

Многолетний комплексный геофизический мониторинг процессов подготовки сильных землетрясений в зоне Авачинского залива (Камчатка). Опыт средне- и краткосрочного прогнозирования сейсмической опасности

**В.А. Гаврилов, Е.В. Полтавцева,
Ю.Ю. Бусс, Ю.В. Морозова, И.А. Сагарьяров**

ИВиС ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский
КамГУ имени Витуса Беринга, г. Петропавловск-Камчатский

В данной работе представлено обобщение результатов многолетних (более 20 лет) комплексных геофизических наблюдений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (ПГП), отражающих процессы подготовки сильных камчатских землетрясений, включая подготовку Камчатского мегаземлетрясения 29.07.2025 г.

С 2014 г. результаты совместного анализа скважинных измерений на территории ПГП и данных других видов мониторинга являются информационной основой для формирования регулярных средне- и краткосрочных прогнозных заключений о сейсмической опасности для Петропавловск-Камчатской городской агломерации



Скв. Г-1: глубина 2450 м; ЭМИ, ГАЭ на глубинах 270 и 1012 м; УЭП воды скважины на глубине 41 м.

Скв. Р-2: глубина 1504 м; ЭМИ, ГАЭ на глубине 730 м, t° и Р воды в скважине на глубинах 3 и 53 м, t° воздуха и Р атм.

Скв. Е-1: глубина 3003 м; ЭМИ, ГАЭ на глубине 600 м.

Скв. ГК-1: глубина 1261 м; мониторинг концентрации метана в воде скважины, УЭП воды скважины на глубине 1 м, t° воды на глубинах 5 см и 7.5 м

Центр сбора и обработки данных (ЦСОД) в здании ИВиС

Голубые линии - сеть разломов высокого ранга

Метод мониторинга удельного электрического сопротивления геосреды

Непрерывный мониторинг изменений удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород, базирующийся на измерениях с подземными электрическими антеннами на основе глубоких скважин

Характер зависимости УЭС от флюидонасыщенности пород определяется типом породы, пористостью, степенью минерализации флюида и проницаемостью. Согласно результатам лабораторных исследований наиболее резко зависимость УЭС от флюидонасыщенности горных пород сказывается при значениях последней около 1.5%. Для пород с таким уровнем флюидонасыщенности изменение ее на десятые доли % приводит к изменению УЭС на порядок и выше [Пархоменко, 1989]

Зондирующий сигнал - непрерывное фоновое электромагнитное излучение техногенного или природного происхождения

Датчики – подземные электрические антенны, основным конструктивным элементом является металлическая обсадная колонна скважин

Физическая основа метода - зависимость УЭС горных пород от степени их флюидонасыщенности



ФИЗИЧЕСКАЯ ОСНОВА МЕТОДА НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ИЗМЕНЕНИЙ УЭС ГЕОСРЕДЫ

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

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

Поглощение ЭМИ в геосреде определяется экспоненциальным множителем $e^{-\delta h}$, где δ - коэффициент поглощения. Для ЭМИ СНЧ-диапазона:

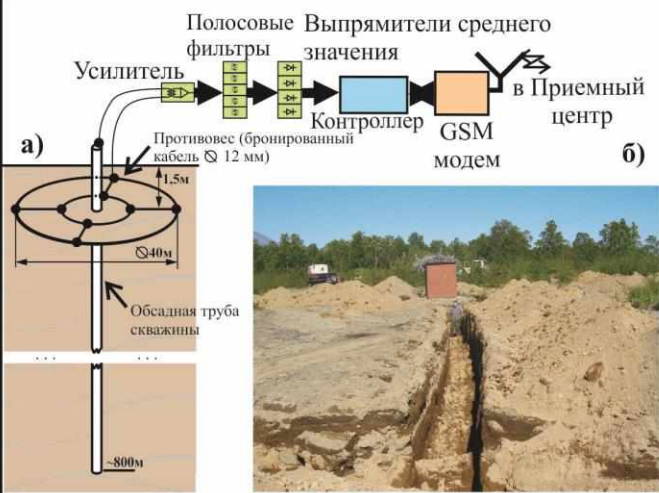
$$\delta = 2\pi \sqrt{\frac{30}{\rho\lambda}}, [\text{м}^{-1}], \text{ где } \rho - \text{УЭС геосреды}$$

Электромагнитные измерения на базе скв.Г-1 проводятся в четырех полосах частот:

