

**Сравнение сейсмоионосферных эффектов в
вариациях критической частоты f_oF2 в ночное и
дневное время для
разноглубинных землетрясений**

Е.В. Липеровская¹,

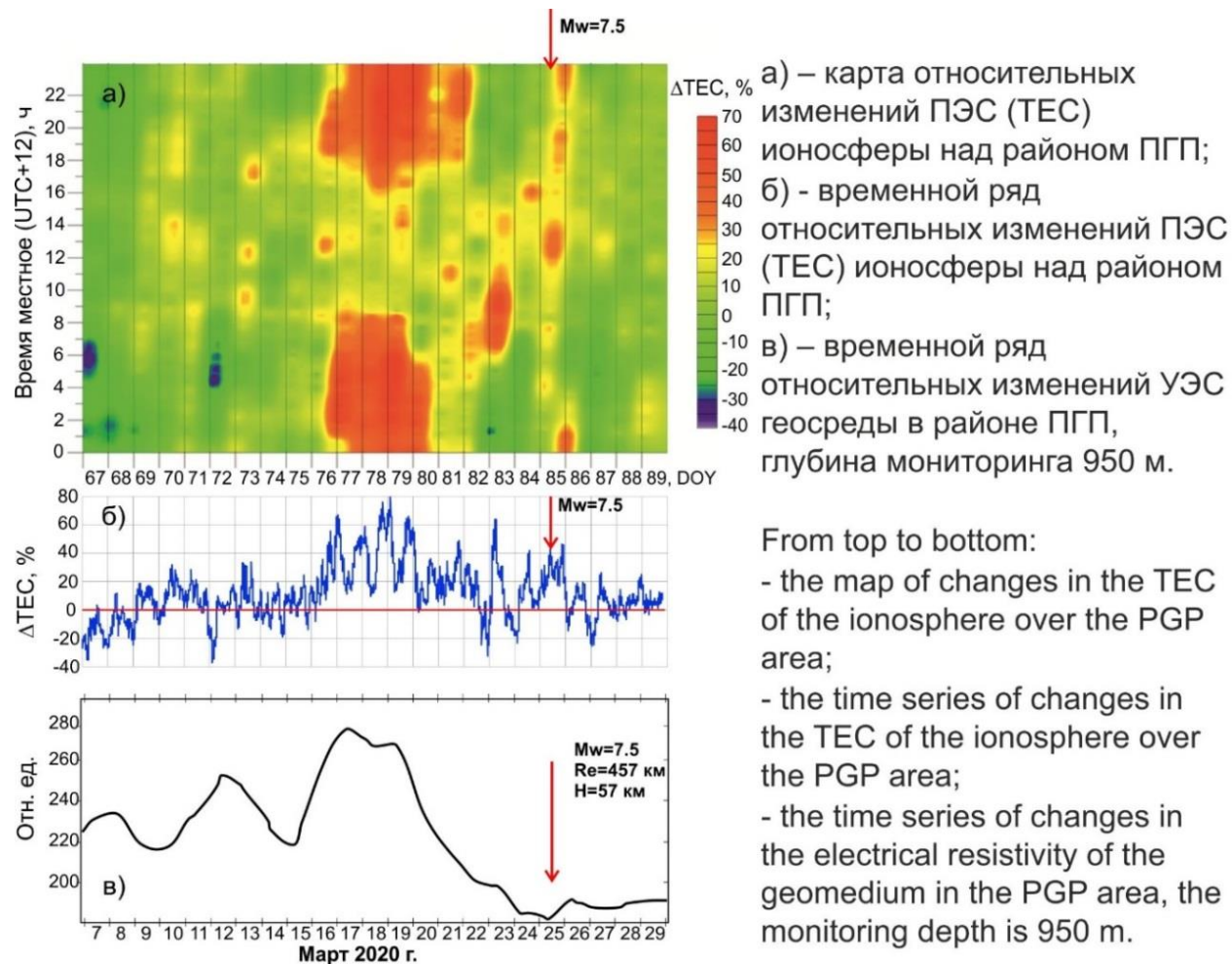
М.В. Родкин^{2,3}

¹ ИФЗ РАН,

² ИТПЗ РАН

³ ИМГиГ ДВО РАН,

Под сейсмоионосферной аномалией обычно понимаются положительные или отрицательные вариации плотности ионизации, чаще возникающие во временной и пространственной окрестности землетрясений [*Le et al.*, 2011, *Liu et al.*, 2006, *Pulinets Boyarchuk*, 2004; и многие другие], чем в фоновое время. Предположение, что сейсмоионосферные эффекты лучше выявляются в ночное время, высказывалось неоднократно и было продемонстрировано на нескольких примерах сильных землетрясений [*Гаврилов и др.*, 2021; и др.].



