

УДК 551.510.535

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНОГО δ -ПАРАМЕТРА БАРБЬЕ ПРИ ПОИСКЕ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2023 г. С. А. Пулинец¹, *, В. В. Хегай², **, А. Д. Легенька², Л. П. Корсунова²¹Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

*e-mail: pulse@rssi.ru

**e-mail: hegai@izmiran.ru

Поступила в редакцию 03.12.2022 г.

После доработки 19.01.2023 г.

Принята к публикации 26.01.2023 г.

Проведено исследование временных вариаций комплексного относительного δ -параметра Барбье (δ_{Barbier}) для оценки его эффективности при поиске ионосферных предвестников землетрясений. С этой целью было рассмотрено его поведение (по данным пятнадцатиминутных измерений ионосферных параметров) перед двумя сильными землетрясениями, для которых ионосферные предвестники землетрясений ранее уже были обнаружены. Первое землетрясение (с магнитудой $M = 6.3$) произошло 06.04.2009 г. (г. Л'Аквила, Италия) на эпицентральной расстоянии ~ 93 км от наземной станции вертикального зондирования ионосферы Рим, а второе (с магнитудой $M = 7.2$) случилось 30.01.2016 г., при этом его эпицентр оказался в ~ 117 км от наземной станции вертикального зондирования ионосферы, расположенной на территории комплексной геофизической обсерватории Паратунка, Камчатка. В обоих случаях в поведении параметра δ_{Barbier} были выделены специфические особенности, совпадающие по времени с ранее обнаруженными ионосферными предвестниками этих землетрясений. Это позволяет сделать вывод об успешной верификации эффективности использования параметра δ_{Barbier} при поиске ионосферных предвестников землетрясений.

DOI: 10.31857/S0016794023600102, EDN: PKPQUY

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [Пулинец и др., 2022] было дано определение нового комплексного относительного δ -параметра Барбье (δ_{Barbier}), полученного на основании полуэмпирической формулы Барбье (см. формулу (3) работы [Barbier and Glaume, 1962]). Последняя связывает количество квантов излучения атмосферы на длине волны 630 нм (Q) в *неосвещенные часы* (на интервале от 20 до 04 ч LT) с измеряемыми непосредственно (см. [Руководство ..., 1977]) двумя ионосферными параметрами области F ионосферы — $foF2$ (критическая частота слоя $F2$ ионосферы, МГц), $h'F$ (минимальная действующая высота следа отражений обыкновенной волны от взятой в целом области F ионосферы, км; согласно определению, данному в [Руководство ..., 1977], § 1.3., п. 1.32, стр. 33) и *трем*я константами, определенными для конкретной наземной станции вертикального зондирования ионосферы (НСВЗИ) и соответствующего временного периода. Величина же δ_{Barbier} определяется только двумя измеряемыми ионосферными параметрами $foF2$ и $h'F$ и *одной* константой для любой

конкретной НСВЗИ — характерным масштабом H (в км). Величина H рассчитывается для любой конкретной НСВЗИ, в соответствии с ее географическим положением и моментом времени. Расчет проводится с помощью хорошо разработанной и современной модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00 (<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>) по набору опорных дней (подробно см. [Пулинец и др., 2022]). Для этого в диапазоне высот от 200 до 400 км полученные с помощью этой модели нейтральной атмосферы высотные профили концентрации атомарного кислорода $[O]$ и плотности нейтральной атмосферы $[p]$ (для *нулевого часа* LT нужных суток) аппроксимируются экспоненциальными функциями, а необходимое значение H вычисляется как среднее величин $H_{[O]}$ и $H_{[p]}$, которые являются характерными масштабами экспоненциального изменения с высотой концентраций атомарного кислорода $[O]$ и плотности $[p]$ в этих аппроксимациях. Таким образом, мы получим с помощью такой процедуры $H = H_{\text{MSIS}} \equiv (H_{[O]} + H_{[p]})/2$. Далее медианное значение H по набору опорных дней используется для дальнейших расчетов δ_{Barbier} .

Математическое выражение для δ_{Barbier} выглядит следующим образом (см. формула (2) в работе [Пулинец и др., 2022])

$$\delta_{\text{Barbier}} \equiv [foF2_{\text{cur}}/foF2_{\text{med}}]^2 \times \exp[(h'F_{\text{med}} - h'F_{\text{cur}})/H] - 1, \quad (1)$$

где нижние индексы “cur” и “med” относятся к текущим значениям соответствующих величин и их медианным значениям по выбранному ансамблю опорных дней.

Определенный таким образом относительный комплексный параметр δ_{Barbier} характеризует изменение оцениваемой по ионосферным данным интенсивности свечения атмосферы на длине волны 630 нм в неосвещенные часы. Если $\delta_{\text{Barbier}} > 0$, то оцениваемая интенсивность свечения выше своего медианного уровня, а если $\delta_{\text{Barbier}} < 0$, то оцениваемая интенсивность свечения ниже этого уровня. Чем меньше величина $h'F_{\text{cur}}$ по сравнению с $h'F_{\text{med}}$, тем больше вероятность того, что оцениваемая интенсивность свечения в линии ОI 630 нм будет превышать свой медианный уровень, так как в выражении (1) их разность определяет фактор с экспоненциальным ростом, что делает этот параметр весьма чувствительным к изменениям $h'F_{\text{cur}}$.

В работе [Пулинец и др., 2022] на основании анализа часовых ионосферных данных НСВЗИ Мауи была показана эффективность использования этого параметра как для анализа ионосферных возмущений магнитосферного происхождения, так и для поиска ионосферных предвестников землетрясения (ИПЗ) на конкретном примере при интерпретации поведения ионосферы перед землетрясением с магнитудой $M = 6.2$ (географические координаты эпицентра 19.36° N; 204.92° E), произошедшим 26.06.1989 г. в окрестности НСВЗИ Мауи (географические координаты 20.8° N, 203.5° E, Гавайские о-ва, эпицентральное расстояние $R_e \cong \cong 220$ км). Именно по данным этой станции ранее в исследовании Barbier et al. [1962] было обнаружено очень хорошее согласие между фотометрическими измерениями ночного свечения [OI] 630 нм и расчетными значениями, полученными с помощью формулы Барбье на основе одновременно измеренных ионосферных параметров $foF2$ и $h'F$. В частности, авторы работы Пулинец и др. [2022] получили, что в течение неосвещенных часов на геомагнитноспокойном фоне (планетарный индекс $Kp \leq 2_+$) 25.06.1989 г., т.е. в день, предшествующий землетрясению, $\delta_{\text{Barbier}} \leq 0$ с 20 ч до 4 ч местного времени. Такое его поведение было объяснено понижением оцениваемой по ионосферным данным интенсивности (по сравнению с медианным уровнем) эмиссии атомарного кислорода $O(^1D)$ в красной линии 630 нм, связанной с диссоциативной рекомбинацией ионов молекул

кислорода O_2^+ на высотах области F в этот период времени. Последнее соответствует длительному уменьшению в ночной период величины основного максимума ионосферной плазмы $NmF2$ над эпицентральной зоной надвигающегося землетрясения с одновременным подъемом слоя (в случае усиления зональной компоненты электрического поля восточного направления проникшим на высоты ионосферы электрическим полем сейсмического происхождения).

