

**Статистика сейсмоионосферных эффектов в F -области
ионосферы для разноглубинных землетрясений:
дополнительные данные для интерпретации**

**Е.В. Липеровская¹,
М.В. Родкин^{2,3}**

¹ ИФЗ РАН,

² ИТПЗ РАН

³ ИМГиГ ДВО РАН,

К настоящему времени накоплен довольно большой, разнообразный и частью противоречивый объем данных по сейсмоионосферным предвестникам. В большинстве случаев при этом указывается на красивые отдельные примеры наблюдаемых эффектов, которые, вообще говоря, могут быть и случайными. В работах [Lee et al., 2010; Lui et al., 2006; Родкин, Липеровская, 2023] на основе качественных однородных и длительных рядов наблюдений вариаций плотности ионизации ионосферы была показана заведомая неслучайность ряда средних аномалий за несколько суток до землетрясений и несколько суток после землетрясений.

Ситуация, возможно, была бы более понятна, если бы существовала физическая интерпретация. Но в недавней публикации [Пилипенко, Сурков, 2025] делается вывод, что согласованной интерпретации и физического понимания результатов наблюдений на данный момент также нет, хотя и был предложен ряд возможных физических механизмов для объяснения наблюдаемых эффектов. Очевидно, что физическая интерпретация сейсмоионосферных эффектов является актуальной задачей.

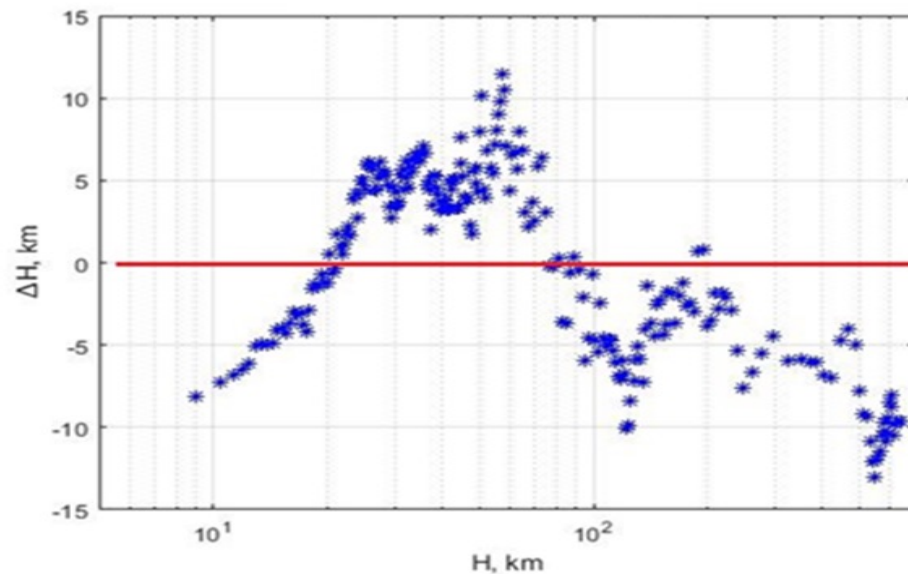


Рис. 1. Средние значения разницы глубин землетрясений по данным о положении гипоцентра и по решению сейсмического момента. Даны средние значения для групп из 120 событий с шагом 60 событий, GCMT каталог (1976–2020 гг.). Магнитуды M5.4+.

Заметим также, что ранее [Калинин и др., 1989], были развиты модели разных физических механизмов для разноглубинных землетрясений. Затем такое различие было показано по сейсмическим данным [Rodkin, 2022]. Так, например, на рис. 1 можно видеть, что в интервале **глубин примерно 20-90 км сейсмический процесс в очаговой зоне преимущественно распространяется вверх, что может объясняться активностью в этом интервале глубин реакций дегидратации, с высвобождением флюида и его прорывами вверх по области трещиноватости в очаге готовящегося землетрясения.**

С опорой на эти результаты в [Родкин, Липеровская 2023] было показано определенное различие также и для средних сейсмоионосферных предвестников для разноглубинных землетрясений. Верификация и уточнение таких различий может способствовать решению задачи физической интерпретации сейсмоионосферных эффектов.

