

ФИЗИКА

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-203-219>

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 554.510.535



Оценка прогностической эффективности ионосферных возмущений, предшествующих наступлению землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ в Камчатском регионе

А. В. Павлов*

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, с. Паратунка, ул. Мира, 7, Россия

Аннотация. Аномальные изменения параметров, характеризующих состояние ионосферных областей E и F, наблюдаемые перед наступлением сейсмических событий, могут рассматриваться как возможные ионосферные предвестники этих землетрясений. С целью идентификации сейсмоионосферных возмущений, предшествующих наступлению землетрясений, в работе использованы ежечасные значения параметров $h'Es$, $hmF2$, $fbEs$, $foF2$, которые получены за период 2016–2023 гг. на ионосферной станции вертикального радиозондирования, расположенной в с. Паратунка (52.97° с.ш., 158.24° в.д.). В качестве возможного ионосферного предвестника землетрясений рассматривались отклонения значений комплекса ионосферных параметров от верхней границы диапазона их фоновых значений в течение суточного интервала при условии отсутствия геомагнитных возмущений. Для оценки прогностической эффективности использованы методики А.А. Гусева, Г.М. Молчана, критерий Ханссена-Койпера, а также вычислялась достоверность и надежность предвестника. Оценки прогностической эффективности проводились для землетрясений, произошедших за временной интервал 2016–2023 гг., с магнитудами $M \geq 5.0$, $M \geq 5.5$, $M \geq 6.0$, глубинами гипоцентров до 100 км и эпицентрными расстояниями до 400 км до места расположения ионосферной станции. Согласно полученным оценкам прогностической эффективности комплекса рассматриваемых ионосферных параметров, прогноз сейсмических событий с магнитудами $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$ отличается от случайного угадывания и, следовательно, выявленные ионосферные возмущения могут быть связаны с процессами подготовки землетрясений. Наибольшие значения эффективности прогноза получены для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.5$.

Ключевые слова: ионосфера, вертикальное радиозондирование, литосфера, землетрясение, предвестник землетрясений.

Получение: 16.10.2024; Исправление: 11.11.2024; Принятие: 18.11.2024; Публикация онлайн: 28.11.2024

Для цитирования. Павлов А.В. Оценка прогностической эффективности ионосферных возмущений, предшествующих наступлению землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ в Камчатском регионе // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т. 49. № 4. С. 203-219. EDN: RMYCLH. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-203-219>.

Финансирование. Работа выполнена за счет Государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2. Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Автор несет ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция:  E-mail: pavlov@ikir.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Павлов А. В., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)





Estimation of the prognostic efficiency of ionospheric disturbances preceding the occurrence of earthquakes with a magnitude of $M \geq 5.0$ in the Kamchatka region

A. V. Pavlov*

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684034, Kamchatka region, Elizovskiy district, Paratunka, Mirnaya str., 7, Russia

Abstract. Anomalous changes in the parameters characterizing the state of the ionospheric E and F regions observed before the onset of seismic events can be considered as possible ionospheric precursors of these earthquakes. In order to identify seismoionospheric disturbances preceding the onset of earthquakes, the work used hourly values of the $h'Es$, $hmF2$, $fbEs$, $fbEs$ and $foF2$ parameters, which were obtained for the period 2016–2023 at the ionospheric station of vertical radio sounding located in the village of Paratunka (52.97° N, 158.24° E). Deviations of the values of the ionospheric parameter complex from the upper limit of the range of their background values during the daily interval in the absence of geomagnetic disturbances were considered as a possible ionospheric precursor of earthquakes. The methods of A.A. Gusev, G.M. Molchan, the Hansen-Kuiper criterion, and the reliability and validity of the precursor were used to estimate the prognostic efficiency. The prognostic efficiency was estimated for earthquakes that occurred in the time interval 2016–2023, with magnitudes $M \geq 5.0$, $M \geq 5.5$, $M \geq 6.0$, hypocenter depths of up to 100 km and epicentral distances of up to 400 km to the location of the ionospheric station. According to the obtained estimates of the prognostic efficiency of the complex of ionospheric parameters under consideration, the forecast of seismic events with magnitudes $M \geq 5.0$ and $M \geq 5.5$ differs from random guessing and, therefore, the identified ionospheric disturbances can be associated with the processes of earthquake preparation. The highest values of the forecast efficiency were obtained for earthquakes with magnitudes $M \geq 5.5$.

Key words: ionosphere, vertical radio sounding, lithosphere, earthquake, earthquake precursor.

Received: 16.10.2024; Revised: 11.11.2024; Accepted: 18.11.2024; First online: 28.11.2024

For citation. Pavlov A. V. Estimation of the prognostic efficiency of ionospheric disturbances preceding the occurrence of earthquakes with a magnitude of $M \geq 5.0$ in the Kamchatka region. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 49: 4, 203-219. EDN: RMYCLH. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-203-219>.

Funding. The work was supported by IKIR FEB RAS State Task (Reg. No. NIOKTR 124012300245-2). The work was carried out using data obtained at the unique scientific installation “Seismic infrasound complex for monitoring the Arctic cryolithozone and complex for continuous seismic monitoring of the Russian Federation, adjacent territories and the world” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. Author is solely responsible for providing the final version of the article in print.

*Correspondence:  E-mail: pavlov@ikir.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Pavlov A. V., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

Последствия землетрясений делают актуальным проведение исследований физических процессов, которые сопровождают подготовку землетрясений на различных фазах, и разработку на их основе методов и средств прогноза. Поиск предвестников землетрясений в таких геофизических оболочках Земли, как атмосфера и ионосфера может быть полезен для краткосрочного (часы-сутки) прогноза сильных сейсмических событий. Как показывают многочисленные исследования, эффекты в ионосфере, связанные с землетрясениями, проявляются как после подземного толчка [1–3], так и до него [4–6]. Возможные физические механизмы связи возмущений в ионосфере, предшествующих землетрясениям, которые можно рассматривать как ионосферные предвестники землетрясений, подробно рассмотрены, в частности, в работах [7–9]. Существующие гипотезы объясняют появление сейсмоионосферных аномалий как следствие проникновения в ионосферу электрического поля и/или акустико-гравитационных волн (АГВ), которые возбуждаются в приземной атмосфере над зоной подготовки землетрясения.