30 Гц, 160 Гц, 560 Гц и 1200 Гц

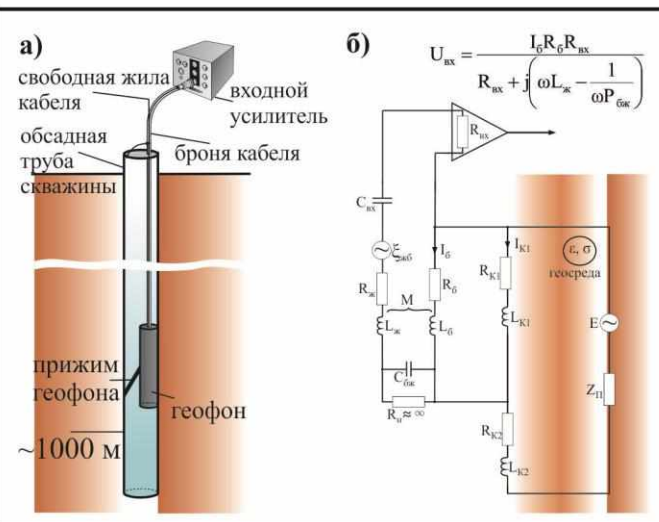
Расчетные значения максимальной глубины мониторинга УЭС геосреды в зависимости от толщины скин-слоя: **2250 м, 950 м, 450 м и 180 м**

Таким образом, в СНЧ-диапазоне частот основное влияние на величину коэффициента поглощения оказывает удельное электрическое сопротивление геосреды 5



Конструкция (а) и процесс строительства (б) подземной электрической антенны типа «монополь» на базе скважины Р-2.

Антенны такого типа обладают высокой чувствительностью, что позволяет использовать для целей мониторинга НДС геосреды даже слабые ЭМИ естественного происхождения. Требуется наличие свободной площади вокруг скважины для размещения подземного рефлктора.



Конструкция (а) и эквивалентная схема (б) подземной электрической антенны для измерений на скважинах Г-1 и Е-1.

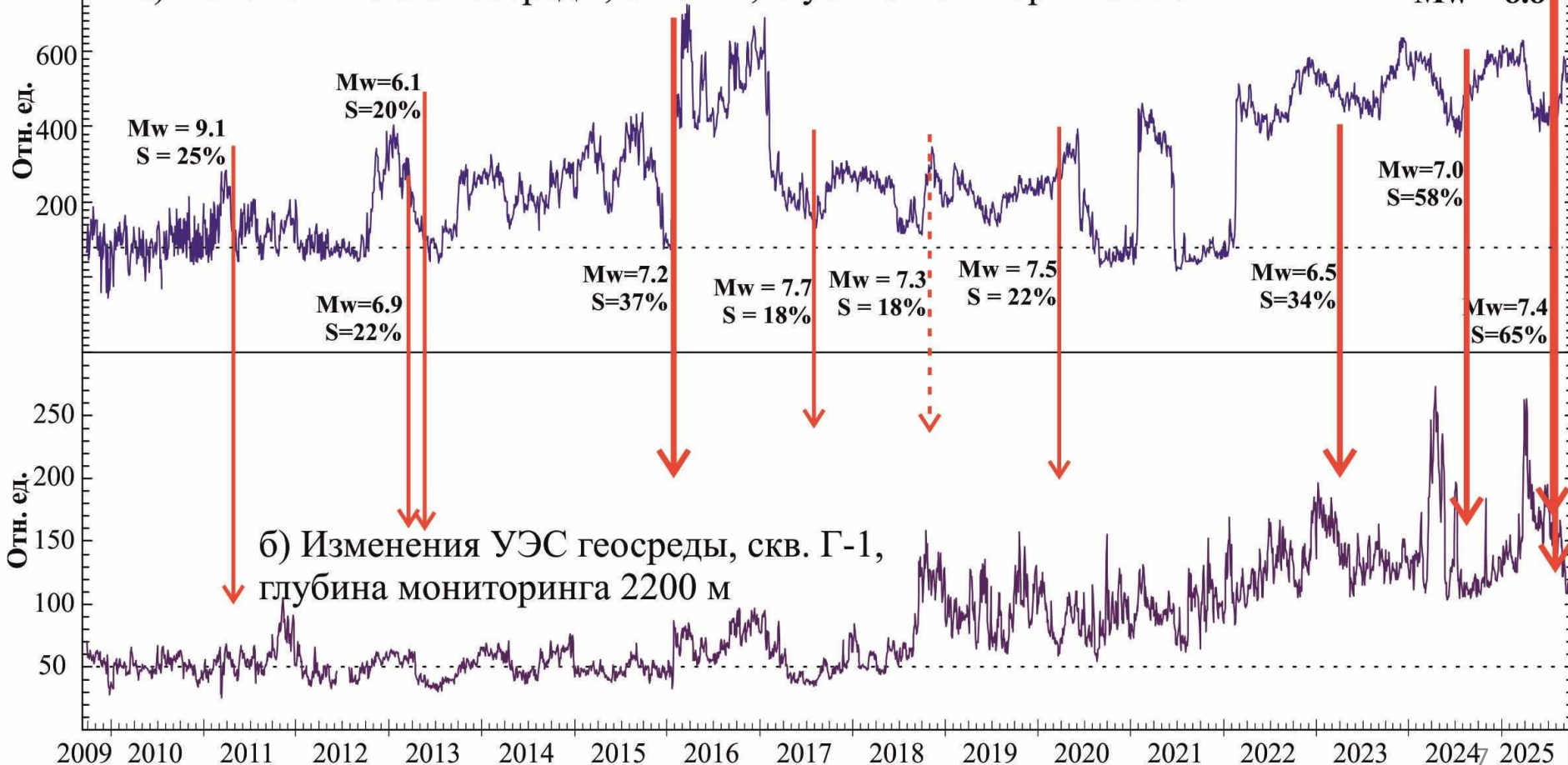
Используется в условиях городской застройки, не требуется наличие свободной площади вокруг скважины.