а) – карта относительных изменений ПЭС (ТЕС) ионосферы над районом ПГП;
 б) – временной ряд относительных изменений ПЭС (ТЕС) ионосферы над районом ПГП;
 в) – временной ряд относительных изменений УЭС геосреды в районе ПГП, глубина мониторинга 950 м.

From top to bottom:
 - the map of changes in the TEC of the ionosphere over the PGP area;
 - the time series of changes in the TEC of the ionosphere over the PGP area;
 - the time series of changes in the electrical resistivity of the geomeidium in the PGP area, the monitoring depth is 950 m.

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 геодинимического полигона по данным скважинных измерений (в) во временной окрестности сильного ($M_w = 7.5$) землетрясения в районе северных Курил 25.03.2020 г.

Обычно полагают, что физика разноглубинных землетрясений различна. Неглубоким землетрясениям отвечает механизм хрупкого разрушения; промежуточные землетрясения обычно принято связывать с высоким флюидным давлением. В [Rodkin, 2022] по мировым сейсмологическим данным было показано, что механизмы реализации землетрясений с глубинами примерно до 30 км и глубинами 30-70 км различаются, а в [Родкин, Липеровская, 2023] на основе данных вертикального зондирования по станции Токио с использованием часовых данных за полные сутки было продемонстрировано различие сейсмоионосферного отклика на процессы подготовки землетрясений с глубинами в диапазонах 0-35 км и 35-70 км; такое различие может отвечать разным механизмам сейсмоионосферных связей.

Задача данной работы: сравнить сейсмоионосферные эффекты в вариациях критической частоты f_oF2 в ночное и дневное время в зависимости от глубины гипоцентра и расстояния, оценить характерные времена этих процессов, среднюю амплитуду вариаций и достоверность.

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.

В сейсмологии принято различать землетрясения до 70 км и более глубокие. По данным станции вертикального зондирования ионосферы Токио (Kokubunji), за 1957- 2020 годы были рассмотрены часовые вариации критической частоты f_oF2 в связи с главными землетрясениями с $M_w \geq 6$, $H < 70$ км, $R < 2000$ км. Магнитуда моментная, использованы каталоги ISC GEM (1957-1976) и GCMT (1976-2020). Афтершоки были исключены по методу, описанному в [Писаренко, Родкин, 2019].

