

УДК 523.31-853, 551.510.535

МОДИФИКАЦИЯ ИОНОСФЕРЫ ПЕРЕД СИМУШИРСКИМ $M = 8.1$ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 13 ЯНВАРЯ 2007 г.: КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД

© 2025 г. С. А. Пулинец¹, **, В. В. Хегай², *, А. Д. Легенька², Л. П. Корсунова²

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

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

*e-mail: hegai@izmiran.ru

**e-mail: pulse@rss.i.ru

Поступила в редакцию 03.06.2024 г.

После доработки 12.08.2024 г.

Принята к публикации 26.09.2024 г.

Проведено исследование ионосферных данных двух наземных станций вертикального зондирования ионосферы Wakkani и Kokubunji, находящихся в зоне подготовки землетрясения с магнитудой $M = 8.1$, произошедшего 13 января 2007 г. в 04:23:21 UT к востоку от о-ва Симушир. Оно было вторым из последовательности двух сильных (с $M > 8.0$) землетрясений, ставших уникальными событиями в сейсмической истории Средних Курил: 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. Комплексный анализ ионосферных данных показал, что за 13–14 ч до этого землетрясения над обеими ионосферными станциями одновременно наблюдались специфические аномалии в E - и F -областях ионосферы, с высокой степенью вероятности, бывшие его краткосрочными ионосферными предвестниками. Показано, что дополнительное рассмотрение при анализе ионосферных данных поведения δ -параметра Барбье (δ_{Barbier}), построенного на их основе, значительно повышает корректность идентификации выявляемых ионосферных предвестников землетрясения в сложных ситуациях.

Ключевые слова: краткосрочные ионосферные предвестники землетрясений, комплексный подход, формула Барбье

DOI: 10.31857/S0016794025020061, EDN: CXEAPW

1. ВВЕДЕНИЕ

Хорошо верифицированные случаи обнаружения ионосферных предвестников землетрясений (ИПЗ) для сильных сейсмических событий с большой магнитудой (M) очень важны как для прояснения фундаментальных механизмов литосферно-ионосферных связей, так и для последующих практических задач успешного их прогнозирования с использованием ионосферных данных. С другой стороны, крупные землетрясения (с магнитудой $M \geq 7.0$) происходят достаточно редко, и таких землетрясений на всей Земле случается не более 20 раз в год (см. работу [Хегай и др., 2022]). Землетрясений же с магнитудой $M \geq 8.0$ в год происходит примерно на порядок меньше, обычно не более 2 событий в год. Действительно, в соответствии с данными United States Geological Survey (USGS) с 2000 г. по 2021 г. (см. (<https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/lists>–

maps-and-statistics)), землетрясения такой силы произошли 4 раза в 2007 г. и 3 раза в 2021 г., в остальные годы этого периода – не более 2 в год. В целом же за период с 2000 по 2021 гг., т. е. за 22 года, произошло всего 27 землетрясений этого класса, тогда средняя частота $27/22 \approx 1.23$, т. е. близка к единице. По оценкам, сделанным в работе [Хегай, 2013], длительность “созревания” очага землетрясения с $M = 8.0$ от начала роста “зерна” очага до момента толчка составляет ~ 27 лет. Таким образом, исследования ионосферных эффектов, возможно связанных с процессами подготовки крупных землетрясений и являющихся их предвестниками, представляют большой интерес, в том числе и потому, что разрушительная мощь таких землетрясений особенно велика, когда их гипоцентры (h_g) лежат на небольших глубинах ($h_g \leq 60$ км).

Землетрясение с $M = 8.1$ (подробное описание дано в работе [Рогожин и Левина, 2007]) произошло

13 января 2007 г. в 04:23:21 UT (или 13:23:21 LT) к востоку от Курильских о-вов, географические координаты его эпицентра: широта $\phi_e = 46.24^\circ\text{N}$; долгота $\lambda_e = 154.52^\circ\text{E}$, а глубина гипоцентра $h_g = 10$ км, т.е. это землетрясение по классификации относится к поверхностным (или коровым) согласно монографии [Апродов, 2000]. В работе [Oyama et al., 2016] это землетрясение вошло в ряд событий, ионосферные эффекты перед которыми в полном содержании электронов (ПЭС, Total Electron Content – TEC) рассматривались статистическими методами, используя подход, предложенный авторами исследований [Liu et al., 2004, 2013, 2014]. При этом авторы показали, что для событий с $M > 7.0$ (в отличие от диапазона $6.0 \leq M < 7.0$) четкую идентификацию ИПЗ статистическими методами получить затруднительно, и ими было предложено рассматривать такие события индивидуально. Следует отметить, что именно для этого землетрясения в работе [Saha et al., 2014] удалось выявить аномальные вариации низкочастотного сигнала на частоте 40 кГц за 1 день до толчка на радиотрасse, проходящей над зоной его подготовки.

