

Комплексные скважинные измерения и мониторинг возмущений ПЭС ионосферы как информационная основа прогнозирования сильных землетрясений Камчатки

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

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

Камчатка – один из самых сейсмоактивных регионов мира. Средняя повторяемость сильнейших ($M \geq 7.7$) неглубоких камчатских землетрясений составляет 50-55 лет. Последнее землетрясение такого класса произошло более 70 лет назад. В настоящее время одним из наиболее вероятных мест следующего сильнейшего землетрясения является Авачинский залив. Необходимым условием достаточно надежного среднесрочного и краткосрочного прогнозирования землетрясений, опасных для района Петропавловска–Камчатского, является наличие Сети комплексных геофизических наблюдений, способной обеспечить мониторинг процессов подготовки сильных землетрясений в зоне Авачинского залива. Основу такой Сети составляют расположенные на Петропавловск–Камчатском геодинамическом полигоне пункты комплексных скважинных измерений, непрерывные измерения на которых проводятся Институтом вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН с августа 2000 года.

В состав сети входит пять измерительных пунктов и центр сбора информации, расположенный в Институте вулканологии и сейсмологии. Основные измерения на пунктах Сети проводятся с использованием датчиков, установленных в скважинах глубиной до 2542 м, что позволяет получать научные результаты, недостижимые при измерениях на земной поверхности. Важной особенностью Сети является комплексность проводимых измерений. Для мониторинга процессов подготовки землетрясений геосреды используется девять видов геофизических измерений (60 измерительных каналов). Базовыми видами измерений являются электромагнитные (ЭМИ) измерения с подземными электрическими антеннами и геоакустические (ГАЭ) измерения в глубоких скважинах. На основе данных этих измерений разработаны уникальные высокочувствительные методы мониторинга изменений состояния геосреды перед сильными камчатским землетрясениями.



Скв. Г-1: глубина 2450 м; 4 км от ИВиС;
начало измерений: **август 2000 г.**;
ЭМИ, ГАЭ на глубинах 270 и 1012 м,
УЭП воды скважины на глубине 41 м

Скв. Р-2: глубина 1504 м; 22 км от ИВиС;
начало измерений: **июль 2005 г.**;
ЭМИ, ГАЭ на глубине 730 м, t° и Р воды в скважине
на глубинах 3 и 53 м, t° воздуха и атм. давление

Скв. Е-1: глубина 3003 м; 24 км от ИВиС;
начало измерений: **август 2011 г.**;
ЭМИ, ГАЭ на глубине 600 м

Скв. К-33: глубина 300 м; 34 км от ИВиС;
начало измерений: **ноябрь 2011 г.**;
ЭМИ, ГАЭ на глубине 210 м

Скв. ГК-1: глубина 1261 м; 28 км от ИВиС;
начало измерений: **февраль 2016 г.**;
изменения 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

Основные виды измерений Сети:

Геоакустические скважинные измерения

Электромагнитные измерения с подземными электрическими антеннами

Дополнительные виды измерений Сети:

Измерения удельной электропроводности (УЭП) воды на скв. Г-1 и ГК-1

Уровень воды и проницаемость геосреды на скв. Р-2

Мониторинг проницаемости геосреды на скв. ГК-1

Минерализация и дебит воды в скв. Г-1 и ГК-1 (предоставляются КФ ГС РАН).

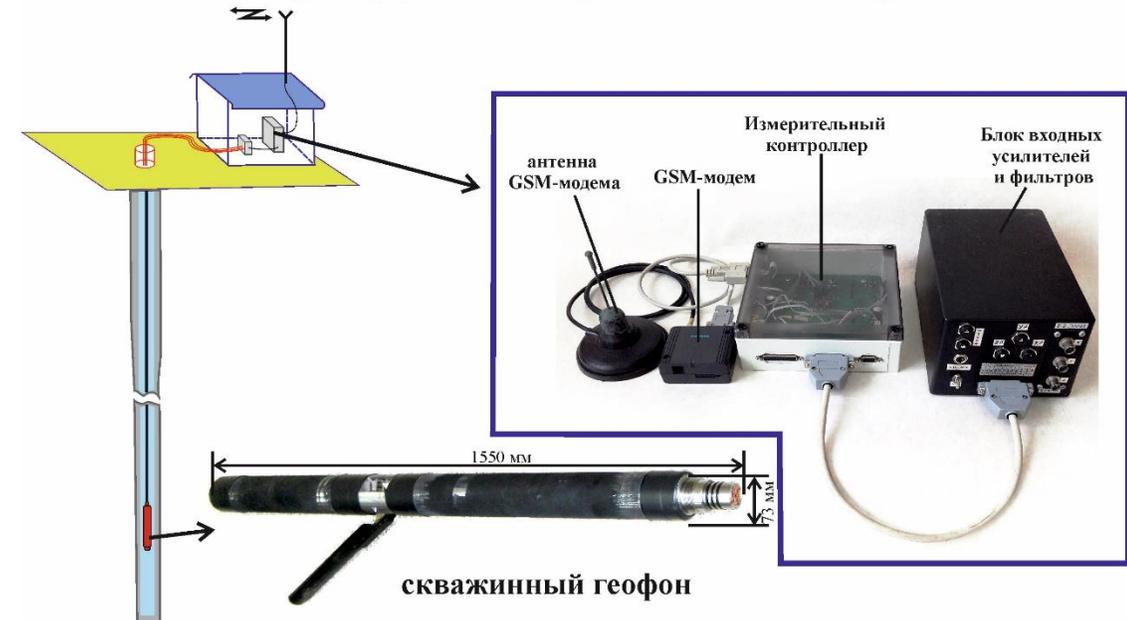
Электромагнитные измерения проводятся с использованием *подземных* электрических антенн разных конструкций: это высокочувствительная подземная электрическая антенна типа «монополь» с подземным рефлектором, а также подземная электрическая антенна собственной разработки, не требующая подземного рефлектора, что позволяет проводить измерения в условиях городской застройки.

