

УДК 550.343.62

ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИОНОСФЕРЫ В ПРЕДВЕРИИ СИЛЬНЫХ ($M \geq 6$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РЕГИОНАХ ГРЕЦИИ И ИТАЛИИ ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2019 г. Д. В. Давиденко^{1, 2, 3, *}, С. А. Пулинец^{1, 2, **}

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

²Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород, Россия

³Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва (РКК “Энергия”),
г. Королёв (Московская обл.), Россия

*e-mail: davidenko5@rambler.ru

**e-mail: pulse@rssi.ru

Поступила в редакцию 10.12.2018 г.

После доработки 16.01.2019 г.

Принята к публикации 24.01.2019 г.

По данным многолетних измерений рассмотрены специфические особенности вариаций электронной концентрации в ионосфере перед сильными ($M \geq 6$) землетрясениями в наиболее сейсмоактивных областях Европы: Греции и Италии. Для охвата длительных промежутков времени (до эры GPS/ГЛОНАСС) анализируются данные вертикального зондирования (вариации критической частоты области F), а с появлением в рассматриваемых регионах приемников глобальных навигационных спутниковых систем анализируются дополнительно вариации вертикального полного электронного содержания. Данный анализ базируется на результатах предыдущих публикаций, где выявлено такое качество ионосферных предвестников как самоподобие, выражающееся в исключительной стабильности вариаций электронной концентрации в зависимости от местного времени, графический образ которых мы называем маской ионосферного предвестника. Эта стабильность, которую мы определяем как детерминированную изменчивость, подтверждена на представленных в работе данных многолетних измерений. Одним из новых результатов являются региональные особенности маски ионосферного предвестника, обнаруженные для Италии, где маска для землетрясений в Центральной Италии (в радиусе 300 км севернее г. Рим) и маска для землетрясений в Южной Италии (в радиусе 300 км южнее г. Рим) отличаются по фазе. Предложено возможное объяснение наблюдаемых региональных особенностей.

DOI: 10.1134/S0016794019040084

1. ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные публикации различных авторов, статистический анализ данных наземных и спутниковых измерений свидетельствуют о том, что аномальные возмущения в ионосфере появляются за несколько суток/часов до землетрясений [Pulinets, 1998; Pulinets et al., 2003; Le et al., 2011; Kon et al., 2011; Parrot and Li, 2015]. Следует отметить, что практически во всех работах, где проводится статистический анализ ионосферных предвестников, применяется стандартный подход, заключающийся в выявлении ионосферных аномалий как отклонений от средних/медианных значений. Отличия в подходах разных авторов незначительны и состоят только в определении пределов, превышение которых означает аномальное значение. В случае гауссовой статистики используется стандартное отклонение с каким-то коэф-

фициентом, в более общем подходе используется интерквартильный интервал в качестве оценки аномалий. В то же время следует отметить, что аномальные возмущения в ионосфере в разных сейсмоактивных регионах Земли перед землетрясениями имеют индивидуальный характер. Прежде всего, это касается знака ионосферных аномалий и времени их появления. Зависимость ионосферных предвестников от местного времени была замечена более 20 лет назад [Пулинец и др., 1998], но никогда не применялась в качестве критерия для выделения сейсмо-ионосферных аномалий до настоящего времени. Единственным исключением являются работы тайваньских ученых [Liu et al., 2004, 2006], где в качестве основного предвестника землетрясений на Тайване предлагались отрицательные вариации электронной концентрации, наблюдавшиеся в послеполуденные часы местного времени.

Известно, что для критических процессов характерно свойство автомодельности и наличие структур-аттракторов, к которым приближается система в результате развития кризиса [Князева и Курдюмов, 2007]. Обнаруженное нами самоподобие ионосферных вариаций, интерпретируемых нами как предвестники, может служить индикатором приближающегося землетрясения, а сам эффект самоподобия позволяет применить метод распознавания образов для их идентификации [Пулинец и др., 2002]. Ранее нами был разработан обобщенный визуальный образ (маска) ионосферного предвестника землетрясения для греческого региона [Пулинец и Давиденко, 2018]. Для создания маски использовались измерения вертикального полного электронного содержания (ПЭС) GPS-приемника poa1 (г. Афины, Греция) для землетрясений на территории Греции с магнитудой $M \geq 6.0$ за период 2006–2011 гг. Было установлено, что основной особенностью предвестника является значительное увеличение ПЭС (более 20%) в ионосфере над зоной подготовки землетрясения, проявляющееся в определенный момент времени. Возмущение возникает с 16 ч UTC за сутки до землетрясения и продолжается практически 12 ч до 4 ч UTC на долготе приемника в Афинах, что соответствует временному периоду с 18 до 6 ч местного времени.

На идею возможного физического механизма подобных вариаций нас натолкнула работа Золотова [2015], где было показано, что ионосферные вариации перед землетрясениями проявляются только в ночные часы за границами солнечного терминатора, из чего следовало, что необходимо обратить внимание на поведение пограничного слоя в восходно-заходные часы местного времени. Наличие восходно-заходных эффектов перед землетрясениями отмечалось также в исследованиях аномалий распространения ОНЧ-сигналов навигационных передатчиков [Hayakawa, 2007].

2. РАЗРАБОТКА МАСКИ ИОНОСФЕРНОГО ПРЕДВЕСТНИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ГРЕЦИИ ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Чтобы проверить разработанную маску, полученную методом радиопросвечивания ионосферы, нами были обработаны данные критической частоты $foF2$ ионосферы, полученные методом вертикального зондирования ионосферы, зарегистрированные станциями вертикального зондирования в городах София (Болгария) и Афины (Греция) для временных интервалов подготовки землетрясений с магнитудой $M \geq 6.2$ за период с 31.03.1965 г. по 06.01.2008 г., эпицентры которых находились в Греции. Выбор указанных станций обусловлен их расположением. Географические координаты станций следующие: ст. Афины

(38.0° N, 23.5° E), ст. София (42.7° N, 23.4° E). Станции расположены практически на одной долготе. Расстояние между ними составляет всего ~523 км. Для каждого землетрясения использовались доступные данные ближайшей к эпицентру рассматриваемого землетрясения станции. В случае отсутствия данных на одной станции, использовались данные второй станции с учетом следующего критерия — расстояние от эпицентра землетрясения до станции не должно превышать 500 км.

Список землетрясений в Греции с магнитудой $M \geq 6.2$ за период с 31.03.1965 г. по 06.01.2008 г., отвечающих этому критерию, представлен в табл. 1.

Предварительный процесс обработки данных $foF2$ заключался в определении относительных отклонений $\Delta foF2$ от текущего среднего по формуле

$$\Delta foF2 = 100(foF2 - foF2_A) / foF2_A,$$

где $foF2$ — значение критической частоты в текущий момент времени (МГц); $foF2_A$ — скользящее среднее значение критической частоты, рассчитанное по 15 предшествующим значениям для того же момента времени или фоновое значение.

Массивы $\Delta foF2$ для каждого землетрясения рассчитывались для 10 сут до и 4 сут после землетрясения.

Следующим шагом стало визуальное представление массивов суточных значений в виде тоновых изображений согласно Пулинец и др. [2002]. Для этого массивы $\Delta foF2$ формировались в матрицу с распределением вычисленных значений по суткам и часам. Тоновая шкала на изображениях отражает величину отклонений $\Delta foF2$ в положительную (светлые тона) и отрицательную (темные тона) стороны и соответствует значениям $\Delta foF2$, выраженным в процентах (%). По оси абсцисс отложено время в сутках до и после суток, в которые произошло землетрясение, по оси ординат — время (UTC). Отрицательные значения на оси абсцисс соответствуют суткам до момента землетрясения, нулевые сутки соответствуют суткам, в которые произошло землетрясение, а положительные — суткам после землетрясения.

На следующем этапе производилось наложение друг на друга массивов $\Delta foF2$ для выбранной группы землетрясений за равноотстоящие интервалы времени относительно суток, в которые происходили землетрясения, с последующим осреднением, что позволило создать обобщенный визуальный образ (маску) предвестника землетрясения, показанный на рис. 1 (метод наложения эпох).

Разработанная маска ионосферного предвестника землетрясения по данным о критической частоте слоя $F2$ ионосферы станций вертикального зондирования в городах София и Афины для

Таблица 1. Список землетрясений с магнитудой $M \geq 6.2$ за период с 31.03.1965 г. по 06.01.2008 г.