Несмотря на большой объём работ, посвященных исследованию сейсмоионосферных эффектов, проблема идентификации ионосферных предвестников землетрясений пока далека от своего разрешения из-за трудностей однозначной интерпретации ионосферных данных в каждом конкретном рассматриваемом случае. Это связано с тем, что ионосфера отличается большой изменчивостью и подвержена влиянию различных гелиогеофизических факторов, при этом, как правило, сами сейсмоионосферные аномалии невелики по амплитуде, а существенная доля ионосферных аномалий, даже в спокойных геомагнитных условиях, не сопровождается землетрясениями [10]. Более надежным способом идентификации возможного ионосферного предвестника землетрясений является анализ не по какому-то одному прогностическому параметру, а по определенному набору морфологических признаков.

Как показывают результаты, полученные по многолетним наблюдениям на наземных станциях вертикального зондирования ионосферы [11, 12], процессы подготовки сильных землетрясений могут оказывать влияние на частотные и высотные параметры, характеризующие состояние нижней (область E) и верхней (область F) ионосферы. В соответствии с этим, целью данной работы является идентификация ионосферных возмущений в областях E и F по данным станции вертикального зондирования ионосферы, и оценка прогностической эффективности этих ионосферных возмущений для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$, $M \geq 5.5$ и $M \geq 6.0$, произошедших в Камчатском регионе за 2016–2023 гг.

Методика анализа данных

Существенные изменения в ионосферном слое E_s перед сильными землетрясениями отмечались во многих исследованиях [13–15]: увеличение

вероятности его появления, рост предельной частоты отражения и частоты экранирования, появление диффузных отражений, уменьшение полупрозрачности слоя. Кроме изменения частотных параметров слоя Es, в работах [16, 17] отмечались значимые изменения его действующих высот в период подготовки землетрясений. Спорадические образования появлялись за несколько суток до землетрясения на высотах, превышающих соответствующие медианные значения на десятки километров. Высоко расположенные спорадические слои нередко сопровождаются отклонением значений частотных параметров слоев Es и F2 от своих фоновых значений в течение одного и того же суточного интервала наблюдений [11, 12, 18]. Таким образом, указанные особенности в изменениях параметров ионосферных слоев можно отнести к предполагаемым предвестникам готовящихся землетрясений.

В данной работе в качестве возможных предвестников землетрясений рассматриваются аномальные временные вариации следующих ионосферных параметров:

- $h'Es$ — наименьшая действующая высота спорадического Es-слоя для обыкновенной волны;
- $foEs$ — предельная частота обыкновенной волны спорадического Es-слоя ионосферы;
- $fbEs$ — экранирующая частота обыкновенной волны спорадического Es-слоя ионосферы;
- $foF2$ — критическая частота обыкновенной волны F2-слоя ионосферы;
- $hmF2$ — высота максимума электронной концентрации F2-слоя ионосферы.

Ежечасные значения ионосферных параметров были получены в ходе радиофизических наблюдений, выполненных средствами вертикального радиозондирования ионосферы. Автоматическая ионосферная станция (АИС) вертикального радиозондирования «Парус-А» расположена в с. Паратунка ($\varphi = 52.97^\circ$ с.ш., $\lambda = 158.24^\circ$ в.д.). Для учета уровня геомагнитной активности в работе использовались значения К-индексов, измеренных на комплексной геофизической обсерватории (ГФО) «Паратунка» ($\varphi = 52.97^\circ$ с.ш., $\lambda = 158.25^\circ$ в.д.) и ежечасные значения геомагнитного индекса Dst, публикуемые Мировым центром данных по геомагнетизму (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html>).

Для определения сейсмоионосферных эффектов в суточных вариациях ионосферных параметров необходимо получить их фоновые распределения. Также при анализе вариаций в ионосфере следует учитывать наличие или отсутствие в рассматриваемый период времени существенных геомагнитных возмущений, которые могут влиять на ионосферу.

Методика идентификации сейсмоионосферных аномалий, применяемая в данной работе, заключается в следующем. Для каждого момента времени суток

t_i для каждого ионосферного параметра $X(t_i)$ на предшествующем интервале длительностью $T_{\text{med}} = 30$ суток вычислялась медиана $X_{\text{med}}(t_i)$. При этом в качестве фона выбирались магнито-спокойные дни и вычисление медианы производилось только по суткам, в которых во всех трехчасовых интервалах значения геомагнитного индекса составляли $K \leq 2$. Для определения меры отклонения от спокойного фонового распределения использовались параметры межквартильных изменений [5, 6]:

$$Y_{\pm}(t_i) = X_{\text{med}}(t_i) \pm 1.5\text{IQR}(t_i)$$

где $X_{\text{med}}(t_i)$ — медиана, рассчитанная по выбранным магнито-спокойным дням, а $\text{IQR}(t_i) = Q_3(t_i) - Q_1(t_i)$ — разность между верхним Q_3 и нижним Q_1 квартилями, вычисленная по этим же суткам с низкой геомагнитной активностью. Значения $X(t_i)$, выходящие за пределы указанной полосы, определялись как возмущенные. В таком случае, «шумовые» полосы Y_{\pm} ограничивают возможные вариации параметров, объясняемые случайными отклонениями с определенной степенью вероятности. Как следует из [19], в случае нормального распределения «ошибки» значений $\Delta X(t_i) = X(t_i) - X_{\text{med}}(t_i)$, величина $1.5\text{IQR}(t_i)$ будет соответствовать примерно двум стандартным отклонениям. Значения $X(t_i)$ под воздействием разных случайных факторов должны колебаться в пределах указанных границ Y_{\pm} с вероятностью 95% или, с другой стороны, вероятность того, что выход значений за границы полосы Y_{\pm} обусловлен чисто случайными факторами, составляет всего 5%. Значения $X(t_i)$, выходящие за пределы «шумовых» полос, относились к аномальным значениям, если длительность такого возмущения по времени составляла не менее полутора часов (с учетом усреднения по трем точкам).

