

Отражение процессов подготовки сильных камчатских землетрясений в формировании возмущений полного электронного содержания ионосферы

Полтавцева Е.В.^{1,2}, Гаврилов В.А.^{1,2}, Сагарьяров И.А.^{1,2}

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

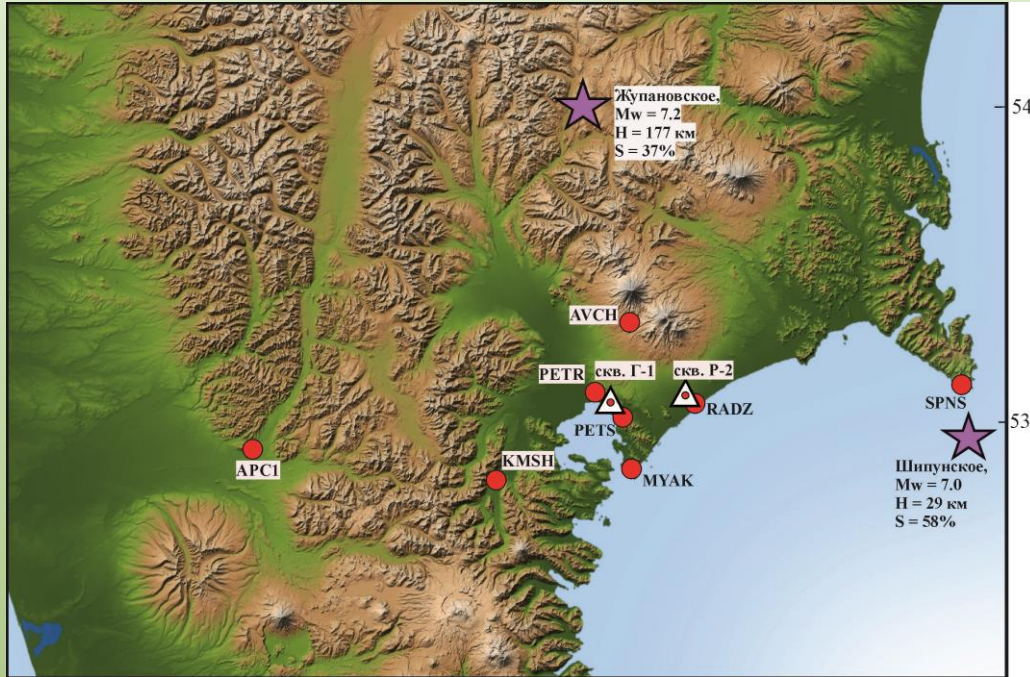
² Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Основные цели и задачи на текущий момент исследования:

- получение и анализ пространственных двумерных карт изменений полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы над районом Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона (ПГП), а также временного ряда вариаций ПЭС в период подготовки и реализации **Жупановского (30 января 2016, $M_w = 7.2$)** и **Шипунского (17 августа 2024, $M_w = 7.0$)** землетрясений;
- сравнение полученных результатов скважинного мониторинга изменений удельного электрического сопротивления (УЭС) геосреды в районе ПГП с изменениями ПЭС на заключительных стадиях подготовки сильных камчатских землетрясений с обсуждением возможной физической основы выявленных причинно-следственных связей.

Исходные данные:

1. Результаты электромагнитных измерений по данным Сети комплексного скважинного мониторинга, скв. Г-1 и скв. Р-2 обозначены треугольниками.
2. Данные сети наблюдений с помощью Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) КФ ГС РАН (пункты сети на территории ПГП обозначены кружками), а также данные следующих пунктов ГНСС-наблюдений: ПЕТТ (г. Петропавловск-Камчатский), входящего в Фундаментальную астрономо-геодезическую сеть; KLUC (п. Ключи Камчатского края) и КАМС (г. Петропавловск-Камчатский), входящих в сеть высокоорбитальной радиотомографии и мониторинга ионосферы.



Звездочками обозначены эпицентры сильнейших по величине S ($S = L/R_h * 100$ [%], L – длина очага землетрясения, R_h – гипоцентрального расстояния до пункта Г-1 в г. Петропавловске-Камчатском)