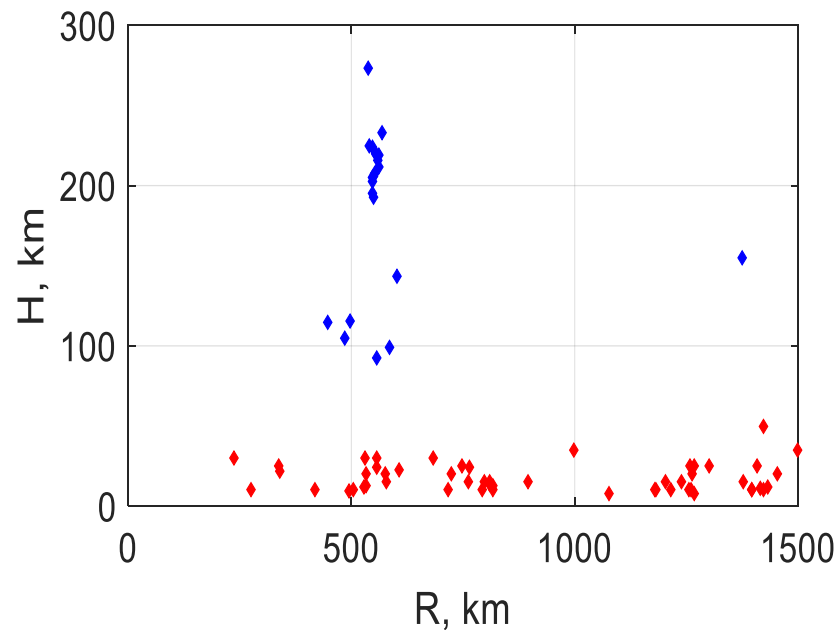
Работа основана на анализе длительных рядов единообразных наблюдений на нескольких станциях вертикального зондирования (ВЗ), в результате предложена таблица, какие аномалии для разных станций для каких землетрясений выглядят единообразно, а какие различаются, и как именно.

При исследовании литосферно-ионосферных связей за сейсмоионосферные эффекты в F-области, в частности, принимали возникновение областей повышенных или пониженных значений плотности ионизации, наблюдаемых во временной и пространственной окрестности землетрясений.

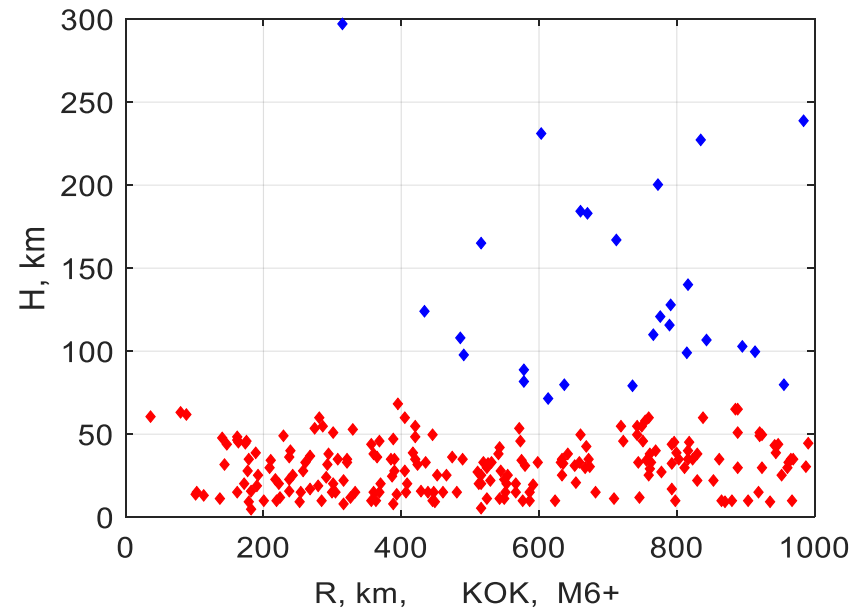
По литературным данным, эффекты в F-области наблюдались для землетрясений $M \geq 6$, время проявления сейсмоионосферных эффектов обычно составляет до 5 суток до землетрясений и несколько дней после.

По данным японских станций вертикального зондирования ионосферы Токио (Kokubunji), Вакканай, Ямагава за 1957- 2020 годы и станции Ташкент за 1964-1996 гг. были рассмотрены часовые вариации критической частоты f_oF_2 в связи с главными землетрясениями с $M_w \geq 6$, $H < 300$ км, $R < 1500$ км. Магнитуда моментная, использованы каталоги ISC GEM (1957-1976) и GCMT (1976-2020). Афтершоки были исключены по методу, описанному в [Писаренко, Родкин, 2019].

В сейсмологии принято различать землетрясения до 70 км и более глубокие; различие таких землетрясений хорошо видно на рис. 2. Сейсмоионосферные эффекты для Eqs с глубинами $H < 70$ км и глубинами $70 < H < 300$ км будут рассмотрены отдельно.



Ташкент



Токио (Kokubunji)

Рис. 2 Распределение землетрясений M6+ по глубинам H в зависимости от расстояния R до станций ВЗ.

Некоторые авторы указывали на различие сейсмоионосферных эффектов в ночное и дневное время, например [Гаврилов и др.,2021]. Это различие не является темой данного доклада, но отмечу, что по ст. Ташкент сейсмоионосферный эффект выделяется и в дневное, и в ночное время, а по японским станциям – только в ночное время. И при построении механизмов передачи возмущений это надо учитывать. Возможно, влияет наличие моря.