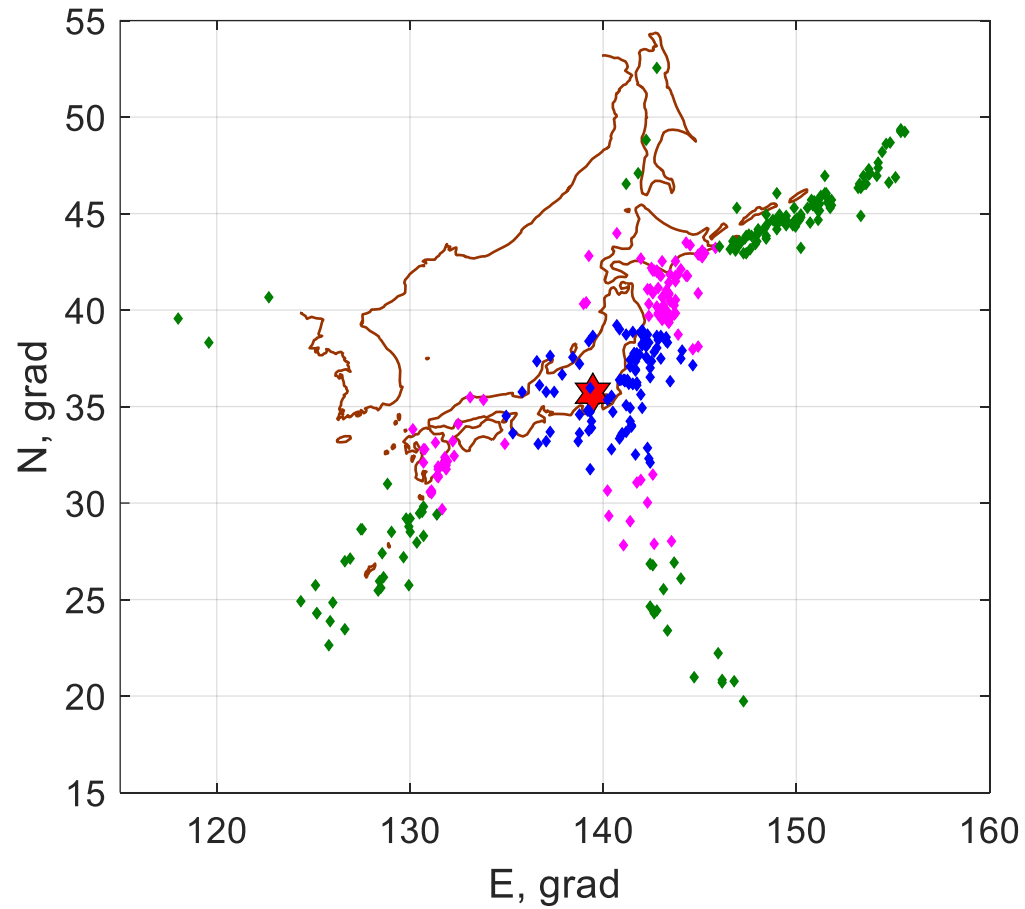


Рис. 2 Карта расположения эпицентров землетрясений M6+, звездочкой отмечена станция В3 Токио; синий $R < 500$ км, мажента $500 < R < 1000$ км, зеленый $1000 < R < 2000$ км

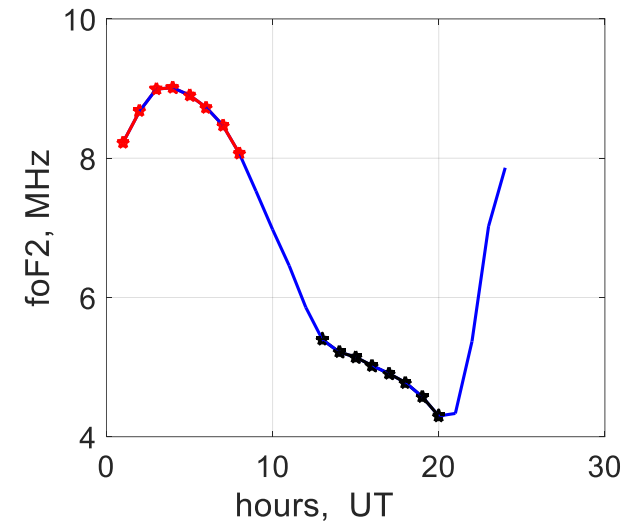


Рис. 3 Усредненный за 64 года суточный ход $foF2$ по данным станции Токио (Kokubunji). Время UT. Максимальная скорость изменения $foF2$ наблюдается в утренние и закатные часы. Ночные и дневные часы в работе использовались отдельно.

Известно, что в ходе foF2 присутствуют сильные годовые вариации в ночные часы, полугодовые в дневные, 27- дневные и 11- летние во все часы.

С целью минимизации вклада этих 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 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 $\Sigma K_p > 25$ и последующие сутки исключались. Далее применялся метод наложения эпох на интервале (-10, +10) сут., не слишком большом и не слишком маленьком.

Разделим землетрясения на две группы по глубинам: с глубинами до 35 км, назовем их условно «неглубокие» и с глубинами от 35 до 70 км – назовем «более глубокими» и применим процедуру наложения эпох на расстояниях до 2000 км .

Представленные здесь цветные рисунки – не более чем иллюстрация, демонстрирующая, на каких расстояниях и временах можно искать сейсмоионосферные эффекты.