№	Дата	Время (UTC)	Географические координаты	Глубина (h , км)	Магнитуда (M)
1	31.03.1965 г.	09:47:31	38.365° N, 22.405° E	75.0	6.8
2	06.07.1965 г.	03:18:45	38.384° N, 22.545° E	20.0	6.3
3	05.02.1966 г.	02:01:45	39.093° N, 21.777° E	10.0	6.2
4	04.03.1967 г.	17:58:06	39.100° N, 24.684° E	15.0	6.6
5	19.02.1968 г.	22:45:45	39.368° N, 24.957° E	15.0	7.2
6	08.04.1970 г.	13:50:29	38.304° N, 22.682° E	20.0	6.3
7	24.02.1981 г.	20:53:38	38.222° N, 22.934° E	33.0	6.7
8	04.03.1981 г.	21:58:05	38.209° N, 23.288° E	28.5	6.4
9	19.12.1981 г.	14:10:50	39.243° N, 25.227° E	10.0	7.2
10	27.12.1981 г.	17:39:13	38.938° N, 24.905° E	13.3	6.5
11	18.01.1982 г.	19:27:24	40.004° N, 24.319° E	10.0	6.8
12	06.08.1983 г.	15:43:51	40.142° N, 24.766° E	2.4	6.8
13	13.05.1995 г.	08:47:12	40.149° N, 21.695° E	14.0	6.6
14	15.06.1995 г.	00:15:48	38.401° N, 22.283° E	14.2	6.5
15	26.07.2001 г.	00:21:36	39.059° N, 24.244° E	10.0	6.5
16	22.01.2002 г.	04:53:52	35.790° N, 26.617° E	88.0	6.2
17	14.08.2003 г.	05:14:54	39.160° N, 20.605° E	10.0	6.3
18	08.01.2006 г.	11:34:55	36.311° N, 23.212° E	66.0	6.7
19	06.01.2008 г.	05:14:20	37.216° N, 22.693° E	75.0	6.2

землетрясений в Греции с магнитудой $M \geq 6.2$ за период с 31.03.1965 г. по 06.01.2008 г. практически полностью повторяет ранее разработанную нами маску ионосферного предвестника по данным вертикального ПЭС GPS-приемника poa1 (г. Афины) для землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ за период 2006–2011 гг. [Пулинец и Давиденко, 2018]. Характерной особенностью предвестника является увеличение критической частоты слоя $F2$ ионосферы, и, соответственно, электронной концентрации на высоте главного максимума ионосферы, проявляющееся в определенный момент времени. Возмущение возникает с 20 ч UTC за сутки до землетрясения и продолжается практически 9 ч до 5 ч UTC на долготе станций, что соответствует временному периоду с 22 до 7 ч местного времени.

За период 2012–2018 гг. в рассматриваемом регионе произошло еще 12 землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$. С целью уточнения ранее разработанной маски по данным вертикального ПЭС GPS-приемника poa1 (г. Афины) для землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ за период 2006–2011 гг. [Пулинец и Давиденко, 2018], нами был произведен расчет значений вертикального ПЭС GPS-приемника poa1 (г. Афины) и GPS/ГЛОНАСС-приемника tuc2 (о-в Крит) с пятиминутным разрешением и обработка этих значений для землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ за период 2006–2018 гг. (см. табл. 2) описанным в работе [Пули-

нец и Давиденко, 2018] методом для построения масок. Географические координаты приемников следующие: poa1 (38.047° N, 23.864° E), tuc2 (35.533° N, 24.071° E). Маски по данным вертикального ПЭС приемников poa1 и tuc2 для землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ за период 2006–2018 гг. представлены соответственно на рис. 2 и рис. 3.

Представленные на рис. 2 и рис. 3 маски идентичны ранее разработанной в работе [Пулинец и Давиденко, 2018] маске ионосферного предвестника землетрясения для греческого региона.

Таким образом, анализ вариаций значений вертикального ПЭС в Греции с использованием созданных масок позволяет выделять характерные возмущения в ионосфере перед землетрясениями в исследуемом регионе, выражающиеся в формировании положительной аномалии ПЭС в ночные часы местного времени.

3. РАЗРАБОТКА МАСКИ ИОНОСФЕРНОГО ПРЕДВЕСТНИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В РЕГИОНЕ БАЛКАНСКОГО П-ОВА ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

С целью выявления характерных особенностей ионосферных предвестников землетрясений в регионе Балканского п-ова нами были обработаны данные критической частоты $foF2$ ионосфе-

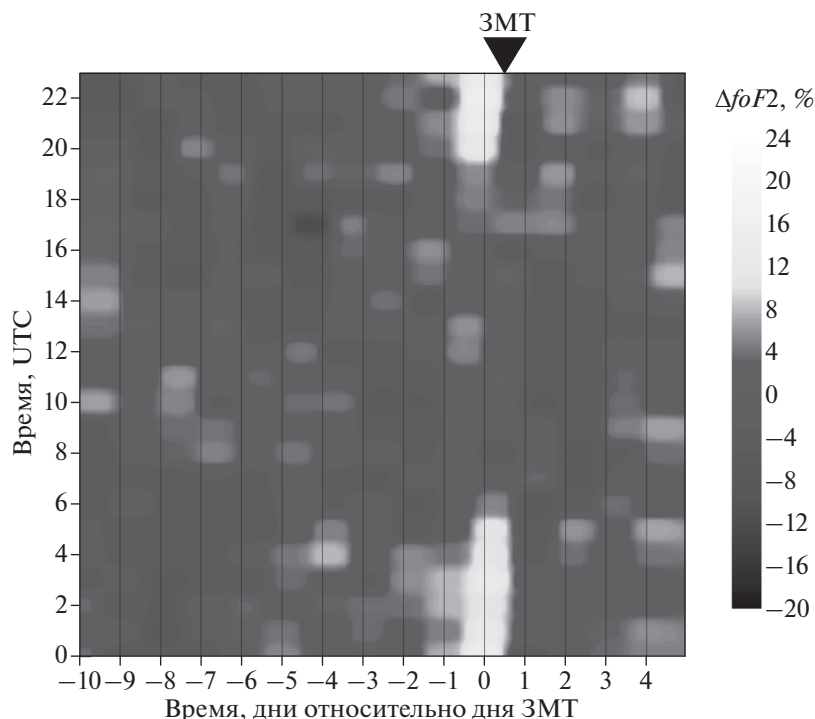


Рис. 1. Маска ионосферного предвестника землетрясения (ЗМТ) по данным о критической частоте слоя $F2$ ионосферы станций вертикального зондирования в городах София и Афины для землетрясений в Греции с магнитудой $M \geq 6.2$ за период с 31.03.1965 г. по 06.01.2008 г.: ось абсцисс — сутки до и после момента землетрясения, нулевые сутки — сутки, в которые произошло землетрясение; ось ординат — время от 00:00 до 23:00 UTC; тоновая шкала — значения $\Delta foF2$, %.

ры, полученные методом вертикального зондирования ионосферы, зарегистрированные станциями вертикального зондирования в городах София (Болгария) и Афины (Греция) для временных интервалов подготовки землетрясений с магнитудой $M \geq 6.2$ за период с 06.10.1964 г. по 06.01.2008 г. Для каждого землетрясения использовались доступные данные ближайшей к эпицентру рассматриваемого землетрясения станции. В случае отсутствия данных на одной станции, использовались данные второй станции с учетом следующего критерия — расстояние от эпицентра землетрясения до станции не должно превышать 700 км.

Список землетрясений в регионе Балканского п-ова с магнитудой $M \geq 6.2$ за период с 06.10.1964 г. по 06.01.2008 г., отвечающих этому критерию, представлен в табл. 3.

Разработка маски ионосферного предвестника для указанных в табл. 3 землетрясений производилась по методике, описанной в разделе 2 данной статьи.

Маска ионосферного предвестника землетрясения по данным о критической частоте слоя $F2$ ионосферы станций вертикального зондирования в городах София и Афины для землетрясений в регионе Балканского п-ова с магнитудой $M \geq 6.2$ за период с 06.10.1964 г. по 06.01.2008 г. представлена на рис. 4.

Разработанная маска ионосферного предвестника землетрясения по данным о критической частоте слоя $F2$ ионосферы станций вертикального зондирования в городах София и Афины для землетрясений в регионе Балканского п-ова с магнитудой $M \geq 6.2$ за период с 06.10.1964 г. по 06.01.2008 г. практически полностью повторяет ранее разработанные нами маски ионосферного предвестника для сильных землетрясений в Греции (см. рис. 1, рис. 2, рис. 3).

Характерной особенностью предвестника является увеличение критической частоты слоя $F2$ ионосферы, и, соответственно, электронной концентрации на высоте главного максимума ионосферы, проявляющееся в определенный момент времени. Возмущение возникает с 20 ч UTC за сутки до землетрясения и продолжается практически 9 ч до 5 ч UTC на долготе станций, что соответствует временному периоду с 22 до 7 ч местного времени.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ВАРИАЦИЙ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В РЕГИОНЕ АПЕННИНСКОГО П-ОВА

С целью выявления характерных особенностей ионосферных предвестников землетрясений в итальянском регионе нами были проанализиро-

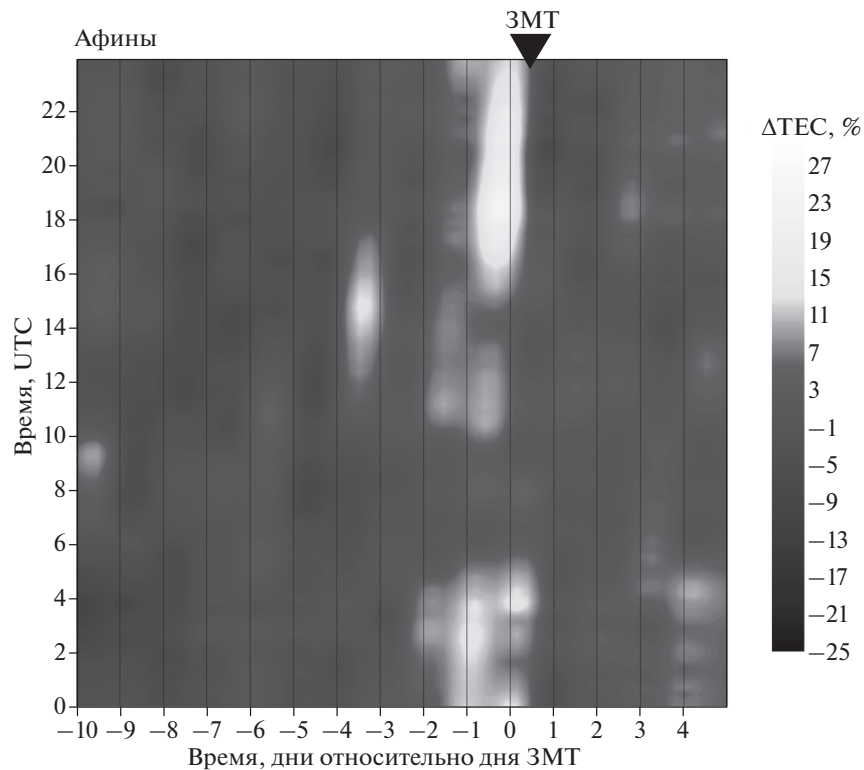


Рис. 2. Маска ионосферного предвестника землетрясения (ЗМТ) по данным вертикального ПЭС GPS-приемника poa1 для землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ за период 2006–2018 гг.: ось абсцисс – сутки до и после момента землетрясения, нулевые сутки – сутки, в которые произошло землетрясение; ось ординат – время от 00:00 до 23:55 UTC; тоновая шкала – значения $\Delta\text{ТЕС}$, %.