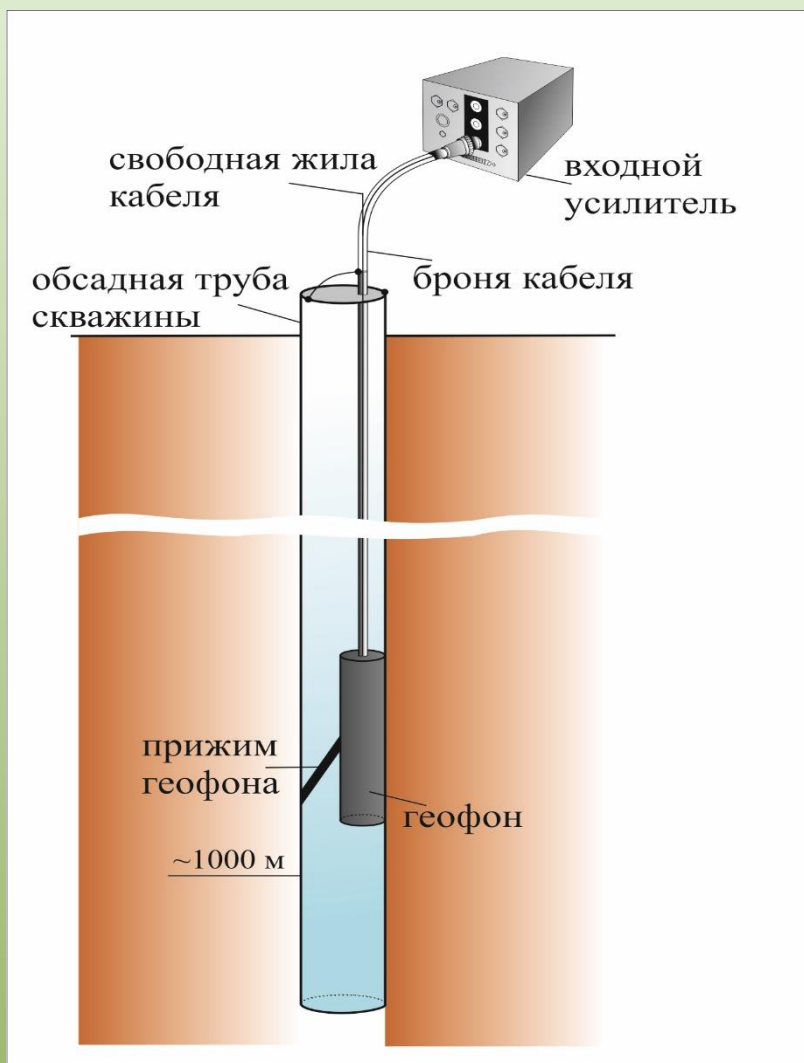
землетрясений – Жупановского, $S = 37\%$ и Шипунского, $S = 58\%$

Мониторинг изменений УЭС горных пород

Зондирующий сигнал - непрерывное фоновое электромагнитное излучение (ЭМИ) техногенного или природного происхождения

Датчики – подземные электрические антенны, основным конструктивным элементом является металлическая обсадная колонна скважин и свободная жила кабеля геофона

Физическая основа метода - зависимость УЭС горных пород от степени их влажности.



Если напряженность вертикальной составляющей поля в воздухе непосредственно над поверхностью раздела геосреды и воздушной среды равна E_{azm} , то напряженность вертикальной составляющей поля в геосреде E_{gz} на глубине h будет:

$$E_{gz} = \frac{E_{azm} e^{-\delta h}}{\sqrt{\varepsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2}} e^{i[\omega(t - \frac{h}{v}) + \alpha]}, \quad \alpha = \arctg \frac{60\lambda\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

где v - фазовая скорость распространения электромагнитной волны в геосреде;
 λ - длина электромагнитной волны в воздухе, ε - относительная диэлектрическая проницаемость геосреды, σ - удельная электропроводность геосреды.

Поглощение ЭМИ в геосреде определяется экспоненциальным множителем $e^{-\delta h}$, где δ - коэффициент поглощения. Для ЭМИ сверхнизкочастотного диапазона $\delta = 2\pi \sqrt{\frac{30}{\rho\lambda}}$, [m⁻¹], где ρ – УЭС геосреды

Таким образом, в СНЧ-диапазоне частот основное влияние на величину коэффициента поглощения оказывает удельное электрическое сопротивление геосреды

Особенности измерений с подземными электрическими антеннами

- 1.** Использование подземных электрических антенн позволяет вести непрерывные наблюдения за изменениями УЭС геосреды на глубинах до 3 км.
- 2.** Высокая плотность пород на таких глубинах обуславливает очень высокую чувствительность УЭС геосреды к изменениям ее влажности: как показывают результаты экспериментов с образцами горных пород для пород с низкой влажностью (первые проценты) изменения влажности всего **на десятые доли процента** может приводить к изменениям УЭС на **два порядка**.
- 3.** Результаты долговременных (более 20 лет) наблюдений на ПГП подтверждают это; так, например, накануне сильного Жупановского землетрясения амплитуды изменений УЭС достигали **700%**.