Неглубокие землетрясения $H < 35$ км

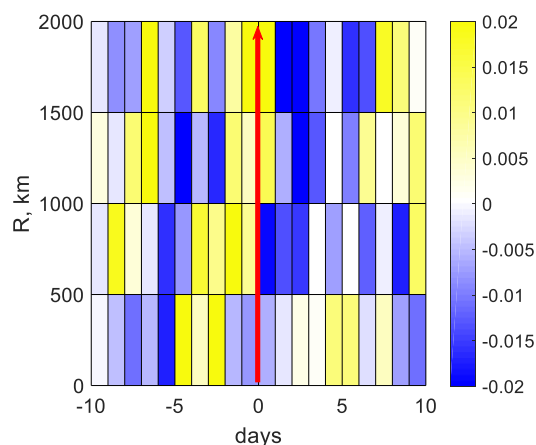


Рис. 4. Ночь

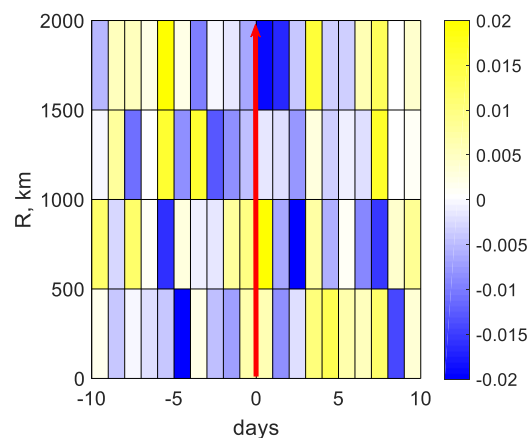


Рис. 5. День

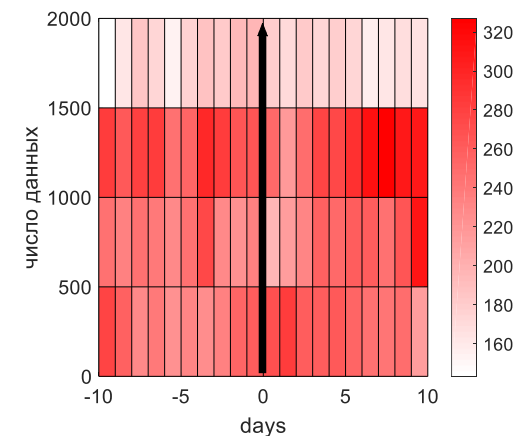


Рис. 6. Число часовых данных (ночь)

На рис. 4 «Ночь» видно, что перед Eqs имеет место увеличение f_oF_2 на расстояниях до 2000 км, причем на уровне тенденции заблаговременность эффекта увеличивается по мере приближения к эпицентру. После Eqs f_oF_2 уменьшается, причем это уменьшение незаметно на расстояниях до 500 км. На рис. 5. «день» эффект не просматривается. Проверим значимость вариаций.

Рассмотрим подробнее неглубокие землетрясения с глубиной $H < 35$ км в различных пространственных границах: до 500 км, до 1000 км.

Землетрясения с глубиной $H < 35$ км, расстояние $R < 500$ км

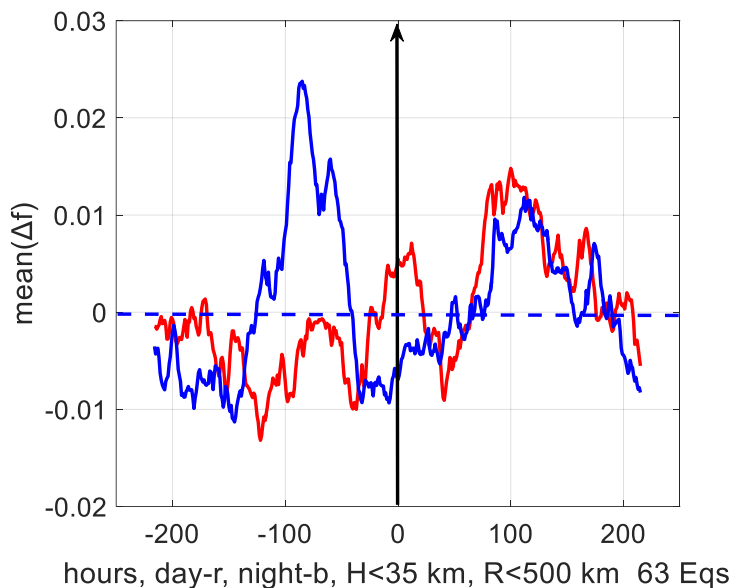


Рис. 7. Результат наложения эпох для неглубоких зт $R < 500$ км. После наложения эпох проводим скользящее сглаживание кривой по окну 48 час. День – красная, НОЧЬ-синяя.