При проведении геоакустических измерений используются скважинные аналоговые геофоны двух типов, а также аналоговые и цифровые гидрофоны. Геофоны установлены в скважинах на глубинах от 270 м до 1012 м.

Основой аппаратного комплекса является измерительный контроллер, в функции которого входит аналого-цифровое преобразование измеряемых сигналов, их цифровое осреднение, привязка данных к точному времени по UTC, а также хранение массивов обработанных данных для их дальнейшей передачи по каналу связи в Центр сбора и обработки данных.

Принятые массивы данных измерительных пунктов автоматически вносятся в базу исходных данных, созданных в формате программного пакета WinABD (авторы – Дещеревский А.В. и др., ИФЗ РАН) в виде временных рядов.

Аппаратура измерительных пунктов



Основные методы мониторинга НДС геосреды

Основными методами мониторинга НДС геосреды являются ГАЭ- и ЭМИ-методы, открытые в ходе многолетних исследований на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне.

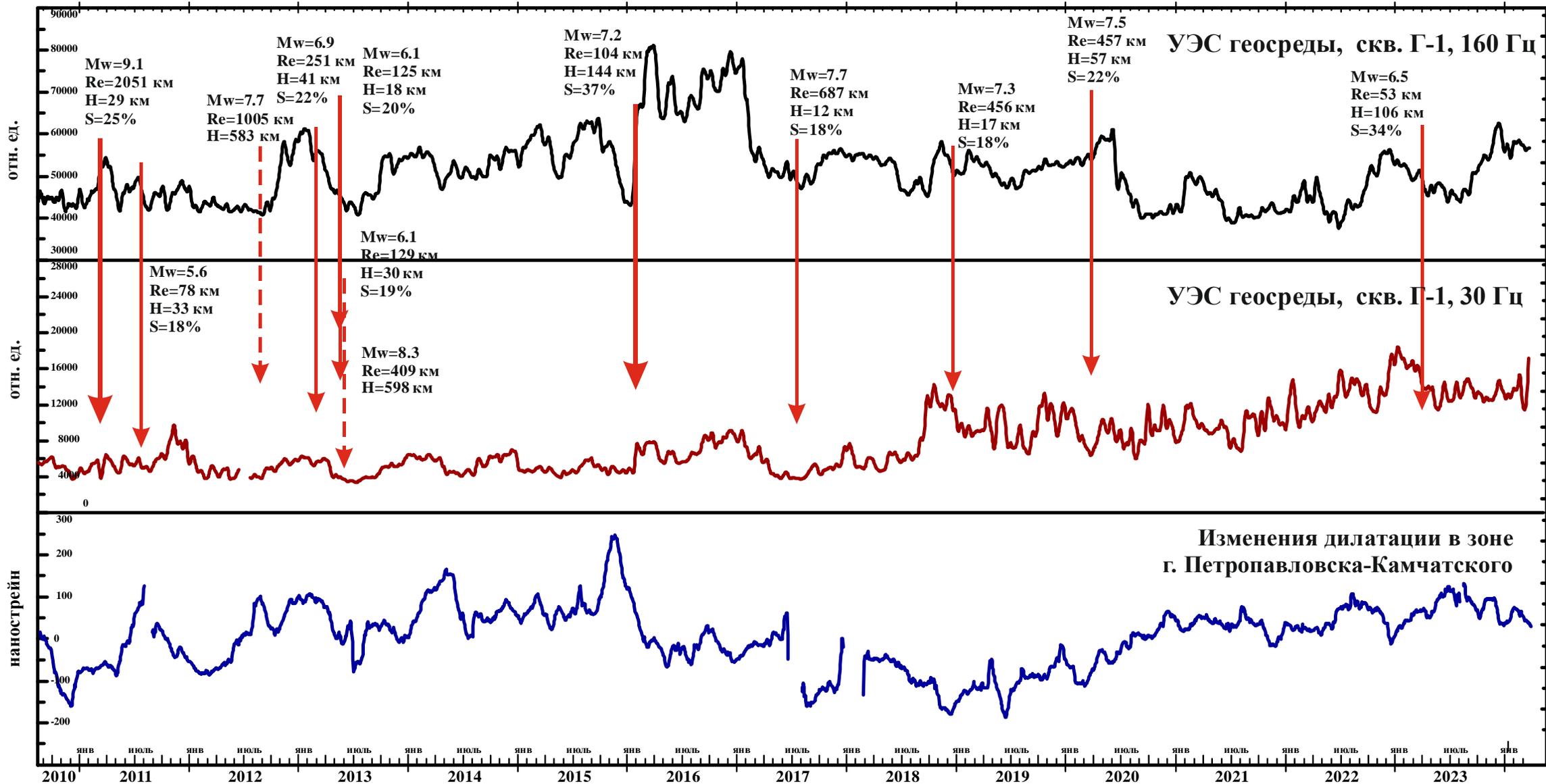
Физической основой ГАЭ-метода является эффект модуляции интенсивности геоакустической эмиссии. При достаточной влажности геосреды воздействие на геоакустические процессы слабого электромагнитного излучения СНЧ диапазона с медленно меняющейся амплитудой напряженности электрического поля будет вызывать изменения амплитуды ГАЭ. Изменения откликов ГАЭ во временных окрестностях относительно близких сильных землетрясений связаны с уменьшением электропроводности горных пород, окружающих скважину, вследствие уменьшения их флюидонасыщенности. Данный метод связан с оценкой изменений амплитуд геоакустических откликов геосреды на внешнее электромагнитное воздействие.

