

УДК 551.510.535

## НОВЫЙ ПАРАМЕТР ДЛЯ АНАЛИЗА ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И ПОИСКА ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФОРМУЛЫ БАРБЬЕ

© 2022 г. С. А. Пулинец<sup>1, \*</sup>, В. В. Хегай<sup>2, \*\*</sup>, А. Д. Легенька<sup>2, \*\*\*</sup>, Л. П. Корсунова<sup>2, \*\*\*\*</sup><sup>1</sup>Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия<sup>2</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

\*e-mail: pulse@rssi.ru

\*\*e-mail: hegai@izmiran.ru

\*\*\*e-mail: leg@izmiran.ru

\*\*\*\*e-mail: lpkors@rambler.ru

Поступила в редакцию 06.12.2021 г.

После доработки 15.01.2022 г.

Принята к публикации 27.01.2022 г.

Предложен новый относительный параметр ( $\delta_{\text{Barbier}}$ ) для анализа ионосферных возмущений и поиска ионосферных предвестников землетрясений, полученный на основе полуэмпирической формулы Барбье. В этой формуле используются непосредственно и одновременно измеряемые ионосферные параметры – критическая частота слоя  $F_2$  ионосферы ( $f_oF_2$ ) и минимальная действующая высота следа отражений обыкновенной волны от взятой в целом области  $F$  ионосферы ( $h'F$ ). Приведен конкретный пример его использования и интерпретации перед землетрясением с магнитудой  $M = 6.2$ , произошедшим в окрестности наземной станции вертикального зондирования ионосферы MAUI (Гавайские о-ва) 26.06.1989 г. Показано, что в течение неосвещенных часов на геомагнитоспокойном 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 интерпретируется как понижение (по сравнению с медианным уровнем) оцениваемой по ионосферным данным интенсивности свечения в красной линии 630 нм излучения атомарного кислорода  $O(^1D)$ , связанного с диссоциативной рекомбинацией ионов молекул кислорода  $O_2^+$  на высотах области  $F$  в этот период времени. Обсуждаемый эффект может иметь сейсмогенную природу и быть ионосферным предвестником землетрясения.

DOI: 10.31857/S0016794022030154

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование возмущений ионосферы, предшествующих землетрясениям (ВИПЗ) ведутся уже более полувека, начиная, по-видимому, с пионерской работы [Davies and Baker, 1965]. В этой работе было показано, что перед катастрофическим землетрясением (Prince William Sound Earthquake, Alaska, географические координаты эпицентра  $\varphi_e = 60.9^\circ \text{ N}$ ;  $\lambda_e = 212.7^\circ \text{ E}$ , время толчка 03:36:16 UT, глубина гипоцентра  $h = 25$  км, магнитуда  $M = 9.2$  по обновленным современным данным), произошедшим 28 марта 1964 г., на наземной станции вертикального зондирования ионосферы (НСВЗИ) BOULDER, удаленной по дуге большого круга на  $\sim 3700$  км от эпицентра землетрясения, были отчетливо зарегистрирова-

ны хорошо выраженные возмущения в ионосфере. Они наблюдались как одновременно существовавшие неоднородности в областях  $E$  (спорадический слой  $E_s$ ) и  $F$  ( $F$ -рассеяние) ионосферы в течение примерно двух часов перед толчком. Отметим здесь, что последовательность планетарных  $Kp$ -индексов в день, предшествующий землетрясению, и в день, когда произошел толчок, выглядела следующим образом:  $Kp(27.03.1964 \text{ г.}) = \{1_+; 0_0; 2_0; 0_+; 0_+; 1_-; 0_+; 1_0\}$  и, соответственно,  $Kp(28.03.1964 \text{ г.}) = \{0_0; 0_0; 0_+; 0_0; 0_0; 0_+; 0_0; 0_0\}$ , т.е. геомагнитная обстановка была очень спокойной.

В этой ситуации вопрос о возможности существования неоднородностей в ионосфере, которые могут быть связаны с процессами подготовки землетрясения, на таком значительном удалении от его эпицентра является вполне естественным.

Однако, к настоящему моменту существует устоявшаяся оценка минимального радиуса зоны подготовки землетрясения на поверхности твердой Земли, зависящая от магнитуды землетрясения  $M$ , полученная в работе [Dobrovolsky et al., 1979], согласно которой этот радиус ( $R_D$ , км) определяется как  $R_D = 10^{0.43M}$ . В соответствии с этим, для указанного выше катастрофического Аляскинского землетрясения получим, что  $R_D(M=9.2) \cong \cong 9000$  км и ст. BOULDER оказывается в зоне его подготовки. Анализ вариаций одного из важнейших, регулярно измеряемых на НСВЗИ параметров, критической частоты слоя  $F2$  ионосферы ( $foF2$ ), за несколько часов до этого землетрясения приведен в работе [Хегай и др., 2002] по данным восьми НСВЗИ. При этом было обнаружено, что по крайней мере за несколько часов до землетрясения на спокойном фоне гелиогеофизической активности (за два дня до землетрясения среднее дневное число солнечных пятен порядка 15, а среднее значение  $AE$ -индекса  $\sim 30$  нТл) появлялись специфические региональные возмущения в ионосфере как вблизи эпицентра назревающего землетрясения ( $\sim 100$  км), так и на значительном удалении от него ( $\sim 1000$ – $1500$  км), по-видимому, бывшие его предвестниками.

Таким образом, вопрос о том, когда ВИПЗ являются также и ионосферными предвестниками землетрясения (ИПЗ), ибо оказываются связанными с процессами его подготовки, решается для каждого события (землетрясения) индивидуально с определенной долей вероятности. При этом, в большинстве случаев, такая оценка проводится а posteriori по совокупности разных морфологических признаков и поведению измеренных параметров ионосферы с учетом общей геофизической обстановки.