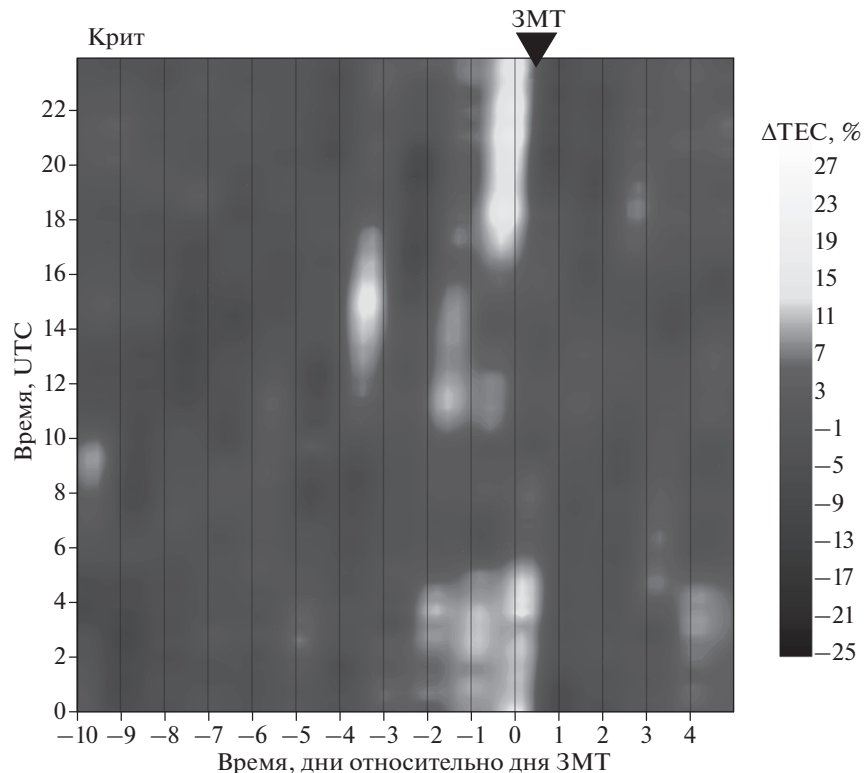


Рис. 3. Маска ионосферного предвестника землетрясения (ЗМТ) по данным вертикального ПЭС GPS/ГЛОНАСС-приемника tus2 для землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ за период 2006–2018 гг.: ось абсцисс – сутки до и после момента землетрясения, нулевые сутки – сутки, в которые произошло землетрясение; ось ординат – время от 00:00 до 23:55 UTC; тоновая шкала – значения $\Delta\text{ТЕС}$, %.

Таблица 2. Список землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ за период 2006–2018 гг.

№	ЗМТ	Дата	Время (UTC)	Географические координаты	Глубина (h , км)	Магнитуда (M)
1	G1	08.01.2006 г.	11:34:55	36.311° N, 23.212° E	66.0	6.7
2	G2	06.01.2008 г.	05:14:20	37.216° N, 22.693° E	75.0	6.2
3	G3	14.02.2008 г.	10:09:22	36.501° N, 21.670° E	29.0	6.9
4	—	14.02.2008 г.	12:08:55	36.345° N, 21.863° E	28.0	6.5
5	G4	20.02.2008 г.	18:27:06	36.288° N, 21.775° E	9.9	6.2
6	G5	08.06.2008 г.	12:25:29	37.963° N, 21.525° E	16.0	6.4
7	G6	15.07.2008 г.	03:26:34	35.800° N, 27.860° E	52.0	6.4
8	G7	01.07.2009 г.	09:30:10	34.164° N, 25.471° E	19.0	6.4
9	G8	01.04.2011 г.	13:29:10	35.662° N, 26.560° E	59.9	6.0
10	G9	10.06.2012 г.	12:44:16	36.420° N, 28.880° E	35.0	6.0
11	G10	15.06.2013 г.	16:11:02	34.400° N, 25.020° E	10.0	6.2
12	—	16.06.2013 г.	21:39:05	34.347° N, 25.159° E	19.0	6.0
13	G11	12.10.2013 г.	13:11:53	35.514° N, 23.252° E	40.0	6.6
14	G12	26.01.2014 г.	13:55:42	38.208° N, 20.453° E	8.0	6.1
15	G13	03.02.2014 г.	03:08:46	38.264° N, 20.390° E	5.0	6.0
16	G14	24.05.2014 г.	09:25:02	40.289° N, 25.389° E	6.4	6.9
17	G15	16.04.2015 г.	18:07:43	35.189° N, 26.823° E	20.0	6.0
18	G16	17.11.2015 г.	07:10:07	38.670° N, 20.600° E	11.0	6.5
19	G17	12.06.2017 г.	12:28:39	38.930° N, 26.365° E	12.0	6.3
20	G18	20.07.2017 г.	22:31:11	36.929° N, 27.414° E	7.0	6.6
21	G19	25.10.2018 г.	22:54:52	37.515° N, 20.564° E	14.0	6.8

ваны данные критической частоты $foF2$ ионосферы, зарегистрированные станцией вертикального зондирования в г. Рим (Италия) для землетрясений с магнитудой $M \geq 5.4$ за период 1962–2017 гг., эпицентры которых находились в радиусе 300 км от станции. Географические координаты ст. Рим (41.9° N, 12.52° E). В результате было обнаружено, что перед землетрясениями, эпицентры которых находились в радиусе 300 км севернее ст. Рим, наблюдались положительные аномалии электронной концентрации в ночные часы в течение нескольких суток до землетрясений, а перед землетрясениями, эпицентры которых находились в радиусе 300 км южнее ст. Рим, наблюдались отрицательные аномалии электронной концентрации в ночные часы в течение нескольких суток до землетрясений. Список землетрясений с магнитудой $M \geq 5.4$, эпицентры которых находились в радиусе 300 км севернее ст. Рим, представлен в табл. 4. Список землетрясений с магнитудой $M \geq 5.4$, эпицентры которых находились в радиусе 300 км южнее ст. Рим, представлен в табл. 5. Маски ионосферного предвестника для указанных групп землетрясений представлены соответственно на рис. 5 и рис. 6.

Кроме того, нами были проанализированы данные критической частоты $foF2$ ионосферы, зарегистрированные станцией вертикального зон-

дирования в г. Рим для землетрясений с магнитудой $M \geq 5.5$, эпицентры которых находились в дальней зоне на расстоянии от 300 до 500 км южнее ст. Рим. Список этих землетрясений представлен в табл. 6. Маска ионосферного предвестника для этих землетрясений представлена на рис. 7. Как видно из рис. 7, формирование положительных аномалий электронной концентрации в ночные часы начинается значительно раньше (за 9 сут до землетрясения), положительные аномалии электронной концентрации в ночные часы продолжают свое существование практически до момента землетрясения.

Малое количество сильных землетрясений на расстоянии от 300 до 500 км севернее ст. Рим не позволило нам создать маску ионосферного предвестника для этих землетрясений. Однако для сейсмических событий магнитудой $M6.0$, $M5.8$ и $M5.1$, произошедших на севере Италии в области Эмилия-Романья соответственно 20.05.2012 г. (02:03:52 UTC), 29.05.2012 г. (07:00:03 UTC) и 03.06.2012 г. (19:20:43 UTC), нами был произведен расчет относительных отклонений $\Delta foF2$ по данным ст. Рим. Также был выполнен расчет относительных отклонений ΔTEC вертикального ПЭС GPS-приемника medi (Медицина, Италия), ближайшего приемника к эпицентрам этих землетрясений. Результаты расчетов представлены на

Таблица 3. Список землетрясений в регионе Балканского п-ова с магнитудой $M \geq 6.2$ за период с 06.10.1964 г. по 06.01.2008 г.