Отметим здесь, что НСВЗИ Мауи располагается достаточно близко к геомагнитному экватору $\Phi = 0^\circ$, так как ее геомагнитная широта $\Phi \cong 20.9^\circ$ N. Однако, угол магнитного наклона для нее, который определяет эффективность проникновения квазистатического электрического поля локализованного на поверхности Земли сейсмогенного источника на ионосферные высоты, достаточно велик и $I \cong 38.8^\circ$. Как показано в работах [Denisenko et al., 2018; Хегай, 2020], при прочих равных условиях величина напряженности его горизонтальной компоненты в ионосфере $\sim \sin I$. Это означает, что при движении от более низких геомагнитных широт к более высоким воздействие квазистатического электрического поля сейсмогенной природы на ионосферу будет становиться более эффективным. Более того, согласно работам [Hegai et al., 2015; Denisenko et al., 2018] эффективность проникновения сейсмогенного поля в ионосферу максимальна именно в неосвещенные часы, для которых как раз и физически хорошо определен δ -параметр Барбье. Продолжительность ночных часов по местному времени (LT), по мере движения от более низких географических широт к более высоким, зависит от географической широты станции наблюдения и дня года.

Целью настоящего исследования является верификация эффективности относительного δ -параметра Барбье при поиске ИПЗ на основании данных НСВЗИ, расположенных выше по широте относительно НСВЗИ Мауи, вплоть до верхней границы средних географических широт ($\sim 55^\circ$ N). Для этого были выбраны два случая сильных землетрясений (перед которыми геомагнитная обстановка была спокойной, а ИПЗ ранее уже были обнаружены в других исследованиях) и проведен анализ поведения δ_{Barbier} по данным пятнадцатиминутных измерений ионосферных параметров (в отличие от часовых значений по НСВЗИ Мауи). Первое землетрясение (с магнитудой $M = 6.3$) произошло 06.04.2009 г. (г. Л'Аквила, Италия) на эпицентральном расстоянии ~ 93 км от НСВЗИ Рим, а второе (с магнитудой $M = 7.2$) случилось 30.01.2016 г., при этом его эпицентр располагался в ~ 117 км от НСВЗИ, находящейся на территории комплексной геофизической obs. Паратунка, Камчатка.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде чем начать рассмотрение и анализ конкретных геофизических и ионосферных данных для выбранных землетрясений, сразу же оговорим следующее. Землетрясение 06.04.2009 г. (г. Л'Аквила, Италия) произошло в *апреле* вблизи НСВЗИ Рим (географические координаты 41.8° N , 12.52° E). Продолжительность дня почти до конца *апреля* для этой географической широты совпадает с его продолжительностью в *июне* на широте НСВЗИ Мауи (географические координаты 20.8° N , 203.5° E), данные которой использовались в работах Barbier et al. [1962] и Пулинец и др. [2022], и составляет ~ 12 ч. Для землетрясения, случившегося 30.01.2016 г. в *январе* недалеко от НСВЗИ Паратунка, Камчатка (географические координаты 52.97° N , 158.25° E) продолжительность дня даже меньше и составляет ~ 10 ч. Таким образом, промежутки времени от 20 до 04 ч LT (т.е. по 8 ч, в пределах которых рассматривается далее поведение параметра δ_{Barbier} на обеих НСВЗИ) действительно приходятся на неосвещенные часы.

2.1. Землетрясение 06.04.2009 г., $M = 6.3$ (г. Л'Аквила, Италия)

Землетрясение 6 апреля 2009 г. в 01:32:42.4 UT стало одним из самых разрушительных на территории Италии за последние 40 лет. Магнитуда землетрясения составила $M = 6.3$, а его гипоцентр находился на глубине 8.8 км в пяти километрах от центра г. Л'Аквила, расположенного на расстоянии ~ 95 км северо-восточнее Рима (географические координаты эпицентра землетрясения $\varphi_e = 42.38^\circ \text{ N}$, $\lambda_e = 13.32^\circ \text{ E}$) на эпицентральной расстоянии $R_e \cong 93$ км по дуге большого круга от НСВЗИ Рим. Минимальный радиус зоны подготовки для этого землетрясения на поверхности Земли, в соответствии с оценкой по Добровольскому [Dobrovolsky et al., 1979], $R_D(M = 6.3) \cong 512$ км, и НСВЗИ Рим находится глубоко внутри этой зоны, т. к. $R_e \cong 93$ км $<$ $R_D(M = 6.3) \cong 512$ км. Описанную ситуацию иллюстрирует рис. 1, на котором крупной черной точкой показана НСВЗИ Рим, а треугольной “звездой” отмечен эпицентр землетрясения. Стрелкой показано эпицентральное расстояние (R_e), а величина радиуса Добровольского указана над рисунком.

На рис. 2 приведены изменения основных геофизических параметров, характеризующих общую ситуацию в изучаемый период.

Видно, что в рассматриваемый период не наблюдалось не только магнитных бурь или суббурь, но сколько-либо значимых магнитных возмущений. Величина B_z -компоненты межпланетного магнитного поля не опускается ниже уровня -4 нТл, значения усредненного за час DST -ин-

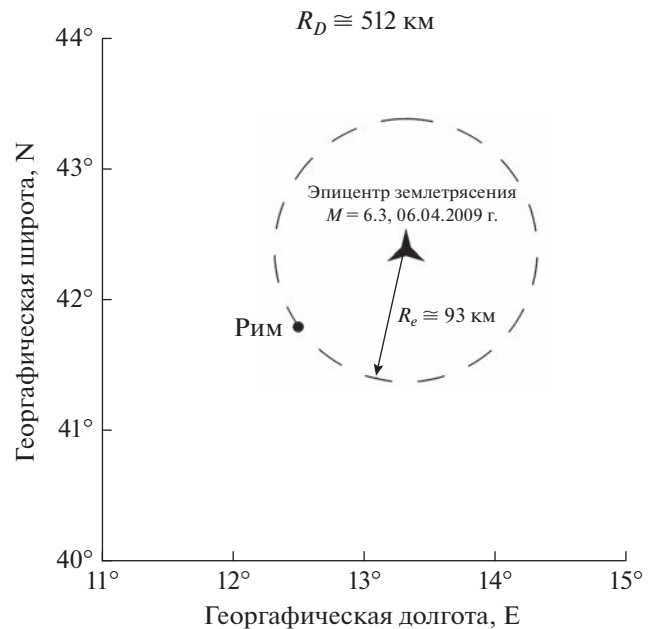


Рис. 1. Географическое положение эпицентра землетрясения с магнитудой $M = 6.3$, произошедшего 06.04.2009 г. (треугольная звезда) около НСВЗИ Рим (крупная черная точка), лежащей в зоне его подготовки на поверхности Земли. Стрелкой показано эпицентральное расстояние (R_e). Радиус Добровольского $R_D \cong 512$ км, указан над рисунком.