ЭМИ-метод базируется на данных непрерывного мониторинга изменений удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород. В качестве зондирующего сигнала используется непрерывное фоновое электромагнитное излучение техногенного или природного происхождения, а в качестве датчиков – подземные электрические антенны. Физической основой метода является зависимость удельного сопротивления УЭС горных пород от степени их влажности. На эффективность ЭМИ-метода указывают результаты, представленные на рисунке ниже. Можно видеть, что подготовка всех сильных землетрясений, для которых величина $S=L_p/Rh*100$ [%], (L - длина очага землетрясения; Rh - гипоцентрального расстояние) составляет не менее 18%, сопровождалась значительными изменениями УЭС.

Величина $S=18\%$ характеризует сейсмические события, эквивалентные землетрясению с магнитудой $M_w=7.3$ с гипоцентральным расстоянием $R_h=450$ км. Величина S удобна тем, что она учитывает как магнитуду возможного землетрясения, так и гипоцентральное расстояние до его очага.

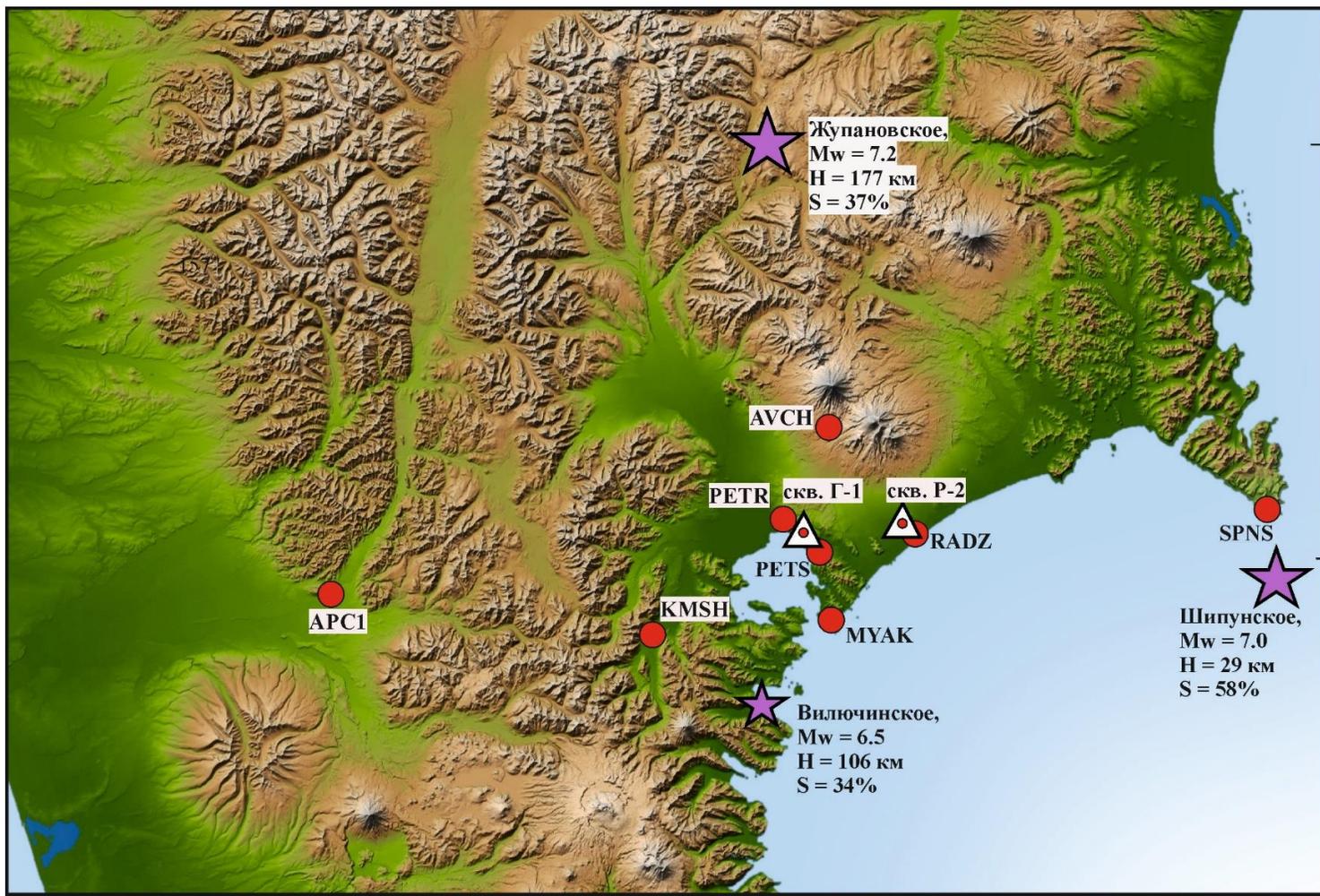
$$S = L_p / Rh * 100 \text{ [%]},$$

где $L_p = 10^{0.44M_w - 1.29}$ - длина очага землетрясения, Rh - гипоцентральное расстояние.