Концептуально общепринятый на настоящий момент подход состоит в том, что для любого измеряемого параметра ионосферы  $X$  определяется “фоновый” уровень его временных изменений, а отклонения от него, превышающие заданные границы, определяются как возмущения. Как правило, в ионосферных исследованиях за “фоновый” уровень обычно принимается медианное значение параметра  $X_{\text{med}}(t_i)$  для каждого момента суток  $i$ , определенное по ансамблю опорных дней (в случае стандартной ситуации, это обычно месяц). При этом  $i \in [0, n]$ , где  $n$  равно числу равномерных отсчетов на суточном интервале. В качестве меры разброса в поведении текущей величины  $X_{\text{current}}(t_i)$  за счет случайных отклонений тогда выбирается межквартильный диапазон (Inter Quartile Range)  $IQR$  – разность между верхним и нижним квартилями по выбранному ансамблю дней. Тогда полоса  $K_{\pm} = X_{\text{med}}(t_i) \pm 1.5IQR(t_i)$  ограничит амплитуду вариаций  $X_{\text{current}}(t_i)$ , объясняемую случайными отклонениями, с определенной

степенью вероятности. Согласно Klotz and Johnson [1983], в случае нормального распределения “ошибки” значений  $\Delta X(t_i) = X_{\text{current}}(t_i) - X_{\text{med}}(t_i)$ , величина  $1.5IQR(t_i)$  будет соответствовать примерно двум стандартным отклонениям, и значения  $X_{\text{current}}(t_i)$  под воздействием разных случайных факторов должны колебаться в пределах полосы  $K_{\pm}$  с вероятностью 95%. Поэтому значения  $X_{\text{current}}(t_i)$ , выходящие за пределы указанной полосы, можно отнести к неслучайным возмущениям. Таким образом, решения о наличии возмущений можно принимать по группе измеренных на НСВЗИ параметров, значения которых можно извлечь из ионограмм.

Следует отметить, что ВИПЗ, идентифицируемые затем как ИПЗ, обычно невелики по амплитуде, если сравнивать их величину с ионосферными возмущениями, обусловленными магнитосферными возмущениями – магнитными бурями, которые могут сильно затруднить, или даже сделать невозможной идентификацию ИПЗ в период их развития на таком возмущенном фоне при описанном выше подходе. Действительно, как показано в работе [Khegai et al., 2007], на одной и той же НСВЗИ ROME максимальная абсолютная величина возмущения  $foF2$  ионосферы, выходящая за границу полосы разброса и обусловленная умеренной бурей ( $Kp^{\text{max}} = 6.0$ ) более чем в три раза превзошла максимальное сейсмоионосферное возмущение (ИПЗ), наблюдавшееся на спокойном геомагнитном фоне ( $Kp \leq 2_0$ ) примерно за сутки до землетрясения с магнитудой  $M = 6.0$  и эпицентральной расстоянием  $R_e \cong 410$  км до ст. ROME. Магнитная буря началась 10 января 1962 г., через два дня после подземного толчка.

В “противовес” или в дополнение сказанному выше, следует указать на *новый* подход в идентификации ИПЗ, представленный в работе [Пулинец и др., 2021]. В этом исследовании предлагается и описывается 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”. Очевидно, что для повышения надежности выделения возможных ИПЗ из наблюдаемых ВИПЗ следует, по возможности, привлекать как можно больше одновременно измеряемых ионосферных параметров или их эффективных комбинаций.

Целью настоящей работы является рассмотрение такой комбинации двух одновременно измеряемых на НСВЗИ параметров, которые практически всегда можно извлечь из ионограммы. Это уже упомянутая выше критическая частота слоя  $F2$  ионосферы ( $foF2$ ) и  $h'F$  – минимальная дей-

ствующая высота следа отражений обыкновенной волны от взятой в целом области  $F$  ионосферы (см. [Руководство ..., 1977]). В результате их одновременного сочетания в новом относительном параметре  $\delta_{\text{Barbier}}$  появляется дополнительная возможность для анализа ионосферных возмущений и поиска возможных ИПЗ. Математическое выражение для  $\delta_{\text{Barbier}}$  выводится из полуэмпирической формулы Барбье (см. работы [Barbier, 1957, 1959; Barbier and Glaume, 1962]), полученной и апробированной для ряда НСВЗИ. Использование вводимого параметра  $\delta_{\text{Barbier}}$  далее иллюстрируется конкретным примером анализа ионосферных данных перед землетрясением с магнитудой  $M = 6.2$ , произошедшим 26.06.1989 г. в окрестности НСВЗИ MAUI (Гавайские о-ва). Данные именно этой НСВЗИ ранее также успешно привлекались для тестирования и верификации предложенной в работах Barbier [1957, 1959] полуэмпирической формулы (см. подробнее работы [Barbier, 1963; Барбье, 1964]).

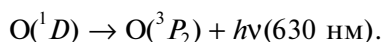
## 2. ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА БАРБЬЕ И ВЫВОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ПАРАМЕТРА $\delta_{\text{Barbier}}$

Полуэмпирическая формула Барбье была предложена им впервые в работе [Barbier, 1957] для НСВЗИ северного полушария TAMANRASSET (географические координаты 22.8° N, 5.5° E), и она связывает количество квантов излучения атмосферы на длине волны 630 нм ( $Q$ ) в неосвещенные часы (на интервале от 20 до 04 ч LT) с измеряемыми ионосферными параметрами области  $F$  ионосферы  $foF2$  и  $h'F$  следующим образом (см. формулу (3) работы [Barbier and Glaume, 1962]):

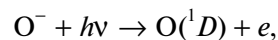
$$Q = K (foF2)^2 \exp\{-(h'F - 200)/H\} + C, \quad (1)$$

где  $Q$  – оцениваемая по ионосферным данным интенсивность свечения (в Рл),  $foF2$  (в МГц),  $h'F$  (в км),  $H$  – характерный пространственный масштаб изменения с высотой (в км), а  $K$  и  $C$  – некоторые постоянные.  $K$ ,  $C$  и  $H$  должны быть определены конкретно для каждой станции наблюдения. В работе [Barbier, 1963] указано, что для НСВЗИ TAMANRASSET величина  $H = 41.3 \pm \pm 2.5$  км.

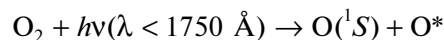
Подробное обсуждение физических процессов, связанных со свечениями в различных линиях, не входит в задачу этой статьи. Тем не менее, укажем здесь, что эмиссия в красной линии OI 630 нм в атмосфере происходит в результате запрещенного перехода (см., работу [Peterson et al., 1966]) атома кислорода из состояния  $O(^1D)$  в состояние  $O(^3P_2)$  с испусканием кванта излучения на длине волны 630 нм, т.е.



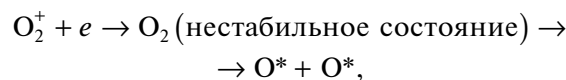
В свою очередь, атом в состоянии  $O(^1D)$ , как указано в работе [Chattopadhyay and Midya, 2006] образуется в процессах “фотоотлипания” электронов от ионов  $O^-$ :



фотодиссоциации в полосе Шумана–Рунге [Solar ..., 1983]:



и диссоциативной рекомбинации:



которая и вносит **основной вклад** в интенсивность этой эмиссии (здесь  $O^*$  обозначает атом кислорода в состояниях  $^1S$ ,  $^1D$  или  $^3P$ ).