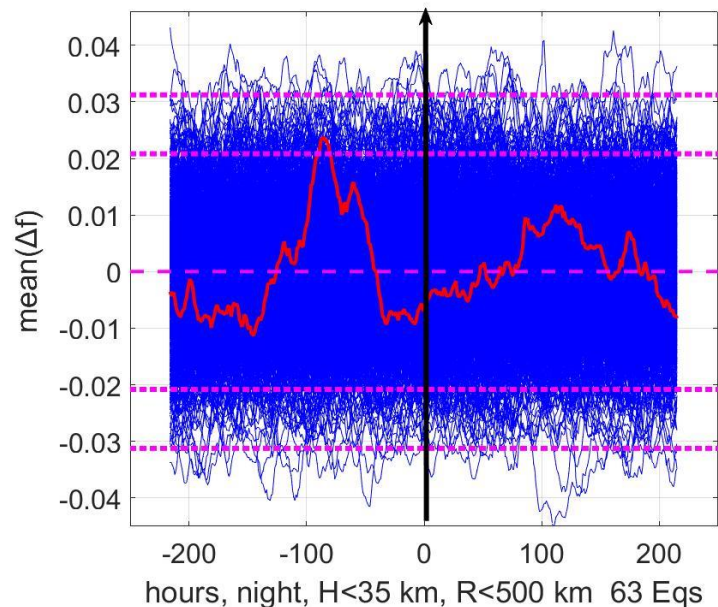


Рис. 8. Результат моделирования случайного процесса (ночь).

Применяем моделирование случайного процесса. Ночью эффект увеличения до Eqs имеет место, можно говорить об 95% уровне значимости; после Eqs увеличение незначимо. Днем до землетрясения ничего нет, увеличение после Eqs незначимо.

Землетрясения с глубиной $H < 35$ км, расстояние $R < 1000$ км

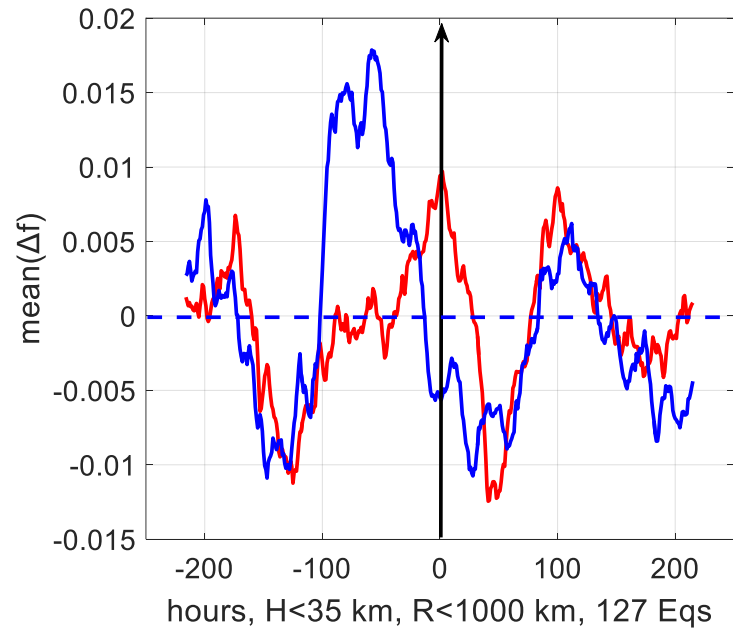


Рис. 9 представлен результат наложения эпох для условно неглубоких Eqs $H < 35$, $R < 1000$ км. Ночью есть увеличение перед землетрясениями, днем- нет.

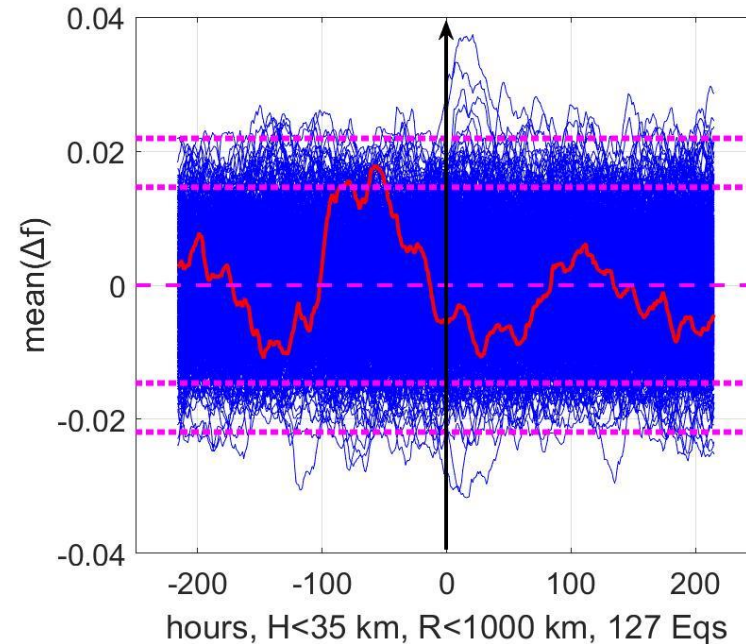


Рис. 10. Результат моделирования случайного процесса. Eqs $H < 35$, $R < 1000$ км. Увеличение перед Eqs значимо.