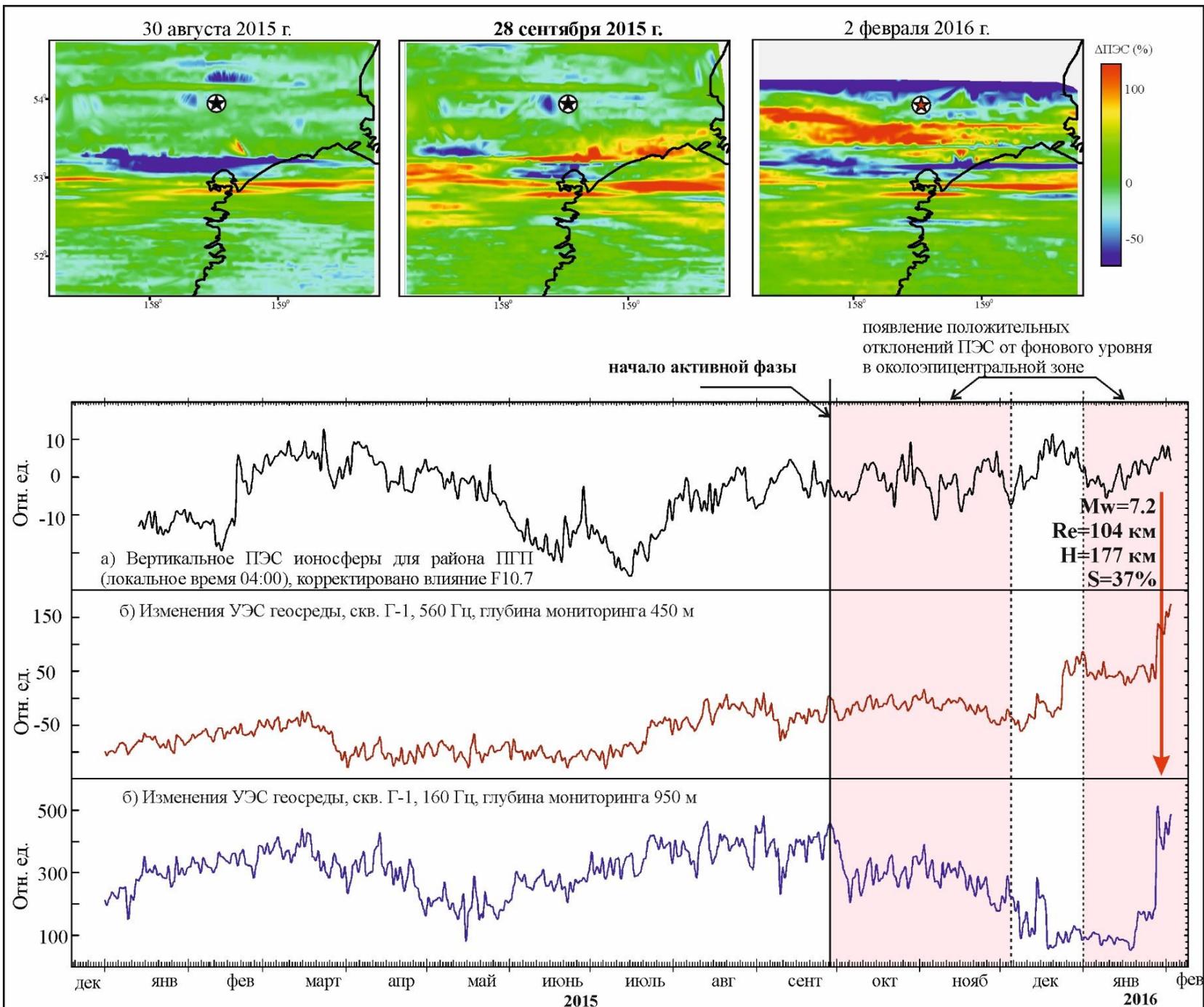


Изменения УЭС геосреды в зоне скважины Г-1 в сопоставлении с моментами сильных землетрясений с глубиной очага менее 500 км и величиной $S \geq 18\%$

Для правильной интерпретации данных комплексного мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды необходимо привлекать данные дополнительных видов измерений, проводимых в том же районе. Хорошую согласованность с данными Сети показывают данные Камчатской сети Глобальной Навигационной Спутниковой Системы (ГНСС), которые с 2023 г. используются при анализе результатов скважинных измерений на постоянной основе. В последнее время совместно с данными скважинных измерений также используются **результаты мониторинга полного электронного содержания ионосферы (ПЭС)**. Анализ двумерных карт пространственного распределения ионосферных возмущений перспективен для уточнения времени и места эпицентра будущего землетрясения.