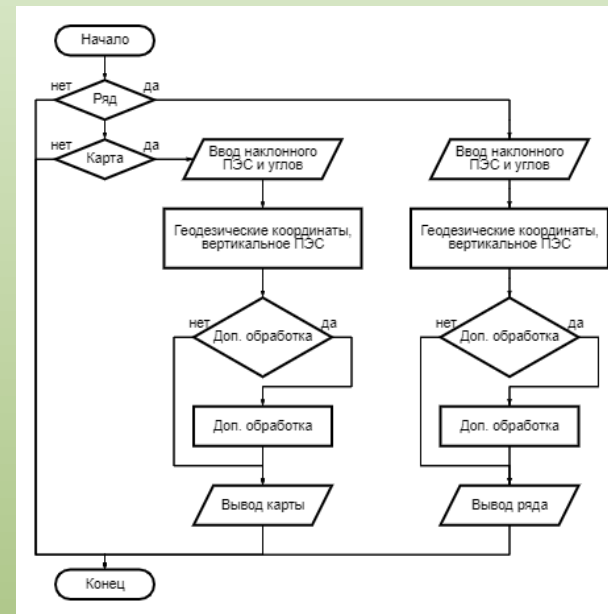
Обработка данных для мониторинга ПЭС ионосферы

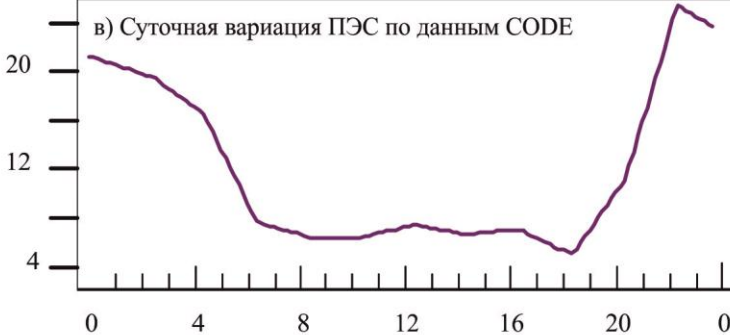
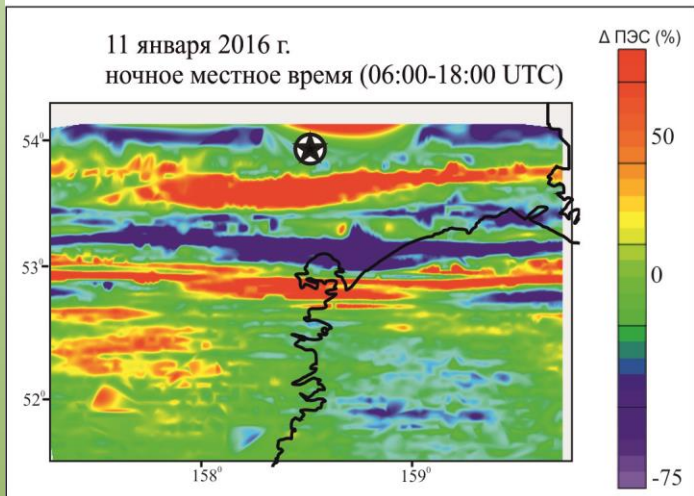
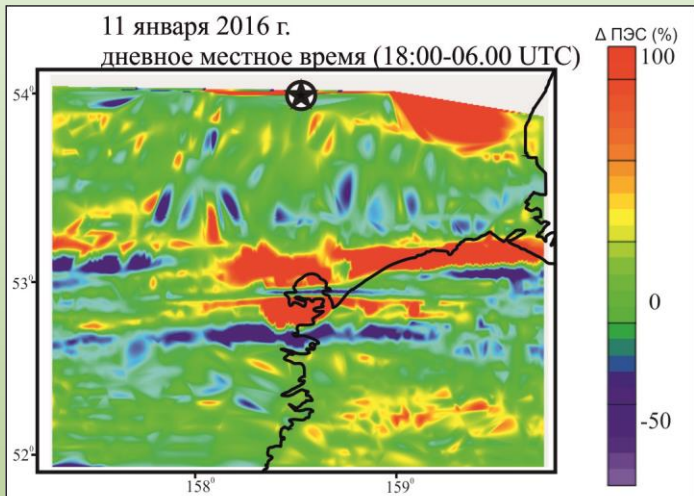
Технология восстановления ПЭС ионосферы вдоль луча “приемник-спутник” по данным сетей Глобальных Навигационных Спутниковых Систем (ГНСС) с использованием RINEX-файлов приемников и файлов навигационных сообщений позволяет практически в режиме реального времени:

- создавать двумерные карты вариаций ПЭС для выбранной пространственной локации;
- формировать временные ряды изменений ПЭС для выбранной пространственной области и сопоставлять их с результатами других видов геофизического мониторинга

Для расчета ПЭС по кодовым измерениям псевдодальностей на первом этапе было использовано программное обеспечение tec_suite v0.7.8 (<https://github.com/gnss-lab/tec-suite/issues>), для визуализации результатов были созданы собственные программные средства на языке Golang (программа ИОН)