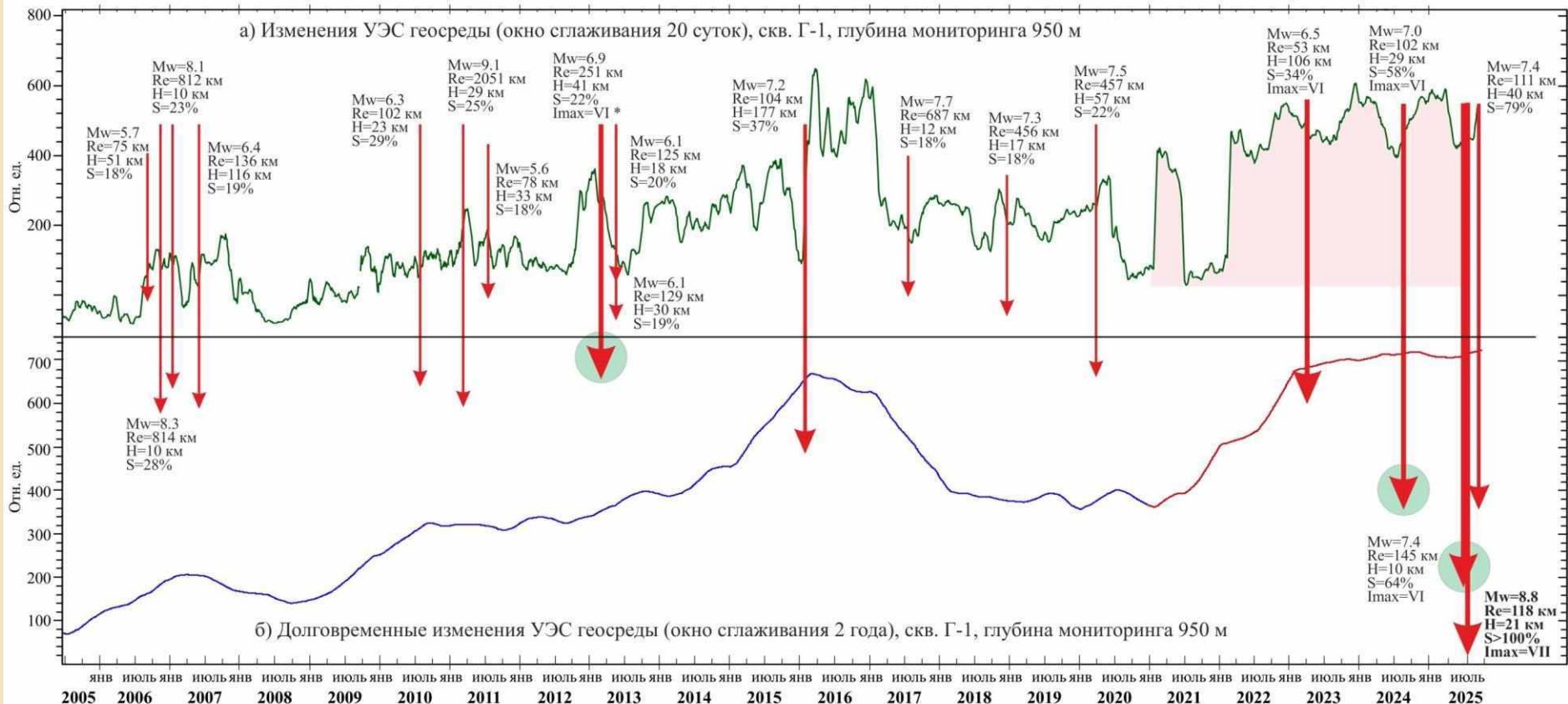
Долговременные изменения УЭС геосреды для глубин мониторинга 950 м и 2200 м