В настоящей работе проведено комплексное исследование ионосферных данных двух наземных станций вертикального зондирования ионосферы (НСВЗИ, далее, где это возможно, просто “станций” или “ст.”) Wakkanai (географические координаты $\phi = 45.16^\circ\text{N}; \lambda = 141.75^\circ\text{E}$) и Kokubunji (географические координаты $\phi = 35.71^\circ\text{N}; \lambda = 139.49^\circ\text{E}$), входящих в зону подготовки указанного землетрясения, в течение шести предшествующих моменту толчка дней и в день землетрясения (седьмой). Целью исследования было выявление его возможных ИПЗ с учетом характеристик солнечной и геомагнитной активности в рассматриваемый период времени.

Сразу отметим, что вариации ионосферы в указанном географическом регионе перед первым Симуширским землетрясением не рассматриваются в этой работе. Дело в том, что незадолго до него, 10 ноября 2006 г. был зафиксирован экстремум DST-индекса ($DST_{\text{extr}} = -60$ нТл), а значение K_p -индекса достигало величины 6₀, что по классификации работы [Loewe and Prölss, 1997] соответствует умеренной геомагнитной буре. Более того, примерно за 10 ч до толчка наблюдался также всплеск авроральной активности, когда значение AE -индекса составило 450 нТл. В связи с этим, возможные ионосферные эффекты подготовки первого Симуширского землетрясения могут накладываться на ионосферные эффекты, обусловленные геомагнитными возмущениями, что значительно затрудняет

однозначную идентификацию возможного ионосферного предвестника для этого землетрясения.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ, ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Характерный масштаб области подготовки землетрясения на поверхности земли определяется как радиальное расстояние от эпицентра землетрясения до границы зоны его подготовки и зависит от его магнитуды M . В научной литературе фигурируют различные (эмпирические и теоретические) оценки этого масштаба (в км), приведенные в работах [Dobrovolsky et al., 1979; Сидорин, 1992; Bowman et al., 1998; Hao et al., 2000]. Далее мы будем использовать минимальную оценку этого масштаба, полученную в работе [Dobrovolsky et al., 1979], полученную при условии, когда глубина гипоцентра землетрясения h_g стремится к нулю. В этом случае характерный размер зоны подготовки землетрясения на поверхности земли выражается формулой $R_{\text{Dobrovolsky}} = R_D = 10^{0.43M}$ (км). В таком случае для землетрясения с $M = 8.1$, $R_D(M = 8.1) = 10^{0.43 \times 8.1} = 3040$ км ≈ 3000 км. Таким образом, возможные ИПЗ этого землетрясения должны проявляться в ионосфере в пределах круга радиусом в 3000 км, с центром определенным географическими координатами эпицентра землетрясения. Эту ситуацию иллюстрирует рис. 1.

На рис. 1 представлены географические положения эпицентра землетрясения с $M = 8.1$, случившегося 13 января 2007 г. (треугольная звезда), а также расположение ионосферных станций Wakkanai и Kokubunji (черные кружки). Эпикентральные расстояния до станций по дуге большого круга указаны около соответствующих стрелок, а радиус зоны подготовки $R_D \approx 3000$ км показан над рисунком. Толстые сплошные линии определяют положения границ плит в области поглощения литосферы (см. также монографию [Апродов, 2000]), тонкими сплошными линиями очерчены о-ва Японского архипелага. Из рисунка ясно видно, что ионосферные станции находятся глубоко внутри зоны подготовки этого землетрясения. Укажем здесь сразу также, что согласно сведениям The National Weather Service (NWS), U.S. (<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>), среднее значение индекса $F10.7$, характеризующего солнечную активность, в январе 2007 г. составило 83.76 SFU, а слаженное среднее – 78.1 SFU, т.е. солнечная активность была низкой. Соответственно, можно было ожидать и низкой геомагнитной активности на достаточно длинном временном интервале в пределах этого месяца, что снижает вероятность развития

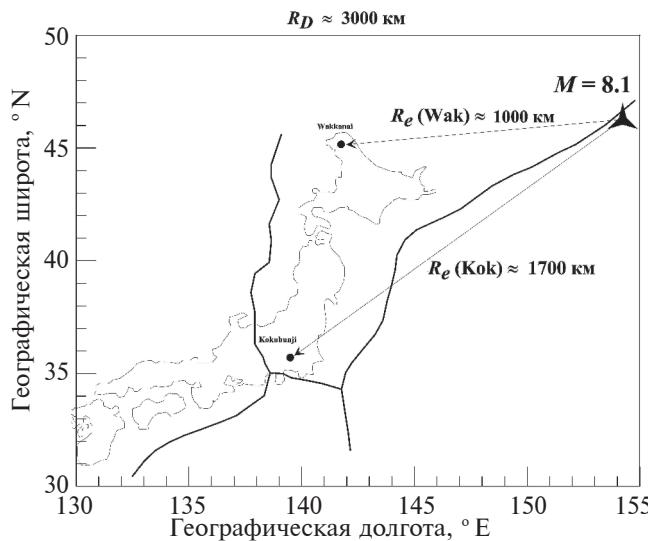


Рис. 1. Географические положения эпицентра землетрясения с $M = 8.1$, произошедшего 13 января 2007 г. (треугольная звезда), а также ионосферных станций Wakkanai и Kokubunji (черные кружки). Эпицентрические расстояния до станций по дуге большого круга указаны около соответствующих стрелок, а радиус зоны подготовки $R_D \approx 3000 \text{ км}$ показан над рисунком. Толстые сплошные линии определяют положения границ плит в области поглощения литосфера, а тонкими сплошными линиями очерчены острова Японского архипелага.