Методика идентификации возможного ионосферного предвестника землетрясений с $M \geq 5.0$, $M \geq 5.5$ и $M \geq 6.0$ на основе комплекса рассматриваемых ионосферных параметров $h'E_s$, foE_s , fbE_s , $foF2$ и $hmF2$, была построена по следующей схеме:

1. На исследуемом временном интервале T идентифицировалось время появления аномальных значений параметра $h'E_s$, выходящих за верхнюю границу Y_+ его фоновых значений, длительностью существования которых была $\Delta t \geq 1.5$ часа.
2. Если в пределах суточного интервала времени ΔT (± 12 часов относительно момента появления аномальных значений $h'E_s$) наблюдалась низкая геомагнитная активность (все трехчасовые значения индекса $K \leq 2$ и $Dst \in [-30 \text{ нТл}; 20 \text{ нТл}]$), то определялось наличие в течение времени ΔT отклонений от верхних границ Y_+ диапазона своих фоновых значений у дополнительных ионосферных параметров foE_s , fbE_s , $foF2$ и $hmF2$.
3. В зависимости от диапазона магнитуд землетрясений, для которых проводилась идентификация ионосферного предвестника, рассматривалось минимальное число дополнительных параметров $n_{\text{доп}}$, аномальные значения

которых наблюдались совместно с аномальными значениями параметра $h'E_s$ в течение временного интервала ΔT . Для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$ было установлено минимальное число дополнительных параметров $n_{\text{доп}} = 2$, а для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.5$ и $M \geq 6.0$ соответственно $n_{\text{доп}} = 3$.

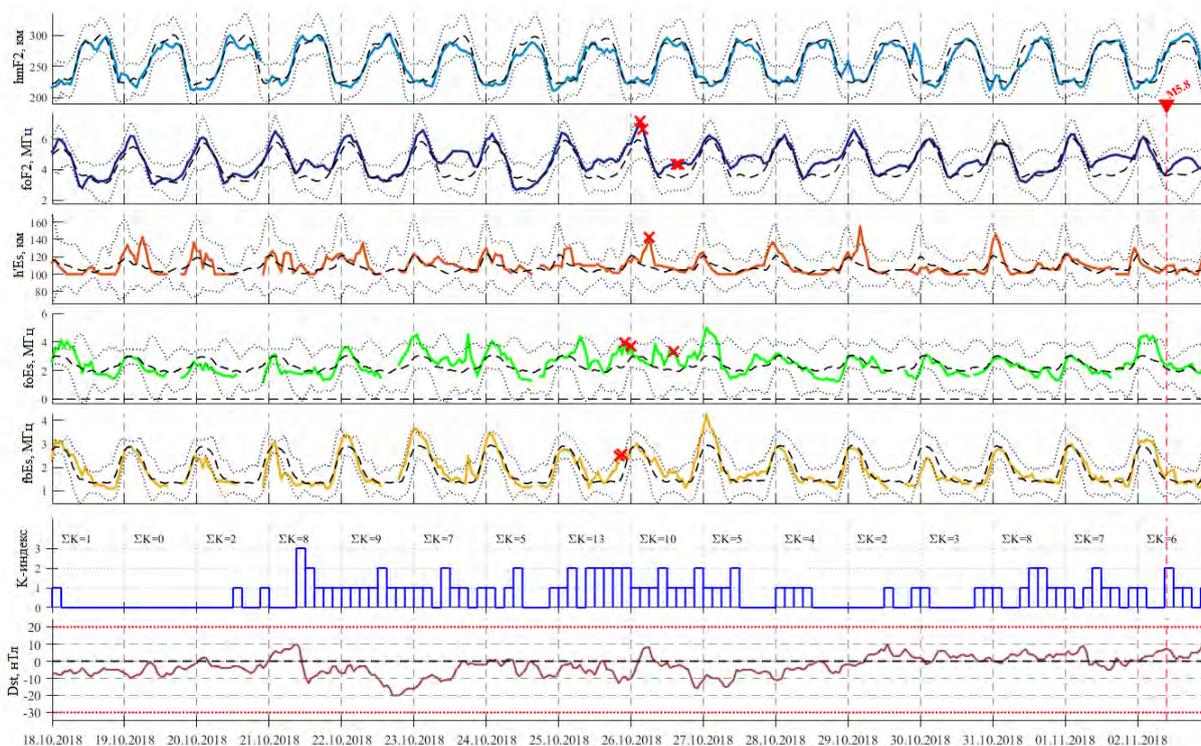


Рис. 1. Временные ряды значений ионосферных параметров $h'E_s$, foE_s , fbE_s , $foF2$, $hmF2$, а также геомагнитных индексов K и Dst, за временной интервал 18.10.2018–02.11.2018 гг. Штриховыми и пунктирными линиями отмечены медианные значения и границы диапазонов фоновых значений ионосферных параметров соответственно. Идентифицированные аномалии отмечены красным маркером 'x'. Землетрясение с магнитудой $M = 5.8$, произошедшее 02.11.2019 г., отмечено на временной оси красным треугольником. [Time series of the ionospheric parameters $h'E_s$, foE_s , fbE_s , $foF2$, $hmF2$, as well as the geomagnetic indices K and Dst for the time interval of 18.10.2018–02.11.2018. Dashed and dotted lines mark the median values and the range boundaries of the background values of the ionospheric parameters, respectively. Identified anomalies are marked with a red marker 'x'. The earthquake with a magnitude of $M = 5.8$ that occurred on 02.11.2019 is marked on the time axis with a red triangle.]

На рис. 1–2, в качестве примера, показаны изменения значений временных рядов рассматриваемых ионосферных параметров, их медианных значений и границ диапазона фоновых значений Y_{\pm} , которые предшествовали наступлению землетрясений.

На рис. 1 представлены значения ионосферных параметров и геомагнитных индексов за временной интервал с 18.10.2018 г. по 02.11.2018 г. Аномальные значения параметров $h'E_s$, foE_s , fbE_s , и foF_2 , превышающие верхние границы фоновых значений, наблюдались 25.11.2018 г. и 26.11.2018 г. в условиях низкой геомагнитной активности. Землетрясение с магнитудой $M = 5.8$, координатами эпицентра $\varphi = 51.98^\circ$ с.ш, $\lambda = 158.72^\circ$ в.д. и глубиной гипоцентра $h = 72$ км произошло 02.11.2018 09:39:27 (UT) на эпицентральной расстоянии 115 км от места расположения ионосферной станции.

На рис. 2 представлены значения ионосферных параметров и геомагнитных индексов за временной интервал с 01.05.2022 г. по 16.05.2022 г.