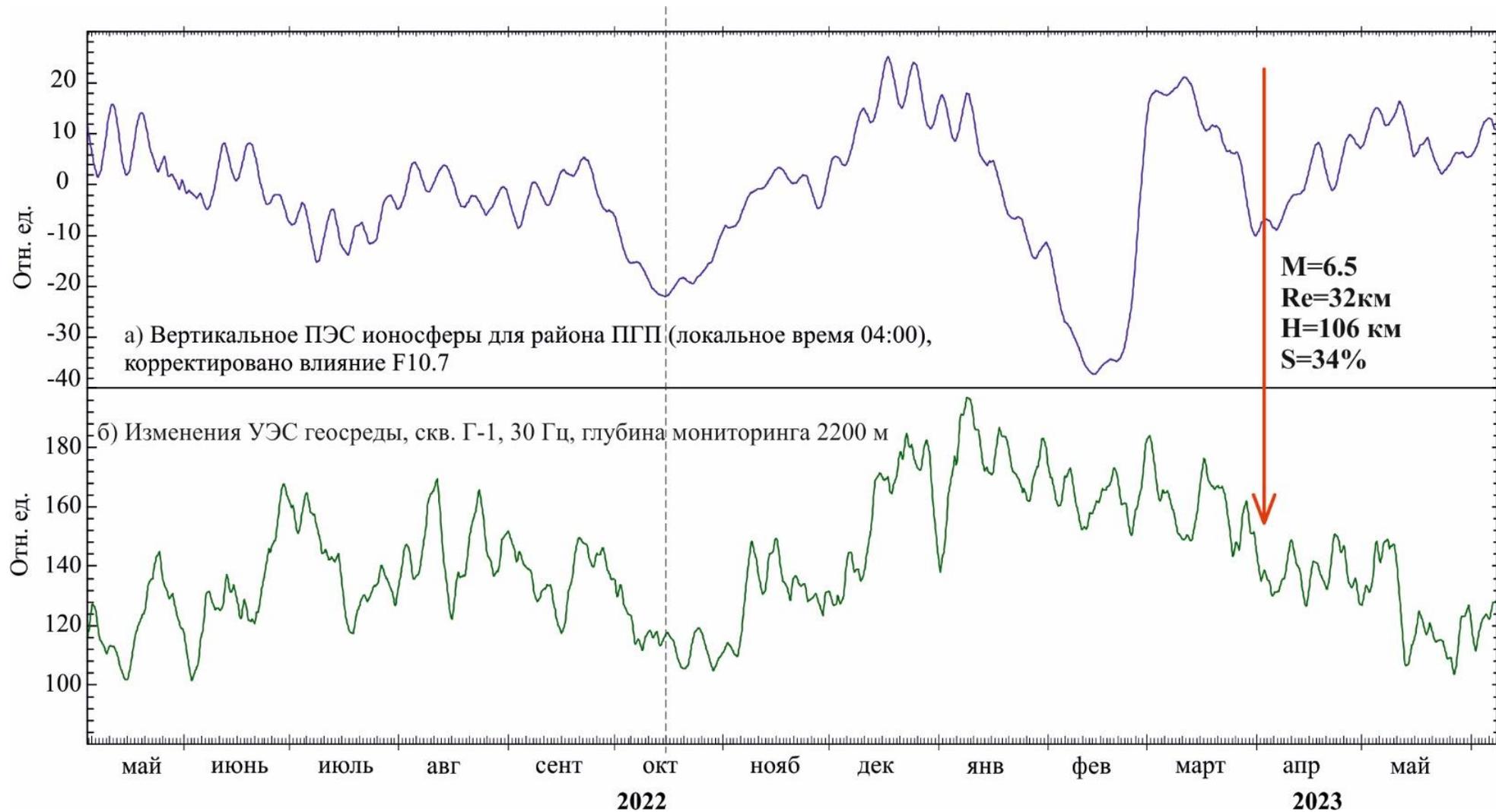


Пункты скважинных измерений Г-1 и Р-2 (треугольники) и пункты Камчатской сети ГНСС-наблюдений (кружки). Звездочками отмечены эпицентры сильных землетрясений с $S \geq 34\%$, произошедших на эпицентральной дистанции менее 200 км. от г. Петропавловска-Камчатского в 2016-2024 гг. Эти землетрясения получили названия Жупановского (30.01.2016 GMT; $M=7.2$), Вилучинского (03.04.2023 GMT; $M=6.5$) и Шипунского (17.08.2024 GMT; $M=7.0$) – по названию районов, где они произошли.



Сравнение результатов мониторинга ПЭС ионосферы и УЭС геосреды на временном интервале подготовки и реализации Жупановского землетрясения (Mw=7.2) совместно с картированием положительных возмущений ПЭС в околоэпицентральной зоне.

За 4 месяца до сейсмического события (28.09.2015) аномалии в ионосфере над районом Петропавловска-Камчатского указали на эпицентральную зону готовившегося землетрясения. Начиная с этого момента, данные ионосферных и скважинных стали изменяться с высокой степенью корреляции.



Сопоставление изменений ПЭС ионосферы с изменениям УЭС (160 Гц, скважина Г-1) во временной окрестности Вилючинского землетрясения ($M_w=6.5$)

Мониторинг сейсмической опасности для Камчатского края. Прогноз Шипунского землетрясения.

Сеть комплексных геофизических наблюдений фактически является информационной основой системы средне- и краткосрочного прогноза сильных камчатских землетрясений. С января 2014 г. лабораторией комплексного мониторинга сейсмоактивных сред ИВиС ДВО РАН регулярно на основе данных Сети подготавливаются заключения о текущей сейсмической опасности для района г. Петропавловска-Камчатского. Заключения подаются в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, а также в Совет по прогнозу землетрясений и извержений вулканов ИВиС ДВО РАН. На основе данных Сети были сделаны успешные прогнозы ряда сильных камчатских землетрясений, в том числе прогноз сильного близкого Шипунского землетрясения (17.08.2024 GMT; Mw=7.0; Re=102 км, H=29 км), вызвавшего в г. Петропавловске-Камчатском сотрясения силой 5-6 баллов.

Первое прогнозное заключение, связанное с подготовкой Шипунского землетрясения, было подано нами **19.12.2023 г.** В нем сообщалось, что на период с 19 декабря 2023 г. по 29.12. 2023 г. «**повышена вероятность землетрясений с параметром $S \geq 18\%$** ». В заключениях о сейсмической опасности мы используем три градации опасности: «низкая», «повышенная» и «значительно повышенная». Далее это заключение нами продлевалось вплоть до 8 августа 2024 г.

Второе прогнозное заключение, связанное с подготовкой Шипунского землетрясения, было подано лабораторией 08.08.2024 г., т.е. за 10 суток до момента землетрясения. В нем сообщалось, что по результатам анализа данных комплекса скважинных измерений на период с 8 августа 2024 г. по 22 августа 2024 г. включительно (время по Гринвичу) «**значительно повышена вероятность землетрясений с параметром $S \geq 18\%$** »

Заключения о сейсмической опасности от 19 декабря 2023 г. и 08 августа 2024 г.