декс лежат в интервале от -10 до 11 нТл, AE -индекс не превосходит значения 200 нТл, Kp -индекс не превышает уровня $Kp = 2_0$, а средний за сутки поток солнечного излучения на волне 10.7 см (индекс $F10.7$) колеблется вблизи 70 единиц sfu ($1 sfu = 10^{-22} \text{ Вт/м}^2$), что соответствует низкому уровню солнечной активности. Таким образом, можно ожидать отсутствия в данный период значимых ионосферных возмущений планетарного масштаба.

На рис. 3 представлено поведение (усредненных по 5 точкам прямых 15-минутных измерений) ионосферных параметров $foF2$ и $h'F$ (панели *б* и *в* соответственно, сплошные линии) и комбинированного параметра δ_{Barbier} (панель *а*, сплошная линия), на том же временном интервале, что и на рис. 2 в промежутках 20–04 ч LT, при этом $H = H_{\text{MSIS}} = 38.04 \pm 0.38$ км. Черные прямоугольники под нижней осью абсцисс определяют временной интервал с 18 до 06 ч LT. Вертикальная штриховая линия со стрелкой отмечает момент землетрясения, а штриховые линии на панелях *б* и *в* показывают медианные значения, полученные по ансамблю опорных дней (с 28 марта по 7 апреля 2009 г., 11 дней). Штрихпунктирные линии на панели *а* определяют “полосу” разброса $K_{\pm} = (\delta_{\text{Barbier}})_{\text{MED}} \pm 1.5 IQR$. Здесь IQR (Inter Quartile Range) — разность между верхним и нижним квантилями по выбранному ансамблю дней в ука-

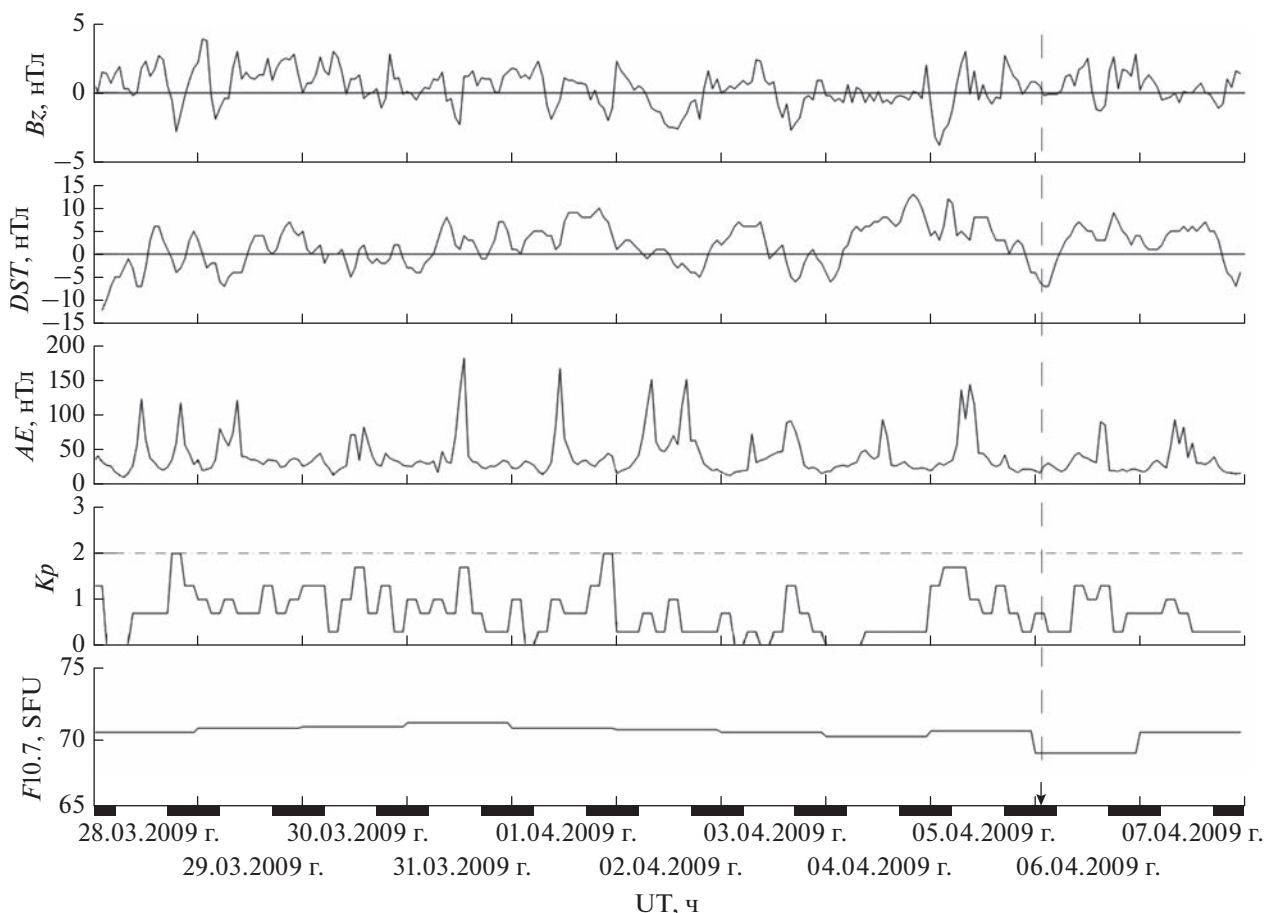


Рис. 2. Временные вариации параметров, характеризующих общую геофизическую ситуацию в период с 28.03.2009 г. по 07.04.2009 г. (одиннадцать дней): B_z -компонента межпланетного магнитного поля (верхняя панель), DST -индекс (вторая панель сверху), AE -индекс (третья панель сверху), K_p -индекс (вторая панель снизу, на которой горизонтальная штрихпунктирная линия отмечает уровень 2_0 , соответствующий геомагнитоспокойным условиям), индекс $F10.7$ (нижняя панель). Черные прямоугольники под осью абсцисс отмечают интервалы местного времени 18–06 ч LT, а вертикальная штриховая линия со стрелкой отмечает момент землетрясения.