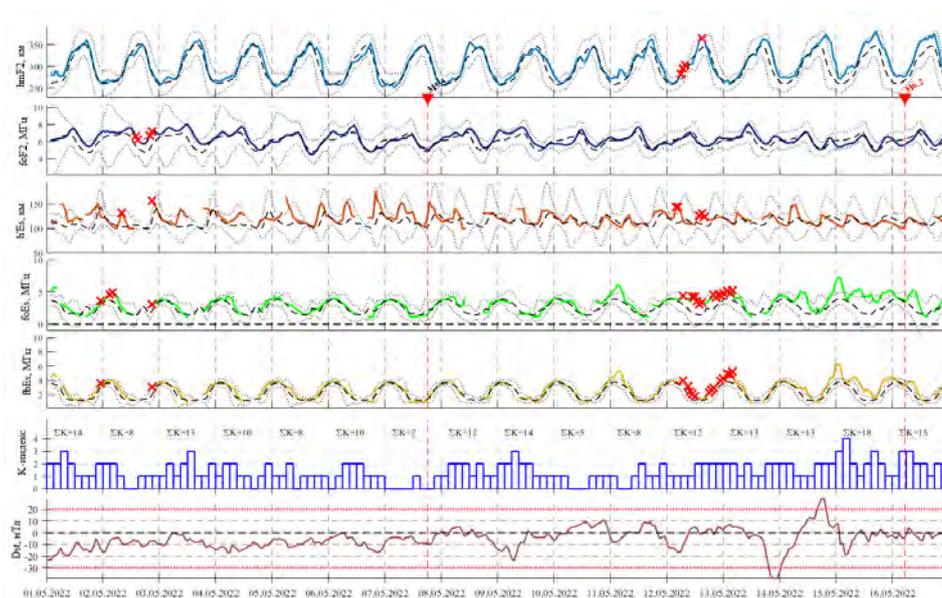


Рис. 2. Временные ряды значений ионосферных параметров $h'E_s$, foE_s , fbE_s , foF_2 , hmF_2 , а также геомагнитных индексов K и Dst , за временной интервал 01.05.2022–16.05.2022 гг. Штриховыми и пунктирными линиями отмечены медианные значения и границы диапазонов фоновых значений ионосферных параметров соответственно. Идентифицированные аномалии отмечены красным маркером 'x'. Землетрясения с магнитудами $M = 5.5$ и $M = 6.2$, произошедшие соответственно 07.05.2022 г. и 16.05.2022 г., отмечены на временной оси красными треугольниками. [Time series of the ionospheric parameters $h'E_s$, foE_s , fbE_s , foF_2 , hmF_2 , as well as the geomagnetic indices K and Dst for the time interval of 01.05.2022–16.05.2022. Dashed and dotted lines mark the median values and the range boundaries of the background values of the ionospheric parameters, respectively. Identified anomalies are marked with a red marker 'x'. Earthquakes with a magnitudes $M = 5.5$ and $M = 6.2$, which occurred on 07.05.2022 and 16.05.2022, respectively, are marked on the time axis with red triangles.]

За этот период в рассматриваемом сейсмоактивном районе произошли два сейсмических события с магнитудами $M = 5.5$ и $M = 6.2$. Аномальные значения параметров $h'Es$, $foEs$, $fbEs$, и $foF2$, превышающие верхние границы фоновых значений, идентифицированы 01.05.2022 г и 02.05.2022 г. в условиях умеренной геомагнитной активности. Сейсмическое событие с магнитудой $M = 5.5$, координатами эпицентра $\varphi = 54.09^\circ$ с.ш, $\lambda = 163.27^\circ$ в.д. и глубиной гипоцентра $h = 68$ км произошло 07.05.2022 18:13:28 (UT) на эпицентральной расстоянии 355 км от места расположения ионосферной станции. Значения параметров $h'Es$, $foEs$, $fbEs$, и $hmF2$, превышающие верхние границы фоновых значений, идентифицированы 12.05.2022 г., при этом в течение этих суток значения трехчасового индекса геомагнитной активности были $K \leq 2$, а геомагнитный индекс Dst принимал значения от -17 нТл до 5 нТл. Сейсмическое событие с магнитудой $M = 6.2$, координатами эпицентра $\varphi = 50.34^\circ$ с.ш, $\lambda = 156.55^\circ$ в.д. и глубиной гипоцентра $h = 89$ км произошло 16.05.2022 05:25:50 (UT) на эпицентральной расстоянии 315 км от места расположения ионосферной станции.

С целью оценки прогностической эффективности методики идентификации возможных ионосферных предвестников землетрясений вычислялись следующие параметры: надежность предвестника R , достоверность предвестника V , эффективность предвестника J_G по методике А.А. Гусева, эффективность предвестника J_M по методике Г.М. Молчана, критерий Хансена–Койпера R_{score} .

Надежность предвестника R определяется как отношение количества землетрясений N_+ , для которых был выделен предвестник, к числу всех землетрясений N [20]:

$$R = \frac{N_+}{N}$$

Достоверность предвестника V определяется как отношение числа предвестниковых аномалий $n(A_E)$ к общему числу выделенных аномалий $n(A)$ [20]:

$$V = \frac{n(A_E)}{n(A)}$$

Эффективность прогноза по методике А.А. Гусева [21] вычисляется для конкретной пространственной области и определённого энергетического диапазона землетрясений по формуле:

$$J_G = \frac{N_+/T_{тр}}{N/T}$$

где T — общее время мониторинга сейсмической обстановки; N_+ — количество землетрясений, соответствующих успешному прогнозу за время T ; N — общее количество землетрясений (имеющих пространственно-временные характеристики, аналогичные прогнозируемым), произошедших за время T ; $T_{тр}$ — общее время тревоги (суммарная длительность всех промежутков времени, в которых действовал прогноз по оцениваемому методу в течение общего времени мониторинга). Эффективность J_G показывает, во сколько раз скорость потока спрогнозированных землетрясений превышает среднюю за время наблюдений T , т.е. является отношением вероятности наступления землетрясения

во время тревоги к их средней вероятности наступления. В отсутствие связи «землетрясение–предвестник», т.е. при случайном угадывании, эффективность J_G равна 1.

