

ПОДХОДЫ К КРАТКОСРОЧНОМУ ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ЗОНЫ АВАЧИНСКОГО ЗАЛИВА (КАМЧАТКА)

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

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

* **Контакт:** Валерий Александрович Гаврилов: e-mail: vgavr1403@mail.ru

Обобщается опыт многолетних исследований, связанных с созданием геофизической системы, способной обеспечивать достаточно эффективное краткосрочное прогнозирование сейсмической опасности для зоны Авачинского залива, где расположены наиболее крупные населённые пункты Камчатки. Используется подход, при котором главной целью является не точное краткосрочное прогнозирование сильных землетрясений, а качественная («низкая», «повышенная», «значительно повышенная») оценка текущей сейсмической опасности для контролируемой зоны. Оценки базируются на текущих результатах непрерывного мониторинга процессов подготовки сильных землетрясений в зоне Авачинского залива, способных вызвать значительные сотрясения в районе г. Петропавловска-Камчатского. Такой подход даёт возможность своевременно информировать власти и структуры МЧС в случае появления оснований для значительной вероятности сотрясений не менее 5 баллов по 12-балльной шкале Медведева — Шпонхойера — Карника (MSK-6) в районе г. Петропавловска-Камчатского на ближайшие 2–4 недели. Обосновывается выбор модели консолидации И. П. Добровольского в качестве базовой физической модели подготовки землетрясений.

Ключевые слова: прогноз сейсмической опасности, активная фаза подготовки землетрясения, модель консолидации, сеть скважинных измерений, удельное электрическое сопротивление.

Цитирование: 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. — Т. 25. — ES5008. — DOI: 10.2205/2025es001054 — EDN: VEJDLM

Введение

Для Камчатки, где уровень сейсмичности наивысший в России и один из самых высоких в мире, достаточно надёжное среднесрочное и краткосрочное прогнозирование сильных землетрясений, представляющих опасность для населения, всегда было и остаётся актуальнейшей научной задачей, имеющей большое социально-экономическое значение. В первую очередь это относится к району, где расположен г. Петропавловск-Камчатский, а также города Елизово и Вилучинск. Это район с наибольшей для Камчатки плотностью населения, находящийся в зоне 9-балльных возможных сотрясений по 12-балльной шкале Медведева — Шпонхойера — Карника (MSK-64). Сотрясения интенсивностью 7 баллов и более происходят в указанном районе в среднем каждые 12–25 лет, а сотрясения интенсивностью 8 баллов и более — каждые 50–100 лет [Федотов, 1975; Чебров и др., 2011]. Следует отметить, что последним землетрясением такого класса является Большое Камчатское землетрясение с магнитудой $M = 8,5$ (или 9,0 по данным Геологической службы США — USGS), вызвавшее катастрофическое цунами, которое произошло 04.11.1952 г., т.е. уже более 72 лет назад.

<https://elibrary.ru/VEJDLM>

Получено: 12 августа 2025 г.

Принято: 18 сентября 2025 г.

Опубликовано: 26 сентября 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

Согласно [Федотов и Соломатин, 2019] наиболее вероятным районом следующего сильнейшего землетрясения с $M \geq 7,7$ является район от северной границы Авачинского залива до южной оконечности Камчатки, который в настоящее время представляет собой многолетнюю сейсмическую брешь. При этом пятилетняя вероятность 9-балльного землетрясения в Авачинском заливе оценивается величиной 14,7%, что в 4 раза превышает среднюю долговременную вероятность по всей Курило-Камчатской сейсмогенной зоне.

Вышеизложенное указывает на очевидную необходимость создания в районе г. Петропавловска-Камчатского геофизической системы, способной обеспечивать достаточно эффективное среднесрочное и краткосрочное прогнозирование сильных камчатских землетрясений, опасных для указанного района. Однако, необходимо согласиться с тем, что точные краткосрочные прогнозы времени (погрешность ± 3 сут.), магнитуды землетрясения (погрешность $\pm 0,1$), а также достижение высокой степени успешности прогнозов (не менее 85–90%), на которых настаивают ряд исследователей [см., например, Короновский и др., 2021], невозможны. В то же время недопустимо отказываться от поиска решений, способных значительно снизить ущерб при сильном землетрясении, прежде всего, уменьшить число пострадавших.

По мнению авторов, в сложившейся ситуации целесообразно использование подхода, при котором **главной целью** является не точное краткосрочное прогнозирование сильных землетрясений, а качественная («низкая», «повышенная», «значительно повышенная») оценка текущей сейсмической опасности для контролируемой зоны. При этом оценки сейсмической опасности должны базироваться на текущих результатах непрерывного мониторинга процессов подготовки сильных землетрясений в зоне Авачинского залива, способных вызвать значительные сотрясения в Петропавловск-Камчатской городской агломерации. Такой подход даёт возможность своевременно информировать власти и структуры МЧС в случае появления оснований для значительной вероятности сотрясений более 5 баллов в указанном районе на ближайшие 2–4 недели.

Фактически и в этом случае речь также идёт о краткосрочном прогнозировании, однако, как показывает многолетний опыт исследований авторов, в этом случае требования к точности параметров прогнозируемого землетрясения могут быть ограничены оценкой величины $S = L/R_h \cdot 100$, %, где L – длина очага землетрясения, R_h – гипоцентрального расстояния. Использование величины S позволяет учитывать влияние на интенсивность сотрясений как магнитуды, так и расстояния до очага землетрясения.

Чтобы не смешивать авторскую терминологию с устоявшейся традиционной, будем далее называть краткосрочное прогнозирование землетрясений, при котором параметры прогнозируемого землетрясения ограничиваются величиной S , «прогнозом с мягкими требованиями к точности прогнозирования».