а) Изменения УЭС геосреды, скв. Г-1, глубина мониторинга 950 м

Mw = 8.8



Долговременные изменения УЭС геосреды для глубины мониторинга 950 м

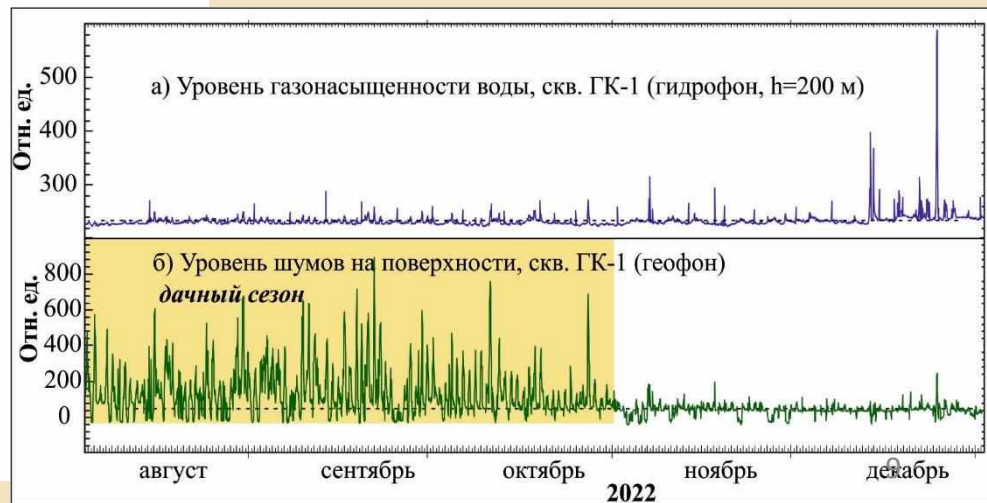
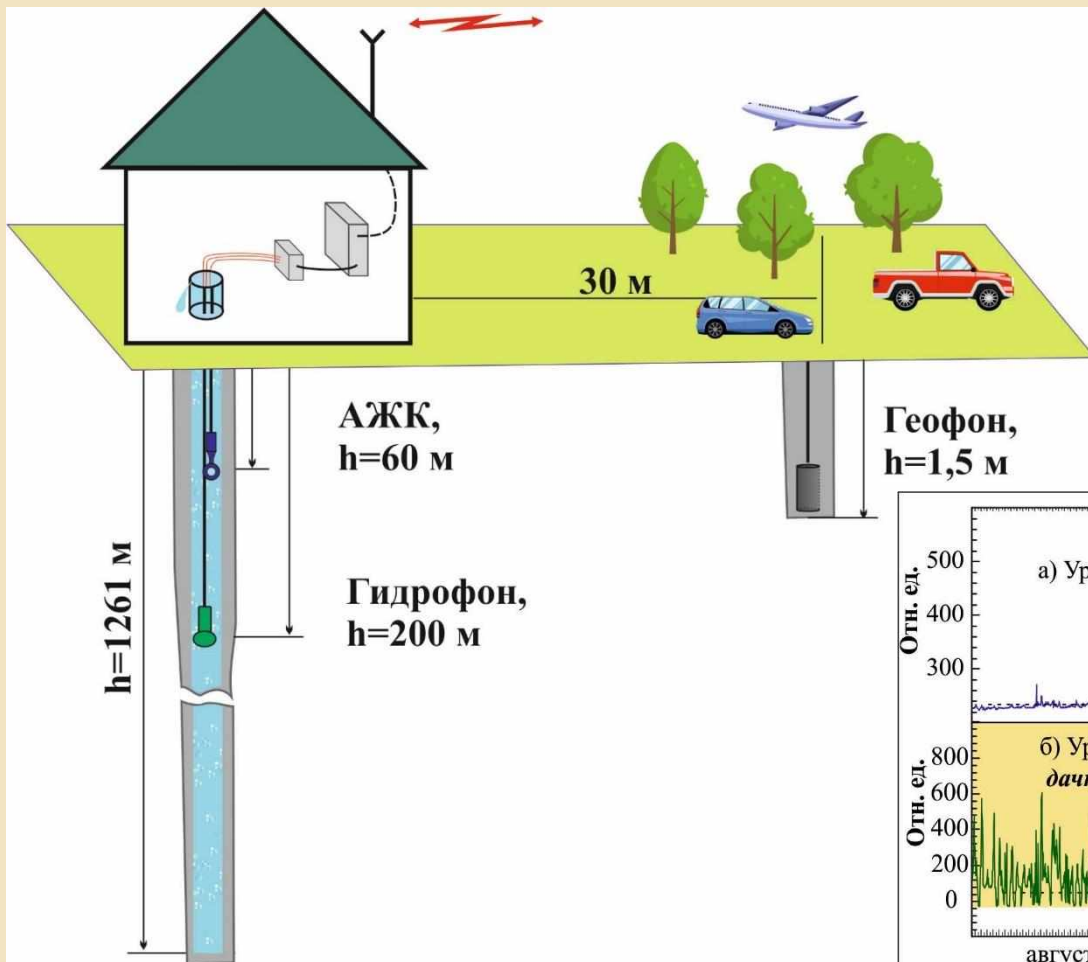