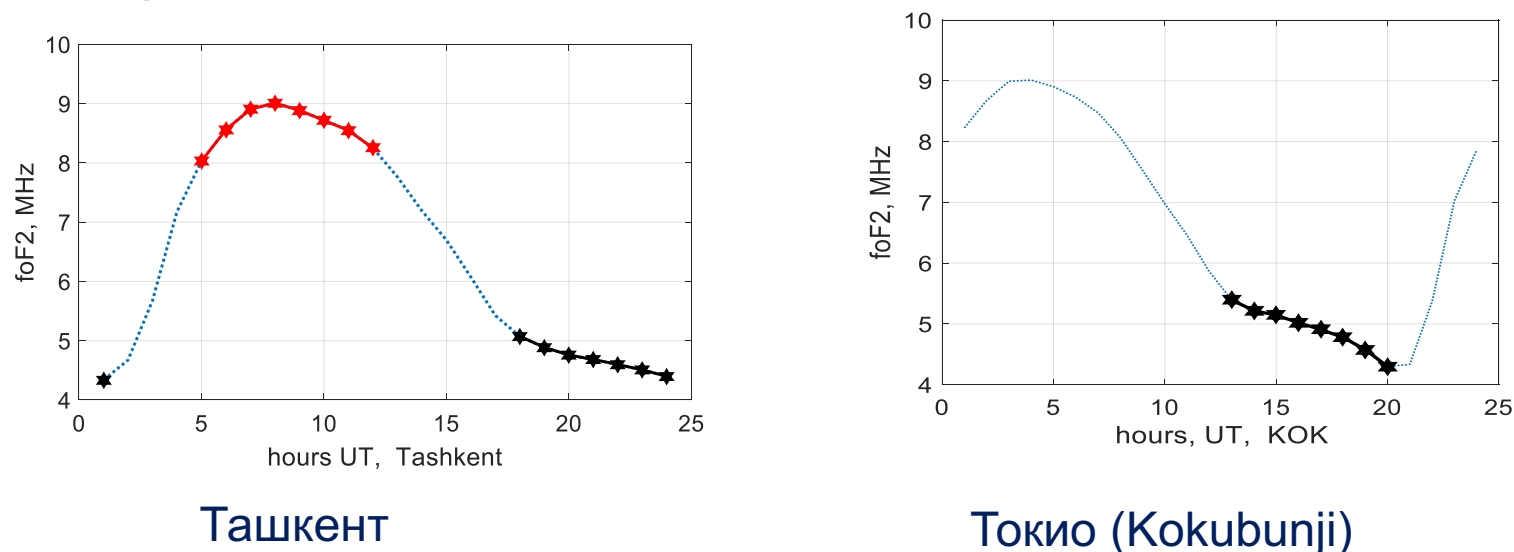


Рис. 3 Суточный ход $foF2$ по данным станций Ташкент и Токио (Kokubunji). Время UT. Максимальная скорость изменения $foF2$ наблюдается в утренние и закатные часы. Эти часы исключаются.

С целью минимизации вклада сильных длиннопериодных вариаций при поиске предполагаемых типовых сейсмоионосферных аномалий величин $foF2$ для каждого часа рассматривались Δf - отклонения $foF2$ от скользящей медианы, нормированные на эту же медиану

$$\Delta f_i = (foF2_i - \text{median}(foF2)) / \text{median}(foF2),$$

где $\text{median}(foF2)$ – медиана значений $foF2$ за промежуток (-7, +7) суток для i -го часа. Медиана вычислялась, если было не менее 8 часовых значений из 15 возможных. Магнитовозмущенные сутки $\Sigma Kp > 25$ и последующие сутки исключались. Далее применялся метод наложения эпох на интервале (-12, +12) сут., не слишком большом и не слишком маленьком. Поскольку при использовании нормирования на скользящую медиану вариации Δf имеют длиннопериодный сезонный (и иной) тренд, то перед наложением эпох среднее за интервал наложения эпох вычиталось. Среднее подсчитывалось, если было не менее половины значений за интервал наложения эпох. После наложения эпох проводим скользящее сглаживание кривой по окну 4 суток (48 час до и 48 час после).

Результаты наложения эпох для землетрясений с глубиной $H < 70$ км (I)