Основные позиции подхода к оценкам сейсмической опасности для района г. Петропавловска-Камчатского

1. Главной целью проводимых авторами многолетних исследований является разработка методов, позволяющих осуществлять успешное качественное прогнозирование сейсмической опасности для района г. Петропавловска-Камчатского. Оценки текущей сейсмической опасности при этом базируются на краткосрочном прогнозировании сильных камчатских землетрясений с мягкими требованиями к точности прогнозирования. К настоящему времени в ходе многолетних исследований закрепились удобная для использования в прикладных целях трёхуровневая система оценки сейсмической опасности: «низкая», «повышенная», «значительно повышенная».
2. Необходимым условием достаточно надёжного среднесрочного и краткосрочного прогнозирования землетрясений с мягкими требованиями к точности прогнозирования, опасных для района г. Петропавловска-Камчатского, является наличие сети комплексных геофизических измерений, данные которых способны обеспечить

непрерывный мониторинг процессов подготовки сильных землетрясений в зоне Авачинского залива.

3. Выбор методов мониторинга процессов подготовки землетрясений и анализ результатов, получаемых сетью комплексных геофизических наблюдений, должны проводиться с учётом основных положений выбранной базовой физической модели подготовки тектонического землетрясения.

Более детально указанные положения обсуждаются ниже.

Выбор базовой физической модели подготовки землетрясения

Опыт, полученный в ходе многолетних исследований на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (ППП), позволяет утверждать, что эффективное среднесрочное и краткосрочное прогнозирование сейсмической опасности невозможно без наличия в контролируемой зоне непрерывно функционирующей сети геофизического мониторинга изменений напряжённо-деформированного состояния (НДС) геосреды, данные которой позволяли бы проводить анализ получаемых результатов в рамках обоснованно выбранной базовой физической модели (концепции) подготовки землетрясения.

Очевидно, что базовая модель подготовки землетрясения не может быть универсальной и подходить для любых сейсмоактивных районов, поскольку на характер откликов геосреды на подготовку землетрясения оказывают влияние достаточно много факторов – сеймотектонические особенности региона, особенности геологического строения конкретного района измерений и пр. Кроме этого применение той или иной модели подготовки землетрясения в качестве базовой модели может оказаться невозможным из-за ограниченных возможностей сети геофизических наблюдений, используемой для мониторинга процессов подготовки землетрясений.

Надо также учитывать, что для решения задач среднесрочного и краткосрочного прогнозирования необходимо, чтобы анализ данных мониторинга, проводимый в рамках базовой модели, позволял достаточно надёжно и быстро (практически в режиме реального времени) выделять начало заключительной стадии подготовки сильного землетрясения. Как показал опыт исследований авторов, указанное условие накладывает серьёзные ограничения при выборе базовой модели. В частности, по этой причине оказалось невозможным использовать в качестве базовой модели дилатантно-диффузионную модель [Nur, 1972; Sholz et al., 1973], справедливо считающуюся наиболее известной и общепризнанной [Гаврилов и др., 2024].

Результаты, полученные в ходе дальнейших исследований, позволили сделать вывод, что характер изменений временных рядов данных комплексных геофизических измерений на заключительных стадиях подготовки сильных камчатских землетрясений соответствует модели консолидации И. П. Добровольского [Добровольский, 2009]. В настоящее время указанная модель используется авторами в качестве базовой физической модели подготовки камчатских землетрясений. Согласно [Добровольский, 2009] в модели консолидации выделяются две основные стадии, предшествующие тектоническому землетрясению: стадия консолидации и стадия распада неоднородности. На стадии консолидации происходит формирование и рост размеров жёсткой неоднородности с соответствующим накоплением потенциальной энергии. Вторая стадия – стадия распада неоднородности – наиболее важная для краткосрочного прогнозирования землетрясений, поскольку именно на этой стадии происходит формирование положения магистрального разрыва и проявляются краткосрочные предвестники. Продолжительность стадии распада значительно меньше продолжительности стадии консолидации, поскольку процесс распада неоднородности протекает интенсивно за счёт потенциальной энергии, накопленной на предыдущей стадии. Начало стадии распада неоднородности сопровождается интенсивным трещинообразованием, небольшими землетрясениями (форшоками), проявлением краткосрочных предвестников. Основным актом разрушения неоднородности является образование магистрального разрыва. Надёжное определение начала стадии распада даёт возможность значительного повышения точности краткосрочного прогнозирования момента землетрясения.

Сеть комплексных скважинных измерений ПГП

Необходимо подчеркнуть, что вышеуказанный подход к среднесрочному и краткосрочному прогнозированию землетрясений, опирающийся на базовую физическую модель подготовки землетрясения, будет эффективен лишь при соответствии информационных возможностей сети геофизических измерений, используемой для мониторинга процессов подготовки землетрясений, ключевым положениям выбранной модели. Причём в этой связке главная роль отводится базовой модели: при отсутствии указанного соответствия должны быть внесены необходимые изменения в состав измерений, проводимых сетью.

В настоящее время информационной основой для системы средне- и краткосрочного прогнозирования землетрясений, опасных для района Петропавловска-Камчатского, являются данные функционирующей в этом районе сети комплексных скважинных измерений (далее – Сеть), созданной Институтом вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (ИВиС ДВО РАН). Достаточно подробная информация о Сети содержится в [Гаврилов и др., 2021].

В состав Сети в настоящее время входят четыре радиотелеметрических пункта, созданных на базе скважин Г-1, Р-2, Е-1, ГК-1, расположенных в радиусе 35 км от г. Петропавловска-Камчатского (рис. 1). Центр сбора и обработки данных Сети скважинных измерений расположен в здании ИВиС ДВО РАН в Петропавловске-Камчатском. На рис. 1 также указано расположение пунктов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), созданной в этом районе Камчатским филиалом Единой геофизической службы РАН (КФ ФИЦ ЕГС РАН) совместно с ИВиС ДВО РАН. Данные этих пунктов в последние годы используются при анализе результатов комплексных скважинных измерений [Гаврилов и др., 2023b].