* Imax - интенсивность сотрясений в зоне Петропавловск-Камчатской агломерации по шкале MSK-64

Перед каждым значительным по величине S событием наблюдались характерные изменения УЭС – рост с последующим спадом уровня

Гидрогеологические измерения на скважинном пункте ГК-1

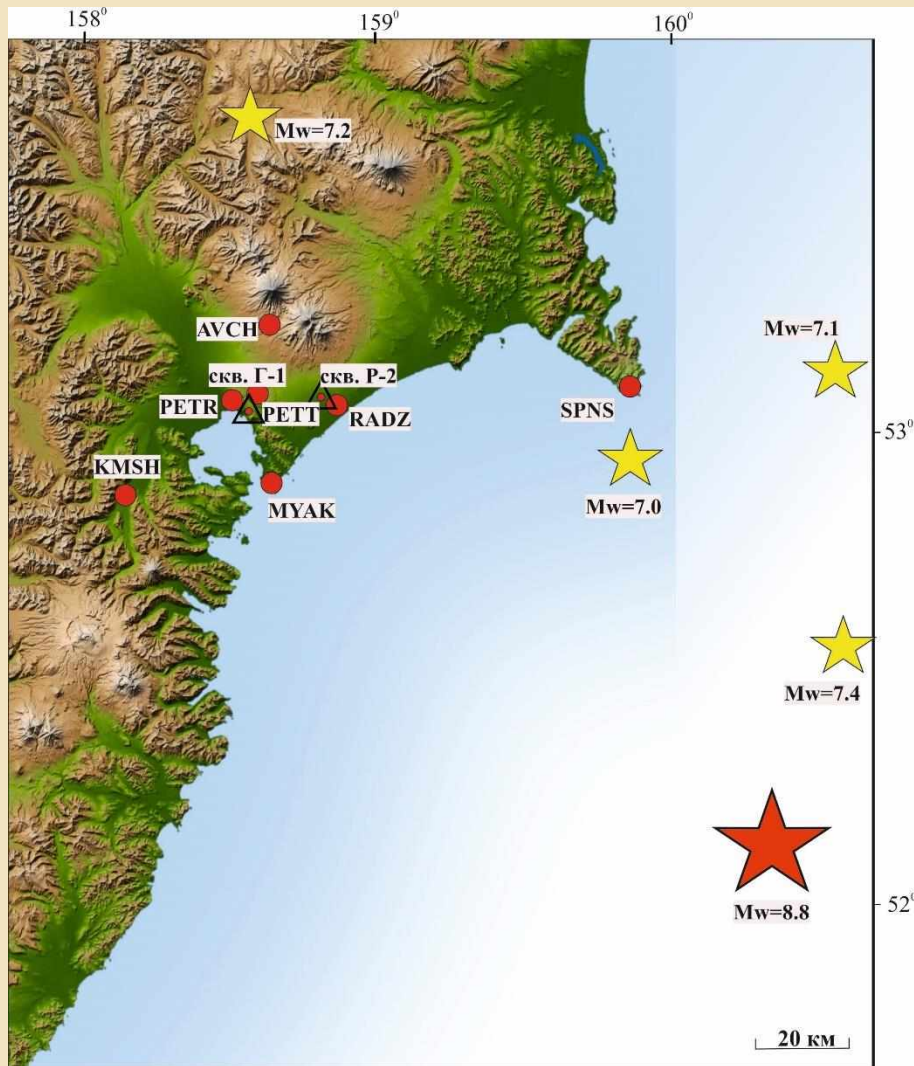
– мониторинг удельной электропроводности воды в скважине и уровня газонасыщенности воды с контролем внешних геоакустических шумов техногенного происхождения