Внеочередное заключение о сейсмической опасности для Камчатского края по состоянию на «19» декабря 2023 г.

1. Организация. Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
2. Используемые виды мониторинга изменений НДС геосреды в районе г. Петропавловска-Камчатского:

1) Скважинные геоакустические измерения; 2) электромагнитные измерения в СНЧ-диапазоне частот с использованием подземных электрических антенн; 3) измерения удельной электропроводности воды в скважинах; 4) минерализация воды скважин Г-1 и ГК-1 (данные предоставлены КФ ФИЦ ЕГС РАН); 5) дебит скважины ГК-1 (данные предоставлены КФ ФИЦ ЕГС РАН); 6) изменения плоской дилатации (по данным ГНСС-сети КФ ФИЦ ЕГС РАН).

3. Пункты наблюдений. Г-1, Р-2, ГК-1

4. Время последнего наблюдения 19 декабря 2023 г.

5. Характеристики режима наблюдений.

Геоакустические измерения проводятся в скважине Г-1 на глубинах 1012 м и 270 м, в скважине Р-2 на глубине 730 м. Электромагнитные измерения проводятся на скважинах Г-1 и Р-2. Измерения удельной электропроводности воды проводятся на скважинах ГК-1 и Г-1. Режим всех измерений - непрерывный.

Регистрация данных – цифровая с частотой 32 Гц на канал. Данные передаются в ИВиС ДВО РАН по телеметрическим каналам по запросу оператора (в обычном режиме - ежедневно, кроме выходных и праздничных дней).

Заключение

По данным ИВиС ДВО РАН (анализ комплекса скважинных измерений), на период с 19 декабря 2023 г. по 29 декабря 2023 г. включительно (время по Гринвичу) **повышена вероятность** землетрясений с параметром $S \geq 18\%$ ($S = L_p / R_h * 100\%$, где $L_p = 10^{0.44M_w - 1.29}$ - длина очага землетрясения, R_h - гипоцентрального расстояние).

Величина $S = 18\%$ характеризует сейсмические события, эквивалентные землетрясению с магнитудой $M_w = 7.3$ с гипоцентрального расстоянием $R_h = 450$ км. Параметр R_h для данного Заключения рассчитывается относительно пункта наблюдения «Скважина Г-1 (Хлебозавод)», координаты 53.046° с.ш., 158.663° в.д.

Зав. лабораторией комплексного мониторинга сейсмоактивных сред, д.ф.м.н.

В.А. Гаврилов

Дежурный оператор сети скважинных измерений, н. с.

Ю.Ю. Бусс

Научный сотрудник

Е.В. Полтавцева

Научный сотрудник

Ю.В. Морозова

19.12.2023 г.

Заключение о сейсмической опасности для Камчатского края по состоянию на «8» августа 2024 г.

1. Организация. Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
2. Используемые виды мониторинга изменений НДС геосреды в районе г. Петропавловска-Камчатского:

1) Скважинные геоакустические измерения; 2) электромагнитные измерения в СНЧ-диапазоне частот с использованием подземных электрических антенн; 3) измерения удельной электропроводности воды в скважинах; 4) минерализация воды скважин Г-1 и ГК-1 (данные предоставлены КФ ФИЦ ЕГС РАН); 5) дебит скважины ГК-1 (данные предоставлены КФ ФИЦ ЕГС РАН); 6) изменения плоской дилатации (по данным ГНСС-сети КФ ФИЦ ЕГС РАН).

3. Пункты наблюдений. Г-1, Р-2, ГК-1

4. Время последнего наблюдения 8 августа 2024 г.

5. Характеристики режима наблюдений.

Геоакустические измерения проводятся в скважине Г-1 на глубинах 1012 м и 270 м, в скважине Р-2 на глубине 730 м. Электромагнитные измерения проводятся на скважинах Г-1 и Р-2. Измерения удельной электропроводности воды проводятся на скважинах ГК-1 и Г-1. Режим всех измерений - непрерывный.

Регистрация данных – цифровая с частотой 32 Гц на канал. Данные передаются в ИВиС ДВО РАН по телеметрическим каналам по запросу оператора (в обычном режиме - ежедневно, кроме выходных и праздничных дней).

Заключение

По данным ИВиС ДВО РАН (анализ комплекса скважинных измерений), на период с 8 августа 2024 г. по 22 августа 2024 г. включительно (время по Гринвичу) **значительно повышена вероятность** землетрясений с параметром $S \geq 18\%$ ($S = L_p / R_h * 100\%$, где $L_p = 10^{0.44M_w - 1.29}$ - длина очага землетрясения, R_h - гипоцентрального расстояние).

Величина $S = 18\%$ характеризует сейсмические события, эквивалентные землетрясению с магнитудой $M_w = 7.3$ с гипоцентрального расстоянием $R_h = 450$ км. Параметр R_h для данного Заключения рассчитывается относительно пункта наблюдения «Скважина Г-1 (Хлебозавод)», координаты 53.046° с.ш., 158.663° в.д.

Зав. лабораторией комплексного мониторинга сейсмоактивных сред, д.ф.м.н.

В.А. Гаврилов

Дежурный оператор сети скважинных измерений, н. с.