№	Дата	Время (UTC)	Географические координаты	Глубина (h , км)	Магнитуда (M)	Положение эпицентра
1	06.10.1964 г.	14:31:25	40.203° N, 28.206° E	27.4	6.8	Турция
2	31.03.1965 г.	09:47:31	38.365° N, 22.405° E	75.0	6.8	Греция
3	06.07.1965 г.	03:18:45	38.384° N, 22.545° E	20.0	6.3	Греция
4	05.02.1966 г.	02:01:45	39.093° N, 21.777° E	10.0	6.2	Греция
5	04.03.1967 г.	17:58:06	39.100° N, 24.684° E	15.0	6.6	Греция
6	22.07.1967 г.	16:57:00	40.751° N, 30.800° E	30.0	7.4	Турция
7	30.11.1967 г.	07:23:52	41.386° N, 20.532° E	20.0	6.7	Албания
8	19.02.1968 г.	22:45:45	39.368° N, 24.957° E	15.0	7.2	Греция
9	28.03.1969 г.	01:48:32	38.515° N, 28.546° E	10.0	6.7	Турция
10	28.03.1970 г.	21:02:26	39.098° N, 29.570° E	25.0	6.9	Турция
11	08.04.1970 г.	13:50:29	38.304° N, 22.682° E	20.0	6.3	Греция
12	17.09.1972 г.	14:07:14	38.347° N, 20.307° E	15.0	6.5	Греция
13	24.02.1981 г.	20:53:38	38.222° N, 22.934° E	33.0	6.7	Греция
14	04.03.1981 г.	21:58:05	38.209° N, 23.288° E	28.5	6.4	Греция
15	19.12.1981 г.	14:10:50	39.243° N, 25.227° E	10.0	7.2	Греция
16	27.12.1981 г.	17:39:13	38.938° N, 24.905° E	13.3	6.5	Греция
17	18.01.1982 г.	19:27:24	40.004° N, 24.319° E	10.0	6.8	Греция
18	17.01.1983 г.	12:41:29	38.026° N, 20.228° E	14.3	7.0	Греция
19	23.03.1983 г.	23:51:06	38.294° N, 20.262° E	19.1	6.4	Греция
20	06.08.1983 г.	15:43:51	40.142° N, 24.766° E	2.4	6.8	Греция
21	30.08.1986 г.	21:28:35	45.547° N, 26.316° E	132.3	7.2	Румыния
22	13.05.1995 г.	08:47:12	40.149° N, 21.695° E	14.0	6.6	Греция
23	15.06.1995 г.	00:15:48	38.401° N, 22.283° E	14.2	6.5	Греция
24	18.11.1997 г.	13:07:41	37.570° N, 20.656° E	33.0	6.6	Греция
25	17.08.1999 г.	00:01:39	40.748° N, 29.864° E	17.0	7.6	Турция
26	12.11.1999 г.	16:57:19	40.758° N, 31.161° E	10.0	7.2	Турция
27	26.07.2001 г.	00:21:36	39.059° N, 24.244° E	10.0	6.5	Греция
28	22.01.2002 г.	04:53:52	35.790° N, 26.617° E	88.0	6.2	Греция
29	03.02.2002 г.	07:11:28	38.573° N, 31.271° E	5.0	6.5	Турция
30	14.08.2003 г.	05:14:54	39.160° N, 20.605° E	10.0	6.3	Греция
31	08.01.2006 г.	11:34:55	36.311° N, 23.212° E	66.0	6.7	Греция
32	06.01.2008 г.	05:14:20	37.216° N, 22.693° E	75.0	6.2	Греция

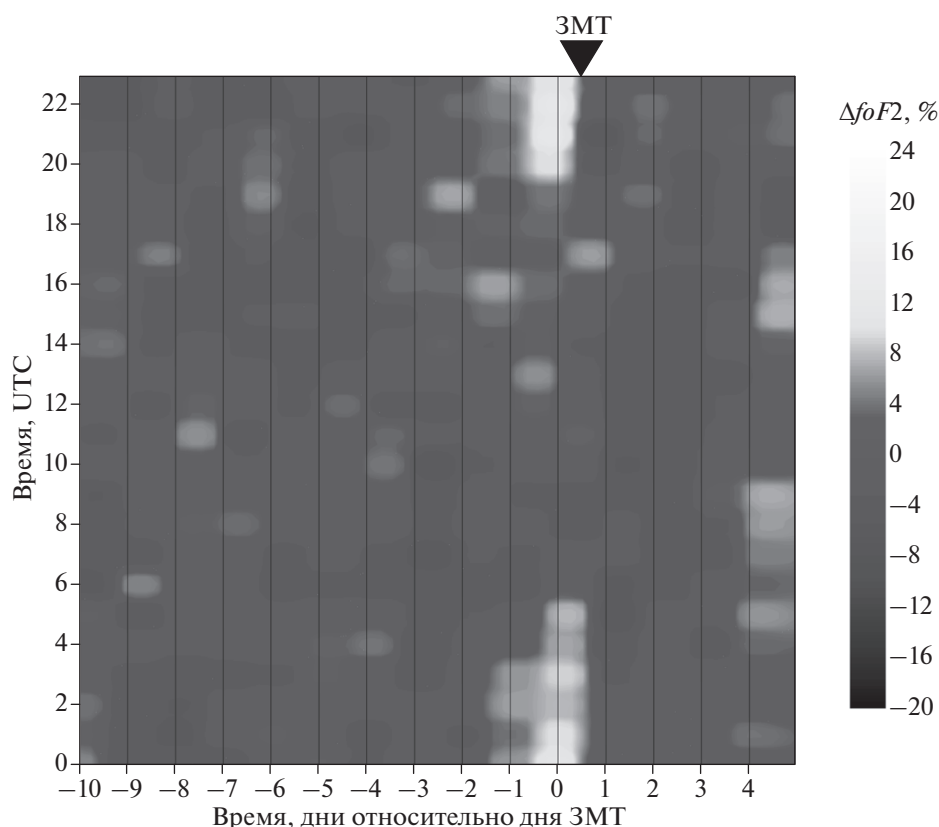


Рис. 4. Маска ионосферного предвестника землетрясения (ЗМТ) по данным о критической частоте слоя $F2$ ионосферы станций вертикального зондирования в городах София и Афины для землетрясений в регионе Балканского п-ова с магнитудой $M \geq 6.2$ за период с 06.10.1964 г. по 06.01.2008 г.: ось абсцисс — сутки до и после момента землетрясения, нулевые сутки — сутки, в которые произошло землетрясение; ось ординат — время от 00:00 до 23:00 UTC; тоновая шкала — значения $\Delta foF2$, %.

рис. 8 и рис. 9. Перед указанными землетрясениями (как за сутки, так и за несколько суток до событий) также наблюдались положительные аномалии электронной концентрации в ночные часы.

В дополнение нами был произведен расчет значений вертикального ПЭС приемника medi с тридцатисекундным разрешением и обработка этих значений для землетрясений в Италии с магнитудой $M \geq 6.0$ за период 1997–2016 гг. (см. табл. 7) описанным в работе [Пулинец и Давиденко, 2018] методом для построения маски предвестника. Эпицентры указанных землетрясений находились в радиусе 300 км относительно приемника medi. Географические координаты приемника medi (44.52° N, 11.647° E). Маска ионосферного предвестника по данным вертикального ПЭС приемника medi для землетрясений в Италии с магнитудой $M \geq 6.0$ за период 1997–2016 гг. представлена на рис. 10.

Как видно из рис. 10, перед рассмотренными сильными землетрясениями отмечается увеличение ПЭС в ночные часы в течение 6 дней до землетрясений.

Убедиться в том, что наблюдаемые ночные аномалии имеют локальный характер, можно с помощью разностных глобальных карт ПЭС. Глобальные ионосферные карты GIM (Global Ionospheric Maps) распространяются International GNSS Service в формате IONEX (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>). Данные IGS в формате IONEX представляют собой матрицу, элементами которой являются значения ПЭС. Разрешение матрицы составляет 2.5 град по широте и 5 град по долготе. Значения ПЭС рассчитываются IGS каждые 2 ч. Вычисление и построение разностных карт глобального ПЭС $\Delta \text{TEC}_{\text{GIM}}$, представляющих собой отклонение текущих значений ПЭС TEC_{GIM} от фоновых TEC_{GIMA} , выполнялось нами в среде MATLAB. Расчет разностных карт производился нами по формуле: $\Delta \text{TEC}_{\text{GIM}} = \text{TEC}_{\text{GIM}} - \text{TEC}_{\text{GIMA}}$, где в качестве фоновых значений использовались средние значения ПЭС, рассчитанные по 15 предшествующим числовым значениям для того же момента времени. Отклонение от фоновых значений выражалось нами в единицах ПЭС (TECU).

Таблица 4. Список землетрясений с магнитудой $M \geq 5.4$, эпицентры которых находились в радиусе 300 км севернее ст. Рим

№	Дата	Время (UTC)	Географические координаты	Глубина (h , км)	Магнитуда (M)	Положение эпицентра
1	29.04.1984 г.	05:03:00	43.26° N, 12.558° E	11.9	5.7	Апеннинский п-ов, Италия, Умбрия
2	26.09.1997 г.	09:40:26	43.084° N, 12.812° E	10.0	6.0	Апеннинский п-ов, Италия, Умбрия
3	26.03.1998 г.	16:26:11	43.255° N, 12.969° E	10.0	5.4	Апеннинский п-ов, Италия, Марке
4	29.03.2003 г.	17:42:15	43.109° N, 15.464° E	10.0	5.5	Адриатическое море
5	06.04.2009 г.	01:32:39	42.334° N, 13.334° E	8.8	6.3	Апеннинский п-ов, Италия, Абруццо
6	21.07.2013 г.	01:32:24	43.501° N, 13.668° E	8.4	5.4	Адриатическое море
7	24.08.2016 г.	01:36:32	42.723° N, 13.188° E	4.4	6.2	Апеннинский п-ов, Италия, Лацио
8	26.10.2016 г.	19:18:08	42.956° N, 13.067° E	10.0	6.1	Апеннинский п-ов, Италия, Марке
9	18.01.2017 г.	10:14:10	42.601° N, 13.227° E	7.0	5.7	Апеннинский п-ов, Италия, Лацио

Таблица 5. Список землетрясений с магнитудой $M \geq 5.4$, эпицентры которых находились в радиусе 300 км южнее ст. Рим