Сеть начала создаваться в конце 1990-х годов. При этом целями её создания с самого начала являлось получение новых научных результатов, относящихся к пониманию физических причин изменений НДС геосреды во временных окрестностях землетрясений и развитие на этой базе методов мониторинга и краткосрочного прогноза сильных камчатских землетрясений.

Главными особенностями Сети является проведение измерений в достаточно глубоких скважинах, а также комплексность проводимых измерений. В целом для мониторинга процессов подготовки землетрясений в настоящее время используются данные, получаемые по семи видам геофизических измерений. В их число входят электромагнитные измерения с подземными электрическими антеннами; геоакустические измерения на глубинах более 1000 м; мониторинг изменений газонасыщенности и удельной электропроводности воды скважин; измерения температуры и уровня воды скважин.

При необходимости к анализу результатов комплексных скважинных измерений привлекаются дополнительные данные, получаемые от сторонних организаций, ведущих наблюдения в районе ПГП (в первую очередь от КФ ФИЦ ЕГС РАН): данные сейсмических наблюдений, данные ГНСС, результаты мониторинга объёмной активности радона, дебита и минерализации воды скважин. В последние годы для подготовки прогнозных заключений также привлекаются данные мониторинга полного электронного содержания ионосферы.

Одним из основных методов мониторинга процессов подготовки землетрясений, данные которого успешно используются авторами для среднесрочных и краткосрочных оценок текущей сейсмической опасности, является метод мониторинга изменений удельного электрического сопротивления (УЭС) геосреды, базирующийся на данных электромагнитных измерений с подземными электрическими антеннами (ЭМИ-метод) [Гаврилов, 2017].

Ключевые позиции ЭМИ-метода мониторинга изменений УЭС геосреды

1. Метод базируется на данных электромагнитных измерений с использованием подземных электрических антенн, что позволяет производить непрерывный мониторинг изменений уровня фонов электромагнитного излучения (ЭМИ) сверх-

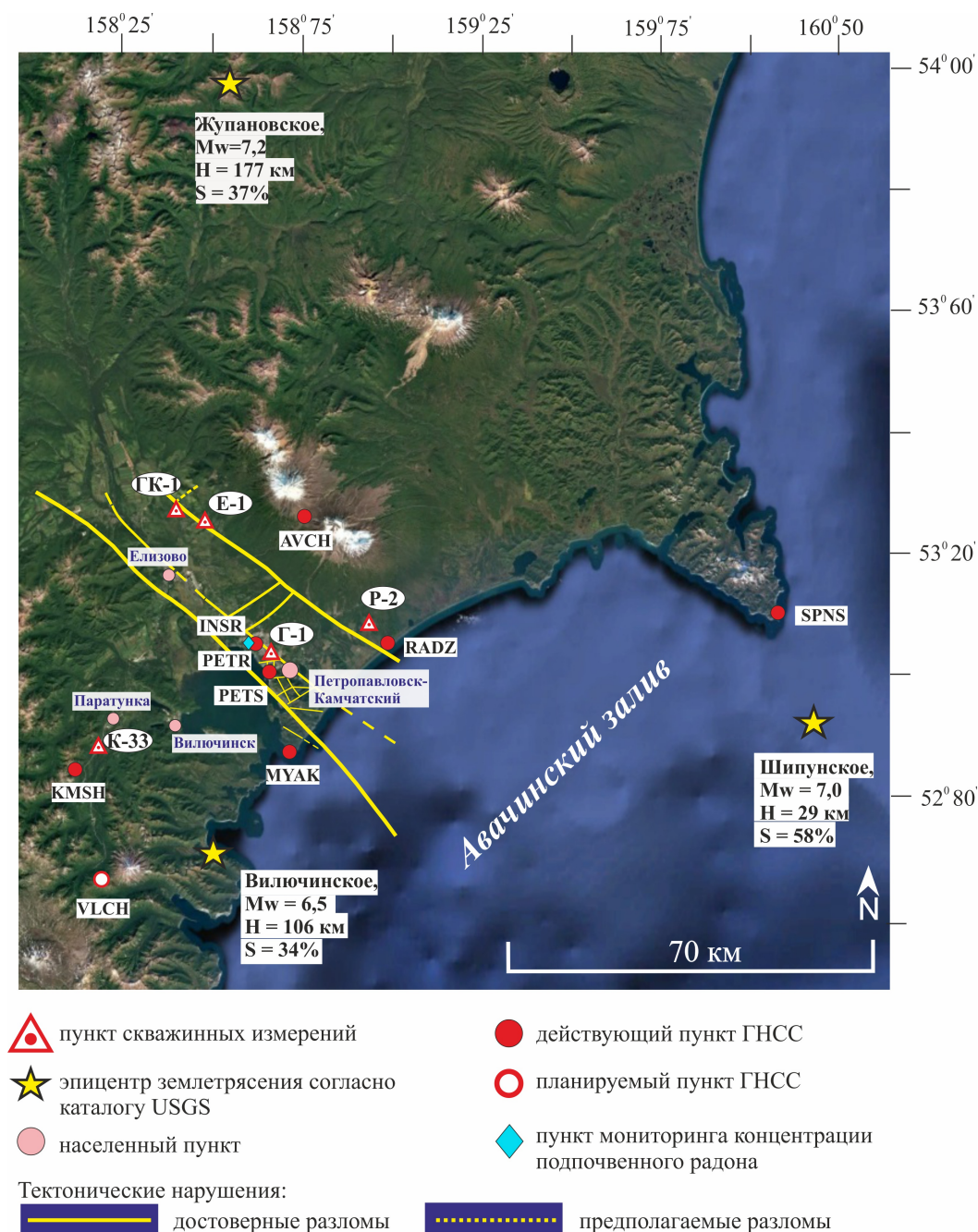


Рис. 1. Пункты комплексных геофизических измерений в районе Петропавловск-Камчатской агломерации.

низкочастотного (СНЧ) диапазона техногенного или естественного происхождения, проходящего через геосреду в зоне измерений.