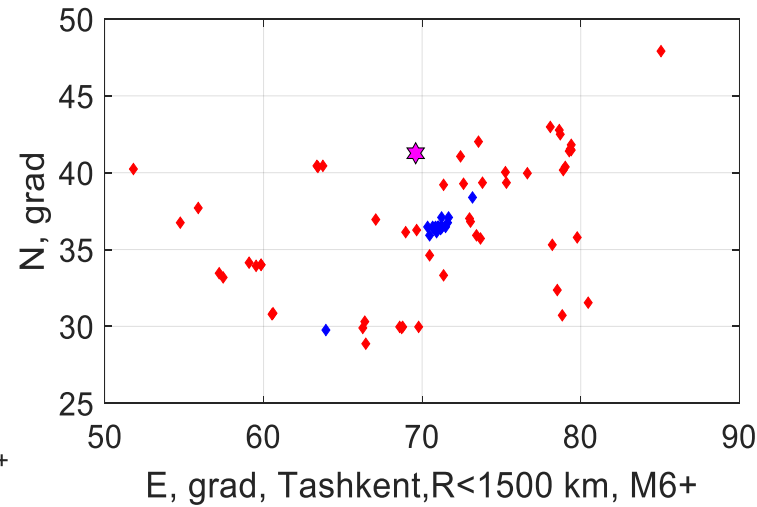
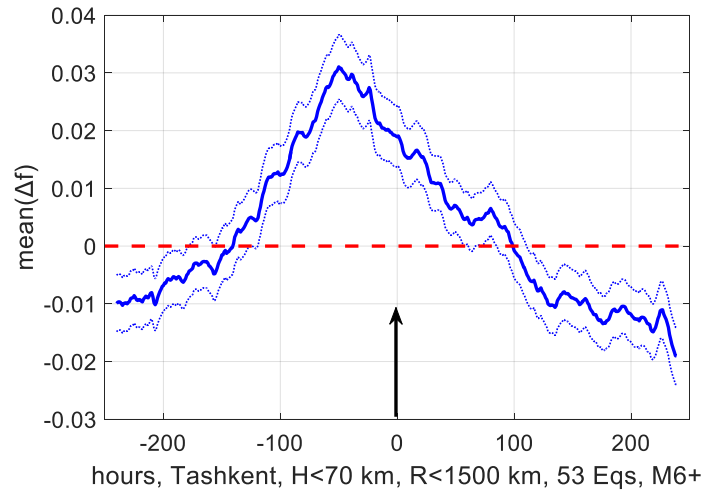


Рис. 4. Ташкент, $R < 1500$ km, 53 Eqs

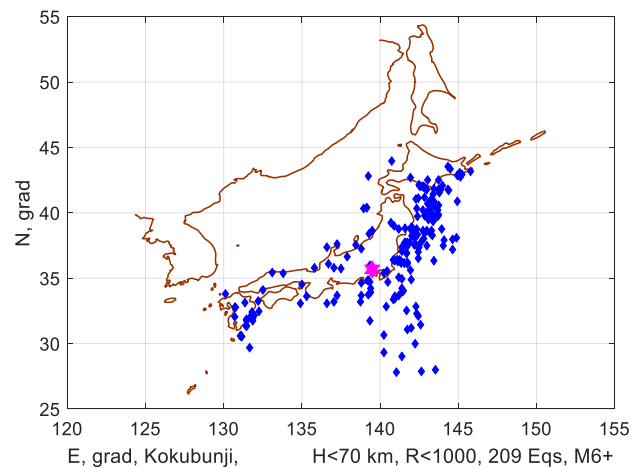
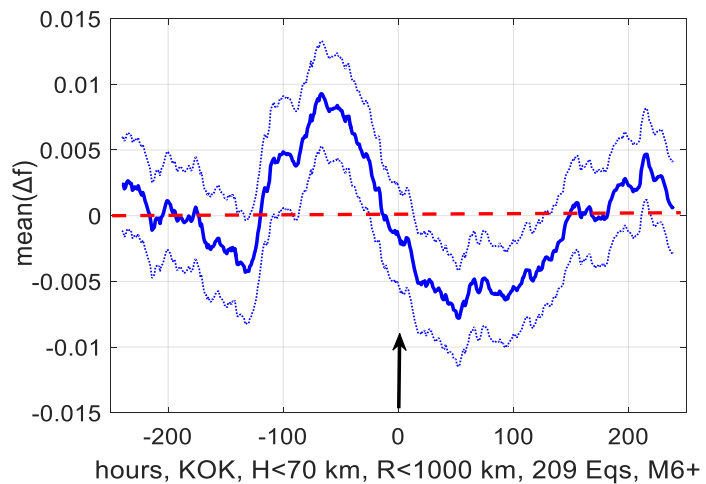
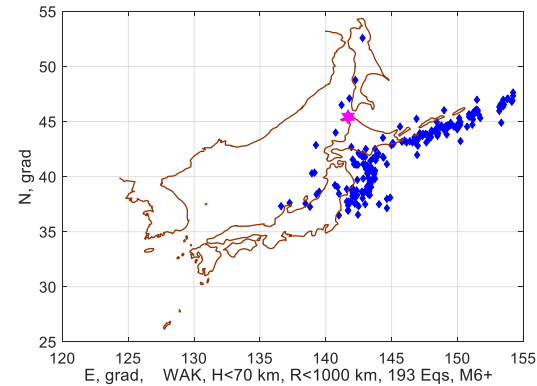
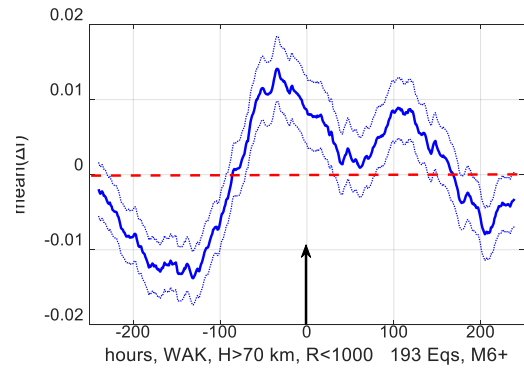


Рис. 5. Токио, $R < 1000$ km, 209 EQs

Результаты наложения эпох для землетрясений с глубинами $H < 70$ км. По оси ОХ-часы LT, по оси ОУ усредненное значение Δf . Жирная линия-результат наложения эпох, пунктир – доверительный интервал 2 стандартных отклонения среднего.