Блок-схема программы Ион





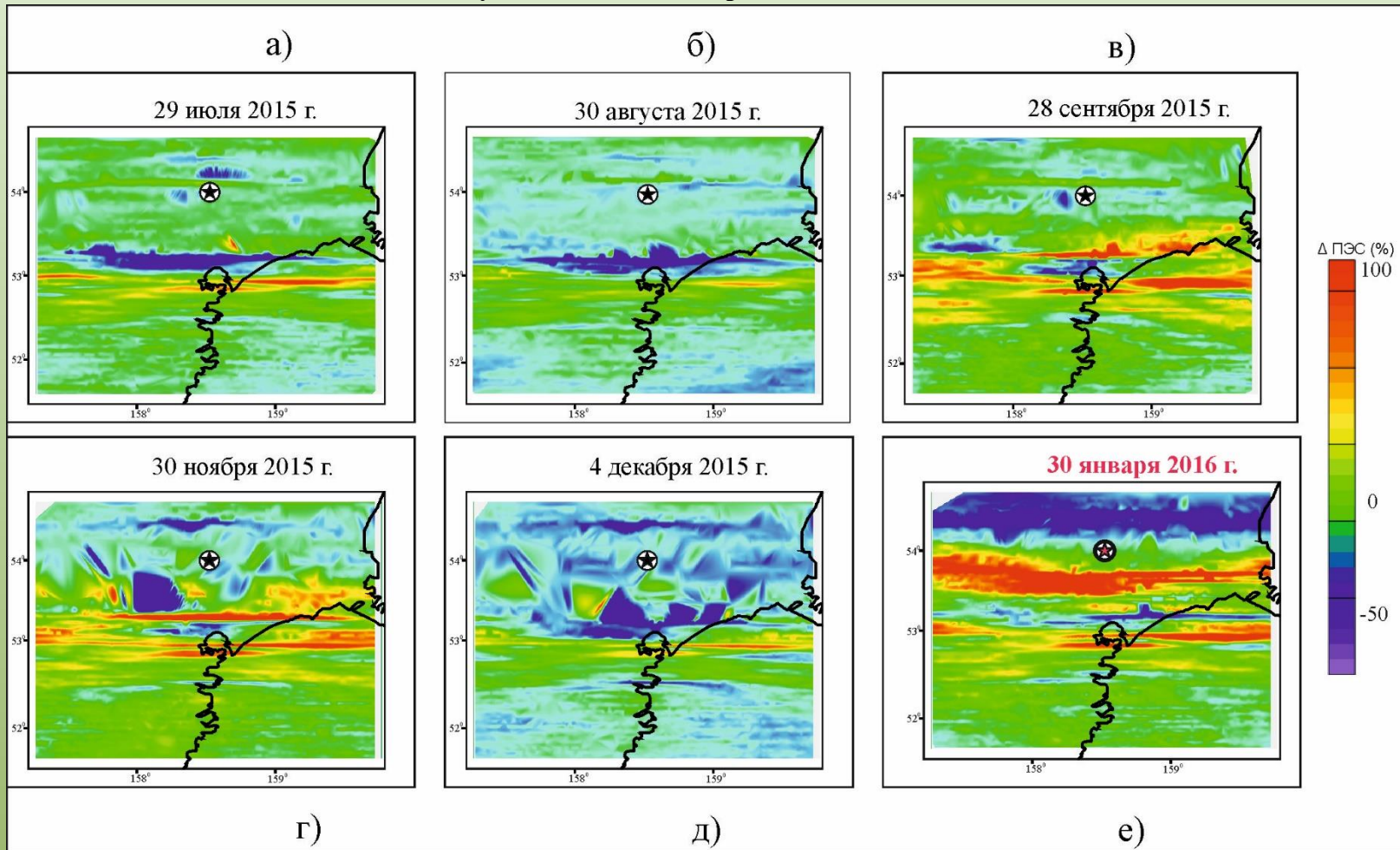
11 января 2016 (UTC)

