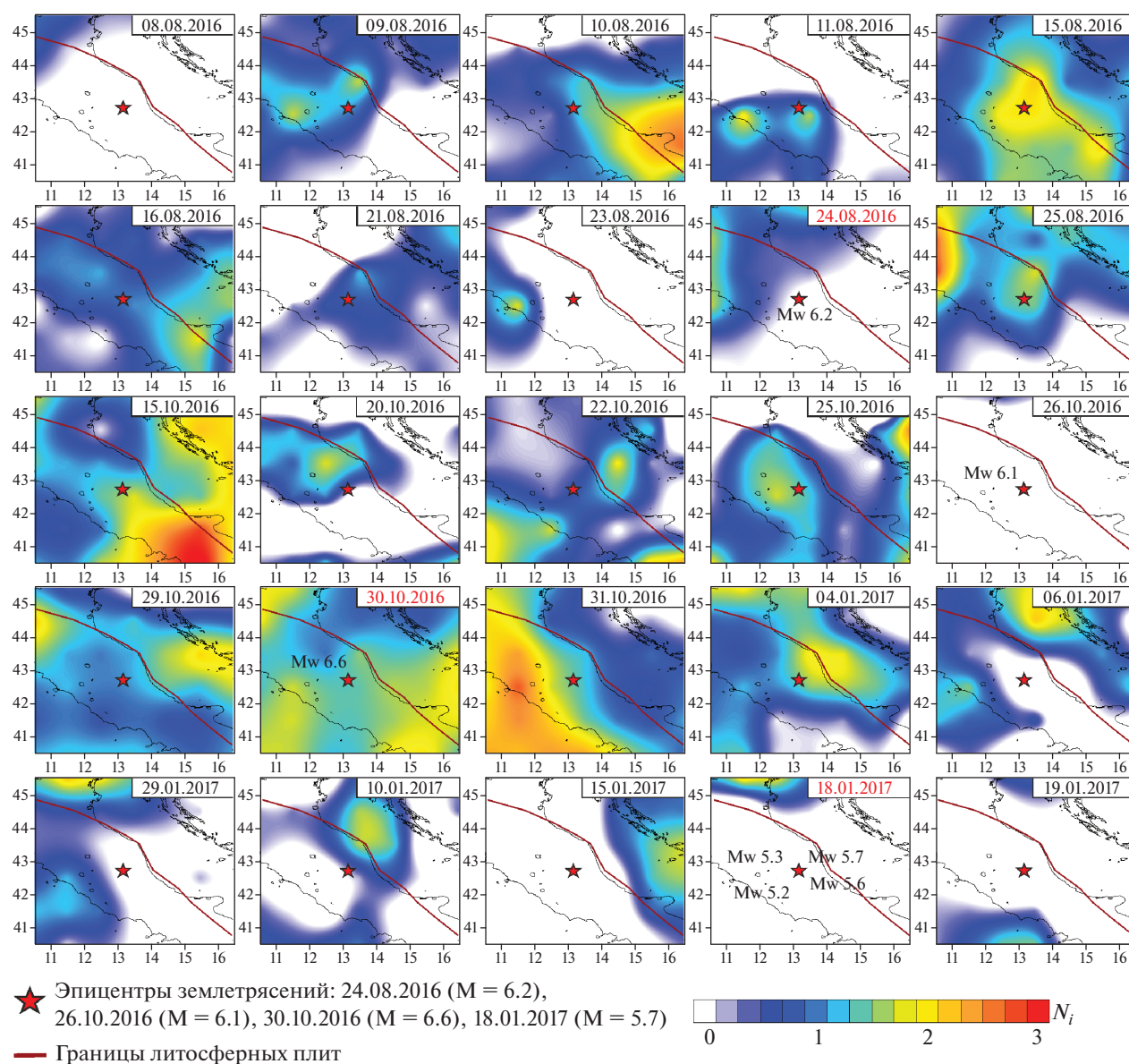


Рис. 4. Аномалии уходящего длинноволнового излучения, результат нормализации данных с использованием средне-квадратического отклонения в период подготовки серии сильных землетрясений в Италии в 2016–2017 гг. по данным спутника Aqua (прибор AIRS).

ния – 31 октября 2016 г. на значительной части исследуемой территории наблюдалась аномалия уходящего длинноволнового излучения значительной интенсивности $N_i = 2.2–3.0$ (см. рис. 4). Вероятной причиной высоких значений нормализованного индекса 31 октября 2016 г. может быть большое количество афтершоков, зарегистрированных после сильного землетрясения, состоявшегося накануне.

За две недели до землетрясений, произошедших 18 января 2017 г. (магнитуды 5.2, 5.3, 5.6 и 5.7) была выявлена положительная аномалия уходящего длинноволнового излучения над областью тектонического разлома (значения нормализо-

ванного индекса $N_i = 1.9$). При этом 10 января 2017 г., т.е. за 8 дней до этих землетрясений, в этой же области наблюдалась аномалия меньшей интенсивности $N_i = 1.6$ (см. рис. 4).

Результаты исследований динамики состояния аэрозолей в атмосфере

На рис. 5 представлен пример композитных изображений среднесуточных значений аэрозольной оптической толщины (AOD) в период подготовки землетрясения, произошедшего 24 августа 2016 г. ($M = 6.2$) на территории Центральной Италии. Для анализа среднесуточных значений AOD использовались данные продукта

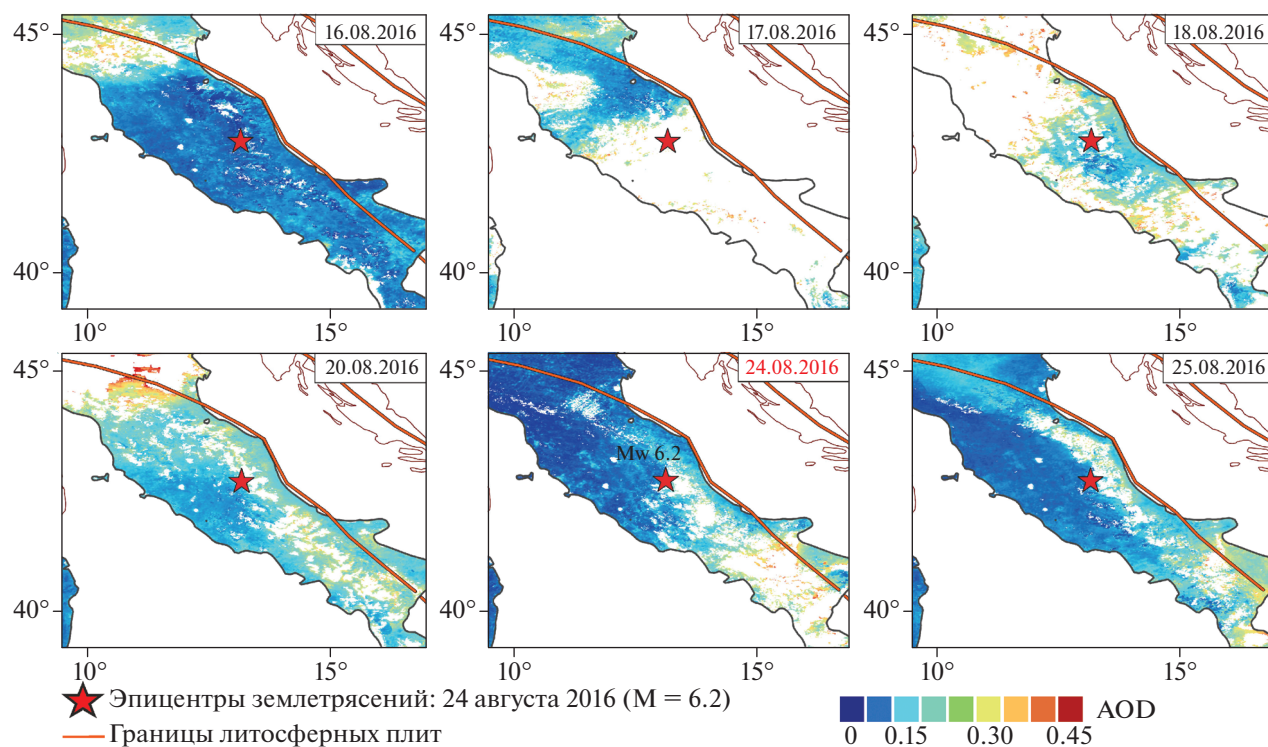


Рис. 5. Пример изменения значений аэрозольной оптической толщины (AOD) в период подготовки землетрясения 24 августа 2016 г. в Италии по данным спутников Terra/Aqua (прибор MODIS).