занных промежутках 20–04 ч LT. Темной заливкой показан ИПЗ, наблюдавшийся в интервале 21–23 ч UT (22–00 ч LT) 05.04.2009 г.

Укажем здесь, что полоса $K_{\pm} = (\delta_{\text{Barbier}})_{\text{MED}} \pm \pm 1.5IQR$ ограничивает амплитуду вариаций δ_{Barbier} , объясняемую случайными отклонениями, с определенной степенью вероятности. Согласно Klotz and Johnson [1983], в случае нормального распределения “ошибки” значений $\Delta\delta_{\text{Barbier}} = (\delta_{\text{Barbier}})_{\text{cur}} - (\delta_{\text{Barbier}})_{\text{med}}$, величина $1.5IQR$ будет соответствовать примерно двум стандартным отклонениям, и значения $(\delta_{\text{Barbier}})_{\text{cur}}$ под воздействием разных случайных факторов должны колебаться в пределах полосы $K_{\pm}$ с вероятностью 95%. Поэтому значения $(\delta_{\text{Barbier}})_{\text{cur}}$, выходящие за пределы указанной полосы, можно отнести к неслучайным возмущениям.

Из рис. 3 также видно, что существенные ночные возрастания δ_{Barbier} наблюдаются также 2, 3 и 4 апреля, хотя и не выходят за пределы полосы разброса $K_{\pm}$.

Ионосферные предвестники рассмотренного здесь землетрясения 06.04.2009 г., как было сказано ранее во Введении, ранее уже были обнаружены в других исследованиях. Так, в работе [Akhoondzadeh et al., 2010] говорится, что “перед землетрясением в Л’Аквиле наблюдаемые аномалии по данным измерений полного электронного содержания (ПЭС) с помощью спутниковой глобальной системы позиционирования Global Position System (GPS) являются положительными. При этом была обнаружена аномалия порядка 28% в относительных разностях ПЭС в ~00:00 LT, за 1 сут до землетрясения. Это возмущение хорошо согласуется с заметными наблюдаемыми аномалиями электронной концентрации (47%)...”.

Указанные в этой работе конкретные детали очень хорошо подтверждаются приведенным выше рис. 3, так как наблюдается совпадение времени проявления ИПЗ в поведении δ_{Barbier} (указан стрелкой на этом рисунке) с выполнением условий $\{foF2_{\text{cur}} > foF2_{\text{med}}; h'F_{\text{cur}} < h'F_{\text{med}}\}$ на интервале

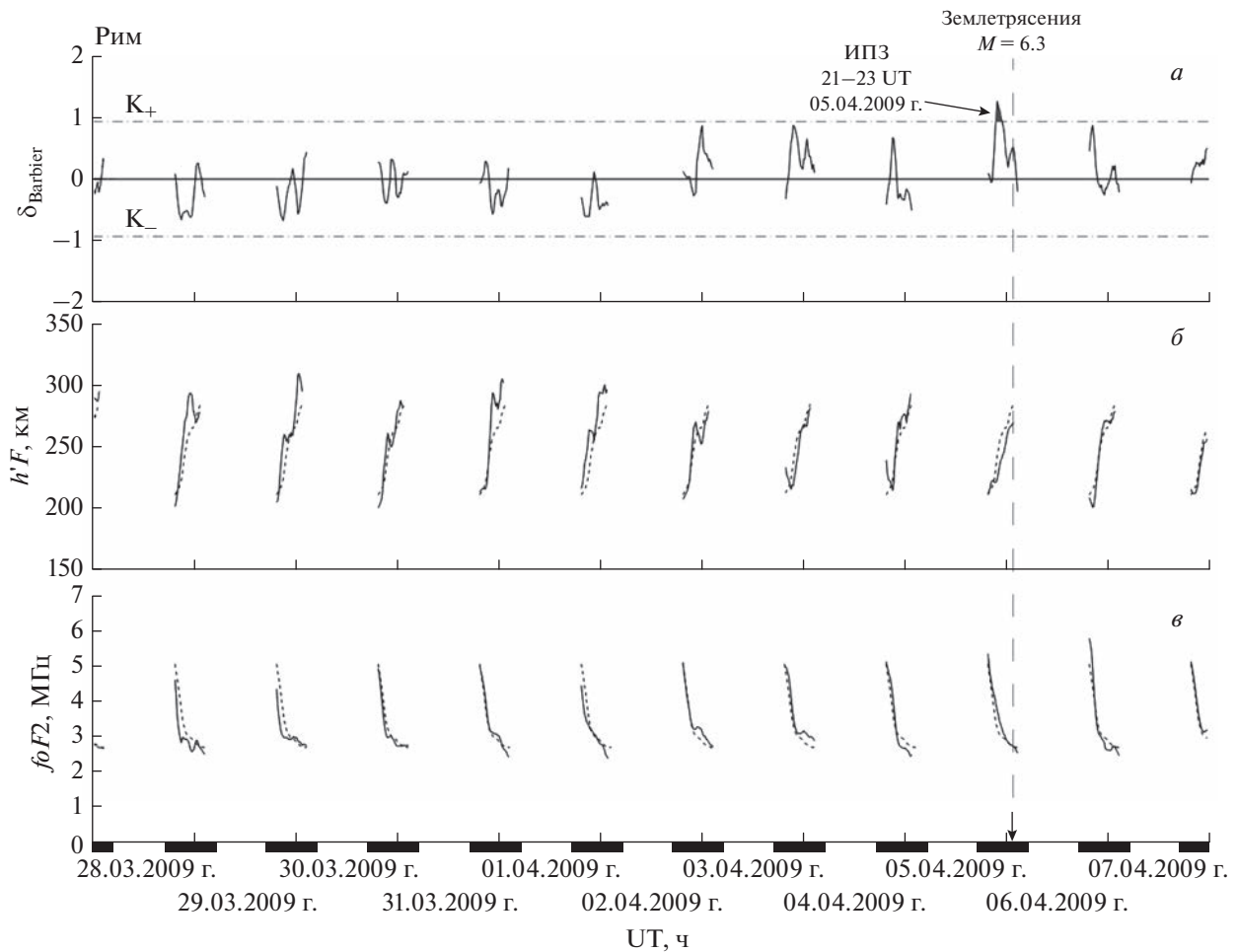


Рис. 3. Поведение ионосферных параметров $foF2$ и $h'F$ (панели b и $в$ соответственно, сплошные линии) и комбинированного параметра δ_{Barbier} (панель a , сплошная линия), на том же временном интервале, что и на рис. 2 в промежутках 20–04 ч LT. Черные прямоугольники под нижней осью абсцисс определяют временной интервал с 18 до 06 ч LT. Вертикальная штриховая линия со стрелкой отмечает момент землетрясения, а штриховые линии на панелях b и $в$ показывают медианные значения, полученные по ансамблю опорных дней. Штрихпунктирные линии на панели a определяют “полосу” разброса $K_{\pm} = (\delta_{\text{Barbier}})_{\text{MED}} \pm 1.5IQR$. Здесь IQR (Inter Quartile Range) – разность между верхним и нижним квартилями по выбранному ансамблю дней (с 28.03.2009 г. по 07.04.2009 г.) в указанных промежутках 20–04 ч LT. Темной заливкой показан ИПЗ, наблюдавшийся в интервале 21–23 ч UT (22–00 ч LT) 05.04.2009 г.