Е.В. Полтавцева

Научный сотрудник

Ю.Ю. Бусс

Научный сотрудник

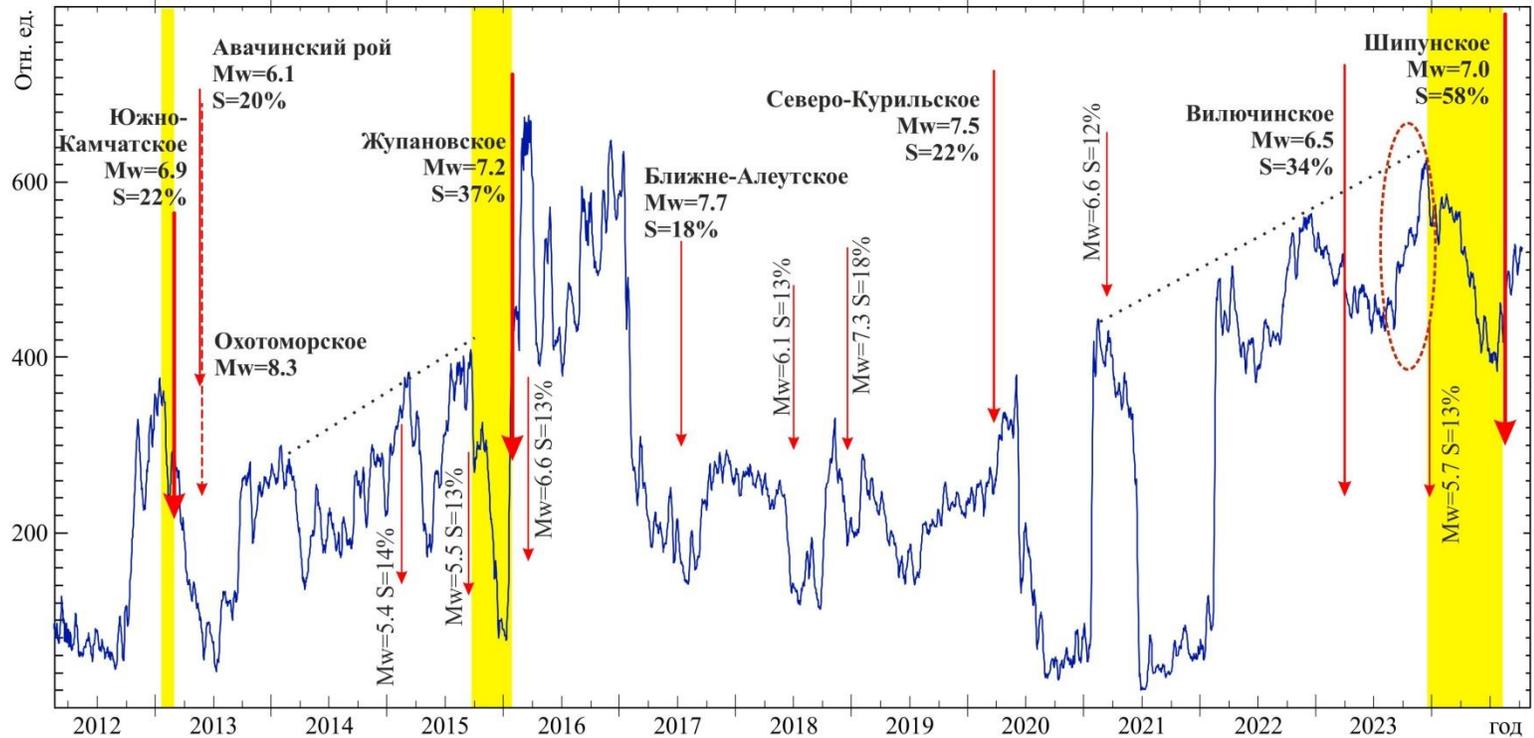
Ю.В. Морозова

08.08.2024 г.

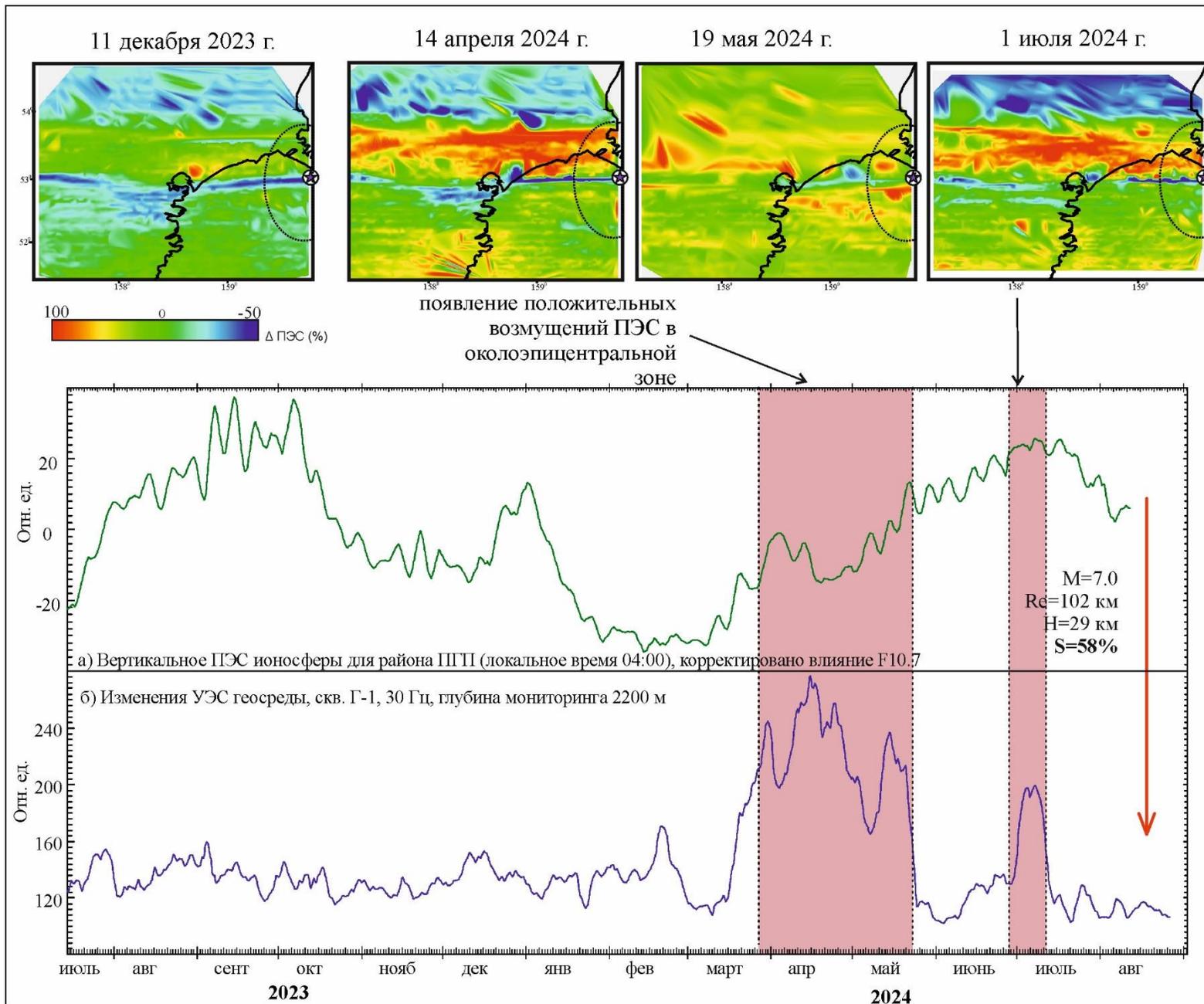
ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗНОГО ЗАКЛЮЧЕНИЯ
О ПОВЫШЕННОЙ
ВЕРОЯТНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ
С ПАРАМЕТРОМ $S \geq 18\%$ ОТ 19.12.2023 Г.