MCD19A2, которые соответствуют только поверхности суши. Значения AOD над территорией суши неокрашены в цвет палитры соответствующим отсутствующим данным.

Аномалии, выявленные в северной части Италии над Паданской равниной (рис. 5), скорее всего связаны с антропогенными источниками аэрозолей, т.к. этот густонаселенный промышленный регион характеризуется самыми высокими значениями AOD в Европе (Rizza et al., 2019).

Анализ рис. 5 позволил обнаружить повышение значений аэрозольной оптической толщины (AOD) за 7 дней (17.08.2016 г.) в эпицентральной области сейсмического события, состоявшегося 24 августа 2016 г. В последующие дни, вплоть до дня самого землетрясения (24 августа 2016 г.), значения AOD были приближены к максимальным (0.3–0.5) и располагались в эпицентральной области землетрясения над зоной активного тектонического разлома.

На выявление изменений значений аэрозольной оптической толщины (AOD) влияет много факторов, таких как облачность, антропогенные источники, сильная временная изменчивость аэрозолей. Это значительно затрудняет получение полной информационной картины. Поэтому использование данных о вариациях AOD для анализа предвестников землетрясений целесообразно проводить только в комплексе с другими параметрами.

Результаты исследований полного электронного содержания ионосферы

Для определения местоположения ионосферной аномалии в период подготовки землетрясений в соответствии с используемой методикой применялась процедура картирования на основе глобальных ионосферных карт GIM, полученных по данным спутниковых навигационных систем. Несмотря на низкое пространственное разрешение этих карт, в настоящее время они обеспечивают наилучшую доступность и наибольшую эффективность данных. Процедуры моделирования и экстраполяции, используемые при их построении, позволяют получать данные для территорий с малым количеством наземных станций. Фактически, сам процесс оперативного исследования начинается с картирования, а затем, при обнаружении локальной аномалии, строятся временные ряды изменений параметров ионосферы на основе данных GPS-станций, ближайших к положению максимума аномалий, обнаруженных путем картирования (Pulinets et al., 2021).

На рис. 6 приведены карты относительных значений ΔTEC (в %), полученных по данным TEC GIM для территории Центральной Италии в августе 2016 г.—январе 2017 г. Анализ рис. 6 позволил выявить положительные ионосферные аномалии при подготовке землетрясений в Центральной Италии в анализируемый период вре-

мени. Из рис. 6 следует, что ионосферные ночные положительные аномалии с локализацией максимума вблизи эпицентров были выявлены:

- 17 августа 2016 г. (за 7 дней до землетрясения с магнитудой $M = 6.2$, произошедшего 24 августа 2016 г.) – $\Delta\text{TEC} = 23\text{--}27\%$ (см. рис. 6, а);

- 25 октября 2016 г. (за 1 день до землетрясения с магнитудой $M = 6.1$, произошедшего 26 октября 2016 г., и за 5 дней до землетрясения с магнитудой $M = 6.6$, произошедшего 30 октября 2016 г.) – $\Delta\text{TEC} = 38\text{--}46\%$ (см. рис. 6, б);

- 15 января 2017 г. (за 3 дня до землетрясений с магнитудами $M = 5.2, 5.3, 5.6, 5.7$, произошедшими 18 января 2017 г.) – $\Delta\text{TEC} = 22\text{--}24\%$ (см. рис. 6, в).

Ближайшими к положению максимумов выявленных аномалий являются две наземные GPS-станции – UNPG и AQU1. В качестве примера на рис. 7 представлены временные ряды ТЕС (см. рис. 7а, 7, в, 7, д) и двумерные распределения (в цветовых тонах) ΔTEC (см. рис. 7б, 7, г, 7, е), полученные по данным наземной GPS-станции UNPG, находящейся в радиусе 100 км от эпицентров сильных землетрясений, произошедших в Центральной Италии в период с августа 2016 г. по январь 2017 г.

Из рис. 7, а следует, что при подготовке землетрясения с магнитудой $M = 6.2$, состоявшегося 24 августа 2016 г., наблюдались два периода падения и повышения значений ТЕС. Падение ТЕС началось 11 августа 2016 г. (на 10% относительно значений, зарегистрированных 10 августа 2016 г.) и сохранялось в течение трех дней (12 августа 2016 г. – на 15%, 13 августа 2016 г. – на 20%, 14 августа 2016 г. – на 15%). После этого был выявлен рост значений ТЕС на 20% (см. рис. 7, а).

Падение ТЕС было зафиксировано также 19 августа 2016 г. (на 15% относительно значений, зарегистрированных 18 августа 2016 г.) и на 20% относительно значений, зарегистрированных 20 августа 2016 г. Затем 21 августа 2016 г. произошел рост ТЕС на 37% (см. рис. 7, а).

Повышение ночных значений ТЕС относительно предыдущих дней наблюдались 12 августа (на 16%), 14 августа (на 26%) и с 16 по 17 августа 2016 г. (на 20–24%) (см. рис. 7, а).

Проанализируем изменения ΔTEC . Из рис. 7б следует, что в период с 0–5 ч 12 августа 2016 г. и с 22 ч 13 августа 2016 г. до 4 ч 14 августа 2016 г., а также с 22 ч 17 августа 2016 г. до 4 ч 18 августа 2016 г. наблюдается положительная ночная аномалия ΔTEC (25–40%). Таким образом, в ночное время положительное отклонение ΔTEC проявилось за 6 и за 10–12 дней до землетрясений, произошедших 24 августа 2016 г., что согласуется с результатами работ (Pulinets and Davidenko, 2014; Pulinets et al., 2021).

Рассмотрим изменения ТЕС и ΔTEC при подготовке землетрясений, произошедших в октябре 2016 г. (26 октября 2016 г. с магнитудой $M = 6.1$ и 30 октября 2016 г. с магнитудой $M = 6.6$). Из рис. 7, в

следует, что в период времени с 18 по 22 октября 2016 г. в дневные часы наблюдалось понижение значений ТЕС на 20–22% относительно значений, зарегистрированных 17 августа 2016 г.

Повышение значений ТЕС в ночные часы на 15–21% было зарегистрировано с 23 по 25 октября 2016 г. Анализ ΔTEC позволил выявить наличие положительной аномалии ($\Delta\text{TEC} = 30\text{--}40\%$) в ночные часы в период времени с 23 по 25 октября 2016 г. за 1–3 дня до землетрясения с $M = 6.1$, произошедшего 26 октября 2016 г., за 5–7 дней до землетрясения с $M = 6.6$, произошедшего 30 октября 2016 г. (см. рис. 7, е).

Из анализа рис. 7, д следует, что при подготовке серии землетрясений с $M = 5.2, 5.3, 5.6, 5.7$, произошедших 18 января 2017 г., в дневные часы были зарегистрированы повышение ТЕС на 18% 15 января 2017 г. и понижение ТЕС на 17%, 16 января 2017 г. Повышение ТЕС на 12–22% в ночные часы выявлено с 16 по 17 января 2017 г. Была также зарегистрирована положительная ночная аномалия 15 января 2017 г. $\Delta\text{TEC} = 30\text{--}44\%$. (рис. 7, е).

Анализ временных рядов ТЕС, зарегистрированных по данным станции AQU1 в период подготовки и протекания исследуемых землетрясений, проиллюстрированных данными, приведенными в табл. 1, показал аналогичную картину.

При анализе ионосферных вариаций, вызванных землетрясениями, для устранения вклада, связанного с изменениями солнечных и геомагнитных явлений, рассматривалось поведение индексов F10.7 и Dst, значения которых приведены на рис. 7, ж.

Анализ солнечной активности (индекс F10.7) показал, что землетрясения в Центральной Италии, состоявшиеся августе 2016 г. – январе 2017 г., произошли в период минимума солнечной активности во время фазы падения 24-го цикла. Значения индекса F10.7 с 4 по 23 августа 2016 г. при подготовке землетрясения с $M = 6.2$, состоявшегося 24 августа 2016 г. изменялись в пределах от 76 до 96 sfu (см. рис. 7, ж). При этом максимальные значения (95–96 sfu) были зарегистрированы в период с 8 по 12 августа 2016 г. (см. рис. 7, ж). Начиная с 12 августа 2016 г. значения индекса F10.7 начали падать и достигли минимальных значений (77 sfu) 21 августа 2016 г. (см. рис. 7, ж).