возмущений в ионосфере, обусловленных магнитными бурями. На приведенном ниже рис. 2 сплошными линиями отображены изменения геофизических индексов (панель a – K_p ; панель b – B_z -компоненты межпланетного магнитного поля; панель c – AE), а также часовых вариаций значений текущих критических частот $foF2_{\text{cur}}$ на ст. Kokubunji (панель g) и ст. Wakkanai (панель d) на семидневном временном интервале с 7.01.2007 г. по 13.01.2007 г. Длинной вертикальной стрелкой (проходящей через панели g и d и пересекающей их оси абсцисс) отмечен момент землетрясения, а зачерненными прямоугольниками под ней – интервалы местного времени с 18:00 до 6:00 LT. Последнее сделано для того, чтобы было видно, когда наблюдается предполагаемый ИПЗ – в освещенные/неосвещенные часы. На панелях g и d линии, данные “точками”, соответствуют медианным значениям по 13 геомагнитно-спокойным (Q) дням января месяца ($foF2_{\text{med}Q}$), когда в течение целого дня величина K_p -индекса не превышала значения 2_+ (этот же уровень отмечен на панели a горизонтальной штрихпунктирной линией), а штрихпунктирными линиями задан интервал $foF2_{\text{med}Q} \pm 1.5IQR$ (IQR – разность между

верхним (75%-ным) и нижним (25%-ным) квартилями, т.е. межквартильный диапазон – Inter Quartile Range). Выделенные темной заливкой области превышения $foF2_{\text{cur}}$ над $foF2_{\text{med}Q}$ отмечены стрелками как возможные ИПЗ, а небольшие прямоугольники того же цвета у осей абсцисс соответствуют интервалам времени, когда на обеих станциях одновременно наблюдались F -рассеяние и спорадический слой E_s .

Как указано выше, в нашей работе в качестве меры разброса в поведении величины $foF2_{\text{cur}}(t_i)$ за счет случайных отклонений за основу был выбран межквартильный диапазон IQR по выбранной совокупности геомагнитно-спокойных дней. Тогда полоса $K_{\pm} = foF2_{\text{med}Q}(t_i) \pm 1.5IQR(t_i)$ ограничит амплитуду вариаций $foF2_{\text{cur}}(t_i)$, объясняемую случайными отклонениями, с определенной степенью вероятности. Согласно Klotz and Johnson [1983], в случае нормального распределения “ошибки” значений $\Delta foF2(t_i)$, величина $1.5IQR(t_i)$ будет соответствовать примерно двум стандартным отклонениям, и значения $foF2_{\text{cur}}(t_i)$ под воздействием разных случайных факторов должны колебаться в пределах полосы K_{\pm} с вероятностью 95%. Поэтому значения $foF2$, выходящие за пределы указанной полосы, могут быть отнесены к аномальным значениям $foF2_{\text{cur}}(t_i)$.

Здесь следует отметить, что успешная идентификация сейсмоионосферных аномалий в поведении критической частоты $F2$ -слоя ионосферы на основе IQR как меры отклонения от фона ранее была выполнена, в частности, в работе [Liu et al., 2006], с тем различием, что в качестве исходной меры отклонения от фона использовалась величина $IQR/2$. Таким образом, нами используется более жесткий критерий к отбору отклонений, которые можно отнести к возмущенным значениям рассматриваемых параметров.

Обсудим рис. 2 более детально. Во-первых, видно, что на всем показанном временном интервале геомагнитная обстановка отвечает спокойным условиям, так как уровень планетарной геомагнитной активности (панель a) в основном соответствует значениям $K_p \leq 2_+$, лишь дважды в течение трех часов достигая уровней 3_- и 3_0 . Перед днем землетрясения (12 января) этот уровень опускается до значений 0_+ в 3 UT, а в 18 UT снижается до 0_0 и остается таким до конца всего интервала наблюдения. Во-вторых, величина B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (панель b) на всем интервале наблюдений лежит в диапазоне от -3 нТл до 5 нТл, т.е. $-3 \text{ нТл} \leq B_z < 5 \text{ нТл}$. Наконец, кратковременное незначительное превышение AE -индексом (панель c) уровня 300 нТл имеет место за три дня до толчка (10 ян-