22–00 LT 05.04.2009 г., а в 22:30 LT (согласно данным НСВЗИ Рим) наблюдается максимальное значение величины $100 \times (foF2_{\text{cur}}^2 - foF2_{\text{med}}^2) / foF2_{\text{med}}^2 \cong 47\%$ (как известно, см., например, [Дэвис, 1973] $NmF2 = 1.24 \times 10^4 (foF2)^2$, где $NmF2$ (в см^{-3}) – значение электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя ионосферы, а $foF2$ (в МГц) – величина критической частоты обыкновенной волны).

Наиболее полно и подробно anomальное поведение различных геофизических параметров (не только ионосферных) перед землетрясением в Л’Аквила (мультипараметрический подход) описано в монографиях [Пулинец и др., 2014; Pulinet and Ouzounov, 2018]. На рис. 1.12 (вторая панель сверху) монографии Пулинец и др. [2014] показаны вариации вертикального ПЭС (разница между

мгновенными значениями вертикального ПЭС и текущей медианой, в %) по данным GPS-приемника aquil (Л’Аквила) в марте–апреле 2009 г. Сравнение этого рисунка с представленным рис. 3 отчетливо показывает, что ИПЗ, идентифицированный в этой монографии по измерениям ПЭС, хорошо совпадает по времени с ИПЗ, показанным на рис. 3 (панель a) в вариациях параметра δ_{Barbier} , полученных по данным НСВЗИ Рим.

Обсудим теперь кратко на этом конкретном примере преимущества использования параметра δ_{Barbier} при выделении ионосферных возмущений перед методикой, рассматривающей только поведение $foF2$ (или даже параллельно учитывающей и вариации $h'F$, но по отдельности). Как уже было указано выше, величина $h'F$ входит в формулу, определяющую величину параметра δ_{Barbier} , в по-

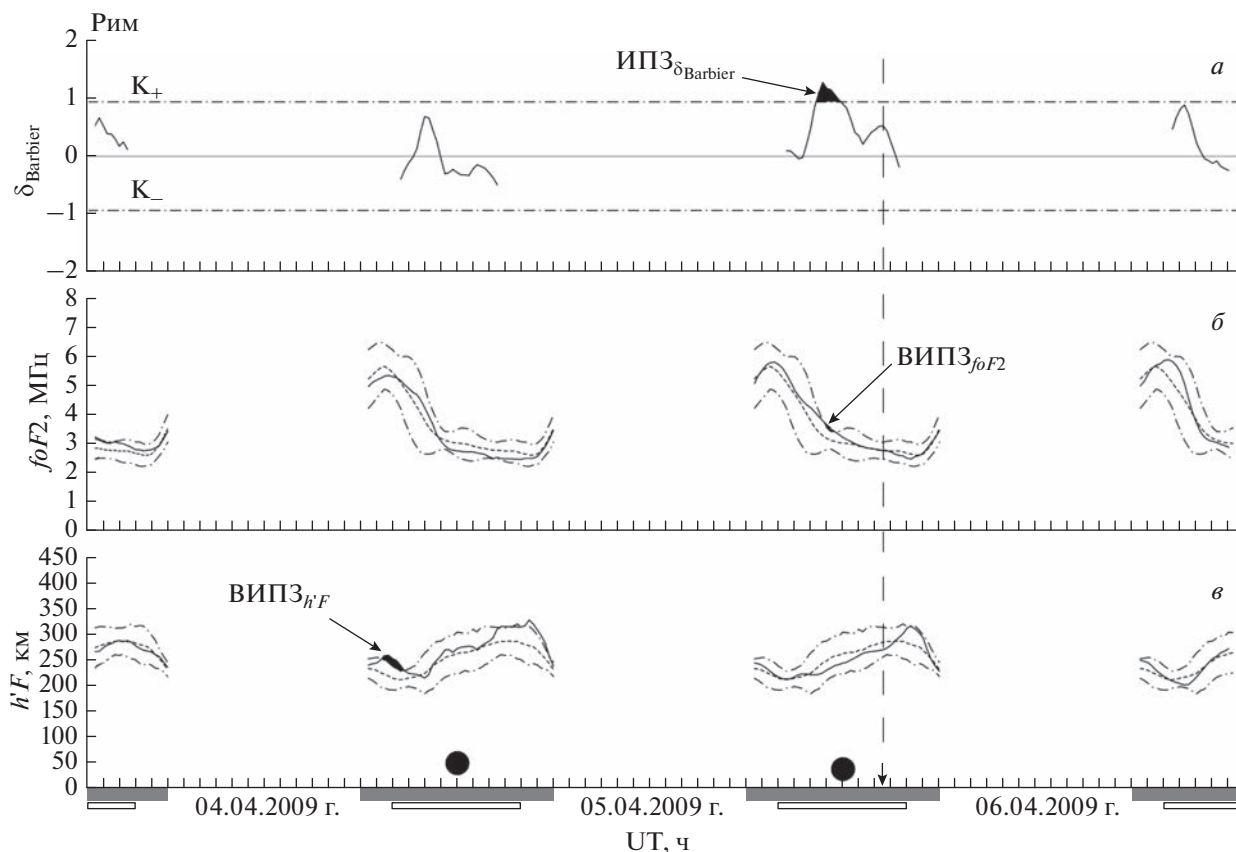


Рис. 4. То же, что и рис. 3, но на более узком временном интервале, с 04.04.2009 г. по 06.04.2009 г. (3 дня). Дополнительно на панелях (б) и (в) штрихпунктирными линиями показаны полосы разброса параметров $\pm 1.5IQR$ от медианы, показанной штриховой линией. На самой нижней оси абсцисс черными кружками отмечена местная полночь, а узкие светлые прямоугольники (под широкими черными) отмечают интервал 20–04 LT, когда хорошо физически определен параметр δ_{Barbier} . Возмущения ионосферы, предшествующие землетрясению (ВИПЗ $_{foF2}$) и (ВИПЗ $_{h'F}$) отмечены стрелками.