При подготовке землетрясений, произошедших в октябре 2016 г., наблюдалось падение значений индекса F10.7 с 102 sfu 10 октября 2016 г. до 76 sfu 17 октября 2016 г. В остальной период времени проведения исследований колебания F10.7 не превышали 3 sfu (см. рис. 7, ж). Колебания индекса F10.7 в течение периода наблюдений с 29 декабря 2016 г. по 21 января 2017 г. при подготовке серии землетрясений, состоявшихся в январе 2017 г., были незначительными и находились в пределах 73–86 sfu (см. рис. 7, ж).

Наиболее надежным индикатором геомагнитных бурь является глобальный экваториальный

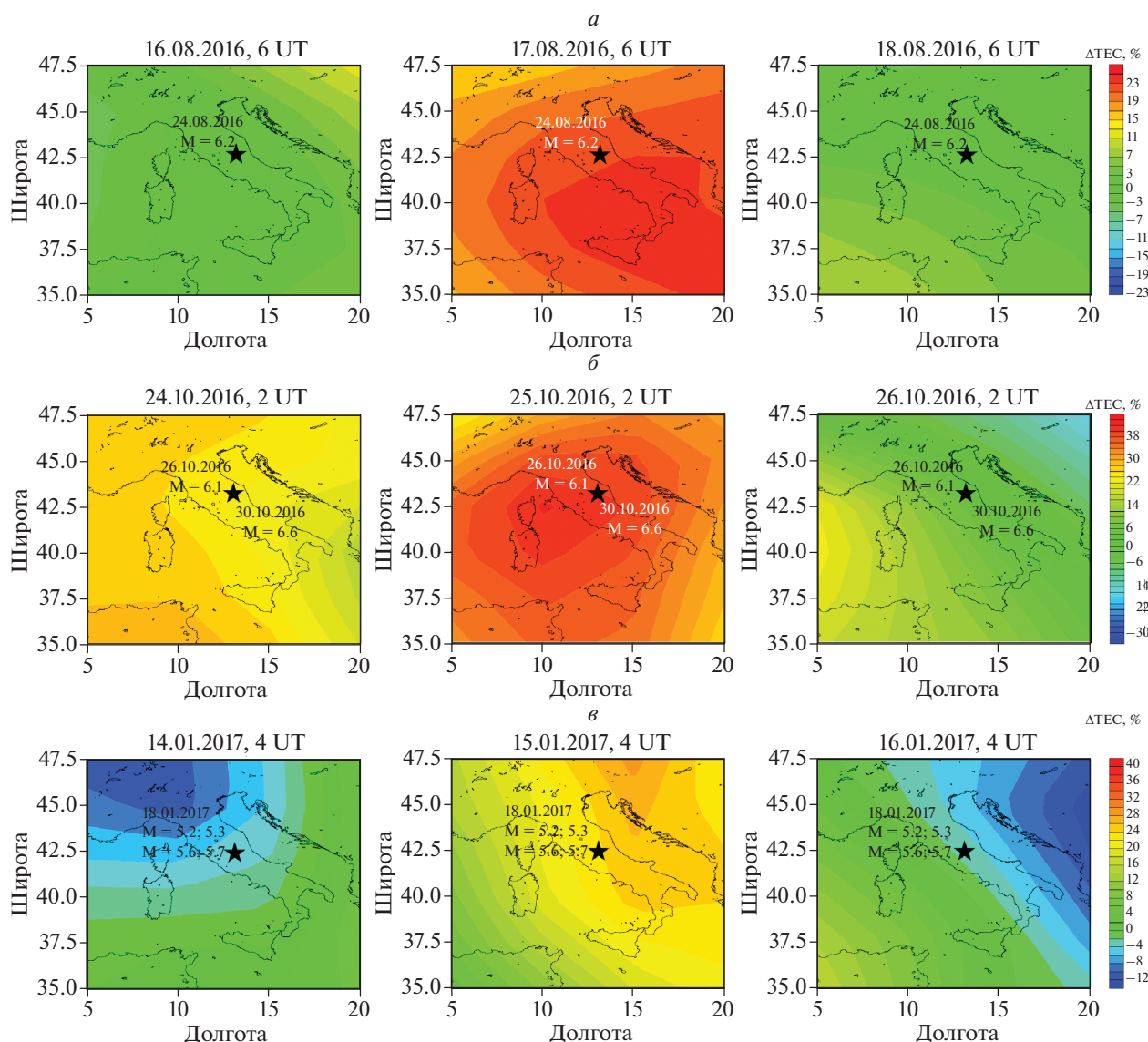


Рис. 6. Карты относительных значений ΔTEC (в %), полученные по данным TEC GIM для исследования ионосферных вариаций при подготовке землетрясений, произошедших: (а) 24 августа 2016 г. ($M = 6.2$); (б) 26 октября 2016 г. ($M = 6.1$), 30 октября 2016 г. ($M = 6.6$); (в) 18 января 2017 г. ($M = 5.2, 5.3, 5.6, 5.7$)

геомагнитный индекс Dst (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>). Анализ индекса Dst в период подготовки землетрясения с магнитудой $M = 6.2$, произошедшего 24 августа 2016 г., показал, что с 4 по 22 августа 2016 г. изменения магнитного поля были незначительными, Dst-индекс находился в пределах 23...–33 nT (см. рис. 7, жс). С 23 августа 2016 г. была зарегистрирована магнитная буря ($\text{Dst} = -80$ nT).

При подготовке землетрясений, состоявшихся в октябре 2016 г., в период времени 13–14 октября 2016 г., происходила сильная магнитная буря ($\text{Dst} = -104$ nT). Небольшие магнитные бури с Dst-индексами, достигавшими значений –59 и –64 nT происходили 25 и 29 октября 2016 г. (см. рис. 7, жс). В период подготовки землетрясений, состояв-

шихся 18 января 2017 г. были зарегистрированы небольшие возмущения геомагнитного поля происходившие 2–5 января 2017 г. ($\text{Dst} = 12\text{--}33$ nT) и 18–19 января 2017 г. ($\text{Dst} = 31\text{--}33$ nT). В остальные дни геомагнитное поле было спокойным (см. рис. 7, жс).

Таким образом, анализ ионосферных вариаций на заключительной стадии подготовки землетрясений и анализ геофизических условий показал наличие аномалий, которые могут быть отнесены к предвестниковым явлениям. Они проявляются в падении значений TEC (на 10–22%), выявленных в дневные часы за 3–10 дней до сейсмических событий с магнитудами $M = 5.2\text{--}6.6$, произошедших в августе 2016 г. – январе 2017 г. Кроме этого предвестники сейсмических собы-