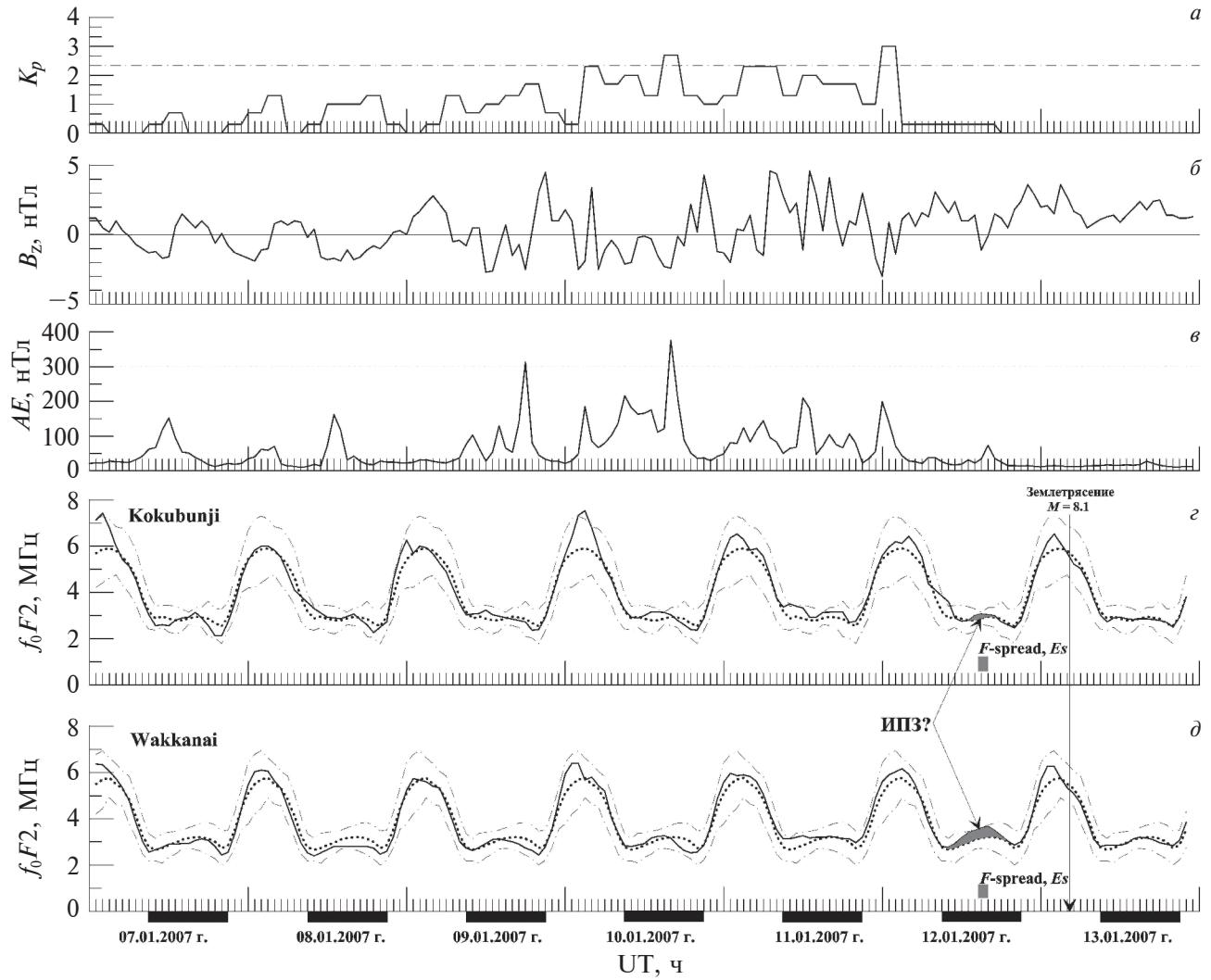


Рис. 2. Изменения (сплошные линии на всех панелях) геофизических индексов (а) – K_p ; (б) – B_z -компоненты межпланетного магнитного поля; (в) – AE , а также часовых вариаций значений текущих критических частот $foF2_{\text{cur}}$ на ст. Kokubunji (г) и ст. Wakkai (д) на семидневном временном интервале с 7.01.2007 г. по 13.01.2007 г. Длинной вертикальной стрелкой (проходящей через панели г и д и пересекающей их оси абсцисс) отмечен момент землетрясения, а зачерненными прямоугольниками под ней – интервалы местного времени с 18:00 до 6:00 LT. На панелях г и д линии, данные “точками”, соответствуют медианным значениям по 13 геомагнитно-спокойным (Q) дням января ($foF2_{\text{med}_Q}$), когда в течение целого дня величина K_p -индекса не превышала значения 2_+ , а штрихпунктирными линиями задан интервал $foF2_{\text{med}_Q} \pm 1.5IQR$. Выделенные темной заливкой области превышения $foF2_{\text{cur}}$ над $foF2_{\text{med}_Q}$ отмечены стрелками как возможные ИПЗ, а небольшие прямоугольники того же цвета у осей абсцисс соответствуют интервалам времени, когда на обеих станциях синхронно наблюдались F -рассеяние и спорадический слой Es .