казателе экспоненты. Это делает параметр δ_{Barbier} очень чувствительным к изменениям $h'F$. Последнее иллюстрирует приведенный ниже рис. 4, на котором более детально показано поведение соответствующих ионосферных параметров перед рассмотренным землетрясением вблизи г. Л'Аквилы на более коротком временном интервале, с 4 по 6 апреля 2009 г. Основные обозначения те же, что и на рис. 3, но дополнительно на панелях (б) и (в) штрихпунктирными линиями показаны полосы разброса параметров $\pm 1.5IQR$ от медианы, показанной штриховой линией. На самой нижней оси абсцисс черными кружками отмечена местная полночь, а узкие светлые прямоугольники (под широкими черными) отмечают интервал 20–04 LT, когда хорошо физически определен параметр δ_{Barbier} . Хорошо видно, что на временном интервале, в котором четко выражен ИПЗ в поведении δ_{Barbier} , наблюдаются лишь незначительные превышения верхней границы полосы разброса в вариациях $foF2$, а $h'F$ лежит в пределах своей полосы разброса. Таким образом, использование параметра δ_{Barbier} существенно увеличи-

вает эффективность обнаружения ИПЗ. С одной стороны это компенсирует дополнительные затраты на его расчет, а с другой увеличивает надежность обнаружения ИПЗ, так как используется единая комбинация двух одновременно измеряемых физических параметров ионосферы.

2.2. Землетрясение 30.01.2016 г., $M = 7.2$ (вблизи с. Паратунка, Камчатка)

Камчатское землетрясение 30.01.2016 г. (географические координаты эпицентра $\varphi_e = 54.01^\circ \text{ N}$, $\lambda_e = 158.01^\circ \text{ E}$, магнитуда $M = 7.2$, глубина гипоцентра 161 км), произошло в 03:25 UT на эпицентральной дистанции (по дуге большого круга) $R_e \cong 117$ км от комплексной геофизической обс. Паратунка (географические координаты $\varphi = 52.97^\circ \text{ N}$, $\lambda = 158.25^\circ \text{ E}$), данные НСВЗИ которой далее используются в настоящей работе. Геометрическое расположение НСВЗИ Паратунка относительно эпицентра землетрясения показано на рис. 5 крупной черной точкой. Все обозначения аналогичны тем же, которые даны на рис. 1.

Здесь необходимо отметить то обстоятельство, что это землетрясение принадлежит к классу землетрясений с промежуточной глубиной гипоцентра ($60 \text{ км} \leq h \leq 300 \text{ км}$). Так как *эпицентральная зона землетрясения* обычно определяется как проекция *очаговой зоны землетрясения* на поверхность Земли, в которой наиболее сильно проявляются макросейсмические эффекты землетрясения, то размер области подготовки землетрясения на поверхности Земли, по крайней мере, не меньше этой зоны. Согласно данным United States Geological Survey (USGS) для этого землетрясения характерный размер эпицентральной зоны составляет $\sim 1000 \text{ км}$, а НСВЗИ Паратунка, расположенная в 117 км от эпицентра, находится очень близко к центру зоны подготовки землетрясения на поверхности Земли. Более того, оказывается (см. монографию [Апродов, 2000]), что чем глубже расположен очаг землетрясения, тем большую территорию охватывают сейсмические проявления при равной энергии землетрясения, т.е. промежуточные землетрясения (глубины гипоцентров от 60 до 300 км) охватывают большие площади, чем коровые (глубины гипоцентров до 60 км) при одинаковых магнитудах. Кроме этого, если иметь в виду возможные проявления аномалий в ионосфере перед этим землетрясением, следует напомнить, что в пионерской работе [Nestorov, 1979] были идентифицированы сейсмоионосферные возмущения в ионосфере за два часа до мощного Вранчского землетрясения $04.03.1977 \text{ г.}$ по наблюдениям на радиотрассах, проходивших именно над его эпицентральной зоной. Указанное землетрясение имело магнитуду $M = 7.2$, а гипоцентр находился на глубине 120 км , т.е. это землетрясение, также как и рассматриваемое здесь нами, относилось к классу промежуточных.

С 25 по 30 января 2016 г. по мировому времени, согласно данным (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>), величина трехчасового Kp -индекса планетарной геомагнитной активности не превышала уровня 2_+ во все часы суток (что соответствует геомагнитоспокойным условиям). Этот набор из 6 дней и был взят в качестве опорных, по которым вычислялись нужные медианные характеристики ионосферы и нейтральной атмосферы, при этом $H = H_{\text{MSIS}} = 40.48 \pm 0.99 \text{ км}$.

Рисунок 6 иллюстрирует временные вариации ионосферных параметров δ_{Barbier} (панель *a*), $h'F$ (панель *b*) и $foF2$ (панель *в*) с $26.01.2016 \text{ г.}$ по $30.01.2016 \text{ г.}$ Основные обозначения те же, что и на рис. 3. Штриховыми линиями на панелях *b* и *в* показаны полосы разброса, границы которых по величине равны медианам соответствующего параметра $\pm 1.5IQR$. На панели *a* выделен ИПЗ (светло-серая заливка), который по величине входит в полосу разброса, однако соответствует условию $\delta_{\text{Barbier}} \leq 0$ на протяжении всего (ночного) интервала наблюдения $29.01.2016$ с 08 до 16 ч UT

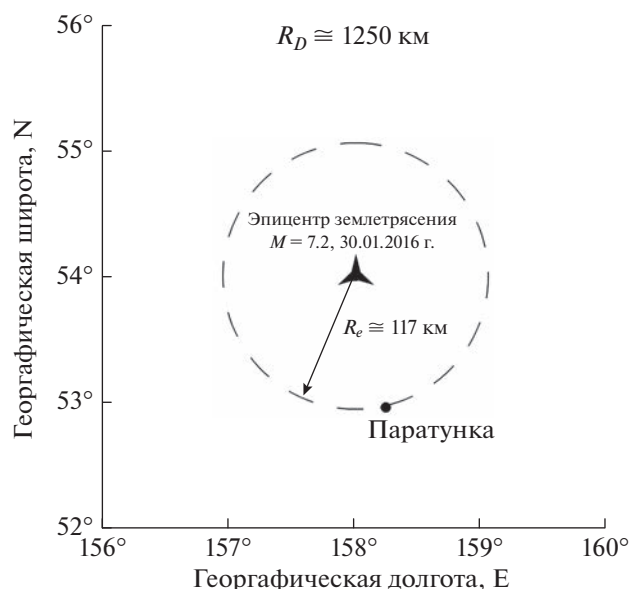


Рис. 5. То же, что и рис. 1, но для НСВЗИ Паратунка.