№	Дата	Время (UTC)	Географические координаты	Глубина (h , км)	Магнитуда (M)	Положение эпицентра
1	21.08.1962 г.	18:19:33	41.175° N, 15.009° E	20.0	6.2	Апеннинский п-ов, Италия, Кампания
2	23.11.1980 г.	18:34:53	40.914° N, 15.366° E	10.0	6.9	Апеннинский п-ов, Италия, Кампания
3	07.05.1984 г.	17:49:41	41.765° N, 13.898° E	10.0	5.9	Апеннинский п-ов, Италия, Абруццо
4	05.05.1990 г.	07:21:29	40.775° N, 15.766° E	10.0	5.8	Апеннинский п-ов, Италия, Базиликата
5	31.10.2002 г.	10:32:58	41.789° N, 14.872° E	10.0	5.9	Апеннинский п-ов, Италия, Молизе

Таблица 6. Список землетрясений с магнитудой $M \geq 5.5$, эпицентры которых находились в дальней зоне на расстоянии от 300 до 500 км южнее ст. Рим

№	Дата	Время (UTC)	Географические координаты	Глубина (h , км)	Магнитуда (M)	Положение эпицентра
1	15.01.1968 г.	02:01:06	37.702° N, 13.033° E	10.0	6.4	О-в Сицилия, Италия
2	16.01.1979 г.	19:27:10	38.262° N, 15.005° E	11.0	5.5	Тирренское море
3	28.05.1980 г.	19:51:19	38.482° N, 14.252° E	14.0	5.7	Тирренское море
4	18.05.1998 г.	17:19:04	39.253° N, 15.108° E	279.9	5.5	Тирренское море
5	09.09.1998 г.	11:27:59	40.035° N, 15.98° E	10.0	5.6	Апеннинский п-ов, Италия, Базиликата
6	06.09.2002 г.	01:21:28	38.381° N, 13.701° E	5.0	6.0	Тирренское море
7	05.05.2004 г.	13:39:43	38.507° N, 14.814° E	228.9	5.5	Тирренское море

Таблица 7. Список землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$, эпицентры которых находились в радиусе 300 км относительно приемника medi

№	Дата	Время (UTC)	Географические координаты	Глубина (h , км)	Магнитуда (M)	Положение эпицентра
1	26.09.1997 г.	09:40:26	43.084° N, 12.812° E	10.0	6.0	Апеннинский п-ов, Италия, Умбрия
2	06.04.2009 г.	01:32:39	42.334° N, 13.334° E	8.8	6.3	Апеннинский п-ов, Италия, Абруццо
3	20.05.2012 г.	02:03:52	44.890° N, 11.230° E	6.3	6.0	Апеннинский п-ов, Италия, Эмилия-Романья
4	24.08.2016 г.	01:36:32	42.723° N, 13.188° E	4.4	6.2	Апеннинский п-ов, Италия, Лацио
5	26.10.2016 г.	19:18:08	42.956° N, 13.067° E	10.0	6.1	Апеннинский п-ов, Италия, Марке

В качестве примера регистрации ночных положительных ионосферных возмущений перед землетрясениями на рис. 11 представлены локализованные положительные аномалии, зарегистрированные перед землетрясением: 1) с магнитудой $M6.9$, имевшим место в Греции 24.05.2014 г. в 09:25:02 UTC (см. рис. 11 – фрагмент *a*); 2) с маг-

нитудой $M6.1$, имевшим место в Италии 26.10.2016 г. в 19:18:08 UTC (см. рис. 11 – фрагмент *b*). Эпицентры указанных землетрясений на рис. 11 обозначены белыми крестиками.

Положительная локализованная аномалия перед землетрясением с магнитудой $M6.9$ в Греции наблюдалась преимущественно в одно и то же

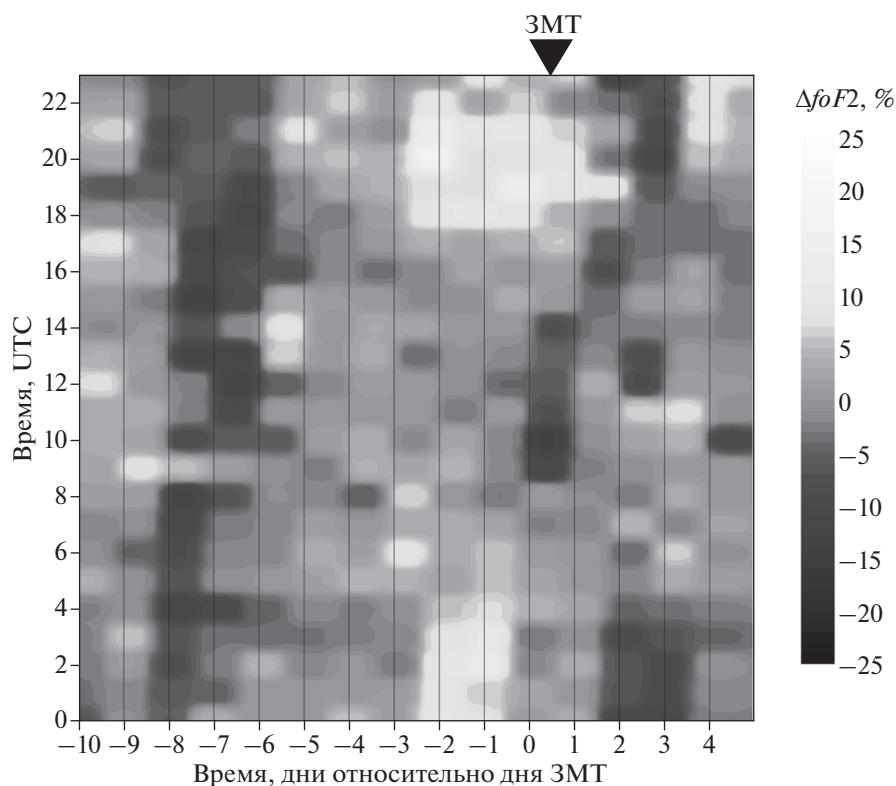


Рис. 5. Маска ионосферного предвестника землетрясения (ЗМТ) по данным о критической частоте слоя $F2$ ионосферы станции вертикального зондирования в г. Рим для землетрясений с магнитудой $M \geq 5.4$, эпицентры которых находились в радиусе 300 км севернее ст. Рим: ось абсцисс – сутки до и после момента землетрясения, нулевые сутки – сутки, в которые произошло землетрясение; ось ординат – время от 00:00 до 23:00 UTC; тоновая шкала – значения $\Delta f_o F2$, %.

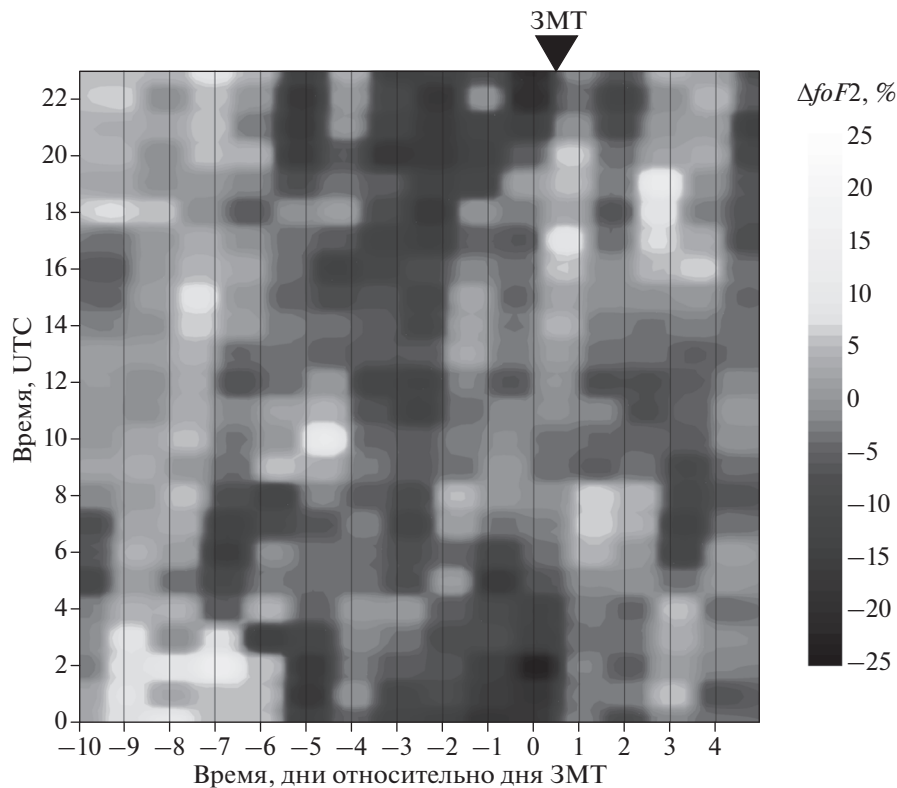


Рис. 6. Маска ионосферного предвестника землетрясения (ЗМТ) по данным о критической частоте слоя F_2 ионосферы станции вертикального зондирования в г. Рим для землетрясений с магнитудой $M \geq 5.4$, эпицентры которых находились в радиусе 300 км южнее ст. Рим: ось абсцисс — сутки до и после момента землетрясения, нулевые сутки — сутки, в которые произошло землетрясение; ось ординат — время от 00:00 до 23:00 UTC; тоновая шкала — значения ΔfoF_2 , %.

время, начиная с 22.05.2014 г.: с 18 ч UTC 22.05.2014 г. до 4 ч UTC 23.05.2014 г., с 20 ч UTC 23.05.2014 г. до 0 ч UTC 24.05.2014 г.