варя). Таким образом, на всем рассматриваемом временном интервале, геомагнитная обстановка по всем указанным геомагнитным индексам соответствует спокойному уровню. Поэтому и возмущений в ионосфере, которые могут быть вызваны геомагнитными возмущениями, наблюдаваться не должно.

Рассмотрим теперь особенности вариаций $foF2_{\text{cur}}$, отмеченные стрелками (затемненные участки на рис. 2) как возможные ИПЗ, на интер-

вале с 13 UT до 17 UT 12 января за день до толчка (панели г, д). Видно, что на более близкой к эпицентру ст. Wakkai [$R_e(\text{Wak}) \approx 1000$ км] величина положительного отклонения $\delta_{foF2}(\text{Wak})_{\max} = [100 \times (foF2_{\text{cur}} - foF2_{\text{med}_Q})/foF2_{\text{med}_Q}]_{\max} \approx 16\%$ больше, чем $\delta_{foF2}(\text{Kok})_{\max} \approx 11\%$ на более удаленной от него ст. Kokubunji [$R_e(\text{Kok}) \approx 1700$ км] в этом временном интервале. Одновременно с этим вид-

но, что для ст. Wakkanai текущее значение $foF2_{cur}$ (Wakkanai) лежит на верхней границе разброса $foF2_{med} + 1.5IQR$. Превышение этой границы означает, что примерно с вероятностью 95% такое отклонение носит неслучайный характер (см. выше, и более подробно – стр. 534 работы [Бычков и др., 2017]). На ст. Kokubunji это превышение в указанном интервале медианных значений $foF2_{med}$ (Kok) текущими значениями $foF2_{cur}$ (Kok) не столь значительно. Однако, в рассматриваемом случае имеет место также одновременная регистрация вблизи момента времени 15 UT 12.01.2007 г. (00 LT 13.01.2007 г.) спорадического слоя *Es* и *F*-рассеяния (*F*-spread) на обеих станциях, разнесенных между собой на ≈ 1068 км по дуге большого круга, согласно данным [https://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/contents/Ionosonde_Map_E.html]. Наличие одновременного существования указанных структур над обеими ионосферными станциями иллю-

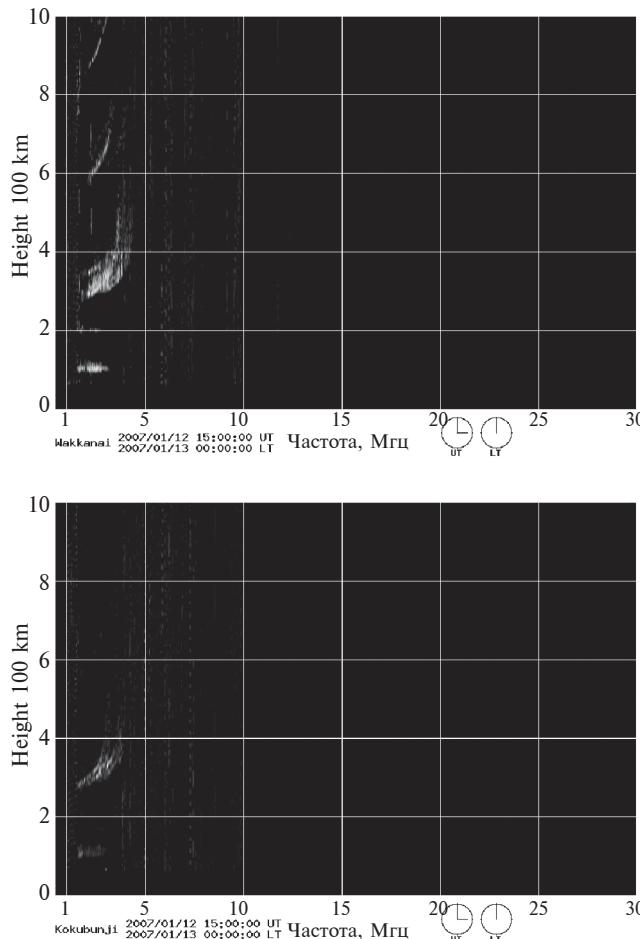


Рис. 3. Ионограммы ст. Wakkanai (верхняя панель) и ст. Kokubunji (нижняя панель) в 15 ч UT 01.12.2007 г. На обеих станциях наблюдаются спорадический слой *Es* и *F*-рассеяние.

стрирует рис. 3, на котором представлены ионоGRAMМЫ для момента времени 15 UT 12.01.2007 г.

Как видно из рисунка, интенсивность проявления в ионосфере указанных структур выше для более близкой к эпицентру землетрясения станции Wakkanai. В работе [Корсунова и Легенька, 2021] основным критерием идентификации краткосрочного ИПЗ являлось одновременное появление аномальных отклонений в ионосферных параметрах на разнесенных (на сотни и более километров) ионосферных станциях, входящих в зону подготовки конкретного землетрясения. Представленная на рис. 3 картина удовлетворяет этому критерию.