на НСВЗИ Паратунка (аналогично случаю, описанному в работе [Пулинец и др., 2022] для землетрясения с магнитудой $M = 6.2$, произошедшему $26.06.1989 \text{ г.}$ в окрестности НСВЗИ Мауи). Превышение верхней границы разброса в поведении $h'F$ также показано светло-серой заливкой, этот интервал времени более узок и полностью лежит внутри границ интервала существования ИПЗ, отмеченного на панели *a*. В рассматриваемом случае наблюдается длительное увеличение высоты $F2$ -слоя ночной ионосферы с одновременным понижением $foF2$, т.е. уменьшением электронной концентрации в максимуме слоя.

В исследовании [Бычков и др., 2017] для этого землетрясения ранее уже была идентифицирована группа ИПЗ в спорадическом слое E и регулярном слое F ионосферы (см. рис. 1 этой работы, группа ВИПЗ-I выделена эллипсом) в неосвещенные часы местного времени $29.01.2016 \text{ г.}$ на временном интервале, который включает в себя более узкий интервал с 08 – 16 UT , соответствующий ИПЗ, представленному на нашем рис. 5. Кроме этого, оказывается (см. выше), что этот тип ИПЗ аналогичен представленному в работе [Пулинец и др., 2022] для землетрясения, произошедшего $26.06.1989 \text{ г.}$ в окрестности НСВЗИ Мауи, и полностью вписывается в концепцию, изложенную в работе [Пулинец и др., 2021] (в этом исследовании предложен и описан подход, названный авторами “когнитивной идентификацией” ИПЗ, который не нуждается в больших отклонениях от невозмущенных значений, поскольку он основан на распознавании “образа” предвестника, созданного с учетом его морфологических признаков, и может эффективно использоваться даже при низких значениях отношения “сигнал/шум”).

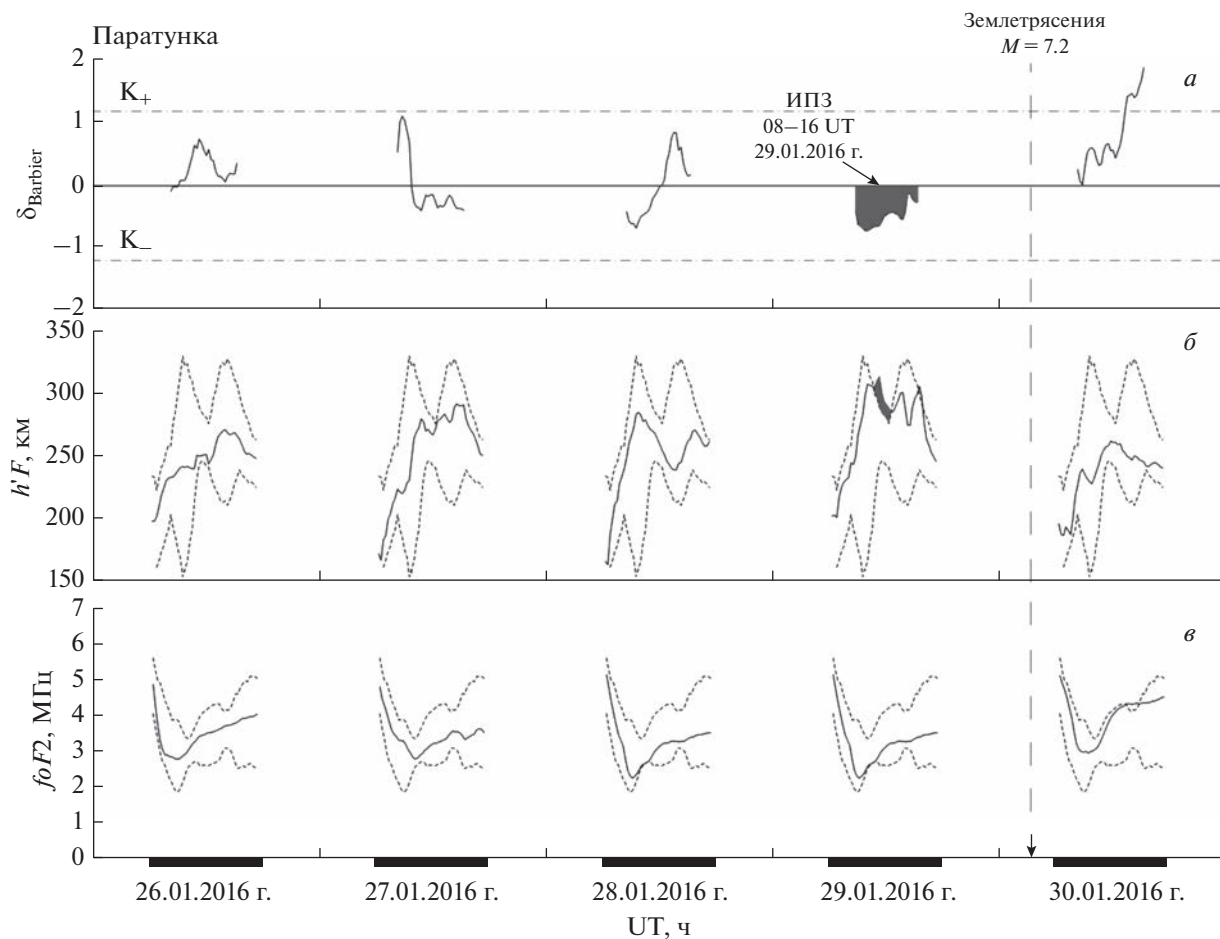


Рис. 6. Временные вариации ионосферных параметров δ_{Barbier} (панель *a*), $h'F$ (панель *б*) и $foF2$ (панель *в*) с 26.01.2016 г. по 30.01.2016 г. Основные обозначения те же, что и на рис. 3. Штриховыми линиями на панелях *б* и *в* показаны полосы разброса, границы которых по величине равны медианам соответствующего параметра $\pm 1.5IQR$. На панели *a* выделен ИПЗ (светло-серая заливка), который по величине входит в полосу разброса, однако соответствует условию $\delta_{\text{Barbier}} \leq 0$ на протяжении всего (ночного) интервала наблюдения 29.01.2016 с 08 до 16 ч UT на НСВЗИ Паратунка. Превышение верхней границы разброса в поведении $h'F$ также показано светло-серой заливкой.