Эффективность предвестника J_M по методике Г.М. Молчана [22] определяется по формуле

$$J_M = 1 - \nu - \tau$$

где $\tau = T_{тр}/T$ — мера тревоги; $\nu = 1 - N_+/N$ — доля пропусков цели. Для случайного прогноза $J_M = 0$, а для идеального (без пропуска цели и с нулевым временем тревоги) — $J_M = 1$. На диаграммах ошибок строится диагональ $\tau + \nu = 1$, которая соединяет точки (0;1) и (1;0) и соответствует случайному прогнозу. Для этой диагонали строятся доверительные интервалы для различных уровней значимости α . Прогноз на диаграмме отмечается точкой с координатами (τ, ν) . Если точка лежит под нижней границей доверительного интервала, то это можно интерпретировать как высокую степень надёжности выявленной связи рассматриваемого предвестника с землетрясениями рассматриваемого энергетического диапазона.

В работах [23, 24] для определения эффективности методов выделения ионосферных предвестников землетрясений из экспериментальных ионосферных данных применялась оценка Ханссена–Койпера R_{score} (Hanssen–Kuipers Score). Величина R_{score} определяется на основе таблицы сопряженности признаков для выбранного интервала наблюдений, в которой дни распределяются в матрице 2×2 согласно своим характеристикам, и задается выражением:

$$R_{score} = \frac{a}{a+b} - \frac{c}{c+d}$$

где a — число дней, в которые произошли землетрясения и был объявлен режим их ожидания; b — число дней, в которые произошли землетрясения, но режим их ожидания не объявлялся; c — количество дней без землетрясений, но с режимом их ожидания; d — количество дней без землетрясений и без режима их ожидания. Данная оценка представляет собой разность между вероятностью обнаружения истинного предвестника землетрясения и вероятностью обнаружения ложного предвестника. Величина R_{score} может принимать значения в диапазоне от -1 до 1 , при этом последнее означает стопроцентную вероятность обнаружения истинного предвестника при отсутствии ложных «тревог».

Результаты анализа прогностической эффективности ионосферных параметров

Оценка прогностической эффективности рассматриваемого комплекса ионосферных аномалий проводилась для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$, $M \geq 5.5$, $M \geq 6.0$, произошедших за временной интервал $T = 2016\text{--}2023$ гг. на глубинах до 100 км и на расстояниях до $r = 400$ км от места расположения станции вертикального радиозондирования ионосферы (географические координаты

$\varphi = 52,97^\circ$ с.ш., $\lambda = 158,25^\circ$ в.д.) на Камчатке. Для анализа использован каталог землетрясений, составленный Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН" [25].

Для всех рассматриваемых энергетических диапазонов сейсмических событий, произошедших в исследуемом сейсмоактивном районе, были проведены ретроспективные оценки периодов ожидания $T_{ож}$ их наступления с момента появления аномальных значений ионосферных параметров. Сейсмическое событие считалось спрогнозированным, если происходило в течение периода ожидания $T_{ож}$, объявленного после идентификации комплекса ионосферных аномалий. Если в течение периода ожидания $T_{ож}$ происходило более одного землетрясения прогнозируемого диапазона магнитуд, то спрогнозированным считалось первое из произошедших сейсмических событий, остальные землетрясения считались пропусками «цели». В случае, если землетрясение происходило вне периода ожидания $T_{ож}$, то оно также считалось пропуском «цели». Если в течении периода ожидания $T_{ож}$ не происходило ни одного землетрясения, то идентифицированные прогностические аномалии считались ложными «тревогами».

В таблице 1 для рассматриваемых диапазонов магнитуд землетрясений приведены оценки следующих величин: надежности R ; достоверности V ; числа спрогнозированных землетрясений N_+ ; общего числа N землетрясений, произошедших за время T ; числа аномалий $n(A_E)$ ионосферных параметров, после наступления которых, в течение времени ожидания $T_{ож}$ произошли землетрясения прогнозируемого диапазона магнитуд; общее число $n(A)$ идентифицированных аномалий ионосферных параметров.

Таблица 1

Надежность и достоверность комплекса ионосферных прогностических признаков. [Reliability and validity of a complex of ionospheric prognostic features.]

Магнитуда	$M \geq 5.0$	$M \geq 5.5$	$M \geq 6.0$
N_+	86	26	8
N	165	58	9
$n(A_E)$	86	26	8
$N(A)$	285	102	102
R	0.52	0.45	0.47
V	0.3	0.25	0.08

Полученные оценки показывают, что наибольшая надежность R , равная 0.52 и достоверность V , равная 0.3, получены при прогнозе землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$. Наименьшая надежность прогноза R , равная 0.45, получена для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.5$. Наименьшая достоверность прогноза V , равная 0.08, получена для землетрясений с магнитудами $M \geq 6.0$.

В таблице 2 для рассматриваемых диапазонов магнитуд сейсмических событий приведены оценки следующих величин: периодов ожидания $T_{ож}$ наступления

землетрясений с момента появления аномальных значений ионосферных параметров; общей длительности мониторинга T ; суммарной длительности всех промежутков времени $T_{\text{тревоги}}$, в которых действовал прогноз; эффективности прогноза J_G по методике А.А. Гусева; уровня статистической значимости α , определяющей вероятность получения значений эффективности J_G в отсутствие связи «землетрясение–предвестник».

Таблица 2

Оценка прогностической эффективности комплекса ионосферных аномалий по методике А.А. Гусева [Estimation of the prognostic efficiency of the complex of ionospheric anomalies using the method of A.A. Gusev]

Магнитуда	$M \geq 5.0$	$M \geq 5.5$	$M \geq 6.0$
$T_{\text{ож}}$ (сутки)	4.22 ± 3.99	7.09 ± 4.83	7.96 ± 5.53
T (сутки)	2922	2922	2922
$T_{\text{тревоги}}$ (сутки)	1149	836	1009
J_G	1.33 ± 0.14	1.57 ± 0.3	1.36 ± 0.48
α	7×10^{-4}	8×10^{-3}	0.3

Для прогнозируемых землетрясений из диапазонов магнитуд $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$ оценка эффективности J_G , с учетом значений $\sigma(J_G)$, превышает 1. Наибольшее значение эффективности J_G получено при прогнозе землетрясений с магнитудой $M \geq 5.5$. Наименьшее значение эффективности J_G , с учетом $\sigma(J_G)$, получено при прогнозе землетрясений с $M \geq 6.0$. Полученные оценки эффективности показывают, что прогноз землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$ на основе представленного комплекса ионосферных параметров отличается от случайного угадывания.