- Основным конструктивным элементом подземной электрической антенны служит металлическая обсадная колонна достаточно глубокой (более 300 м) скважины.
- Поглощение электромагнитного излучения при прохождении через геосреду определяется, в первую очередь, УЭС геосреды.
- Мониторинг изменений УЭС геосреды, проводимый одновременно для нескольких глубин, позволяет получать результаты, отражающие динамику фильтрации поровой жидкости в зоне измерений на заключительных стадиях подготовки землетрясения.

Как показано в [Долуханов, 1972], если напряжённость вертикальной составляющей электромагнитного поля в воздухе непосредственно над поверхностью раздела геосреды и воздушной среды равна E_{azm} , то напряжённость вертикальной составляющей поля в геосреде E_{gz} на глубине h будет:

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

где v – фазовая скорость распространения электромагнитной волны в геосреде; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость геосреды; λ – длина электромагнитной волны в воздухе; $\sigma = 1/\rho$ – удельная электропроводность геосреды; ρ – удельное электрическое сопротивление геосреды. Диэлектрическая проницаемость воздуха принимается равной единице.

Поглощение в геосреде, обусловленное тепловыми потерями электромагнитной энергии, определяется экспоненциальным множителем $e^{-\delta h}$, где δ – коэффициент поглощения для глубины h . Как показано в [Гаврилов, 2017] для ЭМИ СНЧ диапазона $60\lambda\sigma \gg \epsilon$ и в этом случае значения коэффициента поглощения δ можно рассчитывать по упрощённой формуле: $\delta = 2\pi \sqrt{\frac{30}{\rho\lambda}}$, м⁻¹.

Таким образом, в СНЧ диапазоне частот основное влияние на величину коэффициента поглощения δ оказывает УЭС геосреды. Соответственно уровень сигнала на выходе антенны определяется главным образом величиной УЭС геосреды.

Результаты 20-летних измерений на ПГП показывают, что ЭМИ-метод отличается очень высокой тензочувствительностью, что согласуется с результатами лабораторных экспериментов с образцами горных пород, данными измерений в условиях реальной геосреды на других полигонах, а также теоретическими оценками, показывающими, что значения коэффициента тензочувствительности УЭС геосреды могут достигать величин порядка 10^3 – 10^5 [Пархоменко, 1989; Сидорин, 1992; Соболев и Пономарев, 2003; Yamazaki, 1977]. При этом, согласно данным лабораторных исследований, наиболее высокая чувствительность УЭС геосреды к изменениям НДС имеет место при значениях влажности, не превышающих 1,5% [Пархоменко, 1965, 1989; Пархоменко и Бондаренко, 1960]. Так, например, для базальта уменьшение влажности с 0,49% до 0,26% приводит к увеличению УЭС примерно в 30 раз. Для алевролита уменьшение влажности с 0,54% до 0,44% приводит к увеличению УЭС сопротивления примерно в 500 раз.

Приводимые в статье результаты электромагнитных измерений с подземными антеннами получены при измерениях, организованных на базе скважины Г-1 (см. рис. 1). Глубина скважины составляет 2542 м. Скважина заполнена водой, обсажена на всю глубину ствола.

Подчеркнём, что скважина Г-1 расположена в хорошо развитой разломной зоне, образованной тремя различно-ориентированными системами разломов: регионального разлома северо-западного направления, субмеридионального и субширотного разломов (см. рис. 1). Благодаря этому, указанная скважина отличается наиболее высокой эффективностью измерений, прежде всего, для геоакустических измерений и электромагнитных измерений с подземными электрическими антеннами. Как отмечено в [Киссин, 2009], таким зонам свойственна высокая динамичность фильтрационных процессов на заключительных стадиях подготовки сильных землетрясений.

В [Гаврилов, 2017] показано, что использование подземных электрических антенн позволяет вести непрерывные наблюдения за изменениями УЭС геосреды на глубинах до 3 км в радиусе примерно до 1500 м от скважины. Таким образом, сигнал на выходе подземной антенны отражает изменения УЭС для значительного объёма геосреды, что принципиально важно, учитывая неоднородность реальной геосреды. Важно также подчеркнуть, что мониторинг изменений УЭС геосреды с использованием подземных электрических антенн проводится одновременно для нескольких глубин. Для этой цели широкополосный сигнал, поступающий с выхода подземной антенны, разделяется узкополосными полосовыми фильтрами на несколько частотных каналов. Затем

в онлайн-режиме производится аналоговая и цифровая обработка выходных сигналов для каждого частотного канала, что позволяет получать результаты, отражающие изменения УЭС для разных глубин верхней части земной коры в районе ПГП [Гаврилов, 2013, 2017; Гаврилов и др., 2021]. Учитывая, что УЭС горных пород мало зависит от сопротивления минерального скелета, а определяется, в первую очередь, влажностью породы [Пархоменко, 1965; King and Smith, 1981], анализ результатов мониторинга изменений УЭС геосреды для нескольких частотных каналов позволяет получать информацию о динамике фильтрации поровой жидкости в зоне измерений, связанной с подготовкой землетрясения.

Важность результатов многолетнего мониторинга изменений УЭС геосреды иллюстрирует рис. 2, на котором моменты сильных по величине S землетрясений сопоставляются с изменениями УЭС геосреды. Измерения проводились с использованием подземной электрической антенны, созданной на базе скважины Г-1 [Гаврилов, 2013, 2017].