Более глубокие землетрясения $35 \leq H < 70$ км

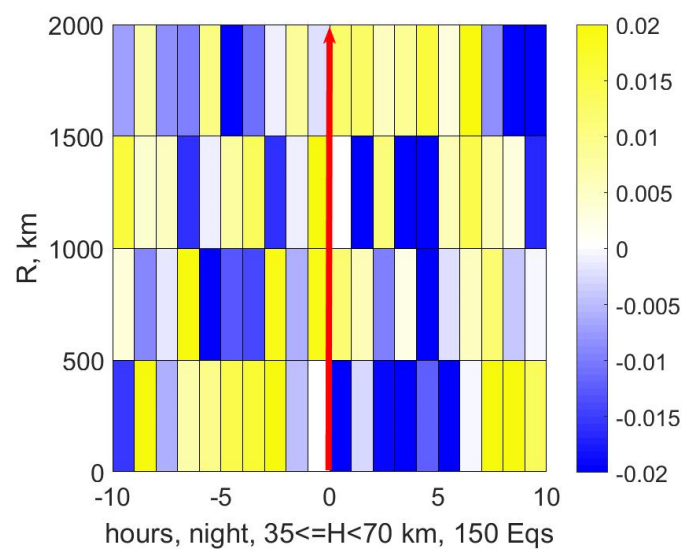


Рис. 11. Eqs $35 \leq H < 70$ км, НОЧЬ

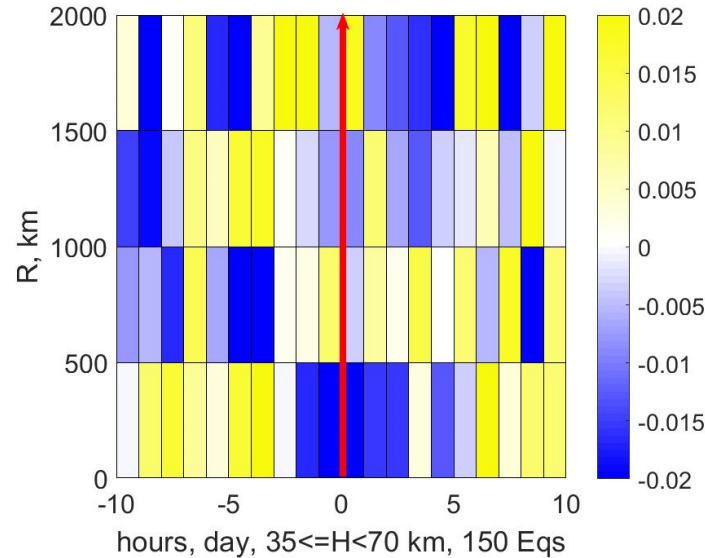


Рис. 12. Eqs $35 \leq H < 70$ км, ДЕНЬ

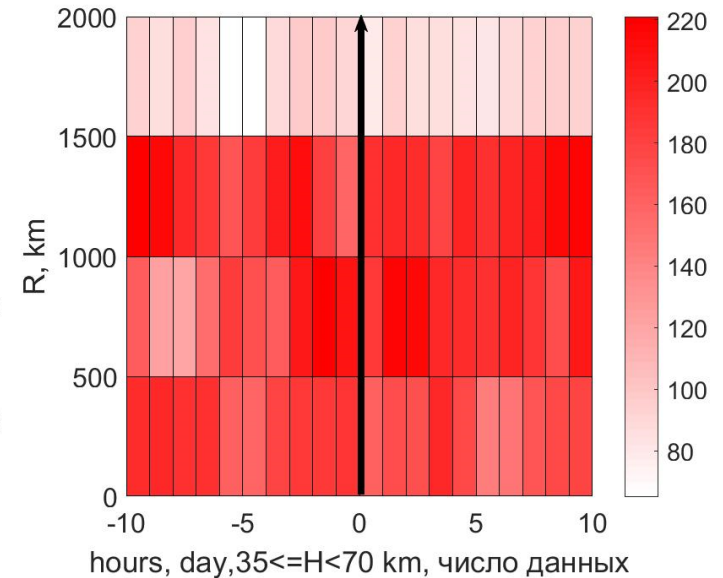


Рис. 13. Число данных, день, 150 EQs

Результат наложения эпох

Для более глубоких Eqs и в ночное время, и в дневное время на расстояниях до 500 км наблюдается увеличение до землетрясений и уменьшение после.