Как отмечают далее авторы работы [Chattopadhyay and Midya, 2006], для эмиссий кислородного свечения (зеленой и красной линий) из экспериментально определенных значений различных констант скорости, коэффициентов гашения и вероятностей перехода можно вывести, что интенсивность свечения этих двух эмиссий пропорциональна только концентрации электронов и, таким образом, характер изменения эмиссии OI 630 нм и OI 557.7 нм в основном определяется высотным профилем электронной концентрации ( $N_e$ ). Вследствие того, что высотный профиль электронной концентрации в ночной области  $F$  может быть представлен с помощью модифицированной функции Чепмена (см. формулу (12) работы [Tinsley and Bittencourt, 1975]), в которой характерный пространственный масштаб  $H'(z)$ , где  $z$  – высота в км, оказывается близок к величине высоты однородной атмосферы для атомарного кислорода  $H_{[O]}$  в этом диапазоне высот, можно ожидать, что и величина  $H$  в формуле Барбье также будет близка к  $H_{[O]}$ . Позже соотношение (1), полученное Барбье, было тщательно верифицировано в работе Carman and Kilfoyle [1963] на НСВЗИ TOWNSVILLE южного полушария (географические координаты 19.25° S, 146.75° E).

Ранее, в работе [Ghosh et al., 2017] авторы определили комбинированный F Parameter  $\equiv (foF2)^2 \exp\{h'F/H\}$ , исходя из переменной части формулы Барбье для анализа пре- и постсейсмической активности по ионосферным данным, и получили его существенный рост за несколько дней до ряда рассмотренных в этой статье землетрясений. Отметим здесь однако, что, во-первых, определялось среднее значение этого параметра для целого дня, а во-вторых, как видно из его определения, в показателе экспоненты фигурирует знак “плюс”, в отличие от формулы Барбье. Значения этого параметра трудно интерпретировать на физической основе, так как формула Бар-

бье получена для неосвещенных часов, а знак “минус” в показателе экспоненты имеет принципиальное значение с физической точки зрения.

Ниже формула Барбие используется для вывода нового относительного параметра  $\delta_{\text{Barbier}}$ , с учетом применимости его только для неосвещенных условий (с 20 до 04 ч LT) и возможности его ясной физической интерпретации.

Рассмотрим теперь разность величин, определяемых формулой (1), в которой нижние индексы “cur” и “med” относятся к текущим значениям соответствующих величин и их медианным значениям по выбранному ансамблю дней, тогда:

$$\begin{aligned} \Delta Q &\equiv Q_{\text{cur}} - Q_{\text{med}} = \\ &= [K(foF2_{\text{cur}})^2 \exp\{-(h'F_{\text{cur}} - 200)/H\} + C] - \\ &- [K(foF2_{\text{med}})^2 \exp\{-(h'F_{\text{med}} - 200)/H\} + C] = \\ &= K \exp(200/H) (foF2_{\text{med}})^2 \exp(h'F_{\text{med}}/H) \times \\ &\times \left\{ [foF2_{\text{cur}}/foF2_{\text{med}}]^2 \exp[(h'F_{\text{med}} - h'F_{\text{cur}})/H] - 1 \right\}. \end{aligned}$$

Определим теперь безразмерную нормированную разность как

$\delta_{\text{Barbier}} \equiv \Delta Q / [K \exp(200/H) (foF2_{\text{med}})^2 \exp(h'F_{\text{med}}/H)]$ , или  $\delta$ -параметр Барбие, тогда

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

характеризует изменение оцениваемой по ионосферным данным интенсивности свечения атмосферы на длине волны 630 нм в неосвещенные часы. Действительно, 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 (2) их разность определяет фактор с экспоненциальным ростом. При этом в выражении (2) остается неизвестной только одна величина –  $H$ , которую нужно определить для конкретной НСВЗИ, на которой ведется наблюдение. Обсудим этот вопрос подробнее.

Barbier et al. [1962] обнаружили поразительное согласие между фотометрическими измерениями ночного свечения [OI] 630 нм и расчетными значениями, основанными на измеренных ионосферных параметрах  $foF2$  и  $h'F$ . Опубликованные оптические наблюдения были сделаны в северных тропиках вблизи НСВЗИ MAUI (20.8° N, 203.5° E) на ст. Haleakala (20.71° N, 203.73° E), расположенной в ~25 км по дуге большого круга от НСВЗИ. Они были проведены в течение трех ночей (22–23 мая, 3–4 и 5–6 июня в 1961 г. в интер-

вале от 20 до 04 LT), а сравнение проводилось между наблюдаемыми величинами и значениями, рассчитанными в соответствии с полуэмпирической формулой Barbier [1957], при этом величина  $H$  была взята равной 41.3 км, т.е. той же, что и для НСВЗИ TAMANRASSET. Отметим здесь, что географические широты НСВЗИ TAMANRASSET (22.8° N) и MAUI (20.8° N) близки.

Далее мы определим процедуру, по которой мы будем рассчитывать величину  $H$  для любой конкретной НСВЗИ, в соответствии с ее географическими координатами и неосвещенного Солнцем периода наблюдения с 20 до 04 LT требуемой даты (аналогично исследованию Barbier et al. [1962]) с помощью хорошо разработанной и современной модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00 [https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php]. Для этого, в диапазоне высот от 200 до 400 км мы будем аппроксимировать полученные с ее помощью высотные профили концентрации атомарного кислорода [O] и плотности [ρ] (для нулевого часа LT нужных суток) экспоненциальными функциями, а необходимое нам значение  $H$  будет получаться как среднее величин  $H_{[O]}$  и  $H_{[\rho]}$ , которые являются характерными масштабами экспоненциального изменения с высотой концентраций атомарного кислорода [O] и плотности нейтральной атмосферы [ρ] в этих аппроксимациях. Таким образом, мы получим с помощью такой процедуры  $H = H_{\text{MSIS}} \equiv (H_{[O]} + H_{[\rho]})/2$ . Отметим, что при таком определении среднее значение будет равно медианному.

Проведем теперь верификацию определенно нами выше значения  $H$  для НСВЗИ TAMANRASSET в ночь с 3 на 4 июня 1961 г. в интервале от 20 до 04 LT, чтобы сопоставить с величиной, указанной в работе [Barbier, 1963], согласно которой  $H = 41.3 \pm 2.5$  км. В приведенной ниже табл. 1 представлены значения  $H_{[\rho]}$ ,  $H_{[O]}$  и  $H_{\text{MSIS}}$  в интервале от 20 до 04 LT с 3 на 4 июня 1961 г. для НСВЗИ TAMANRASSET.