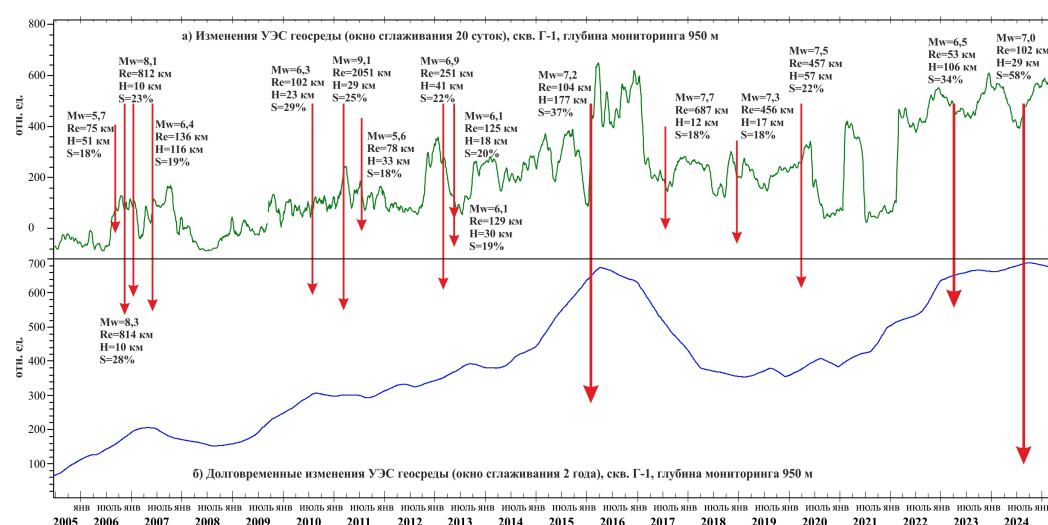


Рис. 2. Изменения УЭС геосреды перед землетрясениями с глубиной $H \leq 200$ км с величиной $S \geq 18\%$ по данным измерений на ПГП с подземной электрической антенной на базе скважины Г-1. Глубина мониторинга УЭС 950 м: (а) – изменения УЭС геосреды, окно сглаживания 20 сут.; (б) – изменения УЭС геосреды, окно сглаживания 2 года.

Приводимые на рис. 2а данные (временной ряд изменений УЭС геосреды с окном сглаживания 20 суток) показывают, что все землетрясения с величиной $S \geq 18\%$ предвараются значительными краткосрочными изменениями УЭС геосреды. В то же время, согласно рис. 2б, который иллюстрирует изменения трендовой составляющей временного ряда изменений УЭС геосреды, сильные землетрясения с величиной $S \geq 23\%$ предвараются продолжительными (несколько лет) интервалами с повышенной скоростью роста УЭС геосреды. Отметим, что согласно модели консолидации такой характер указанных временных рядов может интерпретироваться как отражение процессов формирования жёсткой неоднородности.

Активная фаза подготовки землетрясения

Детальный анализ данных, полученных на интервалах с повышенной скоростью роста УЭС, показывает, что сильные камчатские землетрясения в большинстве случаев за несколько месяцев до момента землетрясения предвараются «активной фазой» подготовки [Гаврилов и др., 2023а]. Признаком начала активной фазы является появление высокоамплитудных краткосрочных предвестниковых аномалий по различным видам измерений, отвечающих по своему физическому смыслу выбранной базовой модели подготовки землетрясения. Особенно ярко подобные изменения НДС геосреды проявились при подготовке наиболее значимых по величине S камчатских землетрясений:

Жупановского (30.01.2016 г., $M_w = 7,2$, $S = 37\%$), Вилючинского (03.04.2023 г., $M_w = 6,5$, $S = 34\%$) и Шипунского (17.08.2024 г., $M_w = 7,0$, $S = 58\%$) (выделены на рис. 2 более длинными стрелками).

Жупановское землетрясение [см. Чебров и др., 2016]. На рис. 3 представлены результаты комплексных геофизических измерений, полученные при подготовке Жупановского землетрясения. По результатам сейсмических наблюдений в зоне очага Жупановского землетрясения (см. рис. 3д, е), (указанные данные получены уже после землетрясения), можно видеть, что в середине декабря 2014 г. характер сейсмических данных в зоне очага значительно изменился: резко возросло число слабых ($K_s \leq 7,7$) землетрясений и существенно изменился характер кумулятивной кривой энергии землетрясений. По мнению авторов, в рамках модели консолидации такие изменения в характере сейсмических данных дают основания считать середину декабря 2014 г. началом стадии распада неоднородности при подготовке Жупановского землетрясения.