Справа схемы расположения эпицентров. Для ст. Ташкент для лучшего ориентирования показаны эпицентры и неглубоких Eqs ($H < 70$ km) - красные и более глубоких ($70 < H < 300$ km) - синие.

Результаты наложения эпох для землетрясений с глубиной $H < 70$ км (II)



Результаты наложения эпох по данным станций Вакканай и Ямагава и подтверждают предыдущие - примерно за 50 часов до землетрясения наблюдается увеличение $foF2$.

Рис. 6. Wakanai $H < 70$ km, $R < 1000$ km, 193 EQs

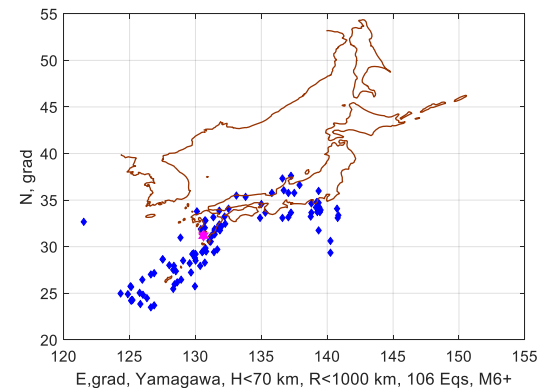
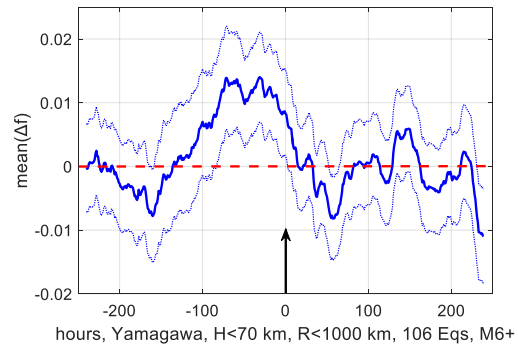
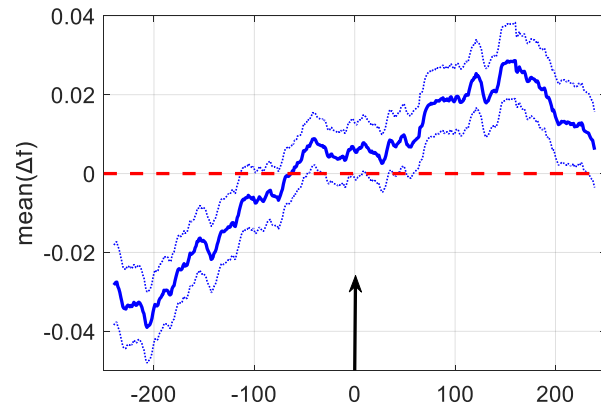
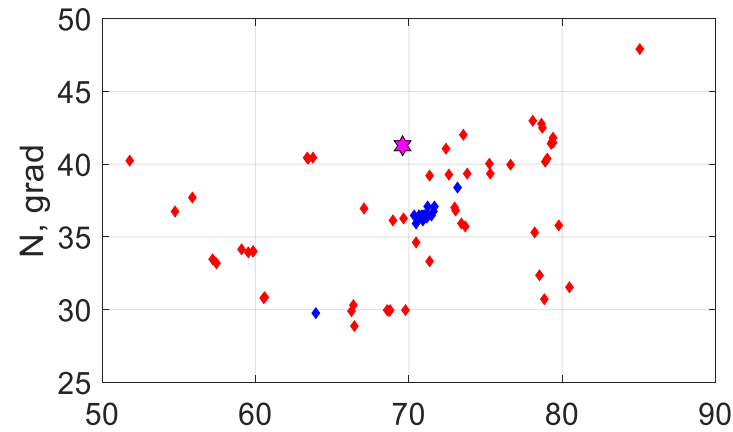


Рис. 7. Yamagawa $H < 70$ km, $R < 1000$ km, 106 EQs

Результаты наложения эпох для землетрясений с глубиной $70 < H < 300$ км (I)