Как видно из табл. 1, полученное нами (с учетом округления) медианное значение  $H_{\text{MSIS}} = H_{\text{MED}} \pm 1.5IQR = 41.6 \pm 2.6$  км очень близко к представленному ранее в работе [Barbier, 1963] значению  $H = 41.3 \pm 2.5$  км. Из таблицы 1 также ясно, что полученная нами с помощью такой процедуры величина  $H$  действительно близка к  $H_{[O]}$ , как предполагалось выше.

Таким образом, для того, чтобы вычислять комбинированный параметр  $\delta_{\text{Barbier}}$  по формуле (2) для диагностики ионосферы, нам необходимы временные ряды наблюдений  $foF2_{\text{cur}}$ ,  $h'F_{\text{cur}}$  в заданных интервалах местного времени от 20 до 04 LT и величина  $H_{\text{MSIS}}$ , определенная по описан-

**Таблица 1.** Значения  $H_{[p]}$ ,  $H_{[O]}$  и  $H_{MSIS}$  в интервале 20 до 04 LT для НСВЗИ TAMANRASSET с 3 на 4 июня 1961 г.

Дата	Время LT, ч	$H_{[p]}$ , км	$H_{[O]}$ , км	$H_{MSIS}$ , км
03.06.1961 г.	20	41.81	50.25	46.03
03.06.1961 г.	21	40.27	48.07	44.17
03.06.1961 г.	22	39.00	46.28	42.64
03.06.1961 г.	23	38.24	45.27	41.75
04.06.1961 г.	00	38.02	45.13	<b>41.57</b>
04.06.1961 г.	01	37.90	45.06	41.48
04.06.1961 г.	02	37.77	44.90	41.34
04.06.1961 г.	03	37.61	44.57	41.09
04.06.1961 г.	04	37.56	44.30	40.93

*Примечание.* Медианное значение  $H_{MSIS}$  выделено жирным шрифтом.

ной выше процедуре с помощью модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00.

Ниже мы и рассмотрим конкретный пример использования этого параметра при изучении вариаций в ионосфере перед землетрясением с магнитудой  $M = 6.2$ , произошедшим 26.06.1989 г. в окрестности НСВЗИ MAUI, по данным которой за 1961 г. тестировалась формула Барбье (1) в работе Barbier et al. [1962].

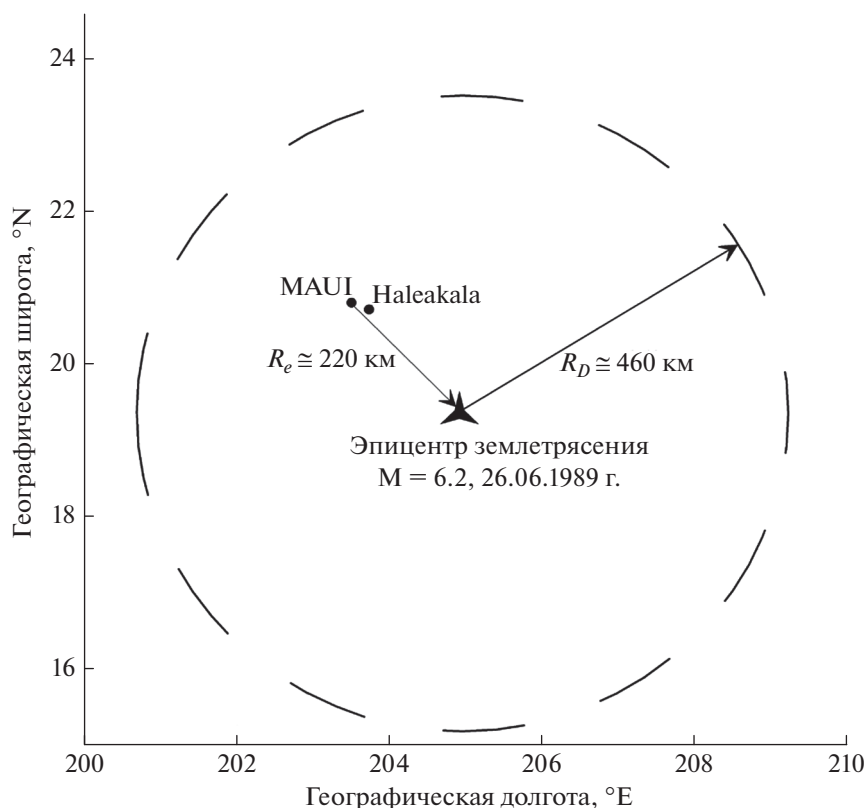
### 3. АНАЛИЗ ДАННЫХ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Землетрясение (по данным каталога USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/hv311275/executive>)) с географическими координатами эпицентра  $\phi_e = 19.36^\circ \text{ N}$ ;  $\lambda_e = 204.92^\circ \text{ E}$ , временем толчка 03:27:03 UT, глубиной гипоцентра  $h = 8.8$  км и магнитудой  $M = 6.2$  произошло 26 июня 1989 г., на эпицентральной расстоянии  $R_e \cong 220$  км по дуге большого круга от НСВЗИ MAUI. Минимальный радиус зоны подготовки для этого землетрясения на поверхности Земли, в соответствии с оценкой по Добровольскому,  $R_D(M = 6.2) \cong 460$  км, и НСВЗИ MAUI оказалась глубоко внутри этой зоны, так как  $R_e \cong 220$  км  $<$   $R_D(M = 6.2) \cong 460$  км. Описанную ситуацию иллюстрирует рис. 1, на котором крупными черными точками показаны НСВЗИ MAUI и ст. Haleakala (на которой ранее и проводились оптические измерения, см. работу Barbier et al. [1962]) соответственно, а треугольной “звездой” отмечен эпицентр землетрясения. Стрелками показаны эпицентральной расстояние ( $R_e$ ) и радиус Добровольского ( $R_D$ ).