часы

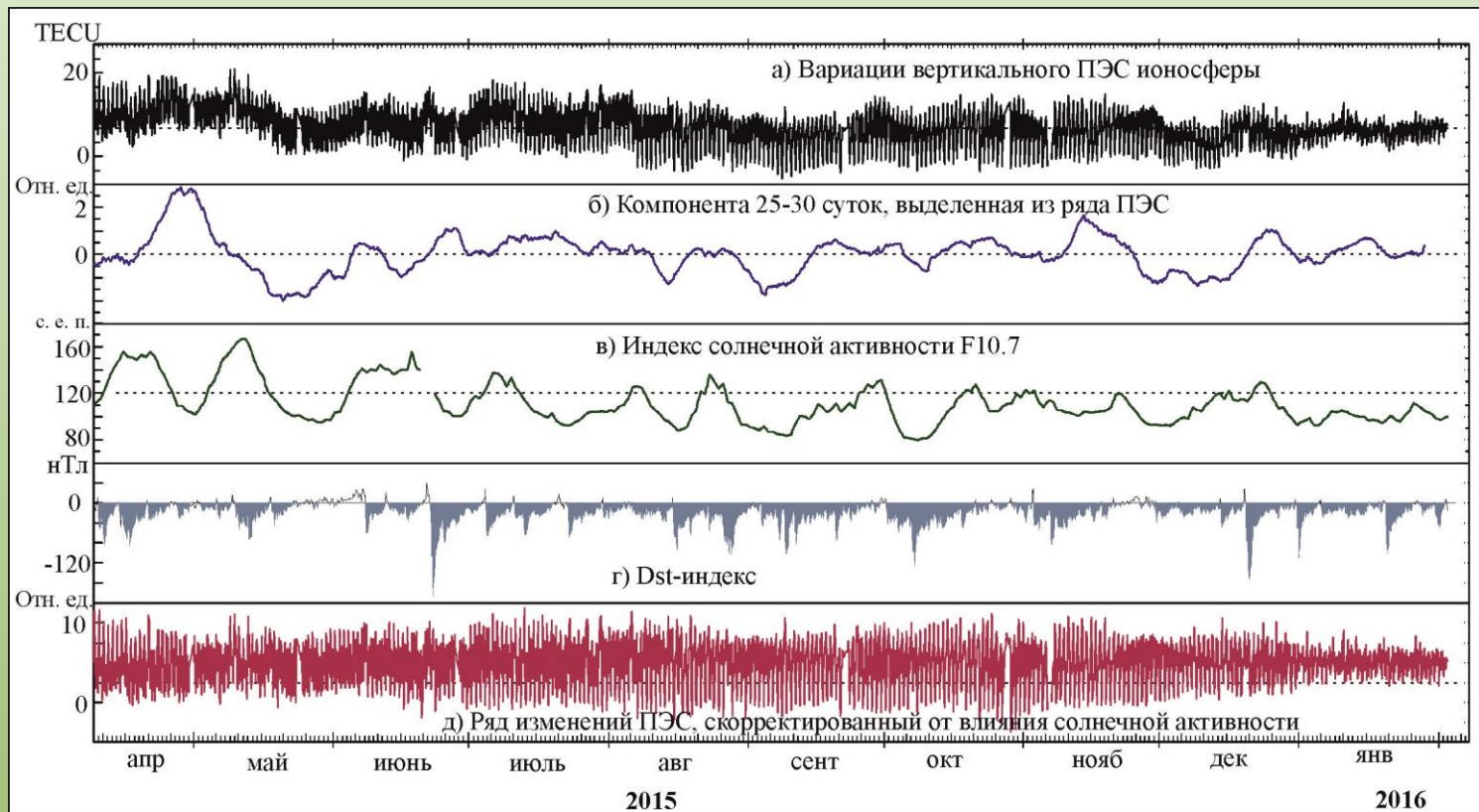
Сравнение рассчитанных значений ПЭС по одной станции и по всей сети с данными центра CODE в сопоставлении с картами, построенными для дневного и ночного локального времени (UTC +12) для 11.01.2016, за несколько дней до Жупановского события

Для картирования использованы отклонения ПЭС от фонового уровня по данным CODE

Эволюция пространственного распределения положительных возмущений ПЭС в околоэпицентральной зоне в период подготовки Жупановского землетрясения в 2015-2016 гг.