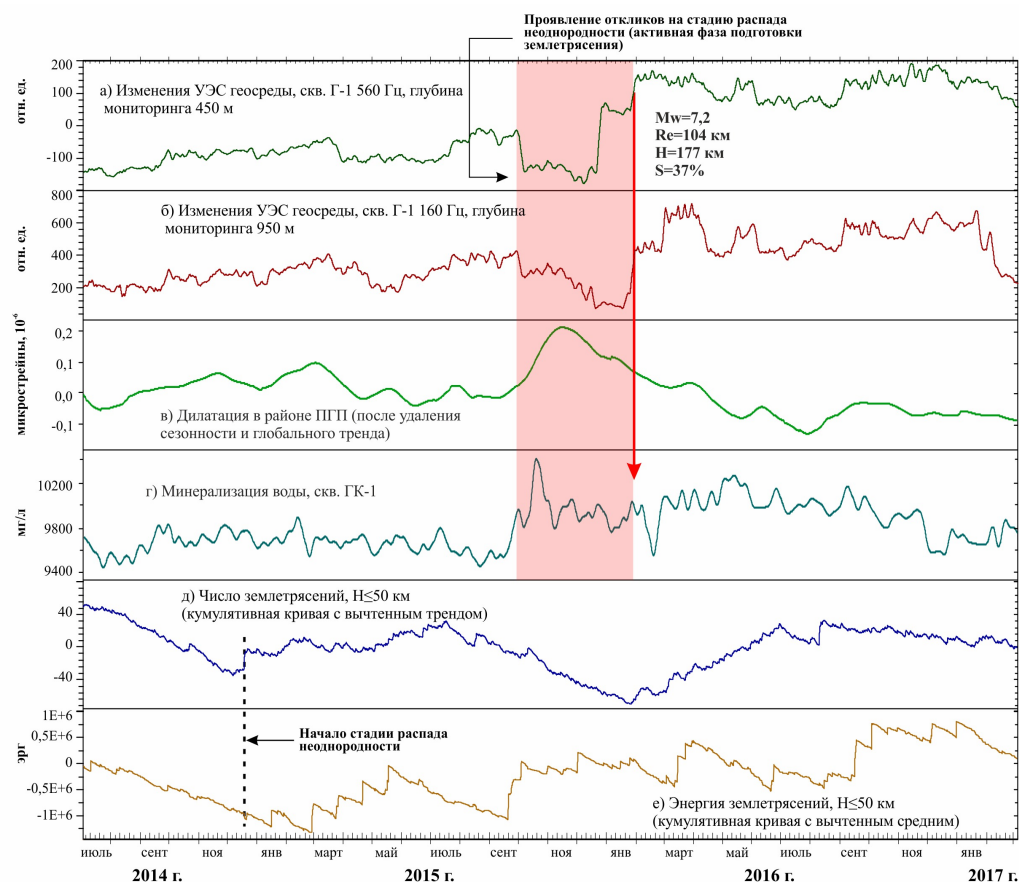


Рис. 3. Проявление стадии распада неоднородности и активной фазы подготовки накануне Жупановского землетрясения: (а) – изменения УЭС геосреды, скв. Г-1, глубина мониторинга 450 м; (б) – изменения УЭС геосреды, скв. Г-1, глубина мониторинга 950 м; (в) – изменения дилатации в районе ПГП (после удаления сезонности и глобального тренда); (г) – минерализация воды, скв. ГК-1 (данные представлены сотрудником КФ ФИЦ ЕГС РАН Г. В. Рябининым); (д) – число слабых неглубоких ($H \leq 50$ км, $K_s \leq 7,7$) землетрясений в зоне $R = 76$ км от эпицентра Жупановского землетрясения (кумулятивная кривая с вычтенным трендом); (е) – энергия слабых неглубоких ($H \leq 50$ км, $K_s \leq 7,7$) землетрясений в зоне $R = 76$ км от эпицентра Жупановского землетрясения (кумулятивная кривая с вычтенным средним).

Начало активной фазы подготовки Жупановского землетрясения можно отнести к концу сентября 2015 г., когда спустя примерно 9,5 месяцев после начала распада неоднородности (соответственно за 4 месяца до момента землетрясения) практически одновременно появились аномалии УЭС геосреды на разных глубинах (рис. 3а, б),

аномалии в данных ГНСС (рис. 3в), аномалии в данных мониторинга минерализации воды скважины ГК-1 (рис. 3г). Кроме этого, в конце сентября 2015 г. в районе Авачинского залива были зарегистрированы землетрясения с синхронными отклонениями от среднеемноголетних значений азимута и угла наклона главной оси сжатия сброшенных напряжений [Гаврилов и др., 2019] (рис. 4).

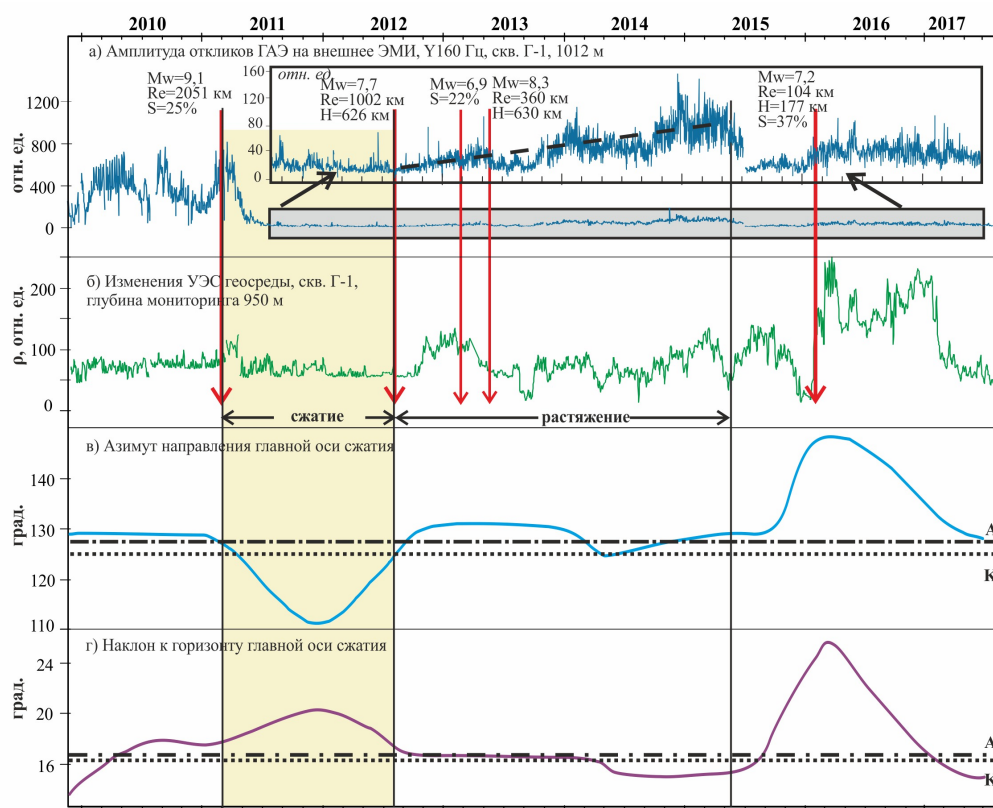


Рис. 4. Изменения параметров ГАЭ и удельного сопротивления геосреды в зоне скважины Г-1 в сравнении с изменениями параметров механизмов очагов землетрясений: (а) – изменения СКЗ откликов ГАЭ на воздействие внешнего ЭМИ для глубины 1012 м (Y-компонента), рисунок на врезке иллюстрирует изменения амплитуды откликов ГАЭ в более детальном масштабе; (б) – изменения УЭС геосреды, глубина мониторинга 950 м; (в) – азимут направления главной оси сжатия по данным о механизмах очагов землетрясений, пунктирные горизонтальные линии А и К – значения азимута для среднего тензора для областей А и К соответственно; (г) – наклон к горизонту главной оси сжатия по данным о механизмах очагов землетрясений, пунктирные горизонтальные линии А и К – значения наклона для среднего тензора для областей А и К соответственно. Согласно [Гаврилов и др., 2019].