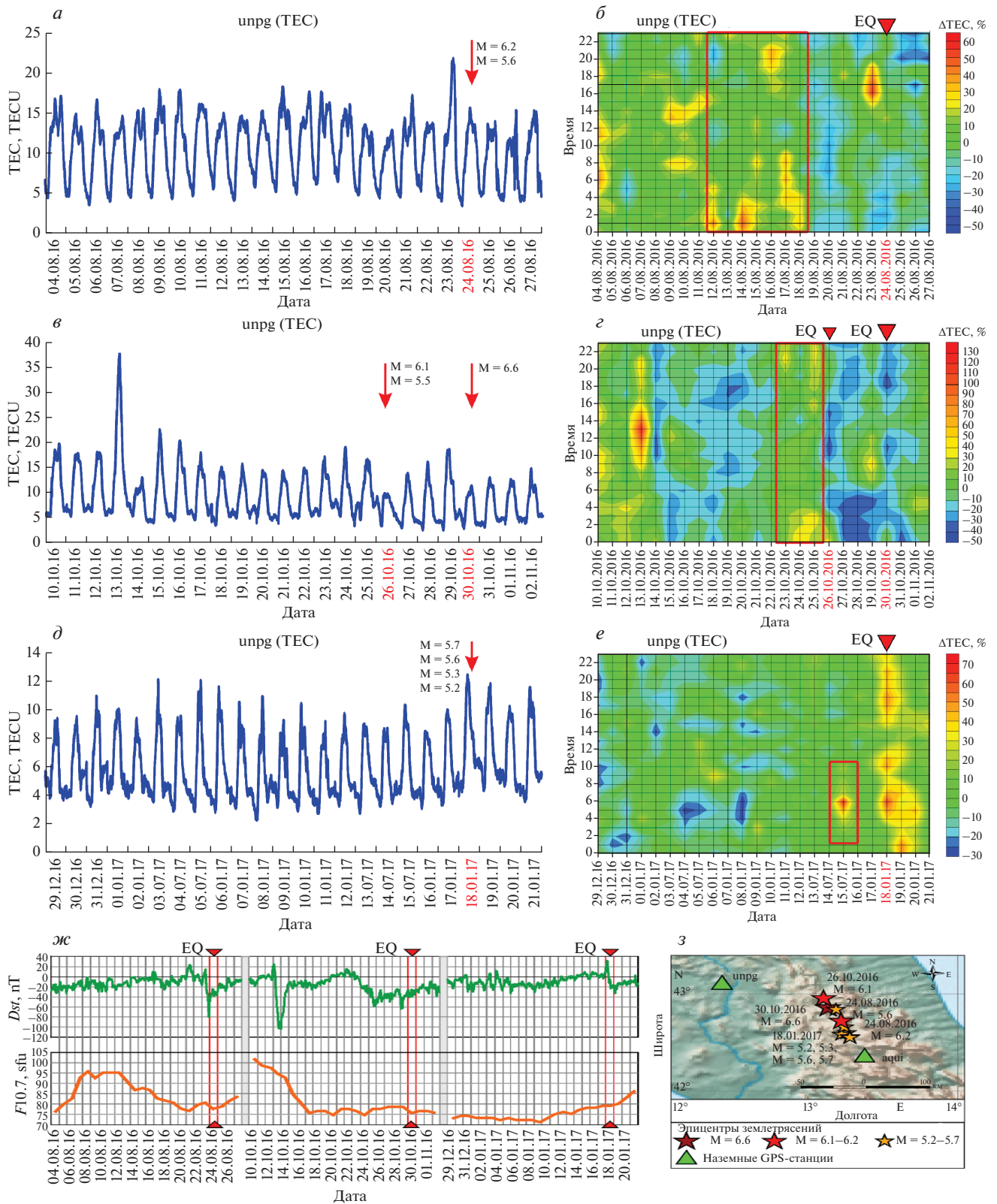


Рис. 7. Временные ряды вариаций полного электронного содержания ионосферы (TEC) и двумерное распределение в цветовых тонах ΔTEC , полученные по данным наземной GPS-станции unpg, находящейся в радиусе 100 км от эпицентров землетрясений, произошедших: 24.08.2016 г., $M = 6.2$ (а, б); 26.10.2016 г., $M = 6.1$, 30.10.2016 г., $M = 6.6$ (в, з); 18.01.2017 г., $M = 5.2, 5.3, 5.6, 5.7$ (д, е). Изменения геомагнитного индекса Dst и индекса солнечной активности $F10.7$ (ж). Карта расположения эпицентров и наземных станций GPS (з).

Таблица 1. Вариации ТЕС и ΔТЕС (%) по данным станции AQU1 при подготовке землетрясений в Центральной Италии в августе 2016 г.—январе 2017 г.

Землетрясение	Вариации ТЕС	Наличие положительной ночной аномалии ΔТЕС (%)
24.08.2016 г. (M = 6.2)	Падение ТЕС в дневные часы: относительно 10.08.2016 г.: – 11.08.2016 г. – на 17%; – 12.08.2016 г. – на 20%; – 13.08.2016 г. – на 26%; – 14.08.2016 г. – на 19%; относительно 18.08.2016 г.: – 19.08.2016 г. – на 11%; – 20.08.2016 г. – на 25%. Повышение ТЕС в ночные часы: 13.08–14.08.2016 г. – 16%; 17.08–18.08.2016 г. – 20%.	12–14.08.2016 г. (22–4h) – 20–35% 17.08.2016 г. (4–6 h) – 20–25%
26.10.2016 г. (M = 6.1) 30.10.2016 г. (M = 6.6)	Понижение ТЕС в дневные часы: – 18.10–22.10.2016 г. – 16–21%. Резкое падение ТЕС – 26.10.2016 г. – 38%. Повышение ТЕС в ночные часы: 23.10–25.10.2016 г. – 21–50%.	24–25.10.2016 г. (0–4h) – 30–40%
18.01.2017 г. (M = 5.2, 5.3, 5.6, 5.7)	Понижение ТЕС в дневные часы 16.01.2017 г. – на 17%. Повышение ТЕС в ночные часы: 17.01.2017 г. – 22%.	15.01.2017 г. (4–6h) – 25–45%

тий в исследуемом регионе проявлялись в появлении положительных ночных аномалий, которые были обнаружены за 10–12 и за 6 дней до землетрясения с магнитудой $M = 6.2$, произошедшего 24 августа 2016 г. ($\Delta\text{ТЕС} = 25\text{--}40\%$), за 1–3 дня до землетрясения с магнитудой $M = 6.1$, произошедшего 26 октября 2016 г. ($\Delta\text{ТЕС} = 30\text{--}40\%$), за 5–7 дней до землетрясения с магнитудой $M = 6.6$, состоявшегося 30 октября 2016 г. ($\Delta\text{ТЕС} = 30\text{--}40\%$), а также за 3 дня до серии землетрясений с магнитудами $M = 5.2, 5.3, 5.6, 5.7$, произошедших 18 января 2017 г. ($\Delta\text{ТЕС} = 30\text{--}50\%$).

Совместный анализ ионосферных возмущений и изменений глобального геомагнитного индекса Dst позволяет выявить эффекты сильных магнитных бурь. Анализ рис. 7, а–7, ж, показал, что положительные аномалии ионосферной плазмы, зарегистрированные 23 августа 2016 г., 13–14 октября 2016 г. и 18 января 2017 г., вероятно, связаны с возмущениями геомагнитного поля. Отделить сейсмоионосферные вариации от небольших возмущений геомагнитного поля в другие дни достаточно сложно. Для этого необходимо использовать дополнительные подходы к идентификации ионосферных возмущений, например, путем многопараметрического анализа, включающего исследования аномальных вариаций других геофизических полей. Такой анализ описан ниже.

Результаты совместного анализа

При проведении предварительного анализа для сопоставления данных выделялась область осреднения значений в 200 км от центра зоны высокого риска возникновения сильных землетрясений. Это связано с тем, что в данной области аномалии исследуемых параметров наиболее зависимы и может быть выявлена временная последовательность появления аномалий. В случае осреднения данных в пределах радиусов 150 и 350 км значения аномалий сопоставляемых параметров могут быть завышены или занижены без их временного смещения (Cherepanova et al., 2018). Период исследований для сопоставления данных составил 20 дней до землетрясения и через 3 дня после него.

Значения температур поверхности (SST), приповерхностного слоя атмосферы (SAT) и уходящего длинноволнового излучения (OLR) были нормализованы с использованием среднеквадратического отклонения данных текущего года по сравнению с данными других лет в этот период для изменения диапазона значений в интервале от 0 до 1. Нормализованные данные SST, SAT и OLR усреднялись в пределах радиуса 200 км от центра зоны высокого риска возникновения сильных землетрясений.

Для сопоставления с тепловыми данными и данными о состоянии ионосферы при подготовке землетрясений, значения аэрозольной оптиче-

ской толщины (AOD) усреднялись вдоль тектонического разлома в буферной зоне с радиусом 200 км от центра зоны высокого риска возникновения сильных землетрясений. Область усреднения не включала данные для северной части Италии, характеризующийся высокими значениями AOD и, вероятно, относящиеся к промышленным источникам (Rizza et al., 2019). Для совместного анализа ионосферных вариаций с другими параметрами использовались ночные данные TEC (GIM), осредненные в анализируемой области радиусом 200 км.

На рис. 8 в виде графиков представлены вариации осредненных в исследуемой области значений температур поверхности (SST), приповерхностного слоя атмосферы (SAT), уходящего длинноволнового излучения (OLR), аэрозольной оптической толщины (AOD) и значений TEC GIM, полученные для периода с августа 2016 г. по январь 2017 г. для территории Центральной Италии.

Рассмотрим характер изменений исследуемых параметров (SST, SAT, OLR, AOD и TEC GIM) в период подготовки землетрясения с магнитудой $M = 6.2$, произошедшего 24 августа 2016 г. (рис. 8, а). Анализ рис. 8, а показывает, что за 14–15 дней до этого сейсмического события было зарегистрировано сильное увеличение значений OLR, а за 12–13 дней до землетрясения в течение двух дней наблюдалось падение значений температур (SST, SAT) и OLR. При этом за 13 дней до землетрясения, произошедшего 24 августа 2016 г., было зарегистрировано резкое увеличение значений AOD (рис. 8, а) и наблюдались колебания значений TEC – повышение этих значений за 13 и 11 дней до землетрясения и их понижение за 12 и 10 дней (рис. 8, а).