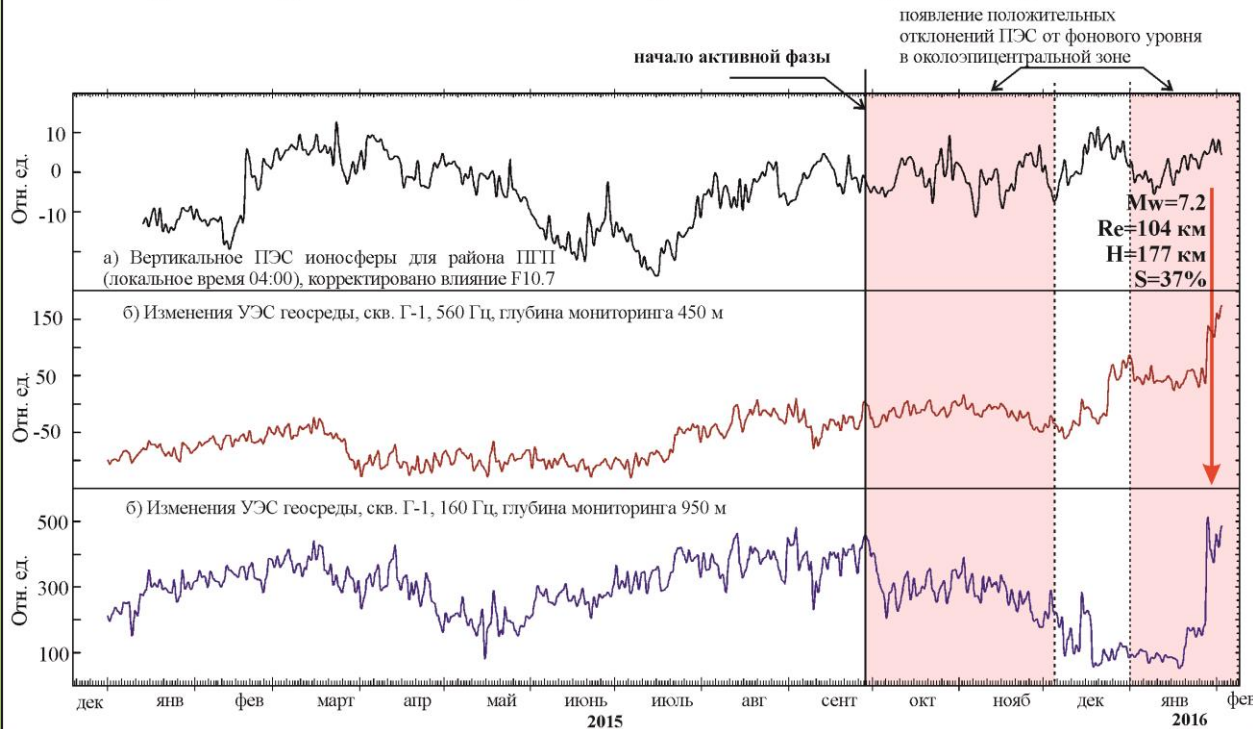
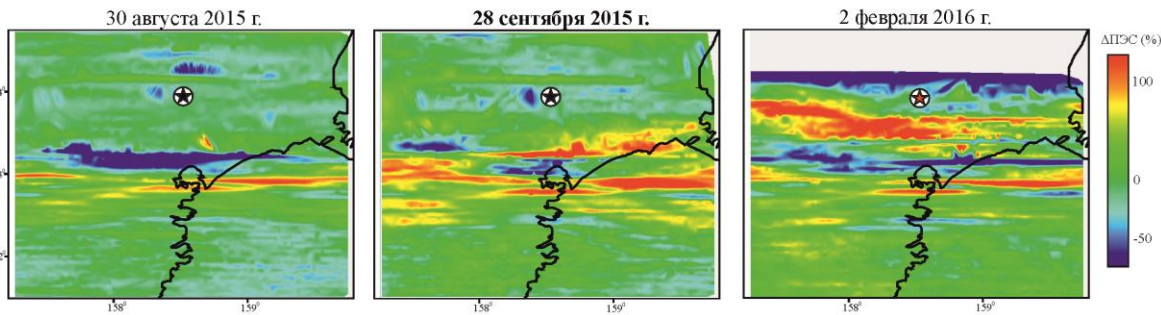
Коррекция влияния индекса солнечной активности F 10.7 в долговременных измерениях ПЭС



- Dst-индекс, [нТл],
сильные
отрицательные
возмущения - начало
магнитной бури

- F 10.7, [с.е.п.], индекс
солнечной активности,
поток радиоизлучения
Солнца на частоте 2800
МГц (длина волны 10.7
см). Измеряется в
солнечных единицах
потока и имеет четко
выраженную 27-
дневную
периодичность,
связанную с
вращением Солнца
вокруг своей оси

Пример коррекции ряда изменений ПЭС от влияния солнечной активности



Сравнение результатов мониторинга ПЭС ионосферы и УЭС геосреды на временном интервале подготовки и реализации Жупановского землетрясения совместно с картированием положительных возмущений ПЭС в околоэпицентральной зоне.

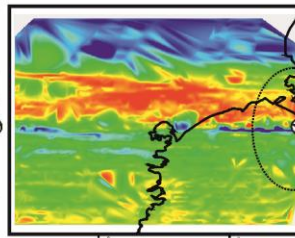
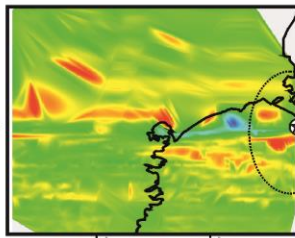
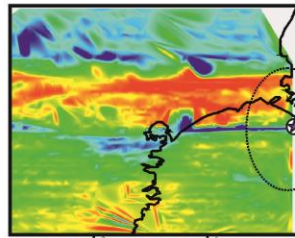
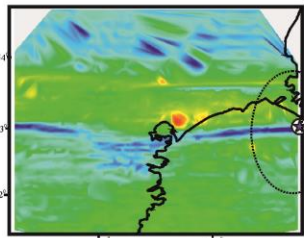
Первое прогнозное заключение о повышенной вероятности землетрясения с S более 18% было подано в конце сентября 2015, второе заключение – о **значительно повышенной вероятности** – 28 января 2016, за 2 суток до события

11 декабря 2023 г.