Далее нами анализируется семидневный временной интервал с 21.06.1989 г. по 27.06.1989 г. (т.е. пять дней до и один день после толчка, а также сам день землетрясения). Чтобы исследовать временные вариации ионосферных параметров ( $foF2_{cur}$ ,  $h'F_{cur}$  и  $\delta_{Barbier}$ ), сначала был определен

временной интервал для выбора опорных геомагнитноспокойных дней, на основе которых затем формировались медианные значения ионосферных параметров  $foF2_{med}$ ,  $h'F_{med}$  для каждого часа суток. Этот интервал был задан как 26.06.1989 г.  $\pm$  9 дней, т.е. симметрично относительно дня землетрясения. Затем из этого интервала были взяты только такие (геомагнитноспокойные!) дни, для которых в течение всего дня  $Kp \leq 3_-$ . При этом налагалось дополнительное требование, чтобы в течение такого дня наблюдалось бы не более двух значений  $3_-$ , а интервал между ними должен быть не менее 6 ч. Оказалось, что таким требованиям к выбору геомагнитноспокойных дней удовлетворяют 10 дней из указанного выше временного интервала: 18, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28 июня и 3, 4 июля. Величина  $H$ , необходимая для вычисления параметра  $\delta_{Barbier}$  по формуле (2), определялась для неосвещенного периода (20–04 LT) каждого из опорных дней в соответствии с процедурой, описанной выше в разделе 2, а затем было взято медианное значение по этой группе дней:  $H = \text{MED} H_{MSIS} = 55.5$  км.

На рисунке 2 показано временное поведение планетарного  $Kp$ -индекса (панель *a*) и текущих значений величин  $\delta_{Barbier}$  (панель *b*),  $h'F$  (панель *в*),  $foF2$  (панель *г*) на НСВЗИ MAUI в интервале 21–27.06.1989 г. в неосвещенные часы (сплошные жирные линии с точками). Затемненные прямоугольники под самой нижней осью абсцисс отмечают интервалы местного времени от 18 до 06 LT. Сплошная вертикальная линия со стрелкой отмечает момент землетрясения. На панели (*a*) горизонтальная штрихпунктирная линия отмечает уровень  $2_+$  – спокойные геомагнитные условия. На панели (*b*) штрихпунктирные линии отмечают полосу разброса значений  $\pm 1.5IQR$  для  $\delta_{Barbier}$ , полученную по значениям на показанном временном интервале с учетом только отрезков 20–04 LT для всех исследуемых суток. На панелях (*в*) и (*г*) сплошные линии указывают медианные значе-



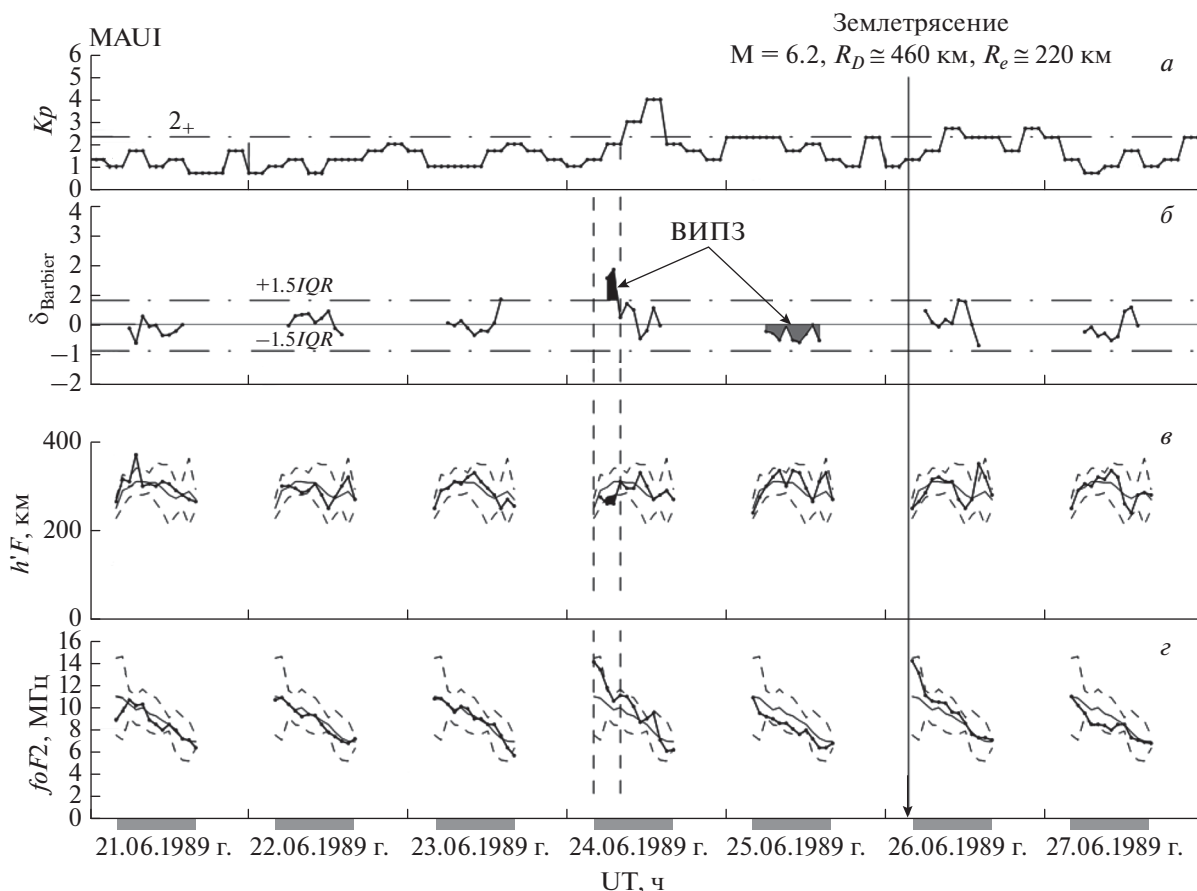
**Рис. 1.** Географическое положение эпицентра землетрясения с магнитудой  $M = 6.2$ , произошедшего 26.06.1989 г. (треугольная звезда) около НСВЗИ MAUI и ст. Haleakala (крупные черные точки), лежащих в зоне его подготовки на поверхности Земли. Стрелками показаны эпицентральное расстояние ( $R_e$ ) и радиус Добровольского ( $R_D$ ).

ния соответствующей величины, а штриховые – полосы их разброса  $\pm 1.5IQR$  по ансамблю опорных дней. Штриховые вертикальные линии отмечают узкий временной интервал 24.06.1989 г., когда  $foF2$  приближается к своей верхней границе полосы разброса, а  $h'F$  опускается ниже своей нижней границы полосы разброса в течение двух часов, при этом  $\delta_{\text{Barbier}}$  тоже выходит за границы своей верхней полосы разброса. Для удобства восприятия эти области отмечены черной заливкой. Светло-серая заливка отмечает отрезок времени с 20–04 LT 25.06.1989 г., в течение которого  $\delta_{\text{Barbier}} < 0$ , т.е. интенсивность свечения в линии OI 630 нм непрерывно ниже своего медианного уровня.