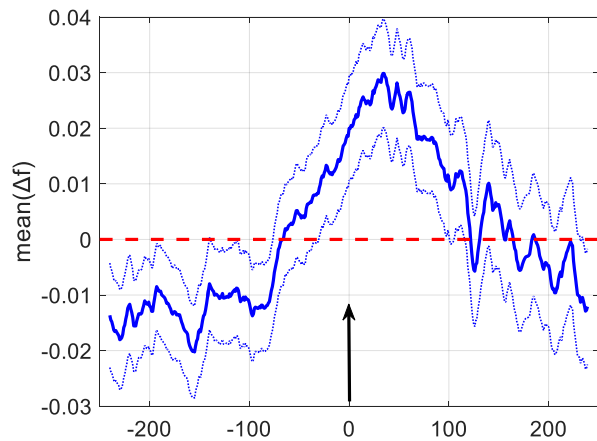


hours, Tash, $H > 70$ km, $R < 1000$ km, 21 Eqs, M6+

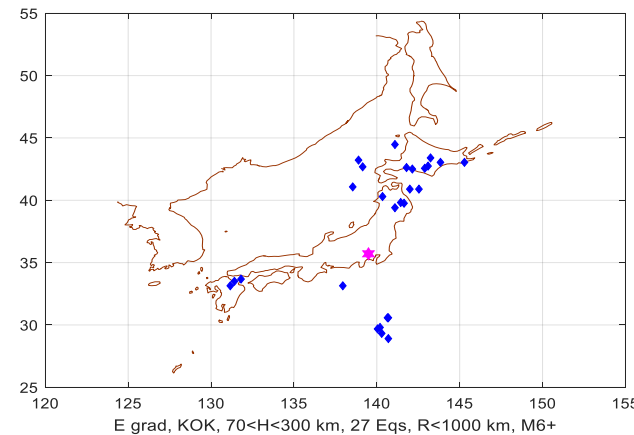


E, grad, Tashkent, $R < 1500$ km, M6+

Рис. 8. Ташкент, $R < 1000$ km, 21 Eqs



hours, KOK, $70 < H < 300$ km, $R < 1000$ km, 27 Eqs, M6+

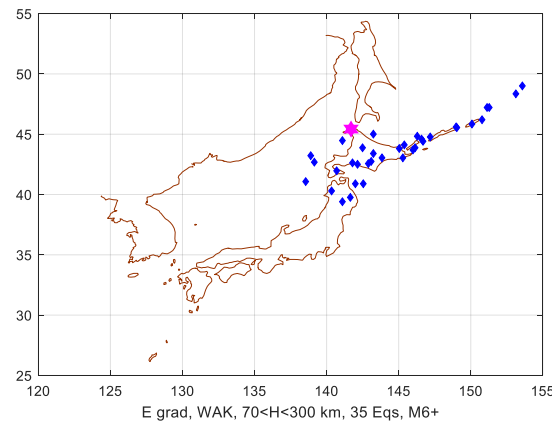
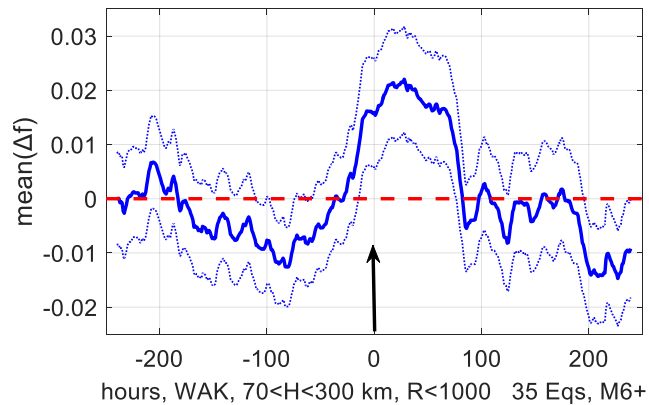


E grad, KOK, $70 < H < 300$ km, 27 Eqs, $R < 1000$ km, M6+

Рис. 9. Токио, $R < 1000$ km, 27 EQs

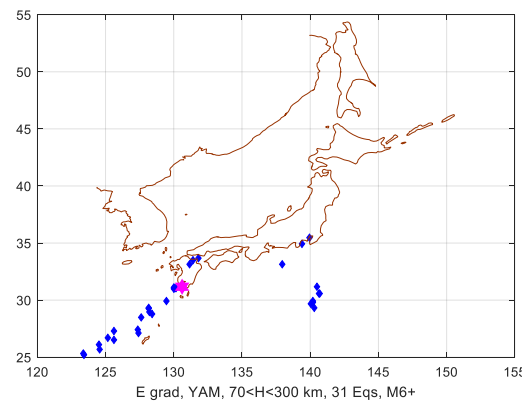
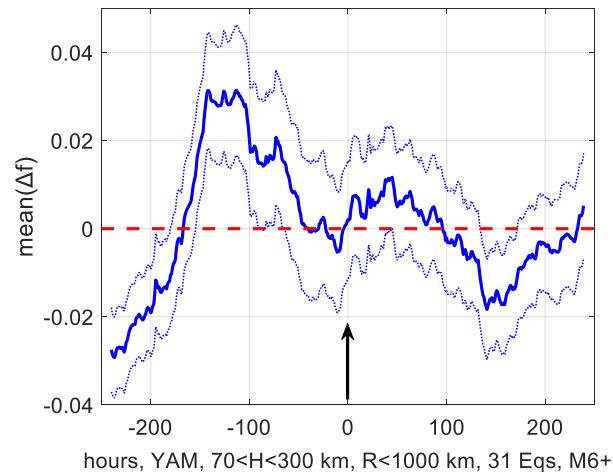
Для глубоких Eqs
 $70 < H < 300$ км
наблюдается
увеличение foF2
после события.