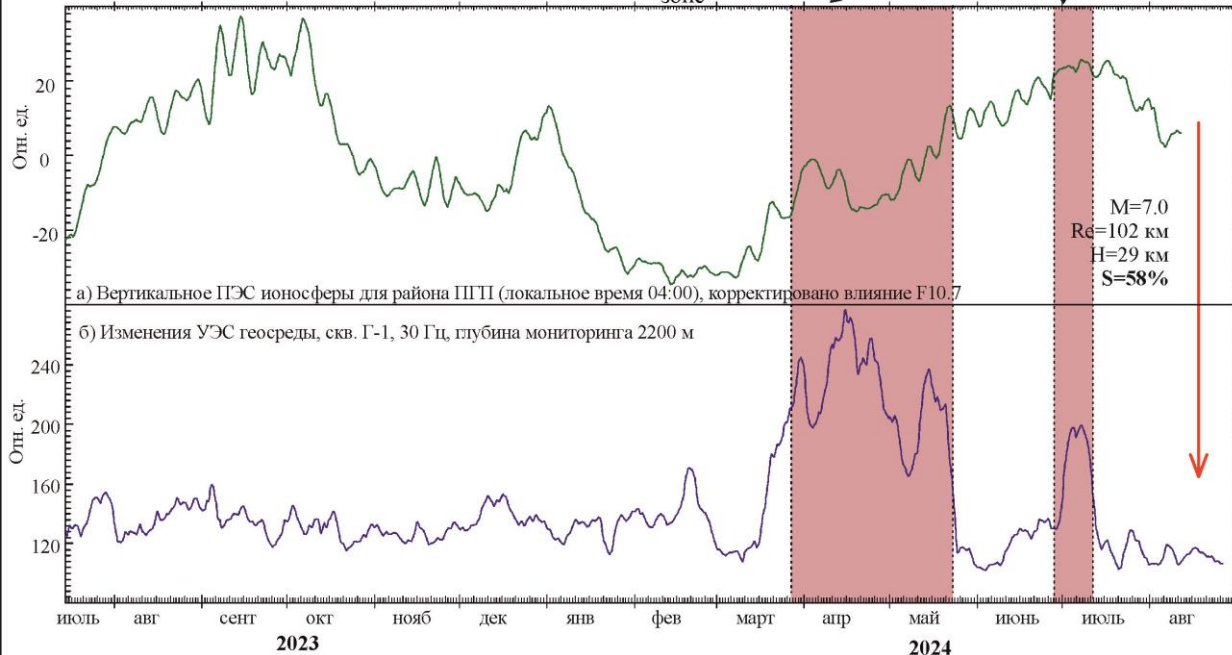
14 апреля 2024 г.

19 мая 2024 г.

1 июля 2024 г.

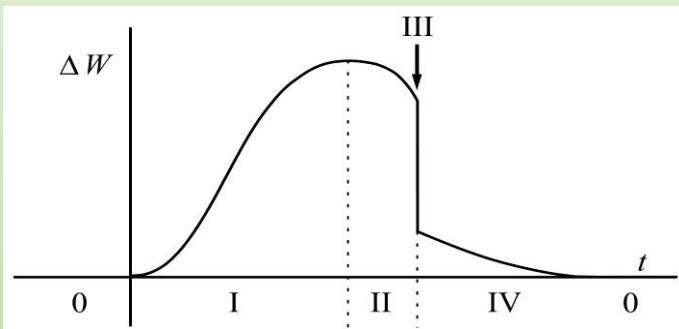


появление положительных
возмущений ПЭС в
околоэпицентральной
зоне



Сравнение результатов мониторинга ПЭС ионосферы и УЭС геосреды на временном интервале подготовки и реализации Шипунского землетрясения совместно с картированием положительных возмущений ПЭС в околоэпицентральной зоне.

Первое прогнозное заключение о повышенной вероятности землетрясения с S более 18% было подано в конце декабря 2023, второе заключение – о **значительно повышенной вероятности** – 8 августа 2024, за 10 суток до события



Консолидационная модель подготовки тектонического землетрясения И.П.Добровольского

Стадия I – стадия консолидации, формирование жесткой неоднородности.

Стадия II – начало распада неоднородности, формирование положения магистрального разрыва.

Стадия III – образование очага землетрясения.

Стадия распада неоднородности – сопровождается интенсивным трещинообразованием и слабыми землетрясениями. По этой причине для выделения начала стадии необходимы, прежде всего, данные сейсмических наблюдений в зоне будущего очага землетрясения. Однако это сложная задача, поскольку расположение будущего очага, как правило, неизвестно.

«**Активная фаза**» подготовки землетрясения практически синхронное появление аномалий по различным видам мониторинга НДС геосреды с определенной временной задержкой (до нескольких месяцев от начала стадии распада), зависящей от магнитуды, глубины очага землетрясения и эпицентрального расстояния до пункта измерений. Как показывают результаты мониторинга на ПГП, данные измерений, регистрируемые на активной фазе подготовки землетрясения, являются откликами на процессы распада неоднородности

Выводы:

***** данные непрерывного мониторинга изменений полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы над контролируемым сейсмоактивным районом в сопоставлении с данными комплексного геофизического мониторинга позволяют сделать серьезный шаг в решении проблемы надежного среднесрочного и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений;**

***** рассмотрение результатов мониторинга ПЭС ионосферы и УЭС геосреды на заключительных стадиях подготовки Жупановского и Шипунского землетрясений с позиций модели И.П. Добровольского предлагает возможное физическое объяснение причинно-следственных связей УЭС геосреды и ПЭС ионосферы. В том числе, становятся понятными физические причины появления аномалий ПЭС ионосферы не только за полторы-две недели до момента сильного землетрясения, но также и на гораздо более ранних интервалах подготовки землетрясения**

Спасибо за внимание!