Повышение температур, зарегистрированное за 11 дней до главного толчка с $M = 6.2$ (24 августа 2016 г.), привело к аномально высокому всплеску значений OLR, который был зафиксирован за 9 дней до землетрясения. После этого было зафиксировано стремительное падение значений OLR (рис. 8, а). За 8 дней до этого землетрясения началось повышение среднесуточных значений AOD и достигло максимальных значений за 5 дней до главного сейсмического толчка. В это же время значения TEC GIM достигли минимума (рис. 8, а).

На рис. 8, б представлены графики изменения исследуемых параметров (SST, SAT, OLR, AOD и TEC GIM) в период подготовки землетрясений, произошедших 26 октября 2016 г. ($M = 6.1$) и 30 октября 2016 г. ($M = 6.6$). Анализ графиков, приведенных на рис. 8, б, позволил выявить постепенное повышение OLR за 11–10 дней до землетрясения с $M = 6.1$ (26 октября 2016 г.) и за 15–14 дней до землетрясения с $M = 6.6$ (30 октября 2016 г.). В этот же период наблюдались высокие значения температур (SST, SAT). За 8 дней до сей-

смического толчка, произошедшего 26 октября 2016 г. и за 12 дней до землетрясения, состоявшегося 30 октября 2016 г., было зафиксировано резкое увеличение среднесуточных значений AOD в то время как значения TEC GIM были минимальны (см. рис. 8, б).

Изменения параметров SST, SAT, OLR, AOD и TEC в период подготовки землетрясений с магнитудами $M = 5.2, 5.3, 5.6, 5.7$, произошедших 18 января 2017 г. показаны на рис. 8, в.

Анализ рис. 8, в показал, что за 13 дней до этих землетрясений начался рост OLR, который достиг максимума за 11 дней до сейсмических событий. При этом значения температур SST, SAT понижались. За 7–11 дней до землетрясений, произошедших 18 января 2017 г., изменения AOD и TEC GIM находились в противофазе (см. рис. 8, в). За 5–7 дней до этих сейсмических событий значения температур резко возросли с минимальных до максимальных, максимум OLR был выявлен за 4 дня до землетрясений (см. рис. 8, в). Анализ рис. 8, в показал, что за 2–4 дня до этого землетрясения было зафиксировано резкое увеличение среднесуточных данных AOD, которые достигли максимальных значений за весь период исследования. В это же время в значениях TEC GIM наблюдалось падение до минимального уровня (см. рис. 8, в).

Таким образом, совместный анализ результатов исследований тепловых полей, изменения аэрозольной оптической толщины и полного электронного содержания ионосферы в период подготовки и протекания сильных землетрясений с магнитудами 5.2–6.6, произошедшими на территории Центральной Италии в 2016–2017 гг., позволил выявить временную последовательность появления аномалий, связанных с активизацией сейсмической деятельности, которая приведена в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на основании анализа вариаций тепловых полей, изменений аэрозольной оптической толщины и полного электронного содержания ионосферы, зарегистрированных по данным ДЗЗ, продемонстрирована взаимосвязь изменений, происходящих в системе литосфера-атмосфера-ионосфера на заключительном этапе подготовки серии умеренных и сильных землетрясений, которые произошли в августе 2016 г. – январе 2017 г. на территории Центральной Италии.

На основании результатов проведенного анализа установлено, что в процессе подготовки землетрясений, произошедших на территории Центральной Италии 24 августа 2016 г. ($M = 6.2$), 26 октября 2016 г. ($M = 6.1$), 30 октября 2016 г. ($M = 6.6$) и 18 января 2017 г. ($M = 5.2–5.7$), выявлены аномалии температуры земной поверхности, которые наблюдались в среднем за 3–6 дней над областью тектонического разлома. При этом

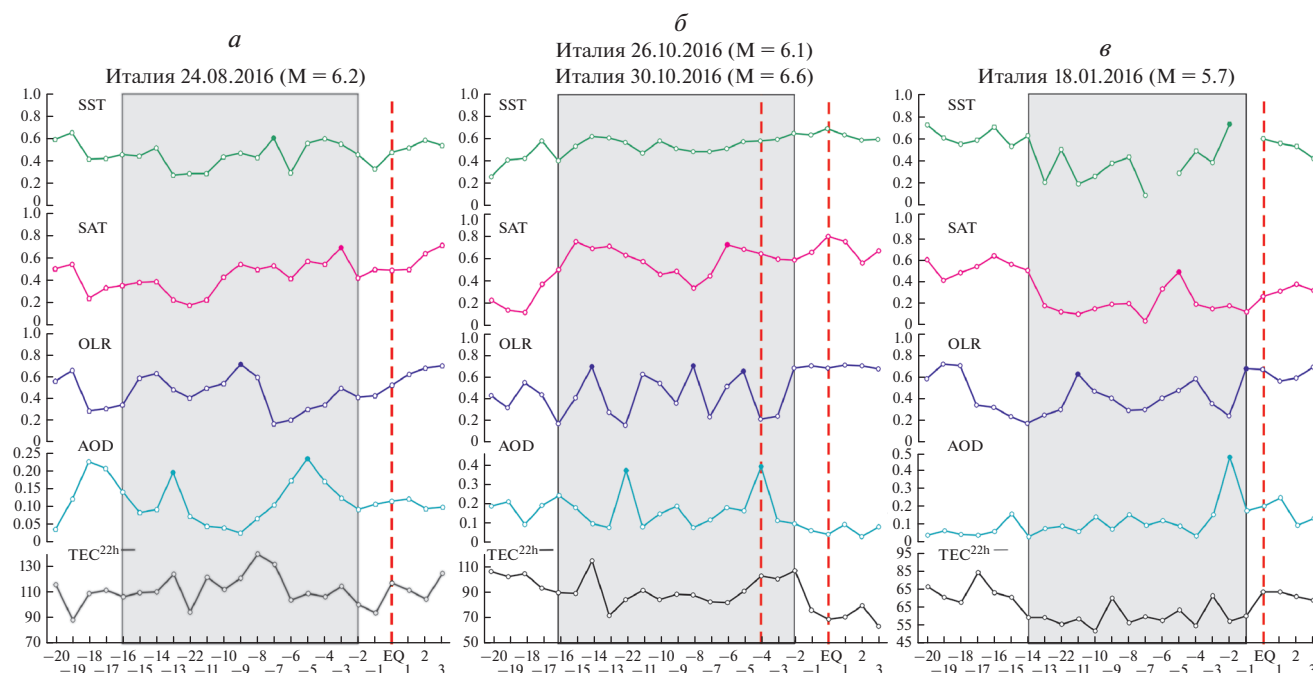


Рис. 8. Вариации температур поверхности (SST), приповерхностного слоя атмосферы (SAT) и уходящего длинноволнового излучения (OLR), значений аэрозольной оптической толщины (AOD) и вариации TEC (GIM) в период подготовки серии сильных землетрясений в Италии в 2016–2017 гг.

аномалии температуры приповерхностного слоя атмосферы регистрировались за 4–9 дней до этих сейсмических событий и располагались над теми же областями тектонического разлома что и аномалии температуры земной поверхности. Аномалии уходящего длинноволнового излучения обнаруживались за 10–14 дней до этих землетрясений над их эпицентрными зонами.

На основании результатов проведенных исследований сейсмоопасной территории Центральной Италии выявлены аномалии аэрозольной оптической толщины AOD, за 7 дней до землетрясения, произошедшего 24 августа 2016 г. с магнитудой $M = 6.2$. Аномалии AOD располагались в эпицентральной области землетрясения вдоль активного тектонического разлома.

Анализ карт относительных значений ΔTEC , построенных по данным TEC GIM, позволил выявить наличие положительных ночных аномалий общего электронного содержания ионосферы в эпицентральных зонах готовящихся землетрясений, которые проявлялись: за 7 дней до землетрясения с магнитудой $M = 6.2$, состоявшегося 24 августа 2016 г. ($\Delta\text{TEC} = 23\text{--}27\%$); за 1 день до землетрясения с магнитудой $M = 6.1$, произошедшего 26 октября 2016 г. и за 5 дней до землетрясения с магнитудой $M = 6.6$, состоявшегося 30 октября 2016 г. ($\Delta\text{TEC} = 38\text{--}46\%$); за 3 дня до землетрясений с магнитудами $M = 5.2, 5.3, 5.6, 5.7$, произошедшими 18 января 2017 г. ($\Delta\text{TEC} = 22\text{--}24\%$).