Кратко суммируем итоги нашей верификации эффективности использования параметра δ_{Barbier} при поиске ИПЗ. Для выбранных двух случаев сильных землетрясений с $M > 6.0$, произошедших на геомагнитоспокойном фоне, ИПЗ в поведении комбинированного параметра δ_{Barbier} были обнаружены. Эти ИПЗ проявились в пределах тех же временных интервалов, которые уже были ранее установлены по поведению иных ионосферных параметров, идентифицированных как ИПЗ, в других *независимых* исследованиях (см. монографии [Пулинец и др., 2014; Pulnits and Ouzounov, 2018] для землетрясения с $M = 6.3$ случившегося в г. Л'Аквила (Италия) 06.04.2009 г. и работу [Бычков и др., 2017] для землетрясения с $M = 7.2$, произошедшего вблизи с. Паратунка (Камчатка) 30.01.2016 г.). Для первого из рассмотренных землетрясений ИПЗ проявился в виде превышения верхней границы полосы разброса $K_{\pm} = (\delta_{\text{Barbier}})_{\text{MED}} \pm 1.5IQR$ в течение двух часов 21–

23 ч UT на НСВЗИ Рим 05.04.2009 г. за ~ 2.5 ч до сейсмического толчка, для второго – в виде отрицательных значений δ_{Barbier} на протяжении всего (ночного) интервала наблюдения 29.01.2016 с 08 до 16 ч UT на НСВЗИ Паратунка за ~ 11.5 ч до подземного удара. С учетом работы [Пулинец и др., 2022], широтный диапазон для которого использование комбинированного параметра δ_{Barbier} при поиске ИПЗ оказывается верифицированным и эффективным, простирается от $\sim 20.0^\circ$ N до $\sim 54.0^\circ$ N. Ограничения использования параметра δ_{Barbier} связаны с тем, что он физически хорошо определен только для неосвещенных часов местного времени в интервале 20–04 ч LT.

4. ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование временных вариаций комплексного относительного δ -параметра Барбье (δ_{Barbier}) для оценки его эффективности

при поиске ионосферных предвестников землетрясений (ИПЗ). Рассмотрено поведение δ_{Barbier} перед двумя сильными землетрясениями, для которых ионосферные предвестники землетрясений ранее уже были обнаружены. Первое землетрясение (с магнитудой $M = 6.3$) произошло 06.04.2009 г. (г. Л'Аквила, Италия) на эпицентральном расстоянии ~ 93 км от наземной станции вертикального зондирования ионосферы Рим, а второе (с магнитудой $M = 7.2$) случилось 30.01.2016 г., при этом его эпицентр оказался в ~ 117 км от наземной станции вертикального зондирования ионосферы, расположенной на территории комплексной геофизической обс. Паратунка, Камчатка. В обоих случаях в поведении параметра δ_{Barbier} были выделены специфические особенности, совпадающие по времени с ранее обнаруженными в других исследованиях ИПЗ для этих землетрясений в иных ионосферных параметрах. Это позволяет сделать вывод об успешной верификации эффективности использования параметра δ_{Barbier} при поиске ионосферных предвестников землетрясений.

2. Широтный диапазон, для которого использование комбинированного параметра δ_{Barbier} при поиске ИПЗ оказывается верифицированным и эффективным, простирается от $\sim 20.0^\circ$ N до $\sim 54.0^\circ$ N. Ограничения использования параметра δ_{Barbier} связаны с тем, что он физически хорошо определен только для неосвещенных часов местного времени в интервале 20–04 ч LT.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Community Coordinated Modeling Center (CCMC) за возможность проведения онлайн-расчетов по модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00, NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC) USA [NASA/GSFC's Space Physics Data Facility's OMNIWeb service] и World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (JAPAN), геофизические данные которых были использованы в данной работе, а также United States Geological Survey's (USGS) Earthquake Hazards Program за предоставление доступа к данным по землетрясениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Апродов В.А.* Зоны землетрясений. М.: Мысль, 461 с. 2000.
- *Бычков В.В., Корсунова Л.П., Смирнов С.Э., Хегай В.В.* Аномалии в ионосфере и электричестве приземного слоя атмосферы перед камчатским землетрясением 30.01.2016 г. по данным обсерватории “Паратунка” // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 57. № 4. С. 532–540. 2017.
<https://doi.org/10.7868/S0016794017040058>
- *Дэвис К.* Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 502 с. 1973.
- *Пулинец С.А., Давиденко Д.В., Будников П.А.* Метод когнитивной идентификации ионосферных предвестников землетрясений // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 61. № 1. С. 103–114. 2021.
<https://doi.org/10.31857/S0016794021010132>
- *Пулинец С.А., Узунов Д.П., Давиденко Д.В., Дудкин С.А., Цадиковский Е.И.* Прогноз землетрясений возможен?! М.: Тривант, 144 с. 2014.
- *Пулинец С.А., Хегай В.В., Легенька А.Д., Корсунова Л.П.* Новый параметр для анализа ионосферных возмущений и поиска ионосферных предвестников землетрясений на основе формулы Барбье // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 62. № 3. С. 383–392. 2022.
<https://doi.org/10.31857/S0016794022030154>
- *Хегай В.В.* Аналитическая модель сейсмогенного электрического поля по данным измерений в приземном слое атмосферы средних широт и расчет его величины на уровне ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 60. № 4. С. 528–541. 2020.
<https://doi.org/10.31857/S0016794020030086>
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. М.: Наука, 343 с. 1977.
- *Akhoondzadeh M., Parrot M., Saradjian M. R.* Electron and ion density variations before strong earthquakes ($M > 6.0$) using DEMETER and GPS data // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. V. 10. Iss. 1. P. 7–18. 2010.
<https://doi.org/10.5194/nhess-10-7-2010>
- *Barbier D., Glaume J.* La couche ionosphérique nocturne F dans la zone intertropicale et ses relations avec l'émission de la raie 6300 Å du ciel nocturne // Planet. Space Sci. V. 9. Iss. 4. P. 133–148. 1962.
- *Barbier D., Roach F.E., Steiger W.R.* The summer intensity variation of [OI] 6300 Å in the tropics // J. Res. NBS. D. Radio Propagation. V. 66D. № 1. P. 145–152. 1962.
https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/66D/jresv66Dn2p145_A1b.pdf
- *Denisenko V.V., Nesterov S.A., Boudjada M.Y., Lammere H.* A mathematical model of quasistationary electric field penetration from ground to the ionosphere with inclined magnetic field // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 179. P. 527–537. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.09.002>
- *Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Myachkin V.I.* Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pure Appl. Geophys. V. 117. Issue 5. P. 1025–1044. 1979.
- *Hegai V.V., Kim V.P., Liu J.Y.* On a possible seismo-magnetic effect in the topside ionosphere // Adv. Space Res. V. 56. Iss. 8. P. 1707–1713. 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.07.034>
- <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>
- <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>
- *Klotz S., Johnson N.L.* (Eds.) Encyclopedia of statistical sciences. N.J.: John Wiley, Hoboken, 1983.
- *Nestorov G. T.* A possible ionospheric presage of the Vrancea earthquake of March 4, 1977 // Comptes rendus de l'Académie Bulgare des Sciences. V. 32. № 4. P. 443–446. 1979.
- *Pulinets S., Ouzounov D.* The Possibility of Earthquake Forecasting: Learning from nature. IOP Publishing Ltd, 167 p. 2018.
<https://doi.org/10.1088/978-0-7503-1248-6>