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КАМЧАТСКИЙ ФИЛИАЛ
РОССИЙСКОГО ЭКСПЕРТНОГО СОВЕТА
ПО ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ,
ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ
И РИСКА

683006, Петропавловск - Камчатский
бульвар Пийпа,9
телефон: (41522) 58898
телефакс: (4152) 431850
E-mail: danila@emsd.ru

17.09.2024 № 95
На № _____ от _____

Справка КФ РЭС № 44

Данной справкой подтверждается подача заключения о сейсмической обстановке В.А. Гавриловым с соавторами 08.08.2024 г., где отмечено **значительное повышение** вероятности сильного землетрясения с параметром $S \geq 18\%$ ($S = L_p/R_0$, где $L_p = 10^{0.44161 \cdot 29}$ – длина очага землетрясения, R_0 – гипоцентральное расстояние).

17 августа 2024 г. в 19:10 UTC произошло землетрясение с $M_w = 7.0$ (данные USGS) с инструментальным определением эпицентра 52.78°с.ш., 160.40°в.д., $H = 43$ км. Эти параметры (время, магнитуда, гипоцентральное расстояние ($R_0 = 127$ км), соответствуют землетрясению, указанному в заключении В.А. Гаврилова с соавторами.

При оценке качества данного заключения следует иметь в виду, что тревожный интервал времени составляет 10 месяцев (а не 10 дней), начиная с первого заключения авторов от 19.10.2023 г. о **повышенной** вероятности сильного землетрясения с параметром $S \geq 12\%$ ($S = L_p/R_0$, где $L_p = 10^{0.44161 \cdot 29}$ – длина очага землетрясения, R_0 – гипоцентральное расстояние), которое затем пролонгировалось. При этом в заключении от 19.12.2023 г. отмечалось **повышение** вероятности сильного землетрясения уже с параметром $S \geq 18\%$ ($S = L_p/R_0$, где $L_p = 10^{0.44161 \cdot 29}$ – длина очага землетрясения, R_0 – гипоцентральное расстояние) и в такой формулировке пролонгировалось вплоть до заключения от 08.08.2024 г.

Кроме этого следует отметить, что к данному заключению не могут быть применены стандартные методики оценки качества прогноза (начиная с исходного вывода «оправдался»/«не оправдался»), так как авторы оперируют вероятностью землетрясения P , а значит всегда существует вероятность отсутствия землетрясения ($1-P$). Но так как конкретные значения этой вероятности не приводятся, то у Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений отсутствует возможность проведения экспертизы заключения как возможного прогноза землетрясения, включая оценку его эффективности.

Председатель КФ РЭС

Д.В. Чебров

17 сентября 2024 г.

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КАМЧАТСКИЙ ФИЛИАЛ
РОССИЙСКОГО ЭКСПЕРТНОГО СОВЕТА
ПО ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ,
ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ
И РИСКА

683006, Петропавловск - Камчатский
бульвар Пийпа,9
телефон: (41522) 58898
телефакс: (4152) 431850
E-mail: danila@emsd.ru

15.04.2016 № 74
На № _____ от _____

Справка КФ РЭС № 37

Дана к.т.н. Гаврилову Валерию Александровичу (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН) в том, что им и дежурным оператором сети скважинных измерений Ю.В. Морозовой представлено в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) прогнозное заключение о сейсмической опасности для Камчатского края от 29.01.2016 г., содержащее информацию о том, что **"на период с 29 января 2016 г. по 05 февраля 2016 г. включительно (время по Гринвичу) повышена вероятность землетрясений с параметром $S \geq 12\%$ ($S = L_p/R_0$, где $L_p = 10^{0.44161 \cdot 29}$ – длина очага землетрясения, R_0 – гипоцентральное расстояние)".**

30 января 2016 г. в 03:25 UTC на эпицентральном расстоянии $R_e = 107$ км от г. Петропавловска-Камчатского на глубине 161 км ($R_0 = 193$ км) произошло землетрясение с $M_w = 7.2$ (данные USGS), что соответствует величине $S = 39\%$.

Указанный в заключении прогноз оправдался по всем параметрам.

Следует отметить, что заключения о сейсмической опасности, указывающие на повышенную вероятность землетрясений с параметром $S \geq 12\%$ на основании данных комплексных скважинных измерений, представлялись в КФ РЭС с 09 октября 2015 г. по 15 января 2016 г. на период по 22 января 2016 г. включительно.

И.о. председателя КФ РЭС



Д.В. Чебров

15 апреля 2016 г.