Итак, на рис. 2 отмечены как ВИПЗ две интересные особенности. Первая состоит в том, что наблюдается двухчасовой отрезок (24.06.1989 с 06 до 07 ч UT), на котором  $\delta_{\text{Barbier}}$  выходит за верхнюю границу полосы разброса (перед небольшим кратковременным умеренным возрастанием геомагнитной активности, судя по поведению  $Kp$ -индекса, вскоре достигающего уровня  $4_0$ ). Вторая особенность наблюдается на следующий день, весь восьмичасовой интервал в неосвещенный период перед землетрясением на спокойном

геомагнитном фоне (25.06.1989 с 06 до 14 ч UT,  $Kp \leq 2_+$ ), когда оцениваемая интенсивность свечения в линии OI 630 нм всегда ниже своего медианного уровня, хотя и не выходит за нижнюю границу полосы разброса. Из рисунка также видно, что, во-первых, кратковременный “всплеск” в  $\delta_{\text{Barbier}}$  (24.06.1989 с 06 до 07 ч UT) происходит тогда, когда  $h'F$  опускается ниже своей нижней границы полосы разброса, а  $foF2$  очень близко подходит к своей верхней границе полосы разброса. Во-вторых, длительный период отрицательных значений  $\delta_{\text{Barbier}}$  (25.06.1989 с 06 до 14 ч UT) соответствует низким значениям  $foF2$  (близко к нижней границе полосы разброса) и одновременно высоким значениям  $h'F$  (близко к верхней границе полосы разброса), что физически означает подъем ночного слоя  $F2$  и понижение величины максимума электронной концентрации  $N_e - NmF2$ . Подчеркнем, что второе ВИПЗ продолжительно, но нигде не выходит за границы полосы разброса параметра  $\delta_{\text{Barbier}}$ , однако из всех рассмотренных ночных отрезков семи анализируемых дней только в ночь перед землетрясением  $\delta_{\text{Barbier}}$  всегда отрицательно.

Рассмотрим выделенные особенности поведения параметра  $\delta_{\text{Barbier}}$  более подробно, в “привяз-



**Рис. 2.** Временной ход планетарного  $Kp$ -индекса (а) и текущих значений величин  $\delta_{\text{Barbier}}$  (б),  $h'F$  (в),  $foF2$  (г) на НСВЗИ MAUI в интервале 21–27.06.1989 г. в неосвещенные часы (сплошные жирные линии с точками). Затемненные прямоугольники под самой нижней осью абсцисс отмечают интервалы местного времени от 18 до 06 ч LT. Сплошная вертикальная линия со стрелкой отмечает момент землетрясения. На панели (а) горизонтальная штрихпунктирная линия отмечает уровень  $2_+$  – спокойные геомагнитные условия. На панели (б) штрихпунктирные линии отмечают полосу разброса значений  $\pm 1.5IQR$  для  $\delta_{\text{Barbier}}$ . На панелях (в) и (г) сплошные линии указывают медианные значения соответствующей величины, а штриховые – полосы их разброса  $\pm 1.5IQR$ . Остальные объяснения в тексте.

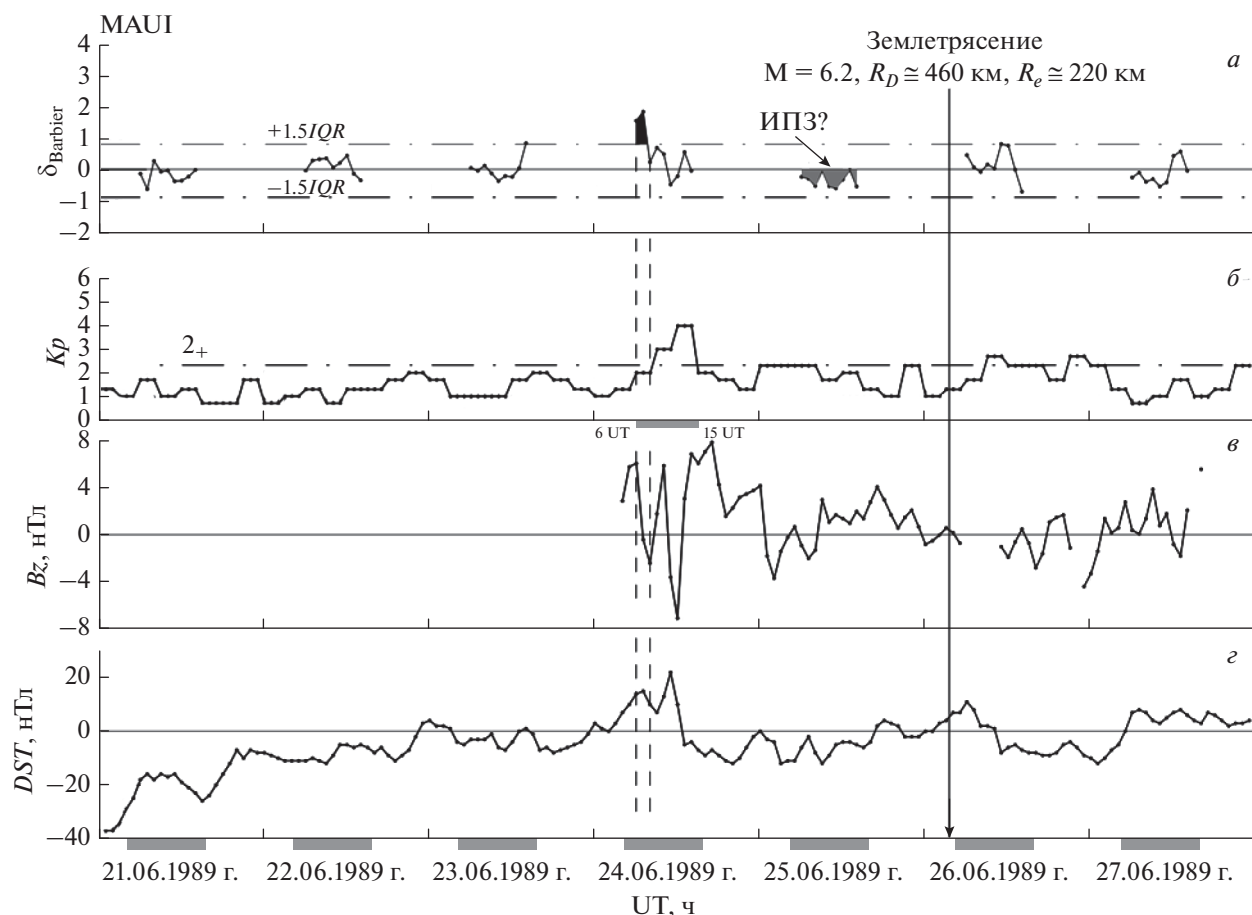
ке” к другим геофизическим индексам –  $DST$  и  $B_z$  – ММП (межпланетное магнитное поле).