В таблице 3 и на рисунке 3 представлены результаты оценки прогностической эффективности по методике Г.А. Молчана. На диаграммах ошибок (рисунки 3а,б) точки прогноза (τ, ν) для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$ лежат ниже 99% доверительного интервала, что может быть интерпретировано как наличие достаточно надежной связи между идентифицированным комплексом ионосферных аномалий и землетрясениями соответствующих диапазонов магнитуд. Наибольшее значение параметр J_M принимает для диапазона магнитуд $M \geq 5.5$ и равен 0.16.

В таблице 4 представлены результаты проведенной оценки Ханссена–Койпера R_{score} . Для представленных диапазонов магнитуд прогнозируемых землетрясений величина R_{score} принимает положительные значения, которые находятся в интервале от 0.13 до 0.17. Наибольшее значение R_{score} принимает при прогнозе землетрясений с магнитудами $M \geq 5.5$.

Полученные оценки эффективности прогноза для представленной методики на основе анализа аномальных значений пяти ионосферных параметров указывают на наличие связи между идентифицированными ионосферными аномалиями и землетрясениями с магнитудами $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$. Представленная методика

Таблица 3

Оценка прогностической эффективности комплекса ионосферных аномалий по методике Г.М. Молчана [Estimation of the prognostic efficiency of the complex of ionospheric anomalies using the method of G.M. Molchan]

Магнитуда	$M \geq 5.0$	$M \geq 5.5$	$M \geq 6.0$
J_M	0.128	0.16	0.125
τ	0.39	0.29	0.35
ν	0.48	0.55	0.53

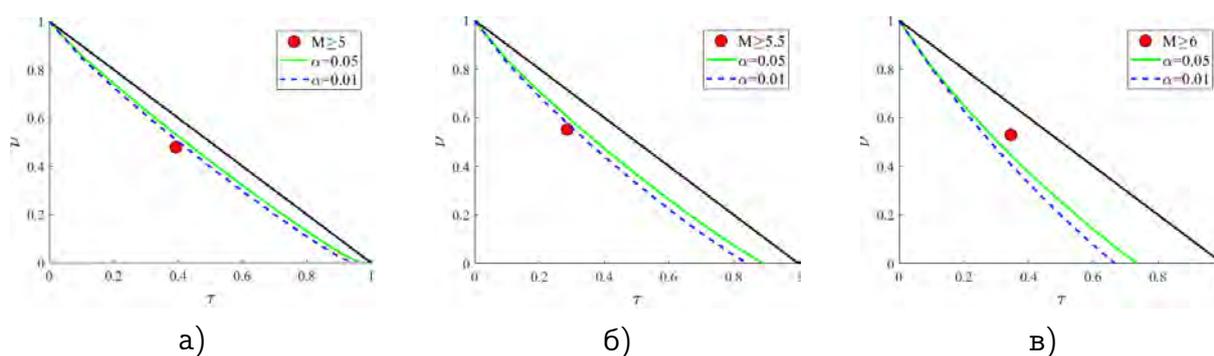


Рис. 3. Диаграммы ошибок для методики идентификации возможного предвестника землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$ (а), $M \geq 5.5$ (б), $M \geq 6.0$ (в) на основе комплекса ионосферных прогностических признаков. Доверительные интервалы построены для уровней значимости $\alpha = 0.01$ и $\alpha = 0.05$. [Error diagrams for the method of identifying a possible precursor of earthquakes with magnitudes $M \geq 5.0$ (a), $M \geq 5.5$ (b), $M \geq 6.0$ (c) based on a complex of ionospheric prognostic features. Confidence intervals are constructed for significance levels $\alpha = 0.01$ and $\alpha = 0.05$.]

Таблица 4

Оценка прогностической эффективности комплекса ионосферных аномалий на основе критерия Ханссена–Койпера. [Estimation of the prognostic efficiency of a complex of ionospheric anomalies based on the Hanssen–Kuiper criterion.]

Магнитуда	$M \geq 5.0$	$M \geq 5.5$	$M \geq 6.0$
a	86	26	8
b	79	32	9
c	1063	810	1001
d	1694	2054	1904
R_{score}	0.14	0.17	0.13

идентификации возможных ионосферных предвестников землетрясений может быть использована для идентификации периодов увеличения сейсмической активности в Камчатском регионе.

Заключение

Произведена идентификация аномалий ионосферных параметров $h'Es$, $foEs$, $fbEs$, $foF2$ и $hmF2$, которые могут рассматриваться как возможные предвестники землетрясений. Проведён ретроспективный анализ прогностической эффективности методики на основе комплекса аномальных значений ионосферных параметров для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$, $M \geq 5.5$, $M \geq 6.0$ произошедших в Камчатском регионе для за период 2016–2023 гг. на эпицентральных расстояниях до 400 км от пункта ионосферных наблюдений.

Наибольшие значения надежности R и достоверности V для методики на основе комплекса этих ионосферных параметров получены для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$. Было получено, что наступлению 52% землетрясений с $M \geq 5.0$ предшествовал комплекс ионосферных возмущений, при этом в течение 4.22 ± 3.99 суток после 30% выявленных аномалий произошли сейсмические события рассматриваемого энергетического диапазона. Наименьшее значение надежности R получено для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.5$ и составило 25% землетрясений, которым предшествовал комплекс ионосферных прогностических признаков. Наименьшее значение достоверности V получены для землетрясений с магнитудами $M \geq 6.0$ и составило 8% аномалий, после наступления которых, произошли сейсмические события.

Результаты оценки прогностической эффективности J_G по методике А.А. Гусева показали, что прогноз землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$ по комплексу ионосферных параметров отличается от случайного угадывания. Наибольшее значение $J_G = 1.57 \pm 0.3$ получено при прогнозе сейсмических событий с магнитудами $M \geq 5.5$ для периодов ожидания землетрясений 7.09 ± 4.83 суток.

Анализ прогностической эффективности по методике Г.М. Молчана показал, что точки прогноза (τ, ν) для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$ лежат ниже 99% доверительного интервала, что может быть интерпретировано как наличие достаточно надежной связи между идентифицированным комплексом ионосферных аномалий и землетрясениями соответствующих диапазонов магнитуд.

Величина R_{score} принимает положительные значения для всех рассмотренных диапазонов магнитуд, т.е. вероятность того, что идентифицированные аномалии ионосферных параметров являются истинным предвестником землетрясений, превышает вероятность того, что они являются ложным предвестником. Наибольшее значение критерий R_{score} принимает при прогнозе землетрясений с магнитудами $M \geq 5.5$ и составляет $R_{score} = 0.17$. Таким образом, представленные оценки эффективности прогноза указывают на наличие связи выявленных ионосферных аномалий с наступившими после их появления землетрясениями с магнитудами $M \geq 5.0$ и $M \geq 5.5$.