Дополнительные виды геофизического мониторинга НДС геосреды

полученные с использованием данных сетей Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), было решено использовать для решения сразу нескольких задач:

- данные прямых деформационных наблюдений могли бы уточнить временные границы стадий развития процессов подготовки сильного землетрясения, если рассматривать их в комплексе с результатами скважинных измерений, так же отражающих деформации растяжения и сжатия в районе ПГП;
- данные об изменениях полного электронного содержания (ПЭС, англ. TEC) ионосферы, рассчитанные с использованием пунктов региональных ГНСС-сетей, могли бы помочь зафиксировать наступление заключительной стадии активной фазы подготовки сильного события, а также в ряде случаев с их помощью можно было бы попытаться локализовать околоэпицентральную область готовящегося землетрясения



Красные кружки: расположение ГНСС-станций, данные которых были так или иначе использованы в работе. Все станции, кроме РЕТТ, принадлежат ГНСС-сети КФ ГС РАН, РЕТТ – станция Федеральной астрономо-геодезической сети.

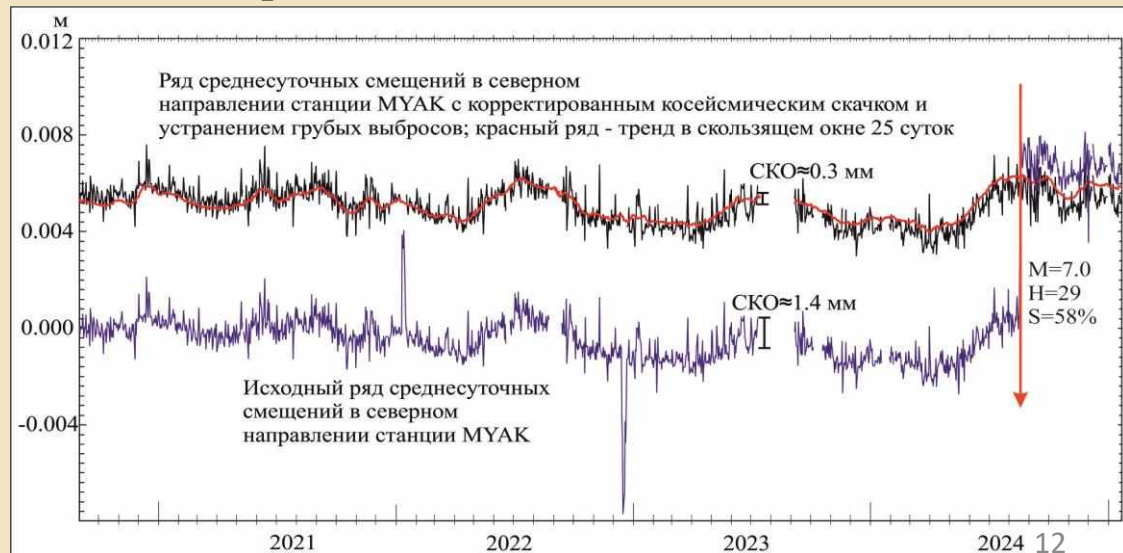
Треугольники: пункты Сети скважинных измерений Г-1 и Р-2

Звездочки: эпицентры сильнейших землетрясений 2024-2025 гг. –Шипунского-1 17.08.2024 г. ($M_w=7.0$), Шипунского-2 20.07.2025 г. ($M_w=7.4$), мегаземлетрясения 30.07.2025 г. ($M_w=8.8$) и Шипунского-3 18.09.2025 г. ($M_w=7.1$)