Землетрясения с глубиной $35 \leq H < 70$ км, расстояние $R < 500$ км

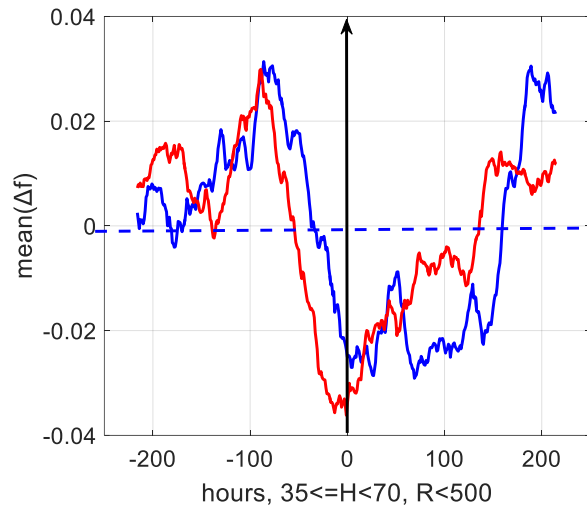


Рис. 14. Результат наложения эпох. Eqs $35 \leq H < 70$ км, $R < 500$ км
День- красный, ночь- синяя.

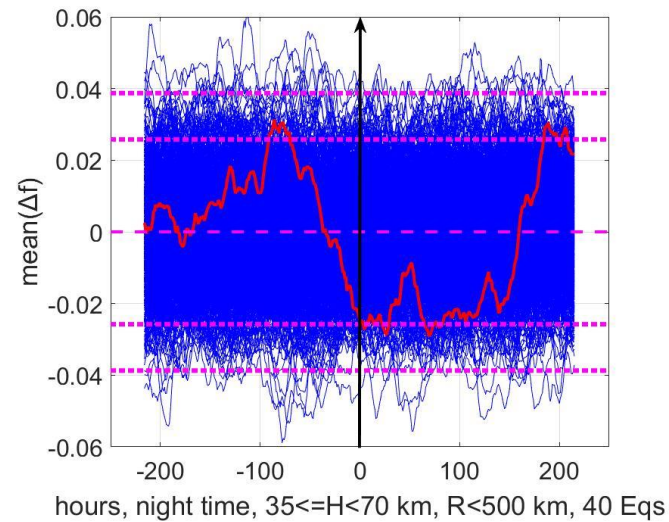


Рис. 15. Результат моделирования случайного процесса. **Ночь.** Eqs $35 \leq H < 70$ км, $R < 500$ км.

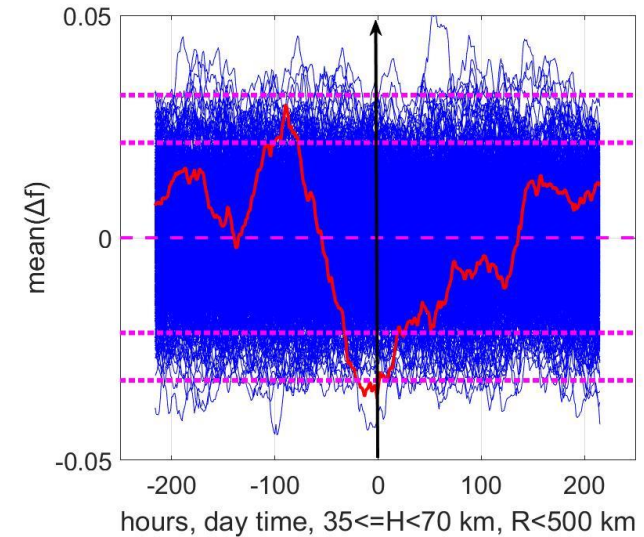


Рис. 16. Результат моделирования случайного процесса. **День.** Eqs $35 \leq H < 70$ км, $R < 500$ км.

Дневные и ночные вариации примерно одинаковые для Eqs $35 \leq H < 70$ км $R < 500$ км (40 событий).

Для прогноза в первую очередь представляют интерес землетрясения $H < 70$ км на расстояниях $R < 1000$ км - не очень глубокие и не очень удаленные.