В тоже время следуют отметить, что достоверность прогноза по представленной методике (доля аномалий после, которых наступили землетрясения) остаётся достаточно низкой и составляет не более 30% для землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$. Дальнейшая работа, связанная с повышением достоверности, надежности

и эффективности краткосрочного прогноза землетрясений с $M \geq 5.0$ в Камчатском регионе на основе предложенного подхода может быть осуществлена как за счет расширения перечня ионосферных параметров, рассматриваемых в качестве прогностических признаков, а также разработки для них системы критериев для идентификации аномальных значений, так и привлечением других геофизических параметров, которые могли бы быть отождествлены с предвестниками землетрясений.

Список литературы

1. Davies K., Baker D.M. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964 // *Journal of Geophysical Research*, 1965. vol. 70, no. 9, pp. 2251–2253.
2. Choosakul N., Saito A., Iyemori T., Hashizume M. Excitation of 4-min periodic ionospheric variations following the great Sumatra-Andaman earthquake in 2004 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009. vol. 114, no. A10, pp. A10313 DOI: 10.1029/2008JA013915.
3. Hegai V.V., Legen'ka A.D., Kim V.P., Georgieva K. Wave-like perturbations in the ionospheric F2-layer observed after the Ms8.1 Samoa earthquake of September 29, 2009 // *Advances in Space Research*, 2011. vol. 47, no. 11, pp. 1979–1982 DOI: 10.1016/j.asr.2011.01.011.
4. Хегай В. В., Легенька А. Д., Ким В. П., Георгиева К. Ионосферный предвестник разрушительного землетрясения, произошедшего 6 апреля 2009 г. в Л'Аквиле (Италия) // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2011. Т. 51, № 1, С. 73–79.
5. Хегай В. В., Легенька А. Д., Ким В. П. Аномальное увеличение критической частоты foF2 перед испанским землетрясением 11.05.2011 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2014. Т. 54, № 1, С. 89–93.
6. Пулинец С. А., Легенька А. Д., Хегай В. В., Ким В. П., Корсунова Л. П. Возмущения ионосферы, предшествующие землетрясениям, по данным наземной станции вертикального зондирования ионосферы WAKKANAI // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2018. Т. 58, № 5, С. 713–719.
7. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. *Ионосферные предвестники землетрясений*. М.: Наука, 1992. 304 с.
8. Pulinets S. A., Boyarchuk K. A. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Berlin: Springer, 2004. 315 с.
9. Пулинец С. А., Узунов Д. П., Давиденко Д. В., Дудкин С. А., Цадиковский Е. И. *Прогноз землетрясений возможен?!*. М.: Тривант, 2014. 144 с.
10. Perrone L., Korsunova L.P., Mikhailov A.V. Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy // *Annales Geophysicae*, 2010. vol. 28, no. 4, pp. 941–950 DOI: 10.5194/angeo-28-941-2010.
11. Корсунова Л. П., Чистякова Л. В., Хегай В. В. Изменения в ионосфере перед слабыми землетрясениями в регионе Иркутска // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2016. Т. 56, № 4, С. 525–534.
12. Корсунова Л. П., Хегай В. В. Возможные краткосрочные предвестники сильных коровых землетрясений в Японии по данным наземных станций вертикального зондирования ионосферы // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2018. Т. 58, № 1, С. 94–101.
13. Липеровская Е. В., Похотелов О. А., Олейник М. А., Алимов О. А., Павлова С. С., Хакимова М. Некоторые эффекты в спорадическом слое E ионосферы перед землетрясением // *Физика Земли*, 1994. № 11, С. 86–88.
14. Silina A.S., Liperovskaya E.V., Liperovsky V.A., Meister C.V. Ionospheric phenomena before strong earthquakes // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2001. vol. 1, no. 3, pp. 113–118.
15. Корсунова Л. П., Легенька А. Д. Обнаружение возможных краткосрочных ионосферных предвестников сильных землетрясений по изменениям ежесуточных характеристик Es // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2021. Т. 61, № 6, С. 803–811.
16. Корсунова Л. П., Хегай В. В. Сейсмоионосферные эффекты сильных коровых землетрясений в Тихоокеанском регионе // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2005. Т. 45, № 5, С. 706–711.
17. Korsunova L.P., Khagai V.V. Medium-term ionospheric precursors to strong earthquakes // *Int. J. Geomagn. Aeron.*, 2006. vol. 6, pp. G13005 DOI: 10.1029/2005GI000122.
18. Ippolito, A., Perrone, L., De Santis, A., Sabbagh, D. Ionosonde Data Analysis in Relation to the 2016 Central Italian Earthquakes // *Geosciences*, 2020. vol. 10, no. 9, pp. 354 DOI: 10.3390/geosciences10090354.

19. Kotz S., Johnson N.L. *Encyclopedia of Statistical Sciences*. Hoboken, N.J.: John Wiley, 1983.
20. Салтыков В. А. О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений // *Физика Земли*, 2017. № 2, С. 84–96.
21. Гусев А. А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности / *Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом Камчатки*. Новосибирск, Наука, 1974, С. 109–119.
22. Molchan G.M. Strategies in strong earthquake prediction // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1990. vol. 61, pp. 84–98.
23. Chen Y.I., Liu J.-Y., Tsai Y.B., Chen C.S. Statistical tests for pre-earthquake ionospheric anomaly // *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2004. vol. 15, no. 3, pp. 385–396.
24. Корсунова Л. П., Хегай В. В. Оценка эффективности использования интегральных суточных характеристик E_s для выделения краткосрочных ионосферных предвестников сильных землетрясений // *Геомагнетизм и аэронавигация*, 2023. Т. 63, № 2, С. 227–237.
25. Чеброва А. Ю., Чемарёв А. С., Матвеев Е. А., Чебров Д. В. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // *Геофизические исследования*, 2020. Т. 21, № 3, С. 66–91 DOI: 10.21455/gr2020.3-5.

Информация об авторе



Павлов Алексей Владимирович ✉ – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Россия,  ORCID 0000-0001-5718-1429.