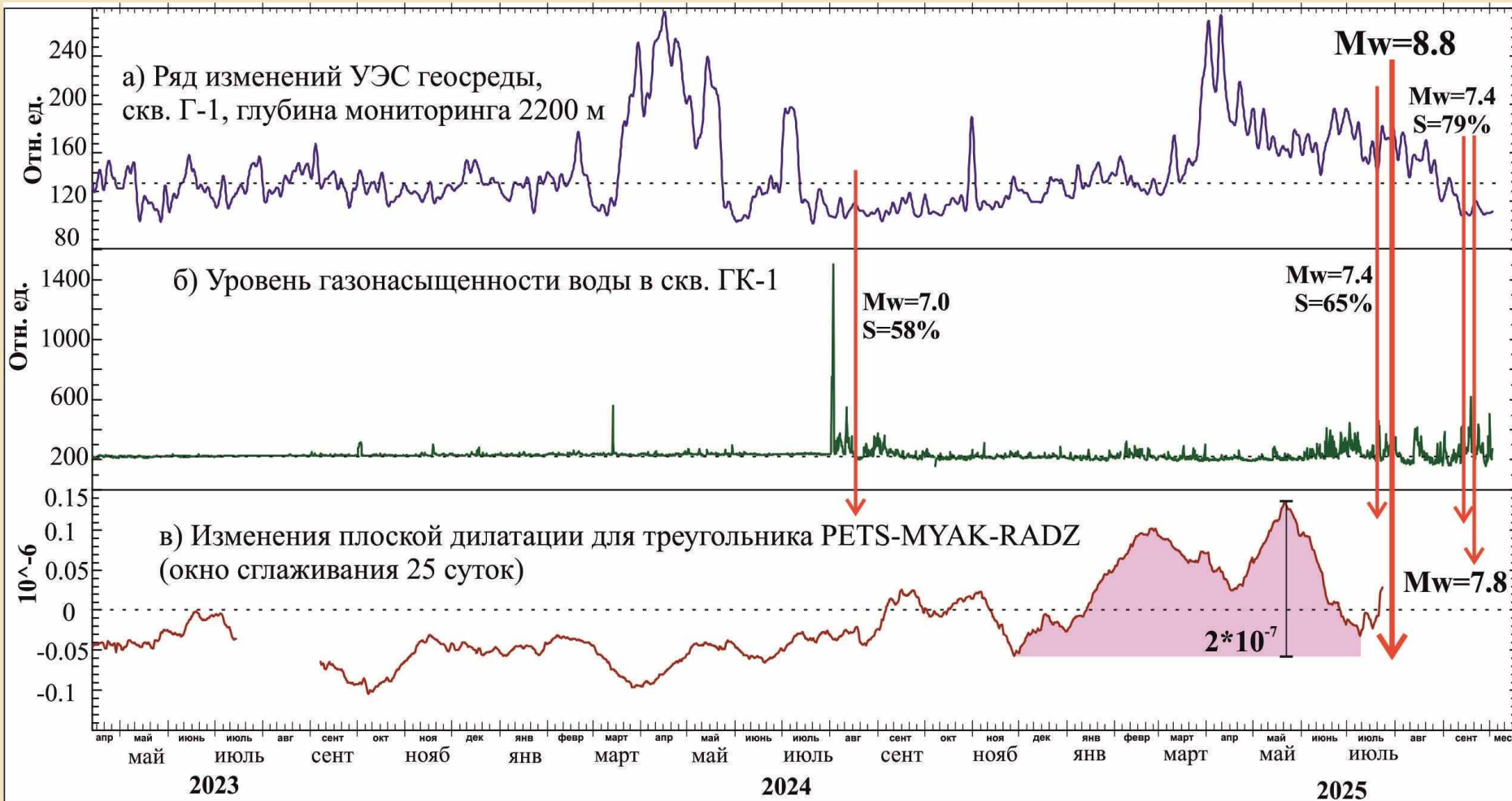
Качественная оценка соответствия результатов ГНСС-наблюдений стадиям сжатия и растяжения геосреды в районе ПГП

- **Плоская дилатация** отражает относительное изменение площади треугольника из пунктов Камчатской ГНСС-сети PETS, MYAK, RADZ на территории ПГП.
- В качестве исходных данных - ряды смещений в горизонтальной плоскости указанных пунктов, в которых корректировались косейсмические скачки, грубые выбросы, удалялся линейный тренд субдукционного происхождения и сезонная составляющая.
- Дилатация - сумма элементов на главной диагонали тензора плоской деформации.