Шипунское землетрясение. Аналогичные построения, выполненные для Шипунского землетрясения (рис. 5), позволяют сделать вывод, что стадия начала распада неоднородности для указанного землетрясения началась 21.01.2024 г. Изменения УЭС геосреды на глубинах 950 м и 2200 м, предположительно связанные с началом распада неоднородности, появились в конце марта 2024 г., т.е. спустя 2 месяца после начала распада и за 4,5 месяца до момента землетрясения (рис. 5в, г).

Оценивая результаты, полученные при подготовке Шипунского землетрясения, следует подчеркнуть их согласованность по своему физическому смыслу на активной фазе подготовки землетрясения. Это, в первую очередь, относится к характеру изменений УЭС геосреды на разных глубинах: можно видеть, что **рост** УЭС геосреды на глубине около 2200 м (см. рис. 5г) с определённой задержкой отражается в **снижении** УЭС на глубине 950 м (см. рис. 5в). Такой характер изменений УЭС геосреды отвечает положениям модели консолидации, согласно которым указанные изменения УЭС можно интерпретировать как следствие начала стадии распада неоднородности (см. рис. 5д, е).

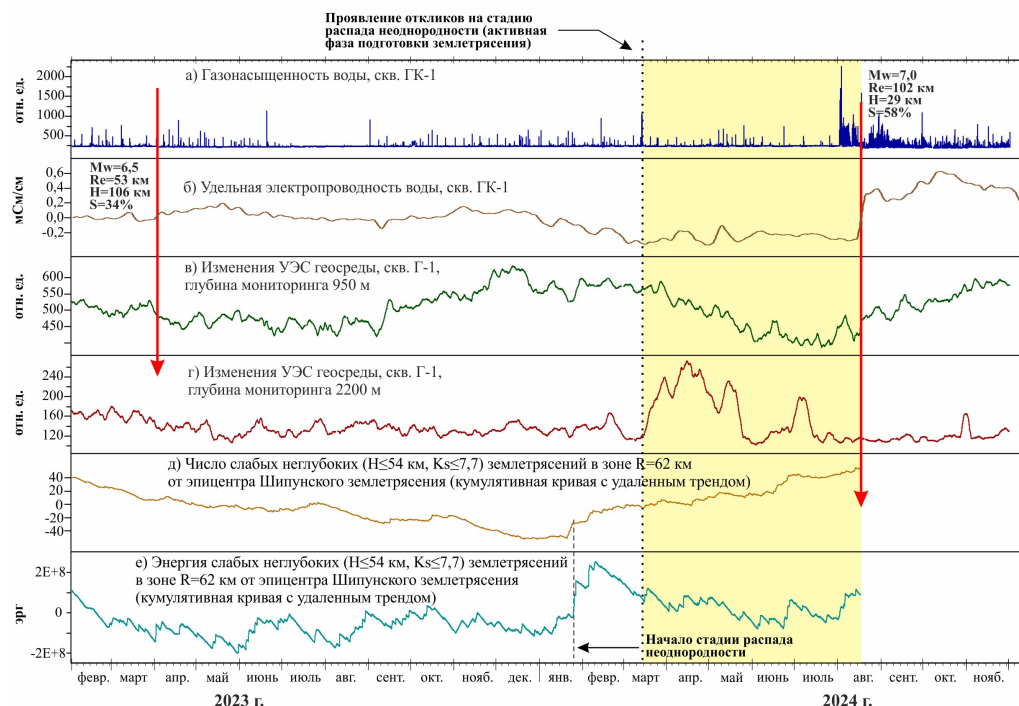


Рис. 5. Проявление стадии распада неоднородности и активной фазы подготовки накануне Шипунского землетрясения: (а) – газонасыщенность воды скв. ГК-1; (б) – удельная электропроводность воды скв. ГК-1; (в) – изменения УЭС геосреды, скв. Г-1, глубина мониторинга 950 м; (г) – изменения УЭС геосреды, скв. Г-1, глубина мониторинга 2200 м; (д) – число слабых неглубоких ($H \leq 54$ км, $K_s \leq 7,7$) землетрясений в зоне $R = 62$ км от эпицентра Шипунского землетрясения (кумулятивная кривая с удаленным трендом); (е) – энергия слабых неглубоких ($H \leq 54$ км, $K_s \leq 7,7$) землетрясений в зоне $R = 62$ км от эпицентра Шипунского землетрясения (кумулятивная кривая с удаленным трендом).

Также есть основания предположить, что с процессом распада жёсткой неоднородности были связаны изменения характера данных УЭС геосреды на глубине 950 м в конце июля 2024 г. (см. рис. 5в) и начавшийся 01.08.2024 г. резкий значительный (на порядок!) рост газонасыщенности воды скважины ГК-1 (см. рис. 5а).

Кроме этого следует отметить, что данные, представленные на рис. 5д и 5е, по своему характеру не противоречат процессу распада значительной по своему объёму жёсткой неоднородности, формирующейся перед сильными землетрясениями в процессе консолидации геосреды. Согласно [Добровольский, 1991, 2009] линейный размер такой неоднородности перед её расходом должен быть близок к размерам очага землетрясения: т.е. для Жупановского землетрясения ($M_w = 7,2$) он, согласно [Ризниченко, 1976], должен составлять около 76 км, а для Шипунского землетрясения ($M_w = 7,0$) – 62 км. Распад таких больших неоднородностей способен приводить к масштабным перераспределениям порового давления в значительных объемах геосреды, а последующая интенсификация фильтрационных процессов – к изменениям УЭС геосреды на разных глубинах (см. рис. 3а, б, рис. 5в, г). В этом случае начало активной фазы подготовки сильных камчатских землетрясений получает ясное физическое объяснение как отклик верхних горизонтов геосреды на начало распада значительной по объёму жёсткой неоднородности.