Можно видеть, что по своему характеру аномалия удельного электрического сопротивления (УЭС) перед Шипунским землетрясением была аналогична аномалиям, ранее имевшим место перед другими сильными камчатскими землетрясениями: Южно-Камчатским, Жупановским, Вилючинским и др. В рамках модели консолидации подобные изменения УЭС на разных глубинах могут объясняться перестройкой геосреды при формировании и разрушении жесткой неоднородности с соответствующей интенсификацией фильтрационных процессов.

Подача прогнозных заключений о **повышенной** вероятности землетрясения с $S \geq 18\%$



Отметим, что для Южно-Камчатского землетрясения (28.02.2013г.; $M_w 6.9$; $R_e=251$ км; $H=52$ км) за 24 сут. нами был дан подтверждавшийся краткосрочный прогноз о «**значительно** повышенной вероятности землетрясений с $M_{LH} \geq 6.5$ в зоне радиусом $R \leq 300$ км от центра Петропавловска-Камчатского с глубиной очагов менее 150 км». Этот прогноз с 27.12.2012 г. предварялся прогнозом о **повышенной** вероятности землетрясений с указанными параметрами.



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

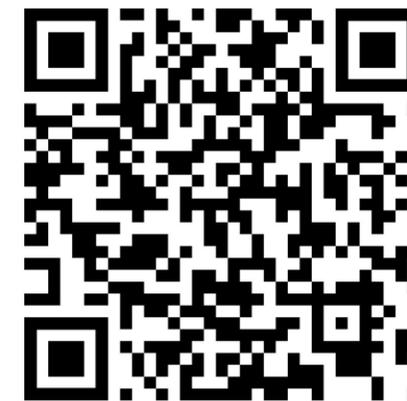
С конца декабря 2023 г. наблюдается резкое падение уровня ПЭС ионосферы. С середины марта 2024 г. наблюдается синхронный рост рядов ПЭС ионосферы и УЭС геосреды на глубине 2200 м (частота измерений 30 Гц), и примерно в середине апреля появляются интенсивные положительные возмущения ПЭС, захватывающие в том числе околоэпицентральною зону готовящегося сильного Шипунского землетрясения. Через некоторое время они исчезают и вновь появляются в начале июля 2024 г.

ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗНОГО ЗАКЛЮЧЕНИЯ
О ЗНАЧИТЕЛЬНО ПОВЫШЕННОЙ
ВЕРОЯТНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ
С ПАРАМЕТРОМ $S \geq 18\%$ ОТ 08.08.2024 Г.

- ✓ Рост УЭС геосреды на глубине 950 м (160 Гц), означающий отток флюида к дневной поверхности .
- ✓ С 14.03. 2024 г. на фоне уменьшения УЭС геосреды на глубине 950 м стало расти УЭС на глубине 2200 м (30 Гц)
- ✓ С середины апреля 2024 г. - интенсивные положительные возмущения ПЭС. Появляются вновь в начале июля 2024 г.
- ✓ С 01.08.2024 г. резко выросла концентрация метана, выделяемого в виде пузырьков газа из воды скв. ГК-1
- ✓ Со второй половины июля 2024 г. началось уменьшение удельной электропроводности воды скв. ГК-1 (глубина измерений 1 м)



Наши работы. Сканируйте qr-коды



О Сети комплексных скважинных измерений

О ГАЭ и ЭМИ методах мониторинга и их физической основе



Гаврилов В.А. Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы (эмпирические закономерности и физические механизмы). Автореферат диссертации д.ф.-м.н.



Гаврилов В.А., и др. Мониторинг изменений НДС геосреды в районе ПГП по данным комплексных скважинных и GPS-измерений на активной фазе подготовки Жупановского землетрясения // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14. № 6