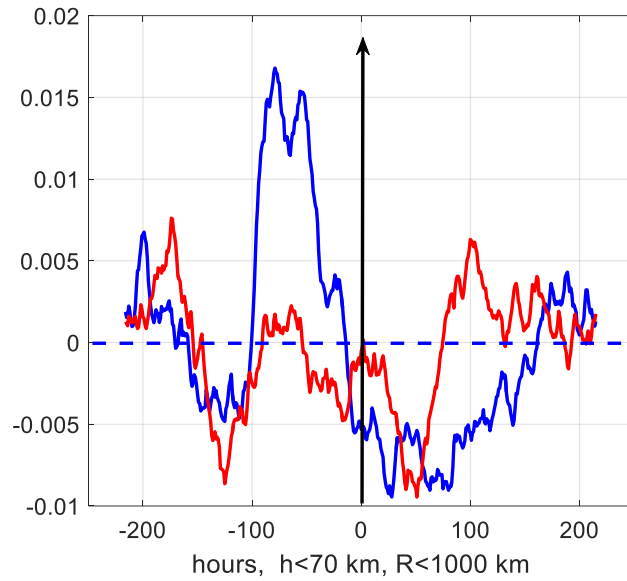


Рис. 17. Результат наложения эпох Eqs $H < 70$ км, $R < 1000$ км. Ночь синяя, день-красный.

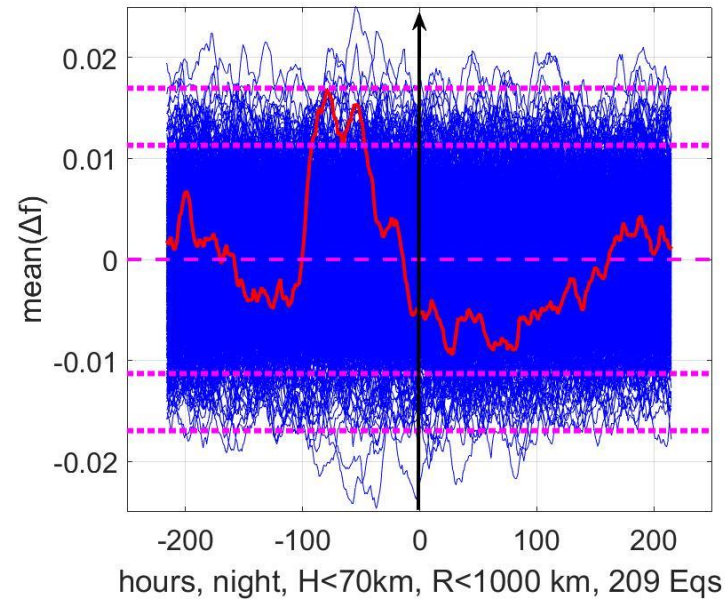


Рис. 18. Результат моделирования случайного процесса Eqs $H < 70$ км, $R < 1000$ км. Ночь.

В ночное время наблюдается статистически достоверное ($>95\%$) увеличение на (-4, -3, -2) сутки. Можно ли использовать увеличение $foF2$ перед землетрясениями как прогностический признак?

Для землетрясений $H < 70$ км на расстоянии до 1000 км получим значимое ночное увеличение на (-4, -3, -2) сутки. Из 209 событий для 98 есть данные за три ночи, за этот интервал положительная вариация наблюдается для 58 событий, отрицательная - для 40. Разница значима, но ее не получится использовать для прогноза. В среднем, как было показано в докладе, повышение за 3 ночи составило $1 \div 1.5\%$. Из 98 событий для 16 повышение за три ночи превысило 5%, т.е. примерно для 16% событий есть заметное повышение. А для фона такое повышение наблюдалось в 10% случаев.

Таблица сейсмоионосферных эффектов в вариациях $foF2$

	H<35 НОЧЬ		35<H<70 НОЧЬ		35<H<70 ДЕНЬ	35<H<70 ДЕНЬ
ТОКИО (Kokubunji)	До Eqs Увели- чение,	После Eqs умень- шение	До Eqs Увели- чение,	После Eqs Умень- шение	До Eqs Увели- чение,	После Eqs Умень- шение
R<500 km	(-4,...-2)	-	(-5,... -1)	(+1...+5)	(-5,...-3)	(-2,...+3)
R<1000 km	(-4,...-2)	-	-	-	-	-

Выводы

1. Для неглубоких землетрясений $H < 35$ км на расстояниях до 1000 км **значимый сейсмоионосферный эффект** наблюдается **только в ночное время**: увеличение f_oF2 за 4-2 сут до E_{qs} .
2. Для более глубоких землетрясений $35 \leq H < 70$ км сейсмоионосферный эффект наблюдается и в дневное, и в ночное время на расстояниях до **500 км**: увеличение f_oF2 за 2-5 сут до и уменьшение в течение $(-1, \dots +4)$ сут.
3. Средняя амплитуда эффекта составила $1 \div 1.5\%$.

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.