Результаты наложения эпох для землетрясений с глубиной $70 < H < 300$ км (II)



По материалам всех станций, кроме Ямагавы, имеем резкое качественное отличие характера аномалий для событий $H < 70$ км и $70 < H < 300$ км.

Рис. 10. Wakkanai $70 < H < 300$ км, $R < 1000$ км, 35 EQs



Заметим, это средняя амплитуда всех рассмотренных аномалий оказалась на порядок и более слабой, чем в отдельных показательных случаях.

Рис.11. Yamagawa $70 < H < 300$ км, $R < 1000$ км, 31 EQs

Таблица сейсмоионосферных эффектов

СТАНЦИИ	Eqs $H < 70$ km		Eqs $70 < H < 300$ km	
	До Eqs увеличение	После Eqs уменьшение	До Eqs уменьшение	После Eqs увеличение
ТАШКЕНТ, $R < 1500$ km	да	да	да	да
ТОКИО, $R < 1000$ km	да	да	да	да
ВАККАНАЙ, $R < 1000$ km	да	0	да	да
ЯМАГАВА, $R < 1000$ km	да	0	Нет! Увеличение!	0

Намечается также, если это не случайность, тенденция систематического изменения характера аномалии от самой сухопутной станции (Ташкент) к самой морской (Ямагава).

Выводы

1. Для землетрясений $H < 70$ км характер сейсмоионосферной аномалии $foF2$ устойчив на всех станциях и отвечает **росту в интервале вокруг 50 часов до события.**
2. Характер аномалии для событий $H < 70$ км и $70 < H < 300$ км резко различен на всех станциях (кроме Ямагавы, самой «морской»).
3. Для землетрясений $70 < H < 300$ км наблюдается **увеличение $foF2$ после события** (кроме Ямагавы).

Авторы не берутся интерпретировать выявленные закономерности, но надеются, что эти результаты могут помочь при решении задачи физической интерпретации сейсмоионосферных эффектов.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Литература

Le H., Liu J. Y., Liu L. A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6.0+ earthquakes during 2002–2010 // J. Geophys. Res. 2001. V. 116. A02303. doi:10.1029/2010JA015781

Liu, J.Y., Chen, Y.I., Chuo, Y.J., Chen, C.S.: A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. 2006. V.111. A05304. doi:10.1029/2005JA011333

Rodkin M.V. The Variability of Earthquake Parameters with the Depth: Evidences of Difference of Mechanisms of Generation of the Shallow, Intermediate-Depth, and the Deep Earthquakes // Pure Appl. Geophys. (2022). <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02927-4>].

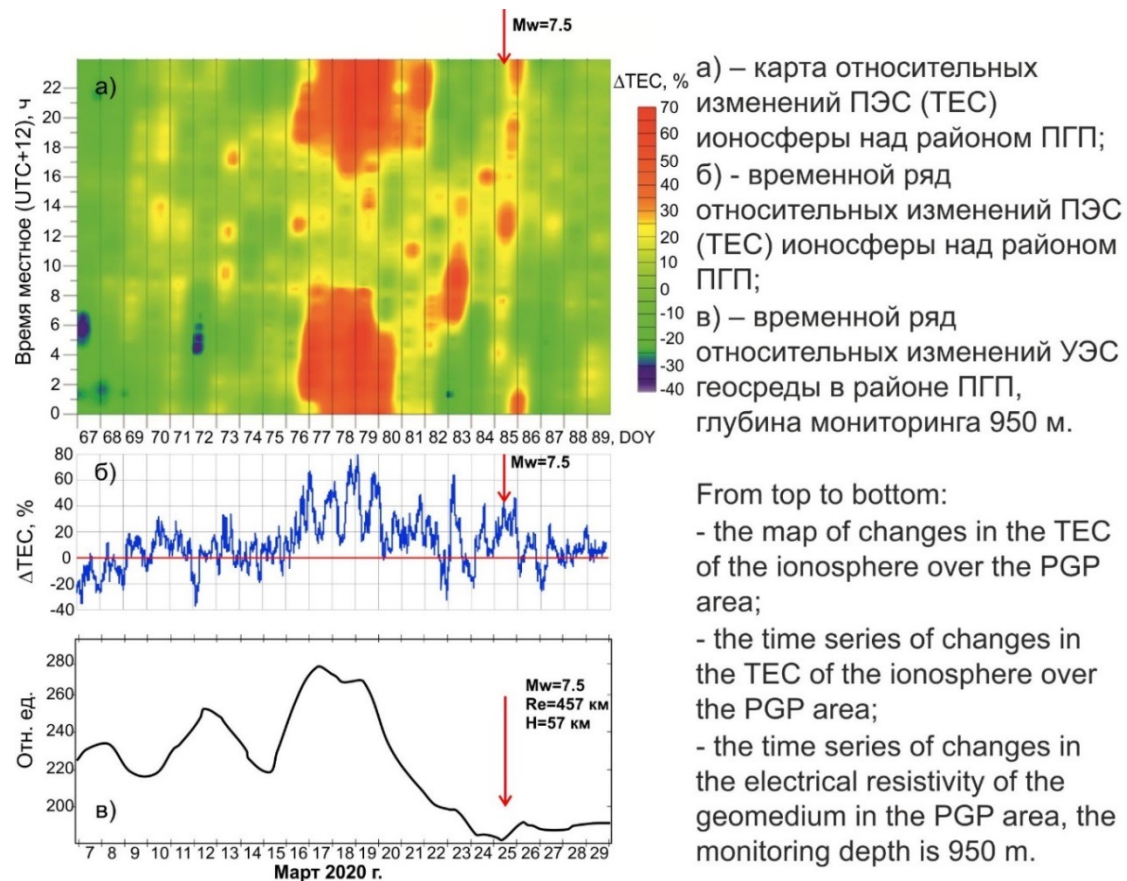
Гаврилов В.А., Дещеревский А.В., Соломатин А.В., Пантелеев И.А., Пулинец С.А., Богданов В.В. Концепция подхода к краткосрочному прогнозированию времени сильнейших землетрясений в районе Авачинского залива (Камчатка)// Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 26 сентября–2 октября 2021 г. г. Петропавловск-Камчатский. С. 246-251.