Используем теперь для дальнейшего анализа ситуации в ионосфере перед землетрясением 13.01.2007 г. еще один параметр – δ -параметр Барбье ($\delta_{Barbier}$). Этот параметр был впервые определен исходя из полуэмпирической формулы Барбье [Barbier, 1957; Barbier and Glaume, 1962; Barbier et al., 1962] в работе [Пулинец и др., 2022] и использован для анализа ионосферных возмущений и поиска ИПЗ. В работе [Пулинец и др., 2023] была показана его эффективность при поиске ИПЗ, а широтный диапазон, для которого использование комбинированного параметра $\delta_{Barbier}$ при поиске ИПЗ было верифицировано, простирается от $\sim 20.0^\circ$ N до $\sim 54.0^\circ$ N. Ограничения использования параметра $\delta_{Barbier}$ связаны с тем, что он физически хорошо определен только для неосвещенных часов местного времени в интервале 20–04 ч LT. Математическое выражение для $\delta_{Barbier}$ выглядит следующим образом (см. формула (2) в работе [Пулинец и др., 2022])

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

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

Здесь $foF2$ – 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 книге [Руководство..., 1977], § 1.3., п. 1.32, стр. 33. Характерный масштаб H (в км) для любой конкретной ионосферной станции, в соответствии с ее географическим положением и моментом времени, может быть вычислен с помощью хорошо разработанной и современной модели нейтральной атмос-

феры NRLMSISE-00 [<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>] по набору опорных дней в соответствии с заданной процедурой (подробно см. [Пулинец и др., 2022]).

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. Дело в том, что (см., например, работу [Chattopadhyay and Midya, 2006]) для этой красной линии эмиссии кислородного свечения OI 630 нм из экспериментально определенных значений различных констант скорости, коэффициентов гашения и вероятностей перехода можно вывести, что интенсивность свечения в этой линии пропорциональна только концентрации электронов и, таким образом, характер изменения интенсивности эмиссии OI 630 нм в основном определяется высотным профилем электронной концентрации (N_e), т.е. критической частотой f_0F2 . Тогда получается, что 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 OI 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 $h'F_{\text{cur}}$.

На рис. 4 панель δ повторяет панель ∂ рис. 2 с теми же обозначениями, а на панели a показано поведение параметра δ_{Barbier} в неосвещенные часы (20–04 ч LT). Горизонтальная линия (точки) соответствует медианным значениям на выбранном семидневном интервале, а штрихпунктирные линии отмечают уровни $K_{\pm} = (\delta_{\text{Barbier}})_{\text{MED}} \pm 1.5IQR$. Темная заливка на панели a отмечает вероятный краткосрочный ИПЗ землетрясения за 13–14 часов до толчка.

Благодаря высокой чувствительности параметра δ_{Barbier} видно, что он существенно превышает заданную верхнюю границу разброса в 13 и 14 UT 12.01.2007 г., при этом превышение происходит внутри диапазона 13 – 17 UT 12.01.2007 г., когда наблюдается положительное возмущение f_0F2_{cur} (Wakkanai). К сожалению, для ст. Kokubunji не удалось построить подобную картину из-за отсутствия нужных данных по $h'F$ в соответствующем временном интервале.

В заключение необходимо отметить следующее. Выделенные 12.01.2007 г. аномальные вариации низкочастотного сигнала на частоте 40 кГц за 1 день до землетрясения на радиотрасse, проходящей над зоной его подготовки в работе [Saha et al., 2014] наблюдались во временном интервале с 8 до 17 ч UT (см. Fig. 4 работы [Saha et al., 2014]). Этот временной интервал включает в себя опре-