Положительная локализованная аномалия перед землетрясением с магнитудой $M_{6.1}$ в Италии наблюдалась преимущественно в одно и то же время, начиная с 23.10.2016 г.: с 20 ч UTC 23.10.2016 г. до 2 ч UTC 24.10.2016 г., с 20 ч UTC 24.10.2016 г. до 4 ч UTC 25.10.2016 г., с 18 ч UTC 25.10.2016 г. до 2 ч UTC 26.10.2016 г.

Различие в поведении ионосферных предвестников в локальном времени для землетрясений в Центральной Италии (в радиусе 300 км севернее г. Рим) и Южной Италии (в радиусе 300 км южнее г. Рим) подтверждает вывод, полученный в прежних работах, что морфологические особенности ионосферных аномалий перед землетрясениями обуславливаются местными условиями и не могут быть идентичными для всех регионов планеты. Однако резкие качественные изменения на незначительно удаленных территориях заставляют обратить внимание на различие тектонических структур разных регионов Апеннинского п-ова.

5. СЕЙСМОТЕКТОНИКА АПЕННИНСКОГО П-ОВА КАК ПРИЧИНА РАЗЛИЧИЯ МОРФОЛОГИИ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ЮЖНОЙ ИТАЛИИ

В работах [Meletti et al., 2000; Chiarabba et al., 2005] дается современное понимание тектонических особенностей Апеннинского п-ова и его сейсмической активности. На рис. 12а представлена схема векторов движения Африканской плиты относительно Европы и вращения Адрии относительно Европы [Meletti et al., 2000]. Отчетливо видно, что Северная Апеннинская дуга представляет собой отдельный блок, отделенный от Южных Апеннин. При этом граница тектонических плит (отмечена треугольниками) в северной части Апеннин проходит по Адриатическому морю рядом с областями Центральной Италии, а в южной части Апеннин пролегает по суше через области Южной Италии. Можно предположить, что условия выделения радона, играющего существенную роль в генерации ионосферных предвестников, различны для этих структур вдоль границы тектонических плит. Кроме того, глубина сейсмогенного слоя в южном сегменте меньше, чем в северном (за исключением региона Сици-

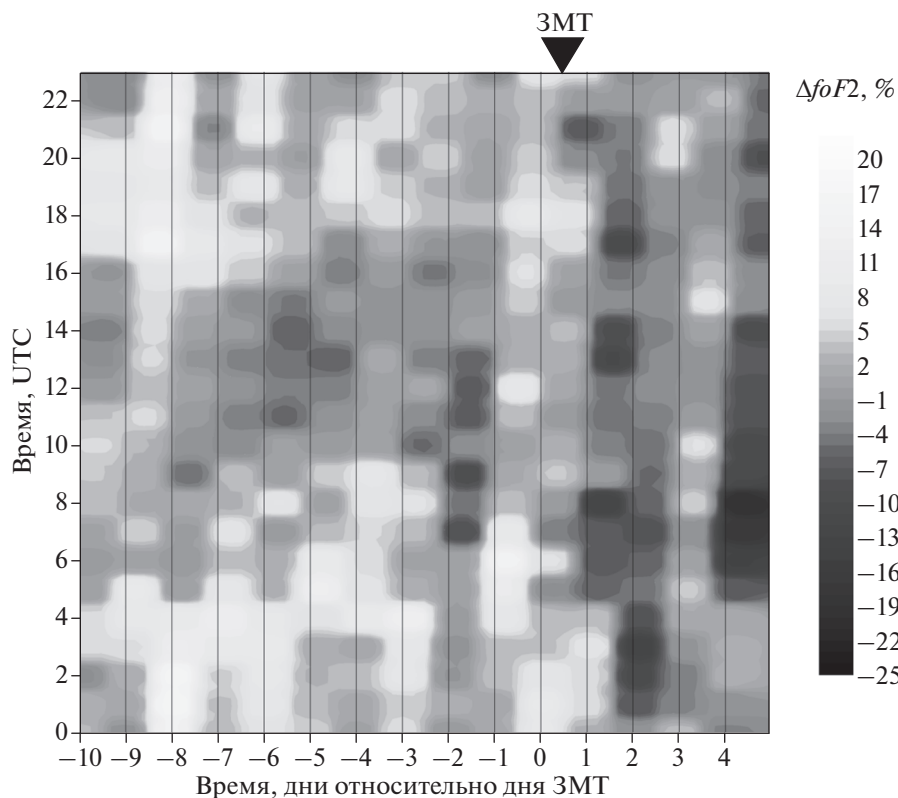


Рис. 7. Маска ионосферного предвестника землетрясения (ЗМТ) по данным о критической частоте слоя $F2$ ионосферы станции вертикального зондирования в г. Рим для землетрясений с магнитудой $M \geq 5.5$, эпицентры которых находились в дальней зоне на расстоянии от 300 до 500 км южнее ст. Рим: ось абсцисс — сутки до и после момента землетрясения, нулевые сутки — сутки, в которые произошло землетрясение; ось ординат — время от 00:00 до 23:00 UTC; тоновая шкала — значения $\Delta foF2$, %.

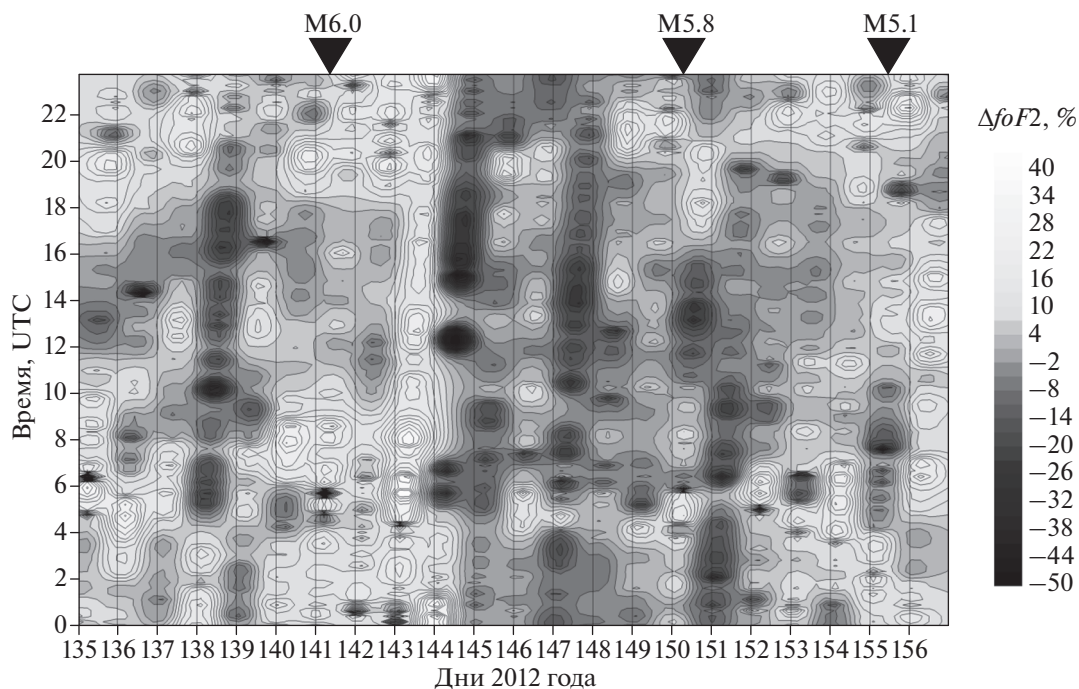


Рис. 8. Результаты обработки данных о критической частоте слоя $F2$ ионосферы станции вертикального зондирования в г. Рим для сейсмических событий магнитудой $M6.0$, $M5.8$ и $M5.1$, произошедших на севере Италии в области Эмилия-Романья соответственно 20.05.2012 г. (141 день года), 29.05.2012 г. (150 день года) и 03.06.2012 г. (155 день года): ось абсцисс — дни 2012 г.; ось ординат — время от 00:00 до 23:45 UTC; тоновая шкала — значения $\Delta foF2$, %.

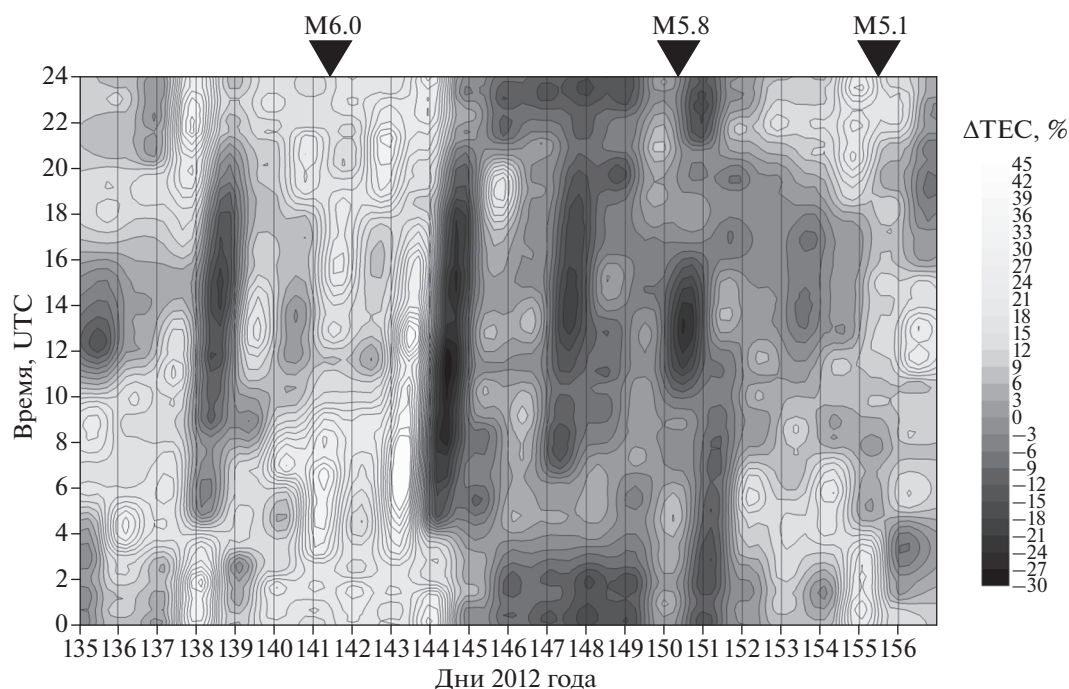


Рис. 9. Результаты обработки данных вертикального ПЭС GPS-приемника medi для сейсмических событий магнитудой $M6.0$, $M5.8$ и $M5.1$, произошедших на севере Италии в области Эмилия-Романья соответственно 20.05.2012 г. (141 день года), 29.05.2012 г. (150 день года) и 03.06.2012 г. (155 день года): ось абсцисс — дни 2012 г.; ось ординат — время от 00:00:00 до 23:59:30 UTC; тоновая шкала — значения $\Delta\text{ТЕС}$, %.