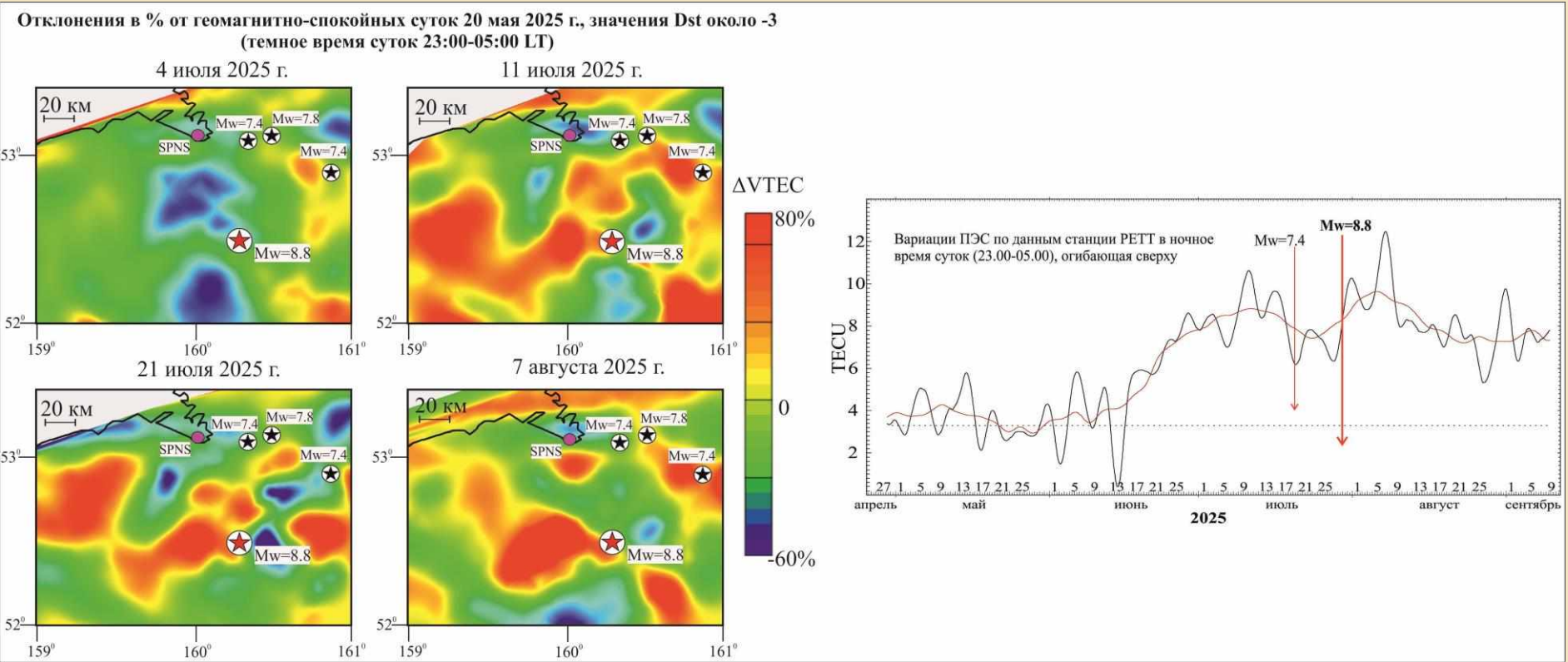
Ошибка составляет около $0.1 \cdot 10^{-7}$, это примерно 10% от минимально рассматриваемых ниже вариаций в $1 \cdot 10^{-7}$ для дилатации в качестве значимых, что превышает приливные деформации в 100 раз



Результаты мониторинга деформационных процессов на территории ПГП на временном интервале 2023-2025 гг.



Изменения ПЭС ионосферы по данным станций PETT и SPNS перед серией сильнейших землетрясений в июле-августе 2025 г.



Для построения интерполированных карт-отклонений от фонового значения, в качестве которого были выбраны подионосферные траектории ночного периода времени для геомагнитно-спокойных суток 20 мая 2025 г., использованы данные ГНСС-станций PETT и SPNS.

Общее повышение в ряде ПЭС начинается с середины июня и достигает максимума к середине июля, за 10 суток до события Шипунское-2, тогда же становятся заметными области повышенных значений ПЭС на картах

Заключение

1. Основой для формирования средне- и краткосрочных прогнозных заключений о сейсмической опасности для г. Петропавловска-Камчатского являются, прежде всего, данные долговременных, непрерывных комплексных геофизических измерений. Только комплексное рассмотрение результатов как скважинных наблюдений, так и сейсмодеформационных и иных видов мониторинга по данным ГНСС-сетей в соответствии с выбранной физической моделью могут дать представление о процессах, происходящих в геосреде на заключительных стадиях подготовки сильного и близкого землетрясения, способного вызвать значительные сотрясения.
2. Представленные результаты показывают, что подготовка сильнейшего Камчатского мегаземлетрясения 29 июля 2025 г. отразилась фактически во всем комплексе данных геофизического мониторинга на территории ПГП, что позволило сформировать, прежде всего, среднесрочный прогноз сейсмической опасности для Петропавловск-Камчатской городской агломерации за 6-8 месяцев до события.

Спасибо за внимание!

Гаврилов В.А., Бусс Ю.Ю., Полтавцева Е.В., Морозова Ю.В. Подходы к краткосрочному прогнозированию сейсмической опасности для зоны Авачинского залива (Камчатка) // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. № 5.