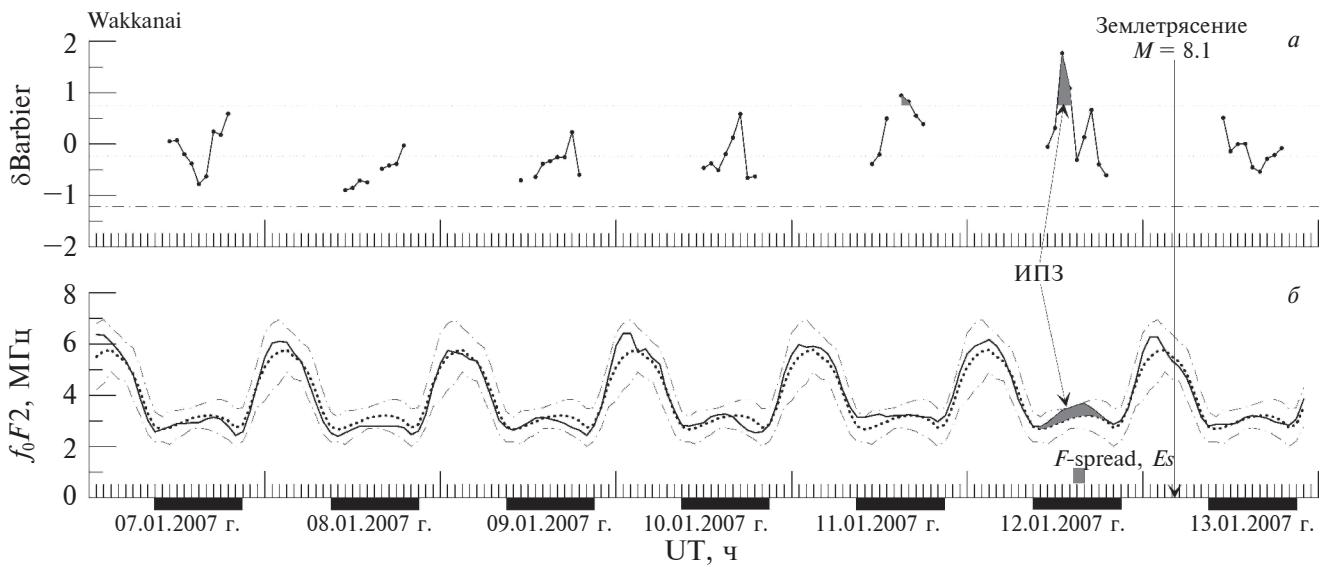


Рис. 4. На панели (a) показано поведение параметра δ_{Barbier} в неосвещенные часы. Горизонтальная линия (точки) соответствует медианным значениям на выбранном семидневном интервале, а штрихпунктирные линии отмечают уровни $K_{\pm} = (\delta_{\text{Barbier}})_{\text{MED}} \pm 1.5IQR$. Темная заливка на панели a отмечает вероятный краткосрочный ИПЗ землетрясения за 13–14 часов до толчка. Панель δ повторяет панель ∂ рис. 2 с теми же обозначениями.

деленный нами более узкий интервал с 13 до 17 ч UT, когда наблюдались выделенные нами ИПЗ на ст. Wakkai и ст. Kokubunji.

3. ВЫВОДЫ

В результате проведенного комплексного исследования ионосферных данных двух наземных станций вертикального зондирования ионосфера Wakkai и Kokubunji, расположенных в зоне подготовки землетрясения с магнитудой $M=8.1$, произошедшего 13 января 2007 г. в 04:23:21 UT к востоку от Курильских о-вов, можно сделать следующие выводы.

1. Комплексный анализ ионосферных данных показывает, что за 13–14 ч до этого землетрясения над обеими ионосферными станциями одновременно наблюдались специфические аномалии в *E*- и *F*-областях ионосферы, которые, с высокой степенью вероятности (по мнению авторов), могут быть отождествлены с его краткосрочными ионосферными предвестниками.

2. Дополнительное рассмотрение при анализе ионосферных данных поведения δ -параметра Барбье (δ_{Barbier}), построенного на их основе, значительно повышает корректность идентификации выявляемых ионосферных предвестников землетрясения в сложных ситуациях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC) USA, National Institute of Information and Communications Technology (NICT, Japan), World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (Japan), ионосферные и магнитные 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.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственной академии наук по теме: Исследование солнечной активности и физических процессов в системе “Солнце–Земля” (рег. № 1021100714181-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Аprodov V.A. 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 аэрономия. Т. 57. № 4. С. 532–540. 2017. <https://doi.org/10.7868/S0016794017040058>

— Корсунова Л.П., Легенька А.Д. Обнаружение возможных краткосрочных ионосферных предвестников сильных землетрясений по изменениям ежесуточных характеристик *Es* // Геомагнетизм и аэрономия Т. 61. № 6. С. 803–811. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0016794021050060>

— 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 аэрономия. Т. 62. № 3. С. 383–392. 2022. <https://doi.org/10.31857/S0016794022030154>

— Пулинец С.А., Хегай В.В., Легенька А.Д., Корсунова Л.П. Эффективность относительного δ -параметра Барбье при поиске ионосферных предвестников землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 3. С. 349–357. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600102>

— Рогожин Е.А., Левина В.И. Симуширские землетрясения 15 ноября 2006 г. (I) и 13 января 2007 г. (II) с $Mw=8.3$ и $Mw=8.1$ (Средние Курилы) // Землетрясения Северной Евразии. Вып. 16. С. 326–338. 2007.

— Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм / Пер. с англ. под ред. Н.В. Медниковой. М.: Наука, 343 с. 1977.

— Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 192 с. 1992.

— Хегай В.В. Эволюция очага и зоны подготовки корового землетрясения: упрощенное феноменологическое описание // Наука и технологические разработки. Т. 92. № 4. С. 19–30. 2013.

— Хегай В.В., Легенька А.Д., Абуин А.А., Абунина М.А., Белов А.В., Гайдаш С.П. Солнечная активность, вариации галактических космических лучей и глобальная сейсмичность Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 1. С. 40–51. 2022. <https://doi.org/10.31857/S0016794022010102>

— Barbier D. La lumiere du ciel nocturne en ete a Tamanrasset // Compt. Rend. Acad. Sci., Paris. № 245. № 18. P. 1559–1561. 1957.