На рисунке 3 представлены временные изменения  $\delta_{\text{Barbier}}$  на НСВЗИ MAUI в неосвещенные часы (панель а), ход планетарного  $Kp$ -индекса (панель б) и текущие часовые значения величин  $B_z$  (панель в) и  $DST$  (панель г) в интервале 21–27.06.1989 г. (сплошные жирные линии с точками). Черный прямоугольник под осью абсцисс на панели (б) отражает кратковременное умеренное возрастание геомагнитной активности с 06 до 15 ч UT 24.06.1989 г. Область светло-серой заливки на панели (а) отмечена стрелкой как возможный ионосферный предвестник землетрясения (ИПЗ). Отсутствие значений  $B_z$  на панели (в) на различных временных отрезках связано с отсутствием данных. Другие обозначения те же, что и на рис. 2.

Из рисунка 3 видно, что в течение 24.06.1989 г. (–2-й день, если считать день землетрясения нулевым) регистрируется незначительное кратковременное возрастание геомагнитной активности, связанное с поворотом  $B_z$  – ММП к югу, в виде двух последовательных микросуббурь (см., в частности, монографии [Akasofu, 1977; Пудовкин и др., 1977; Нишида, 1980]) на интервале с 06 до 15 ч UT (черный прямоугольник под осью абсцисс на панели (а) графика  $Kp$ -индекса). При этом, локальные экстремумы (минимумы)  $DST$ -индекса (панель г) следуют за локальными минимумами  $B_z$  (повороты ММП к югу) с характерной часовой задержкой.

В начале развития первой микросуббури наблюдается короткий, существующий в течение двух часов пик в  $\delta_{\text{Barbier}}$ , совпадающий с одновременным понижением  $h'F$  и ростом  $foF2$  (при этом  $h'F$  выходит за пределы своей нижней границы, а  $foF2$  – вблизи своей верхней границы “фона”





**Рис. 3.** Временные изменения  $\delta_{\text{Barbier}}$  на НСВЗИ MAUI в неосвещенные часы (а), ход планетарного  $K_p$ -индекса (б) и текущие часовые значения величин  $B_z$  (в) и  $DST$  (г) в интервале 21–27.06.1989 г. (сплошные жирные линии с точками). Черный прямоугольник под осью абсцисс на панели (б) отражает кратковременное умеренное возрастание геомагнитной активности с 06 до 15 ч UT 24.06.1989 г. Стрелкой отмечена область светло-серой заливки на панели (а) как возможный ионосферный предвестник землетрясения (ИПЗ). Отсутствие значений  $B_z$  на панели (в) на различных временных отрезках связано с отсутствием данных. Другие обозначения те же, что и на рис. 2.

относительно медианы). Этот пик может быть обусловлен описанным выше началом кратковременного магнитосферного возмущения, после окончания которого (в 15 UT) в течение полутора суток, вплоть до момента землетрясения,  $K_p \leq 2_+$ , т.е. регистрируется спокойный геомагнитный фон. Длительное же восьмичасовое понижение  $\delta_{\text{Barbier}}$  в неосвещенные часы суток за  $\sim 13.5$  ч до землетрясения может иметь сейсмогенную природу. Такое уменьшение оцениваемой интенсивности свечения в линии OI 630 нм ниже своего медианного уровня, может означать подъем ночного слоя  $F_2$  с одновременным уменьшением  $NmF_2$ . Как отмечают авторы работы [Kim et al., 2017], **джоулев нагрев** ночной ионосферной плазмы  $F$ -области внутри магнитной трубки, опирающейся на эпицентральную зону надвигающегося землетрясения (и обусловленный проникшим в ионосферу электрическим полем сейсмогенного происхождения), может привести к уменьшению

нисходящего потока плазмы из протоносферы, которая играет важную роль в поддержании ночного  $F_2$ -слоя. Уменьшение нисходящего потока плазмы приведет к уменьшению основного максимума ионосферной плазмы  $NmF_2$  над эпицентральной зоной надвигающегося землетрясения, при этом восточная компонента зонального электрического поля, усиленная полем сейсмогенного источника, вызовет дополнительный дрейф плазмы вверх, что приведет к подъему слоя.

Рост температуры в ночной области  $F$  ионосферы на сотни градусов Кельвина перед Иранским землетрясением (географические координаты эпицентра  $\varphi_e = 36.96^\circ \text{ N}$ ;  $\lambda_e = 49.41^\circ \text{ E}$ , время толчка 20 июня 1990 г. 21:00:09 UT, глубина гипоцентра  $h = 18.5$  км, магнитуда  $M = 7.4$ ) в его очаговой зоне ранее был зафиксирован в работе [Акмамедов, 1993] в соответствии с интерферометрическими измерениями температуры по эмиссии атомарного кислорода OI 630 нм. Эпицентральный



ное расстояние  $R_e$  до обсерватории (географические координаты  $\varphi_{\text{обс}} = 37.9^\circ \text{ N}$ ;  $\lambda_{\text{обс}} = 58.4^\circ \text{ E}$ ), расположенной вблизи г. Ашхабада, составило  $\sim 800$  км по дуге большого круга, тогда как  $R_D(M = 7.4) \cong \cong 1520$  км. Измерения проводились в период низкой магнитной и стабильной солнечной активности.

Таким образом, в рассмотренном нами случае получается, что первый короткий “всплеск” в параметре  $\delta_{\text{Barbier}}$  продолжительностью в два часа оказывается связан с кратковременным умеренным ростом геомагнитной активности, а длительное восьмичасовое понижение  $\delta_{\text{Barbier}}$  (ниже своего медианного уровня на спокойном геомагнитном фоне) в неосвещенные часы суток за  $\sim 13.5$  ч до землетрясения может иметь сейсмогенную природу и быть его ионосферным предвестником (ИПЗ). Этот возможный ИПЗ концептуально вписывается в схему “когнитивной идентификации” ИПЗ, предложенную в работе [Пулинец и др., 2021].