По данным наземных станций GPS, расположенных к северо-западу (станция UNPG) и к югу (станция AQU1) в радиусе 100 км от эпицентров исследуемых землетрясений обнаружены периоды падения TEC в дневное и повышение в ночное время. Максимальные значения таких вариаций были зарегистрированы за 1–2 дня до умеренных землетрясений с магнитудами $M = 5.2, 5.3, 5.6, 5.7$, произошедшими 18 января 2017 г. (понижение TEC днем на 17%, повышение TEC ночью на 12–22%) и за 4–11 дней до сильных землетрясений с магнитудами $M = 6.1\text{--}6.6$, произошедших 24 августа 2016 г., 26 и 30 октября 2016 г. (понижение TEC днем на 10–22%, повышение TEC ночью на 16–26%). По данным GPS-станций UNPG и AQU1 было также выявлено наличие положительных ночных аномалий ΔTEC , которые проявлялись: за 10–12 и за 7 дней до землетрясения $M = 6.2$, произошедшего 24 августа 2016 г. ($\Delta\text{TEC} = 25\text{--}40\%$); за 1–2 дня до землетрясения $M = 6.1$, состоявшегося 26 октября 2016 г. и, соответственно, за 5–6 дней до землетрясения $M = 6.6$, произошедшего 30 октября 2016 г. ($\Delta\text{TEC} = 30\text{--}40\%$); за 3 дня до землетрясений $M = 5.2\text{--}5.7$, состоявшихся 18 января 2017 г. ($\Delta\text{TEC} = 30\text{--}44\%$).

Установлено, что положительные ночные аномалии ΔTEC , выявленные по данным TEC GIM и данным двух наземных GPS-станций (UNPG и AQU1) перед исследуемыми сейсмическими событиями практически совпали как по значениям, так и по времени появления.

Таблица 2. Временная последовательность появления аномалий тепловых полей (SST, SAT, OLR), аэрозольной оптической толщины (AOD) и полного электронного содержания ионосферы (TEC) на заключительной стадии подготовки землетрясений с магнитудами $M = 5.2–6.6$, произошедших на территории Центральной Италии в 2016–2017 гг.

Параметр	Последовательность появления аномалий перед землетрясением	
	период 1	период 2
SST	– 15–13 дней	– 11–10 дней
SAT	– 15–13 дней	– 11–10 дней
OLR	– 15–14 дней	– 11–9 дней
AOD	– 13–11 дней	– 8–5 дней
TEC	– 14–11 дней	– 8–1 дней

На основании результатов проведенного совместного анализа исследуемых геофизических полей были выявлены два периода появления их аномальных вариаций. Установлено, что первые предвестниковые изменения тепловых полей (SST, SAT и OLR) в буферной зоне с радиусом 200 км от центра зоны высокого риска возникновения сильных землетрясений были зарегистрированы за 13–15 дней, аномальные значения AOD наблюдались за 11–13 дней, а аномальные вариации TEC зафиксированы за 11–14 дней до главных сейсмических толчков.

Для второго периода появления аномальных значений геофизических полей, возникающих до землетрясений, выявлена следующая последовательность их проявления: для тепловых полей (SST, SAR, OLR) – 9–11 дней; для аэрозольной оптической толщины AOD – 5–8 дней; для общего электронного содержания TEC – 1–8 дней.

На основании результатов проведенного совместного анализа вариаций тепловых полей, аэрозольной оптической толщины и полного электронного состояния ионосферы в процессе подготовки и протекания землетрясений в Центральной Италии, произошедших 24 июня 2016 г. ($M = 6.2$), 26 октября 2016 г. ($M = 6.1$), 30 октября 2016 г. ($M = 6.6$) и 18 января 2017 г. ($M = 5.2, 5.3, 5.6, 5.7$), установлено наличие и выявлена последовательность появления таких аномалий.

Таким образом использование совместного анализа при исследованиях вариаций различных геофизических полей, регистрируемых из космоса при мониторинге сейсмоопасных территорий, обеспечивает повышение точности и достоверности выявления аномальных значений, связанных с подготовкой землетрясений, которые могут использоваться в качестве краткосрочных предвестников значительных сейсмических событий.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках Государственного задания (AAAA-A19-119081390037-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акопян С.Ц., Бондур В.Г., Рогожин Е.А. Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // *Физика Земли*. 2017. № 1. С. 34–53.
<https://doi.org/10.7868/S0002333717010021>
- Бондур В.Г., Воронова О.С. Вариации уходящего длинноволнового излучения при подготовке и протекании сильных землетрясений на территории России в 2008 и 2009 г. // *Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2012. № 1. С. 79–85.
- Бондур В.Г., Воронова О.С. Исследования тепловых полей перед сильными землетрясениями в Турции 8 марта 2010 г. ($M = 6.1$) и 24 января 2020 г. ($M = 6.7$) // *Исслед. Земли из космоса*. 2020. № 6. С. 3–16.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420060032>
- Бондур В.Г., Гапонова Е.В. Регистрация из космоса аномальных вариаций линеаментных систем Байкальской рифтовой зоны в период землетрясения с магнитудой $M = 5.6$, состоявшегося 21 сентября 2020 года // *Исслед. Земли из космоса*. 2021. № 2. С. 3–14.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421020020>
- Бондур В.Г., Гарагаиш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л. Геомеханические модели и ионосферные вариации для крупнейших землетрясений при слабом воздействии градиентов атмосферного давления // *Докл. АН*. 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.
- Бондур В.Г., Гарагаиш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В. Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // *Физика Земли*. 2016 (а). № 1. С. 120–132.
<https://doi.org/10.7868/S000233371601004X>
- Бондур В.Г., Гарагаиш И.А., Гохберг М.Б. Крупномасштабное взаимодействие сейсмоактивных тектонических провинций. На примере Южной Калифорнии // *Докл. АН*. 2016 (б). Т. 466. № 5. С. 598–601.
<https://doi.org/10.7868/S0869565216050170>
- Бондур В.Г., Гарагаиш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В. Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // *Докл. АН*. 2010. Т. 430. № 3. С. 400–404.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // *Докл. АН*. 2005 (а). Т. 402. № 1. С. 98–105.