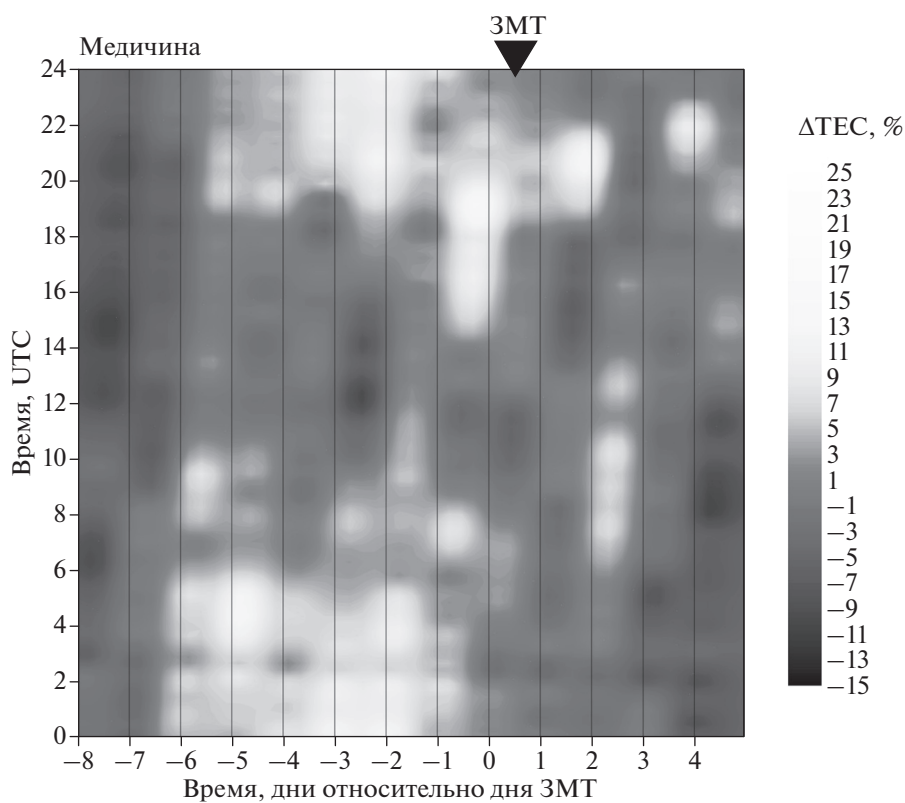


Рис. 10. Маска ионосферного предвестника землетрясения (ЗМТ) по данным вертикального ПЭС приемника medi для землетрясений в Италии с магнитудой $M \geq 6.0$ за период 1997–2016 гг., эпицентры которых находились в радиусе 300 км относительно приемника medi: ось абсцисс — сутки до и после момента землетрясения, нулевые сутки — сутки, в которые произошло землетрясение; ось ординат — время от 00:00:00 до 23:59:30 UTC; тоновая шкала — значения $\Delta\text{ТЕС}$, %.

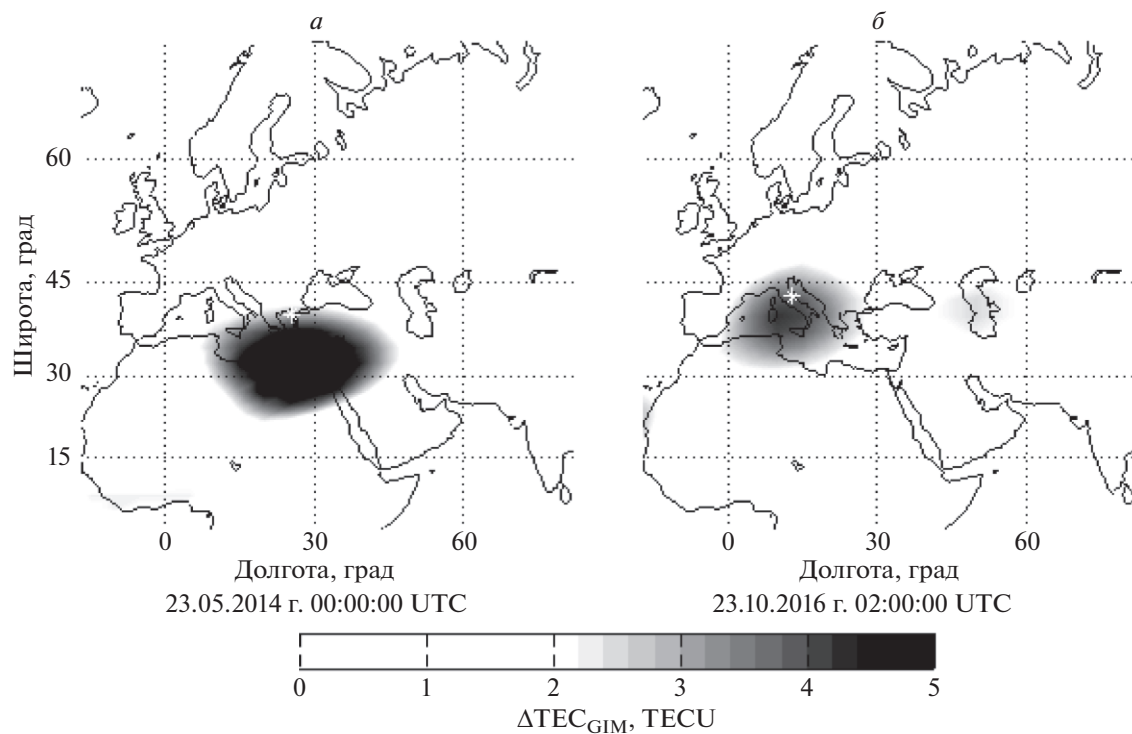


Рис. 11. Пример регистрации ночных положительных ионосферных возмущений перед землетрясениями. *а* — локализованная положительная аномалия, зарегистрированная перед землетрясением с магнитудой $M6.9$, имевшим место в Греции 24.05.2014 г. в 09:25:02 UTC. *б* — локализованная положительная аномалия, зарегистрированная перед землетрясением с магнитудой $M6.1$, имевшим место в Италии 26.10.2016 г. в 19:18:08 UTC. Эпицентры указанных землетрясений обозначены белыми крестиками.

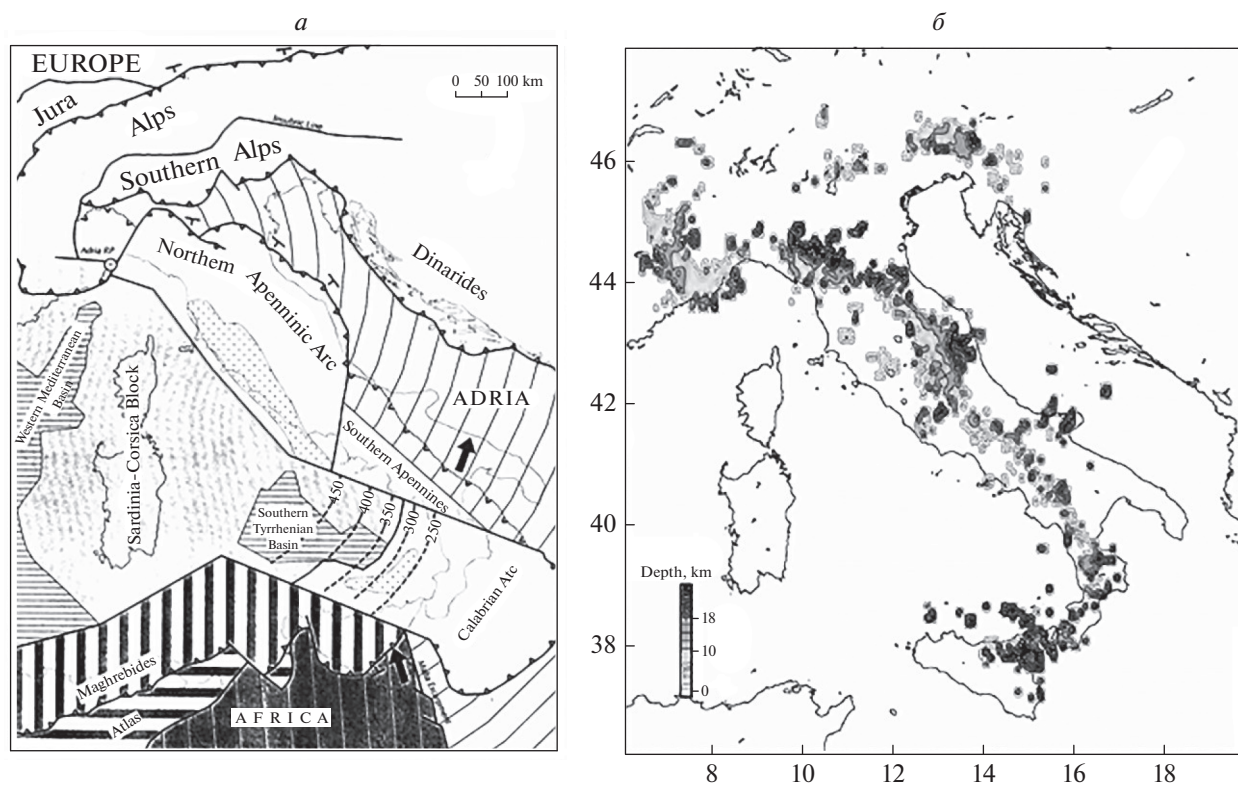


Рис. 12. Современное понимание тектонических особенностей Апеннинского п-ова и его сейсмической активности.