— 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. № 4. P. 133–148. 1962. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(62\)90001-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(62)90001-6)

— Barbier D., Roach F.E., Steiger W.R. The summer intensity variation of [OI] 6300 Å in the tropics // J. Res. NBS. D. Rad. Sci. V. 66D. № 2. P. 145–152. 1962. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.066D.017>

— Bowman D.D., Ouillon G., Sammis C.G., Sornette A., Sornette D. An observational test of the critical earthquake concept // J. Geophys. Res. – Sol. Ea. V. 103. № 10. P. 24359–24372. 1998. <https://doi.org/10.1029/98JB00792>

- Chattopadhyay R., Midya S.K. Airglow emissions: fundamentals of theory and experiment // Indian J. Phys. V. 80. № 2. P. 115–166. 2006.
- Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pure Appl. Geophys. V. 117. № 5. P. 1025–1044. 1979. <https://doi.org/10.1007/BF00876083>
- Hao J., Tang T.M., Li D.R. Progress in the research of atmospheric electric field anomaly as an index for short-impending prediction of earthquakes // Journal of Earthquake Prediction Research. V. 8. № 3. P. 241–255. 2000.
- <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>
- https://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/contents/Ionosonde_Map_E.html
- <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
- <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/lists-maps-and-statistics>
- Klotz S., Johnson N.L. (Eds.) Encyclopedia of statistical sciences. Hoboken, NJ: John Wiley, 736 p. 1983.
- Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. – Space. V. 111. № 5. ID A05304. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JA011333>
- Liu J.-Y., Chen Y.-I., Jhuang H.-K., Lin Y.-H. Ionospheric $f_{0}F2$ and TEC anomalous days associated with $M > 5.0$ earthquakes in Taiwan during 1997–1999 // Terr. Atmos. Ocean. Sci. V. 15. № 3. P. 371–383. 2004. [https://doi.org/10.3319/TAO.2004.15.3.371\(EP](https://doi.org/10.3319/TAO.2004.15.3.371(EP))
- Liu J.Y., Chen C.H., Tsai H.F. A statistical study on ionospheric precursors of the total electron content associated with 146 $M > 6.0$ earthquakes in Japan during 1998–2011 / Earthquake prediction studies: seismo electromagnetics. Ed. M. Hayakawa. Tokyo: Terrapub. P. 17–29. 2013.
- Liu J., Huang J., Zhang X. Ionospheric perturbations in plasma parameters before global strong earthquakes // Adv. Space Res. V. 53. № 5. P. 776–787. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.029>
- Loewe C.A., Prölss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms // J. Geophys. Res. – Space. V. 102. № 7. P. 14209–14213. 1997. <https://doi.org/10.1029/96JA04020>
- Oyama K.-I., Devi M., Ryu K., Chen C.H., Liu J.-Y., Liu H., Bankov L., Kodama T. Modifications of the ionosphere prior to large earthquakes: report from the Ionosphere Precursor Study Group // Geoscience Letters. V. 3. ID 6. 2016. <https://doi.org/10.1186/s40562-016-0038-3>
- Saha A., Guha A., De B.K., Roy R., Choudhury A., Banik T., Dhar P., Chakraborty M. Precursory signature of several major earthquakes studied using 40 kHz low frequency signal // Adv. Space Res. V. 54. № 4. P. 617–627. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.04.024>

Modification of the Ionosphere Before the Strong Earthquake of January 13, 2007 With Magnitude $M = 8.1$: An Integrated Approach

S. A. Pulinet^{1, **}, V. V. Hegai^{2, *}, A. D. Legenka², L. P. Korsunova²

¹Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAS), Moscow, Russia

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Moscow, Troitsk, Russia

*e-mail: hegai@izmiran.ru

**e-mail: pulse@rss.ru

A study was carried out of vertical sounding data collected by two ground-based vertical ionosondes Wakkani and Kokubunji, situated within the preparation zone of an earthquake with a magnitude of $M = 8.1$, which occurred on January 13, 2007 at 04:23:21 UT east of Simushir Island and was the second of a sequence of two strong ($M > 8$) earthquakes on November 15, 2006 and January 13, 2007, which were unique events in the seismic history of the Middle Kuril Islands. A comprehensive analysis of ionospheric data showed that 13–14 hours before this earthquake, specific anomalies in the E- and F-regions of the ionosphere were simultaneously observed over both ionospheric stations, which, with a high degree of probability, were its short-term ionospheric precursors. It is shown that additional consideration when analyzing ionospheric data of the behavior of the Barbier δ -parameter, constructed on their basis, significantly increases the correctness of identification of detected ionospheric earthquake precursors in complex situations.

Keywords: short-term ionospheric precursors of earthquakes, integrated approach, Barbier formula