- Бондур В.Г., Зверев А.Т. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линейных элементов // Исслед. Земли из космоса. 2005 (6). № 3. С. 37–52.
- Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Докл. АН. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С. Систематизация ионосферных, геодинамических и тепловых предвестников сильных землетрясений ($M \geq 6$), регистрируемых из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 4. С. 3–19.
<https://doi.org/10.31857/S020596140002352-8>
- Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С. Совместный анализ аномалий различных геофизических полей, регистрируемых из космоса, при подготовке сильных землетрясений в Калифорнии // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 5. С. 3–24.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420050036>
- Вилор Н.В., Минько Н.П. Спутниковый мониторинг инфракрасного излучения геолого-структурных элементов Саяно-Байкало-Патомской горной области и Байкальской рифтовой зоны // Исслед. Земли из космоса. 2002. № 4. С. 55–61.
- Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Комплекс долгосрочных предвестников для сильнейших землетрясений мира // Землетрясения и предупреждения стихийных бедствий. 27-й Международный геологический конгресс. Москва. Коллоквиум Сб. Т. 61. М: Наука, 1984. С. 56–66.
- Пулинец С.А., Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова М.В. Проверка концепции сейсмо-ионосферных связей в спокойных гелиогеомагнитных условиях на примере Венчуаньского землетрясения в Китае 12 мая 2008 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. № 2. С. 240–252.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. // М.: Наука, 2003, 270 с.
- Akhoondzadeh M., Jahani Chehrebargh F. Feasibility of anomaly occurrence in aerosols time series obtained from MODIS satellite images during hazardous earthquakes. *Advances in Space Research*, 2016. 58(6), 890–896.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.05.046>
- Akhoondzadeh M., De Santis A., Marchetti D., Piscini A., Jin S. Anomalous seismo-LAI variations potentially associated with the 2017 Mw = 7.3 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake from Swarm satellites, GPS-TEC and climatological data. *Adv. Space Res.* 2019. 64, 143–158.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.03.020>
- 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) // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 2012. V. 53. № 1. P. 147–168.
<https://doi.org/10.4430/bgta0043>
- Cervone M., Kafatos D., Napoletani E., Singh R.P. An early warning system for coastal earthquakes // *Adv. Space Res.*, 2006. 37, 636–642.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.071>
- Cherepanova E.V., Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S. Satellite monitoring of seismic zones based on earthquakes precursors analysis: Central Italy earthquake August 2016 case study // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2018. V. 18. № 2.2. P. 385–394.
- Ciraolo L., Spalla P. Comparison of ionospheric total electron content from the Navy Navigation Satellite System and the GPS // *Radio Sci.* V. 32. P. 1071–1080. 1997.
- De Santis A., Cianchini G., Marchetti D., Piscini A., Sabbagh D., Perrone L., Campuzano S.A., Inan S. A Multiparametric Approach to Study the Preparation Phase of the 2019 M 7.1 Ridgecrest (California, United States) Earthquake. *Front. Earth Sci.* 2020. 8: 540398.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.540398>
- Davis C., Keilis-Borok V., Kossobokov V., Soloviev A. (2012). Advance prediction of the March 11, 2011 Great East Japan Earthquake: A missed opportunity for disaster preparedness. *International J. Disaster Risk Reduction*, 1, 17–32.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2012.03.001>
- Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I. Estimation of the size of earthquakes preparation zones // *Pure Appl. Geophys.* V. 117. № 5. P. 1025–1044. 1979.
- Hearty T., Savchenko A., Theobald M., Ding F., Esfandiari E., Vollmer B. Readme document for AIRS version 006 products, Readme, NASA GES DISC Goddard Earth Sci. Data and Inf. Serv. Cent., Greenbelt, Md. 2013. 14 p.
- Lyapustin A., Wang Y. MCD19A2 MODIS/Terra + Aqua Land Aerosol Optical Depth Daily L2G Global 1km SIN Grid V006 [Data set] // *NASA EOSDIS Land Processes DAAC*. 2018. 19 p.
<https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD19A2.006>
- Marchetti D., De Santis A., Shen X., Campuzano S.A., Perrone L., Piscini A., Di Giovambattista R., Huang J. Possible Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling effects prior to the 2018 Mw = 7.5 Indonesia earthquake from seismic, atmospheric and ionospheric data // *J. Asian Earth Sciences*, 2020 188, art. № 104097.
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104097>
- Martinelli G., Facca G., Genzano N., Gherardi F., Lisi M., Pierotti L., Tramutoli V. Earthquake-Related Signals in Central Italy Detected by Hydrogeochemical and Satellite // *Techniques.Front. Earth Sci.* 2020. 8: 584716.
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.584716>
- Noll C. The Crustal Dynamics Data Information System: A resource to support scientific analysis using space geodesy, *Advances in Space Research*. V. 45. Is. 12. 15 June 2010. P. 1421–1440, ISSN 0273-1177.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.018>
- Okada Y., Mukai S., Singh R.P. Changes in atmospheric aerosol parameters after Gujarat earthquake of January 26, 2001 // *Adv. Space Res.* 2004. 33(3). 254–258.
- Ouzounov D., Freund F. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data // *Adv. Space Res.*, 2004, 33(3), 268–273.
[https://doi.org/10.1016/s0273-1177\(03\)00486-1](https://doi.org/10.1016/s0273-1177(03)00486-1)
- Piscini A., De Santis A., Marchetti D. et al. A Multi-parametric Climatological Approach to Study the 2016 Amatrice–Norcia (Central Italy) Earthquake Preparatory Phase. *Pure Appl. Geophys.* 174, 3673–3688 (2017).
<https://doi.org/10.1007/s00024-017-1597-8>
- Pulinets S.A., Morozova L.I., Yudin I.A. Synchronization of atmospheric indicators at the last stage of earthquake preparation cycle // *Research in Geophysics*, 2015. 4(1).
<https://doi.org/10.4081/rg.2014.4898>
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnikh L.A. The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2006. 31(4–9), 143–153.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.042>

Pulinets S., Davidenko. DIonospheric precursors of earthquakes and global electric circuit // *Adv. Space Res.*, 2014. 53(5). 709–723.

Pulinets S., Ouzounov D. Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation // *J. Asian Earth Sci.*, 41. 371–382. 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.jseae.2010.03.005>

Pulinets S., Tsidilina M., Ouzounov D., Davidenko D. From Hector Mine M7.1 to Ridgecrest M7.1 Earthquake // *A*

Look from a 20-Year Perspective. Atmosphere 2021, 12, 262. <https://doi.org/10.3390/atmos12020262>

Qin K., Wu L.X., Zheng S., Bai Y., Lv X. Is., Is there an abnormal enhancement of atmospheric aerosol before the 2008, Wenchuan earthquake? // *Adv. Space Res.* 2004. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.04.025>

Rizza U., Mancinelli E., Morichetti M., Passerini G., Virgili S. Aerosol Optical Depth of the Main Aerosol Species over Italian Cities Based on the NASA/MERRA-2 Model Reanalysis // *Atmosphere*. 2019. T. 10. № 11.

Studying from Space Anomalous Variations of Geophysical Fields During the Preparation of Strong Earthquakes in Italy in 2016–2017

V. G. Bondur^a, M. N. Tsidilina^a, O. S. Voronova^a, and N. V. Feoktistova^a

^aAEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

A joint analysis of various geophysical fields registered from space have allowed us to reveal a timing sequence of heat anomalies, and anomalies of aerosol optical depth and total electron content of the ionosphere during the preparation of strong $M = 5.2$ – 6.6 earthquakes in Central Italy in 2016–2017. AIRS (Aqua sat.) surface temperatures, atmospheric near-surface layer temperatures, and outgoing long-wave radiation were used for the analysis of heat fields. Studies of aerosol optical depth changes were carried out using the MCD19A2 product (Terra and Aqua satellites). Global ionospheric maps (GIM) obtained on the basis of data from global satellite navigation systems and ground GPS stations within 100-km radius from earthquake epicenters were used to study anomalies of the ionosphere. It has been found that first precursor changes in geophysical fields occurred within 200-km-radius regions, the centers of which coincided with the centers of high earthquake risk zones, and were recorded 11–15 days before main seismic shocks.

Keywords: remote sensing, space monitoring, earthquake precursors, thermal anomalies, aerosol optical depth, ionosphere

REFERENCES

Akhoondzadeh M., Jahani Chehrebargh F. Feasibility of anomaly occurrence in aerosols time series obtained from MODIS satellite images during hazardous earthquakes. *Advances in Space Research*, 2016. 58(6), 890–896. DOI:10.1016/j.asr.2016.05.046

Akhoondzadeh M., De Santis A., Marchetti D., Piscini A., Jin S. Anomalous seismo-LAI variations potentially associated with the 2017 $M_w = 7.3$ Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake from Swarm satellites, GPS-TEC and climatological data. *Adv. Space Res.* 2019. 64, 143–158. DOI: 10.1016/j.asr.2019.03.020

Akopian S.Ts., Bondur V.G., Rogozhin E.A. Technology for monitoring and forecasting strong earthquakes in Russia with the use of the seismic entropy method // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2017. V. 53. № 1. P. 32–51. DOI: 10.1134/S1069351317010025

Bondur V.G., Gaponova Ye.V. Registratsiya iz kosmosa anomalnykh variatsiy lineamentnykh sistem Baykalskoy riftovoy zony v period zemletryaseniya s magnitudoy $M = 5.6$, sostoyavshegosya 21 sentyabrya 2020 goda (Registering from Space Anomalous Variations of Baikal Rift Zone Lineament Systems during the $M = 5.6$ Earthquake Occurred on September 21, 2020) // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2021. № 2. P. 3–14. DOI: 10.31857/S0205961421020020 (In Russian).

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V., Steblou G.M., Shalimov S.L. Geomechanical models and ionospheric variations related to strongest earthquakes and weak influence of atmospheric pressure gradients // *Doklady Earth Sciences*. 2007. V. 414. № 4. P. 666–669. DOI: 10.1134/S1028334X07040381

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Rodkin M.V. The Evolution of the Stress State in Southern California Based on the Geomechanical Model and Current Seismic-

ity // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2016a. V. 52. № 1. P. 117–128. DOI: 10.1134/S1069351316010043

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B. Large scale interaction of seismically active tectonic provinces: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*, 2016b. V. 466. № 2. P. 183–186. DOI: 10.1134/S1028334X16020100

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V. Connection between variations of the stress–strain state of the Earth’s crust and seismic activity: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*. 2010. V. 430. Part 1. P. 147–150. DOI: 10.1134/S1028334X10010320

Bondur V.G., Smirnov V.M. Method for monitoring seismically hazardous territories by ionospheric variations recorded by satellite navigation systems // *Doklady Earth Sciences*. 2005. V. 403. № 5. P. 736–740.

Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S. Joint Analysis of Anomalies of Different Geophysical Fields, Recorded from Space during Precursors of Strong Earthquakes in California // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020. V. 56. № 12. P. 1502–1519. DOI: 10.1134/S000143382012035X

Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S. Systematization of Ionospheric, Geodynamic, and Thermal Precursors of Strong ($M \geq 6$) Earthquakes Detected from Space // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018. V. 54. № 9. P. 1172–1185. DOI: 10.1134/S0001433818090475

Bondur V.G., Voronova O.S. Issledovaniya teplovykh poley pored silnymi zemletryasenyami v Turtsii 8 marta 2010 g. ($M = 6.1$) i 24 yanvarya 2020 g. ($M = 6.7$) (Studying Thermal Fields before Strong Earthquakes in Turkey March 8, 2010 ($M = 6.1$) and January 24, 2020 ($M = 6.7$)) // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2020. № 6. P. 3–16. DOI: 10.31857/S0205961420060032 (In Russian).

- Bondur V.G., Voronova O.S.* Variatsii ukhodyashchego dlin-novolnovogo izlucheniya pri podgotovke i protekaniy sil'nykh zemletryaseniy na territorii Rossii v 2008 i 2009 godu (Outgoing longwave radiation variations during preparation and occurrence of strong earthquakes in Russia in 2008 and 2009) // *Izvestiya vuzov. Geodeziya i Aerofotosemka*. 2012. № 1. P. 79–85. (In Russian)
- Bondur V.G., Zverev A.T.* Kosmicheskiy metod prognoza zemletryaseniy na osnove analiza dinamiki sistem lineamentov (A method of earthquake forecast based on the lineament dynamic analysis using satellite imagery) // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2005a. № 3. P. 37–52. (In Russian)
- Bondur V.G., Zverev A.T.* A method of earthquake forecast based on the lineament analysis of satellite images // *Doklady Earth Sciences*. 2005b. V. 402. № 4. P. 561–567.
- 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) // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 2012. V. 53. № 1. P. 147–168. DOI: 10.4430/bgta0043
- Cervone M., Kafatos D., Napolitano E., Singh R.P.* An early warning system for coastal earthquakes // *Adv. Space Res.*, 2006. 37, 636–642. DOI: 10.1016/j.asr.2005.03.071
- Cherepanova E.V., Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S.* Satellite monitoring of seismic zones based on earthquakes precursors analysis: Central Italy earthquake August 2016 case study // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2018. V. 18. № 2.2. P. 385–394.
- Ciraolo L., Spalla P.* Comparison of ionospheric total electron content from the Navy Navigation Satellite System and the GPS // *Radio Sci.* V. 32. P. 1071–1080. 1997.
- Davis C., Keilis-Borok V., Kossobokov V., Soloviev A.* (2012). Advance prediction of the March 11, 2011 Great East Japan Earthquake: A missed opportunity for disaster preparedness. *International J. Disaster Risk Reduction*, 1, 17–32. DOI: 10.1016/j.ijdr.2012.03.001
- De Santis A., Cianchini G., Marchetti D., Piscini A., Sabbagh D., Perrone L., Campuzano S.A., Inan S.* A Multiparametric Approach to Study the Preparation Phase of the 2019 M7.1 Ridgecrest (California, United States) Earthquake. *Front. Earth Sci.* 2020. 8: 540398. DOI: 10.3389/feart.2020.540398
- Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I.* Estimation of the size of earthquakes preparation zones // *Pure Appl. Geophys.* V. 117. № 5. P. 1025–1044. 1979.
- Hearty T., Savtchenko A., Theobald M., Ding F., Esfandiari E., Vollmer B.* Readme document for AIRS version 006 products, Readme, NASA GES DISC Goddard Earth Sci. Data and Inf. Serv. Cent., Greenbelt, Md. 2013. 14 pages.
- Keylis-Borok V.I., Kosobokov V.G.* Kompleks dolgosrochnykh predvestnikov dlya sil'neyshikh zemletryaseniy mira (Complex of long-term precursors for the strongest earthquakes in the world) // *Earthquakes and natural disaster prevention*. 27th International Geological Congress. Moscow. Colloquium C6. V. 61. Moscow: Nauka, 1984. P. 56–66.
- Lyapustin A., Wang Y.* MCD19A2 MODIS/Terra + Aqua Land Aerosol Optical Depth Daily L2G Global 1km SIN Grid V006 [Data set] // *NASA EOSDIS Land Processes DAAC*. 2018. 19 pages. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD19A2.006>
- Marchetti D., De Santis A., Shen X., Campuzano S.A., Perrone L., Piscini A., Di Giovambattista R., Huang J.* Possible Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling effects prior to the 2018 Mw = 7.5 Indonesia earthquake from seismic, atmospheric and ionospheric data // *J. Asian Earth Sciences*, 2020. 188, art. № 104097. DOI: 10.1016/j.jseaes.2019.104097
- Martinelli G., Facca G., Genzano N., Gherardi F., Lisi M., Pierotti L., Tramutoli V.* Earthquake-Related Signals in Central Italy Detected by Hydrogeochemical and Satellite // *Techniques Front. Earth Sci.* 2020. 8: 584716. DOI: 10.3389/feart.2020.584716
- Noll C.* The Crustal Dynamics Data Information System: A resource to support scientific analysis using space geodesy, *Advances in Space Research*, V. 45. Is. 12. 15 June 2010. P. 1421–1440, ISSN 0273-1177, DOI: 10.1016/j.asr.2010.01.018
- Okada Y., Mukai S., Singh R.P.* Changes in atmospheric aerosol parameters after Gujarat earthquake of January 26, 2001 // *Adv. Space Res.* 2004. 33(3), 254–258.
- Ouzounov D., Freund F.* Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data // *Adv. Space Res.*, 2004, 33(3), 268–273. DOI: 10.1016/s0273-1177(03)00486-1
- Piscini A., De Santis A., Marchetti D. et al.* A Multi-parametric Climatological Approach to Study the 2016 Amatrice–Norcia (Central Italy) Earthquake Preparatory Phase. *Pure Appl. Geophys.* 174, 3673–3688 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1597-8>
- Pulinets S.A., Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova M.V.* Verification of the concept of seismoionospheric coupling under quiet heliogeomagnetic conditions, using the Wenchuan (China) earthquake of May 12, 2008, as an example // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2010. V. 50. № 2. P. 231–242. DOI: 10.1134/S0016793210020118
- Pulinets S.A., Morozova L.I., Yudin I.A.* Synchronization of atmospheric indicators at the last stage of earthquake preparation cycle // *Research in Geophysics*, 2015. 4(1). DOI: 10.4081/rg.2014.4898
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnikh L.A.* The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2006. 31(4–9), 143–153. DOI: 10.1016/j.pce.2006.02.042
- Pulinets S., Davidenko.* Ionospheric precursors of earthquakes and global electric circuit // *Adv. Space Res.*, 2014, 53(5), 709–723.
- Pulinets S., Ouzounov D.* Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation // *J. Asian Earth Sci.*, 41, 371–382, 2011. DOI: 10.1016/j.jseaes.2010.03.005
- Pulinets S., Tsidilina M., Ouzounov D., Davidenko D.* From Hector Mine M7.1 to Ridgecrest M7.1 Earthquake // *A Look from a 20-Year Perspective. Atmosphere* 2021, 12, 262. <https://doi.org/10.3390/atmos12020262>
- Qin K., Wu L.X., Zheng S., Bai Y., Lv X.* Is there an abnormal enhancement of atmospheric aerosol before the 2008, Wenchuan earthquake? // *Adv. Space Res.* 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.04.025>
- Rizza U., Mancinelli E., Morichetti M., Passerini G., Virgili S.* Aerosol Optical Depth of the Main Aerosol Species over Italian Cities Based on the NASA/MERRA-2 Model Reanalysis // *Atmosphere*. 2019. T. 10. № 11.
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V.* Fizika zemletryaseniy i predvestniki [Earthquake physics and precursors]. Moscow: Nauka, 2003. 270 p. (In Russian)
- Vilor N.V., Min'ko N.P.* Sputnikovyy monitoring infrakrasnogo izlucheniya geologo-strukturnykh elementov Sayano-Baykalo-Patomskoy gornoy oblasti i Baykal'skoy riftovoy zony // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2002. № 4. P. 55–61. (In Russian)