Калинин В.А., Родкин М.В., Томашевская И.С. Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. М.: Наука. 1989. 157 с.

Пилипенко В.А., В.В. Сурков В.В. Сейсмoeлектромагнитные и сейсмоионосферные явления: от пионерских работ Г.А. Соболева до наших дней// Физика Земли. 2025. № 4. С. 93–114. DOI: 10.31857/S0002333725040078

Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Декластеризация потока сейсмических событий, статистический анализ. Физика Земли, 2019, 5, 1-15.

Родкин М.В., Липеровская Е.В. О различии физических механизмов разноглубинных землетрясений и характера их ионосферного отклика // Физика Земли. 2023. № 3. С. 48-62.

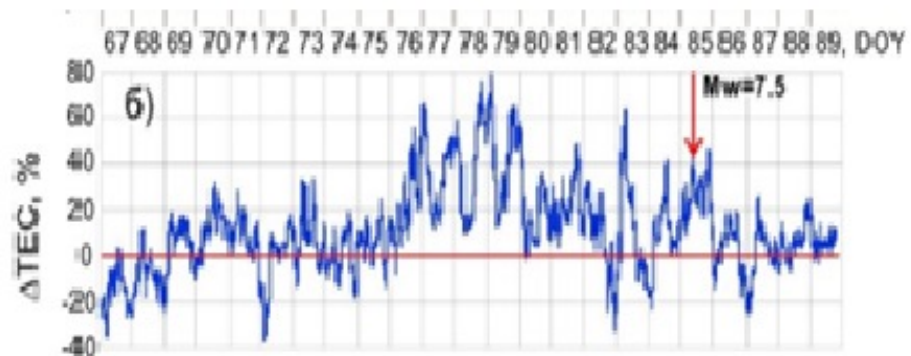


На верхней панели Рис. 1 карта относительных изменений ТЭК, два красных пятна – демонстрируют значительное увеличение в ночное время, пространство между ними – дневное время, увеличение ТЭК **в дневное время слабее, чем в ночное**. На средней панели представлено то же самое в линейном варианте.

На нижней панели приведен редкий пример совпадения вариаций плотности ионизации с результатами уникальных измерений в скважине, но в докладе этого касаться не будем.

Рис.1 Сопоставление изменений полного электронного содержания ионосферы ТЕС (а, б) с изменениями удельного электрического сопротивления геосреды в районе Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона по данным скважинных измерений (в) во временной окрестности сильного ($M_w = 7.5$) землетрясения в районе северных Курил 25.03.2020 г.

Обратимся к Рис. 1, средняя панель.



Фрагмент Рис. 1. По оси ОХ- сутки ,
по оси ОУ – ΔТЕС.

Обратим внимание, что **ночное увеличение ΔТЭК для события M7.5** наблюдалось не за 1-5 сут, а на несколько дней раньше, на (-9...-6) сутки. Отметим, что для таких сильных Eqs статистические исследования временных особенностей проявления сейсмоионосферных эффектов практически отсутствуют (и почти невозможны – редкие события, мала достоверность).

Еще одна особенность Рис 1. состоит в том, что за 6-9 дней **наблюдается увеличение ТЕС примерно на 20%** (что примерно соответствует увеличению $foF2$ на 10%, а **ночью наблюдается увеличение ТЕС на 60%**, что соответствует примерно увеличению $foF2$ на 25%. Таким образом разность средненочной и среднедневной вариаций ($\Delta f_{ночь}$ - $\Delta f_{день}$) составила бы примерно 0.15 в эти сутки.