Из проведенного выше рассмотрения ясно, что введенный нами относительный параметр дельта-Барбье ( $\delta_{\text{Barbier}}$ ) может быть использован как для анализа ионосферных возмущений магнитосферного происхождения, так и для изучения аномалий ионосферы, имеющих сейсмогенную природу – возможных ионосферных предвестников землетрясений (ИПЗ).

#### 4. ВЫВОДЫ

1. Предложен новый относительный параметр ( $\delta_{\text{Barbier}}$ ) для анализа ионосферных данных, полученный на основе полуэмпирической формулы Барбье, впервые предложенной в работе Barbier [1957].

2. На конкретном примере продемонстрирована его эффективность при интерпретации поведения ионосферы перед землетрясением с магнитудой  $M = 6.2$ , произошедшим в окрестности наземной станции вертикального зондирования ионосферы MAUI (Гавайские о-ва) 26.06.1989 г. Показано, что в течение неосвещенных часов на геомагнитоспокойном 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 может быть 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. Этот эффект может иметь сейсмогенную природу и быть ионосферным предвестником землетрясения.

3. Параметр дельта-Барбье ( $\delta_{\text{Barbier}}$ ) может быть использован как для анализа ионосферных возмущений магнитосферного происхождения, так и для изучения аномалий ионосферы, имеющих сейсмогенную природу – возможных ионосферных предвестников землетрясений (ИПЗ).

#### 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Community Coordinated Modeling Center (CCMC) за возможность проведения онлайн-расчетов по модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00, UK Solar System Data Centre (UKSSDC) за предоставление доступа к ионосферным данным, NOAA’s National Geophysical Data Center (NGDC) USA [NASA/GSFC’s Space Physics Data Facility’s OMNIWeb service], 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

- Акмамедов Х. Интерферометрические измерения температуры в  $F2$ -области ионосферы в период Иранского землетрясения 20.06.1990 г. // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 33. № 1. С. 163–166. 1993.
- Барбье Д. Введение в излучение полярных сияний и излучения атмосферы / Геофизика. Околосферное космическое пространство. Лекции в летней школе теоретической физики при Гренобльском Университете. 1962 г. Перевод под ред. Г.С. Голицына. М.: Мир. С. 182–242. 1964.
- Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 301 с. 1980.
- Пудовкин М.И., Козелов В.П., Лазутин Л.Л., Трошичев О.А., Чертков А.Д. Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений. Л.: Наука, 312 с. 1977.
- Пулинец С.А., Давиденко Д.В., Будников П.А. Метод когнитивной идентификации ионосферных предвестников землетрясений // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 61. № 1. С. 103–114. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0016794021010132>
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. М.: Наука, 343 с. 1977.
- Хегай В.В., Легенька А.Д., Пулинец С.А., Ким В.П. Изменения в  $F2$ -области ионосферы перед катастрофическим землетрясением на Аляске 28.03.1964 г. по данным наземных станций вертикального зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 42. № 3. С. 360–365. 2002.
- Akasofu S.-I. Physics of magnetospheric substorms. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 599 p. 1977.
- Barbier D. La lumiere du ciel nocturne en ete a Tamanrasset // Compt. Rend. Acad. Sci., Paris. № 245. P. 1559–1561. 1957.
- Barbier D. Recherches sur la raie 6300 de la luminescence atmospherique nocturne // Ann. Geophys. V. 15. № 2. P. 179–217. 1959.

- *Barbier D.* Étude de la couche F d'après l'émission de la raie rouge du ciel nocturne // *Planet. Space Sci.* V. 10. P. 29–35. 1963.  
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(63\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0032-0633(63)90004-7)
- *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](https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/66D/jresv66Dn2p145_A1b.pdf)
- *Davies K., Baker D.M.* Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964 // *J. Geophys. Res.* 1965. V. 70. № 9. P. 2251–2253.  
<https://doi.org/10.1029/JZ070i009p02251>
- *Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I.* Estimation of the size of earthquake preparation zones // *Pure Appl. Geophys.* V. 117. Issue 5. P. 1025–1044. 1979.
- *Carman E.H., Kilfoyle B.P.* Relationship between [OI] 6300 Å zenith airglow and ionospheric parameters  $f_oF_2$  and  $h'F$  at Townsville // *J. Geophys. Res.* V. 68. № 19. P. 5605–5607. 1963.
- *Chattopadhyay R., Midya S.K.* Airglow emissions: fundamentals of theory and experiment // *Indian J. Phys.* V. 80. № 2. P. 115–166. 2006.
- *Ghosh S., Sasmal S., Midya S.K., Chakrabarti S.K.* Unusual change in critical frequency of  $F_2$  layer during and prior to earthquakes // *Open J. Earthquake Research.* V. 6. № 4. P. 191–203. 2017.  
<https://doi.org/10.4236/ojer.2017.64012>
- <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlm-sise00.php>
- <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/hv311275/executive>
- *Khegai V.V., Legenka A.D., Kim V.P.* Comparison of  $f_oF_2$  variations observed prior to two major earthquakes in Italy and during a magnetic storm // *IUGG XXIV General Assembly July 2–13, 2007 Perugia, Italy.* (S) – IASPEI – International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior. JSS010. Poster presentation 2080.
- *Kim V.P., Hegai V.V., Liu J.-Y., Ryu K., Chung J.-K.* Time-varying seismogenic Coulomb electric fields as a probable source for pre-earthquake variation in the ionospheric  $F_2$ -layer // *J. Astron. Space Sci.* V. 34. № 4. P. 251–256. 2017.  
<https://doi.org/10.5140/JASS.2017.34.4.251>
- *Klotz S., Johnson N.L.* (Eds.) *Encyclopedia of statistical sciences.* N.J.: John Wiley, Hoboken, 1983.
- *Peterson V.L., Vanzandt T.E., Norton R.B.* F-region nightglow emissions of atomic oxygen // *J. Geophys. Res.* V. 71. № 9. P. 2255–2265. 1966.  
<https://doi.org/10.1029/JZ071i009p02255>
- *Solar Terrestrial Physics, Principles and Theoretical Foundations.* Eds. R.L. Carovillano and J.M. Forbes. Dordrecht: D. Riedel Publishing Company, 859 p. 1983.
- *Tinsley B.A., Bittencourt J.A.* Determination of  $F$  region height and peak electron density at night using airglow emissions from atomic oxygen // *J. Geophys. Res.* V. 80. Iss. 16. P. 2333–2337. 1975.  
<https://doi.org/10.1029/JA080i016p02333>