References

- [1] Davies K., Baker D.M. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964, *Journal of Geophysical Research*, 1965, vol. 70. no. 9. pp. 2251–2253.
- [2] Choosakul N., Saito A., Iyemori T., Hashizume M. Excitation of 4-min periodic ionospheric variations following the great Sumatra-Andaman earthquake in 2004, *Journal of Geophysical Research: Space physics*, 2009, vol. 114, no. A10, p. A10313. DOI: 10.1029/2008JA013915
- [3] Hegai V.V., Legen'ka A.D., Kim V.P., Georgieva K. Wave like perturbations in the ionospheric F2-layer observed after the Ms8.1 Samoa earthquake of September 29, 2009, *Advances in Space Research*, 2011, vol. 47, no. 11, pp. 1979–1982. DOI: 10.1016/j.asr.2011.01.011
- [4] Khegay V.V., Legen'ka A.D., Kim V.P., K. Georgieva K. Ionospheric precursor of a destructive earthquake that occurred on April 6, 2009 at L'Aquila (Italy), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2011, vol. 51, no. 1, pp. 73–79 (In Russian).
- [5] Khegay V.V., Legen'ka A.D., Kim V.P. Anomalous increase in the fof2 critical frequency prior to the spanish earthquake of May 11, 2011, *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2014, vol. 54, no. 1, pp. 89–93 (In Russian).
- [6] Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Khegay V.V., Kim V.P., Korsunova L.P. Ionosphere disturbances preceding earthquakes according to the data of ground based station of the vertical ionospheric sounding WAKKANAI, *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2018, vol. 58, no. 5, pp. 713–719 (In Russian).
- [7] Liperovskiy V. A., Pokhotelov O. A., Shalimov S. L. Ionosfernye predvestniki zemletryaseniya [Ionospheric precursors of earthquakes]. Moscow, Nauka, 1992, 304 pp. (In Russian).
- [8] Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric Precursors of Earthquakes, Berlin, Springer, 2004, 315 p.
- [9] Pulinets S. A., Uzunov D. P., Davidenko D. V., Dudkin S. A., Tsadikovskiy E. I. Prognoz zemletryaseniya vozmozhen?! [Earthquake forecast is possible?!]. Moscow, Trovant, 2014, 144 p. (In Russian).
- [10] Perrone L., Korsunova L.P., Mikhailov A.V. Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy, *Annales Geophysicae*, 2010, vol. 28, no.4, pp. 941–950. DOI: 10.5194/angeo-28-941-2010
- [11] Korsunova L. P., Khegay V.V. Vozmozhnye kratkosrochnye predvestniki sil'nykh korovykh zemletryaseniya v yaponii po dannym nazemnykh stantsiy vertikal'nogo zondirovaniya ionosfery [Possible short-term precursors of strong crustal earthquakes in Japan based on ground-based vertical ionospheric sounding stations], *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2018, vol. 58, no. 1, pp. 94–101 (In Russian).
- [12] Liperovskaya E.V., Pokhotelov O.A., Oleynik M.A., Alimov O.A., Pavlova S.S., Khakimova M. Some effects in the sporadic E layer of the ionosphere before an earthquake, *Fizika Zemli* 1994, no. 11. pp. 86–88 (In Russian).
- [13] Silina A.S., Liperovskaya E.V., Liperovsky V.A., Meister C.V. Ionospheric phenomena before strong earthquakes, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2001, vol. 1, no. 3, pp. 113–118
- [14] Korsunova L. P., Legen'ka A. D. Detection of possible short-term ionospheric precursors of strong earthquakes by changes in daily Es characteristics, *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2021, vol. 61, no. 6, pp. 803–811 (In Russian).
- [15] Korsunova L.P., Khegay V.V. Seismoionosfernye efekty sil'nykh korovykh zemletryaseniya v Tikhookeanskom regione [Seismoionospheric effects of strong crustal earthquakes in the Pacific region], *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2005, vol. 45., no. 5, pp. 706–711 (In Russian).

- [16] Korsunova L.P., Khegai V.V. Medium-term ionospheric precursors to strong earthquakes, *Int. J. Geomagn. Aeron.*, 2006, vol.6, G13005. DOI: 10.1029/2005GI000122
- [17] Ippolito, A., Perrone, L., De Santis, A., Sabbagh, D. Ionosonde Data Analysis in Relation to the 2016 Central Italian Earthquakes, *Geosciences* 2020, vol. 10, no. 9, pp. 354.
- [18] Klotz, S., Johnson, N.L. *Encyclopedia of Statistical Sciences*, Hoboken, John Wiley, 1983.
- [19] Saltykov V.A. On the possibility of using tidal modulation of seismic noise for earthquake prediction, *Fizika Zemli*, 2017, no. 2. pp.84–96 (In Russian).
- [20] Gusev A.A. Prognoz zemletryasenyi po statistike seysmichnosti [Earthquake forecast based on seismicity statistics]. In: *Seysmichnost' i seysmicheskiy prognoz, svoystva verkhney mantii i ikh svyaz' s vulkanizmom na Kamchatke* [Seismicity and seismic forecast, properties of the upper mantle and their relationship with volcanism in Kamchatka]. Novosibirsk, Nauka, 1974, pp. 109–119 (In Russian).
- [21] Molchan G.M. Strategies in strong earthquake prediction, *Phys. Earth and Planet. Inter.*, 1990, vol.61, pp. 84–98.
- [22] Chen Y.I., Liu J.-Y., Tsai Y.B., Chen C.S. Statistical tests for pre-earthquake ionospheric anomaly, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2004, vol. 15, no 3, pp. 385–396.
- [23] Korsunova L. P., Khegay V.V. Evaluation of the efficiency of using integral daily characteristics Es for identifying short-term ionospheric precursors of strong earthquakes. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2023, vol. 63, no. 2, c. 227–237 (In Russian).
- [24] Chebrova A.Yu., Chemarev A.S., Matveenko E.A., Chebrov D.V. Unified information system of seismological data in the Kamchatka branch of the Federal Research Center of Geophysical Surveys of the Russian Academy of Sciences: principles of organization, main elements, key functions, *Geofizicheskie issledovaniya*, 2020, vol. 21. no 3. pp. 66–91 DOI: 10.21455/gr2020.3-5 (In Russian).

Information about the author



Pavlov Aleksey Vladimirovich ✉ – Cand. Sci. (Phys. & Math.), Researcher, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia,  ORCID 0000-0001-5718-1429.