лии), что можно видеть из рис. 12б [Chiarabba et al., 2005], что также приводит к различию в уровне активности радона в Центральной и Южной Италии. Таким образом, мы можем сделать вывод, что различия в тектонической структуре и динамике тектонических блоков, а также сейсмической активности Центральной и Южной Италии являются причиной различий, наблюдаемых в морфологических признаках ионосферных предвестников над этими регионами.

6. ВЫВОДЫ

1. В результате обработки и анализа данных о критической частоте слоя $F2$ ионосферы, зарегистрированных станциями вертикального зондирования в городах София (Болгария) и Афины (Греция) для временных интервалов подготовки 19 землетрясений в Греции с магнитудой $M \geq 6.2$ за период с 31.03.1965 г. по 06.01.2008 г. разработан обобщенный визуальный образ (маска) ионосферного предвестника землетрясения. Установлено, что основной характерной особенностью ионосферного предвестника является увеличение критической частоты слоя $F2$ ионосферы, и, соответственно, электронной концентрации на высоте главного максимума ионосферы, проявляющееся в определенный момент времени. Возмущение возникает с 20 ч UTC за сутки до землетрясения и продолжается практически 9 ч до 5 ч UTC на долготе станций, что соответствует временному периоду с 22 до 7 ч местного времени.

2. В результате обработки и анализа данных вертикального ПЭС ионосферы, зарегистрированных GPS-приемником poa1 (г. Афины) и GPS/ГЛОНАСС-приемником tus2 (о-в Крит) для временных интервалов подготовки 19 землетрясений в Греции с магнитудой $M \geq 6.0$ за период 2006–2018 гг. разработаны маски ионосферного предвестника землетрясения. Установлено, что основной характерной особенностью ионосферного предвестника является увеличение ПЭС, проявляющееся в определенный момент времени. Возмущение возникает с 16 ч UTC за сутки до землетрясения и продолжается практически 12 ч до 4 ч UTC на долготе приемников, что соответствует временному периоду с 18 до 6 ч местного времени.

3. В результате обработки и анализа данных о критической частоте слоя $F2$ ионосферы, зарегистрированных станциями вертикального зондирования в городах София (Болгария) и Афины (Греция) для временных интервалов подготовки 32 землетрясений в регионе Балканского п-ова с магнитудой $M \geq 6.2$ за период с 06.10.1964 г. по 06.01.2008 г. разработан обобщенный визуальный образ (маска) ионосферного предвестника землетрясения. Установлено, что маска ионосферного предвестника землетрясения для Балканского п-ова

практически полностью повторяет ранее разработанные нами маски ионосферного предвестника для сильных землетрясений в Греции.

4. В результате обработки и анализа данных о критической частоте слоя $F2$ ионосферы, зарегистрированных станцией вертикального зондирования в г. Рим (Италия) для временных интервалов подготовки землетрясений в регионе Апеннинского п-ова с магнитудой $M \geq 5.4$ за период 1962–2017 гг. установлено следующее:

1) перед землетрясениями, эпицентры которых находились в радиусе 300 км севернее ст. Рим, наблюдались положительные аномалии электронной концентрации, проявляющиеся в определенный момент времени в течение нескольких суток до землетрясений. Возмущение возникает с 18 ч UTC и продолжается практически 10 ч до 4 ч UTC на долготе ст. Рим, что соответствует временному периоду с 19 до 5 ч местного времени;

2) перед землетрясениями, эпицентры которых находились в радиусе 300 км южнее ст. Рим, наблюдались отрицательные аномалии электронной концентрации, проявляющиеся в определенный момент времени в течение нескольких суток до землетрясений. Возмущение возникает с 18 ч UTC и продолжается практически 10 ч до 4 ч UTC на долготе ст. Рим, что соответствует временному периоду с 19 до 5 ч местного времени.

5. В результате обработки и анализа данных о критической частоте слоя $F2$ ионосферы, зарегистрированных станцией вертикального зондирования в г. Рим (Италия) для временных интервалов подготовки землетрясений с магнитудой $M \geq 5.5$ за период 1968–2004 гг., эпицентры которых находились на расстоянии от 300 до 500 км южнее ст. Рим, установлено следующее: перед землетрясениями наблюдались положительные аномалии электронной концентрации, проявляющиеся в определенный момент времени в течение 9 сут до землетрясений. Возмущение возникает с 18 ч UTC и продолжается практически 10 ч до 4 ч UTC на долготе ст. Рим, что соответствует временному периоду с 19 до 5 ч местного времени.

6. Малое количество сильных землетрясений на расстоянии от 300 до 500 км севернее ст. Рим не позволило нам создать маску ионосферного предвестника для этих землетрясений. Однако, исходя из анализа вариаций значений критической частоты слоя $F2$ ионосферы, зарегистрированных ст. Рим для сейсмических событий в мае–июне 2012 г. в области Эмилия-Романья можно сделать следующий вывод: характерные особенности ионосферного предвестника для землетрясений на расстоянии от 300 до 500 км севернее ст. Рим идентичны ранее полученным результатам для землетрясений в радиусе 300 км севернее ст. Рим.

7. Аномальные возмущения электронной концентрации на высоте главного максимума ионосферы и ПЭС, предшествующие землетрясениям, носят локальный характер, что подтверждается картированием ионосферы: расчетом и построением глобальных разностных карт ПЭС по данным IGS в формате IONEX.

8. В каждом регионе изменчивость ионосферы, связанная с подготовкой сильного землетрясения, имеет детерминированный характер, что облегчает ее моделирование и автоматизацию идентификации ионосферных предвестников в приложениях, связанных с краткосрочным прогнозом землетрясений.

9. Различие морфологических признаков ионосферных предвестников для землетрясений в Центральной и Южной Италии, по-видимому, обуславливается различной сейсмотектоникой этих регионов.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ) проект № 18-12-00441.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Золотов О.В. Эффекты землетрясений в вариациях полного электронного содержания ионосферы. Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. Мурманск. МГТУ. 20 с. 2015.
- Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Синергетика. Нелинейность времени и ландшафты коэволюции // М.: КомКнига. 272 с. 2007.
- Пулинец С.А., Легенька А.Д., Зеленова Т.И. Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя F от местного времени // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 38. № 3. С. 188–193. 1998.
- Пулинец С.А., Давиденко Д.В. Положительная ночная аномалия электронной концентрации в ионосфере как краткосрочный предвестник землетрясений и возможный физический механизм ее формирования // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 4. С. 579–591. 2018.
- Пулинец С.А., Боярчук К.А., Ломоносов А.М., Хегай В.В., Лью И.Я. Ионосферные предвестники землетрясений: предварительный анализ критических частот f_oF_2 на наземной станции вертикального зондирования ионосферы Чунг-Ли (остров Тайвань) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 42. № 4. С. 535–540. 2002.
- Chiarabba C., Jovane L., DiStefano R. A new view of Italian seismicity using 20 years of instrumental recordings // Tectonophysics. V. 395. P. 251–268. 2005.
- Hayakawa M. VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes // Sensors. V. 7. P. 1141–1158. 2007.
- Kon S., Nishihashi M., Hattori K. Ionospheric anomalies possibly associated with $M \geq 6.0$ earthquakes in the Japan area during 1998–2010: case studies and statistical study // J. Asian Earth Sci. V. 41. P. 410–420. 2011.
- Le H., Liu J.Y., Liu L. A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 $M_{6.0+}$ earthquakes during 2002–2010 // J. Geophys. Res. V. 116. N A02303. 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JA015781>
- Liu J.Y., Chen Y.I., Jhuang H.K., Lin Y.H. Ionospheric f_oF_2 and TEC anomalous days associated with $M \geq 5.0$ earthquakes in Taiwan during 1997–1999 // Terr. Atmos. Ocean. Sci. V. 15. № 3. P. 371–383. 2004.
- Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S. A statistical investigation of pre-earthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. V. 111. A05304. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JA011333>
- Meletti C., Patacca E., Scandone P. Construction of a seismotectonic model: the case of Italy // Pure Appl. Geophys. V. 157. P. 11–35. 2000.
- Parrot M., Li M. DEMETER results related to seismic activity // The Radio Science Bulletin. N 355. P. 18–25. 2015.
- Pulnits S.A. Seismic activity as a source of the ionospheric variability // Adv. Space Res. V. 22. P. 903–906. 1998.
- Pulnits S.A., Legen'ka A.D., Gaivoronskaya T.V., Depuev V.Kh. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 65. № 16–18. P. 1337–1347. 2003.