О возможности надёжного качественного прогнозирования сейсмической опасности для Петропавловск-Камчатской городской агломерации

Понимание физических причин, обуславливающих появление активной фазы подготовки землетрясения, а также возможность её выделения перед сильными камчатскими землетрясениями (см. рис. 3, 4, 5), позволяет достаточно оптимистично относиться

к возможности эффективного краткосрочного прогнозирования сейсмической опасности для Петропавловск-Камчатской городской агломерации. Отметим, что с июля 2005 г. по июнь 2025 г. произошло четыре сильных землетрясения, вызвавших в районе Петропавловск-Камчатской агломерации сотрясения до 5–6 баллов: Южно-Камчатское (28.02.2013; $M_w = 6,9$; $S = 22\%$), Жупановское (30.01.2016; $M_w = 7,2$; $S = 37\%$), Вилучинское (03.04.2023; $M_w = 6,5$; $S = 34\%$), Шипунское (17.08.2024; $M_w = 7,0$; $S = 58\%$) землетрясения. Как показано выше, начало активной фазы подготовки надёжно выделяется за 4,5 месяца накануне Шипунского землетрясения и за 4 месяца до Жупановского землетрясения. Для Южно-Камчатского и Вилучинского землетрясений начало активной фазы выделяется примерно за 6 месяцев до Южно-Камчатского и за 4,5 месяца до Вилучинского землетрясения [Гаврилов и др., 2023a]. При этом для Южно-Камчатского, Жупановского и Шипунского землетрясений были даны оправдавшиеся краткосрочные прогнозы (с мягкими требованиями к точности прогнозирования), базирующиеся на модели консолидации И. П. Добровольского, подтверждённые справками Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (далее – «КФ РЭС»). Наиболее обоснованный краткосрочный прогноз был сделан авторами для Шипунского землетрясения.

Первое прогнозное заключение, связанное с подготовкой Шипунского землетрясения, было подано авторами 19.12.2023 г. В нем сообщалось о «**повышенной**» вероятности землетрясения с параметром $S \geq 18\%$ на ближайшие 10 суток». Параметр R_h для таких заключений рассчитывался относительно скважины Г-1 с координатами $53,046^\circ$ с. ш., $158,663^\circ$ в. д. Основанием для подачи указанного заключения послужили изменения в характере данных мониторинга УЭС геосреды (см. рис. 5в), которые в рамках модели И. П. Добровольского позволяли сделать заключение о переходе от стадии консолидации к стадии распада неоднородности для очередного сильного близкого землетрясения. Заключение о повышенной вероятности землетрясения с параметром $S \geq 18\%$ затем подтверждалось каждые две недели вплоть до 08.08.2024 г., поскольку до этого момента не было серьёзных оснований менять его формулировку.

8 августа 2024 г. в адрес КФ РЭС, а также в Совет по прогнозу землетрясений и извержений вулканов ИВиС ДВО РАН, авторами было отправлено заключение уже о «**значительно повышенной**» вероятности сильного землетрясения с величиной параметра S не менее 18% на период с 8 по 22 августа 2024 г.».

Основанием для такого заключения явился, в первую очередь, резкий и значительный (на порядок!) рост газонасыщенности воды скважины ГК-1, начавшийся 1 августа 2024 г. (см. рис. 5а). Несколько ранее изменились на противоположные характеры данных мониторинга удельной электропроводности воды скважины ГК-1 (см. рис. 5б) и УЭС геосреды на глубине 950 м на скважине Г-1 (см. рис. 5в).

Землетрясение, соответствующее указанным в заключении параметрам – «Шипунское» землетрясение произошло 17 августа 2024 г., т.е. спустя 9 суток после подачи заключения о значительной вероятности сильного землетрясения в районе г. Петропавловска-Камчатского (справка КФ РЭС от 17.09.2024 г.).

Из вышеизложенного видно, что в своих подходах к краткосрочному прогнозированию сейсмической опасности авторами используется трёхступенчатая («низкая», «повышенная», «значительно повышенная») оценка вероятности сотрясений не менее 5 баллов в районе Петропавловск-Камчатской агломерации на ближайшие 2–4 недели. При таком подходе заключение с формулировкой о «повышенной вероятности землетрясения» при надёжном выделении начала активной фазы по данным комплексных геофизических наблюдений, по существу, является среднесрочной (на интервал примерно 10 месяцев) оценкой сейсмической опасности для контролируемой зоны, а заключение о «значительно повышенной вероятности» – краткосрочной оценкой опасности.

Важность достаточно точного и своевременного выделения начала активной фазы поясняет рис. 6, иллюстрирующий изменения в характерах временных рядов данных комплексных геофизических измерений, связанных с подготовкой Шипунского

землетрясения. Напомним, что в случае Шипунского землетрясения заключение о «повышенной вероятности землетрясения» было подано 19.12.2023 г. Указанное заключение оправдалось (землетрясение произошло), однако, как это следует из данных, приводимых на рис. 6, указанное заключение было бы гораздо более надёжным, если бы оно базировалось на выделении начала активной фазы подготовки землетрясения (середина марта 2024 г). Проявление в данных мониторинга начала активной фазы означает, что распад неоднородности уже начался. Учитывая при этом, что процесс распада неоднородности хорошо энергообеспечен, вероятность последующего магистрального разрыва (сильного землетрясения) очень высока. Такой вывод подтверждается тем, что все четыре сильных землетрясения, вызвавшие в 2013–2024 гг. в районе Петропавловск-Камчатской агломерации сотрясения до 5–6 баллов, предварялись активной фазой. Учитывая это, появление высокоамплитудных краткосрочных предвестниковых аномалий по различным видам измерений, отвечающих по своему физическому смыслу модели консолидации (рис. 6а, б, в, г), в данном случае указывало на высокую вероятность очередного сильного ощутимого землетрясения, способного произойти через несколько месяцев.

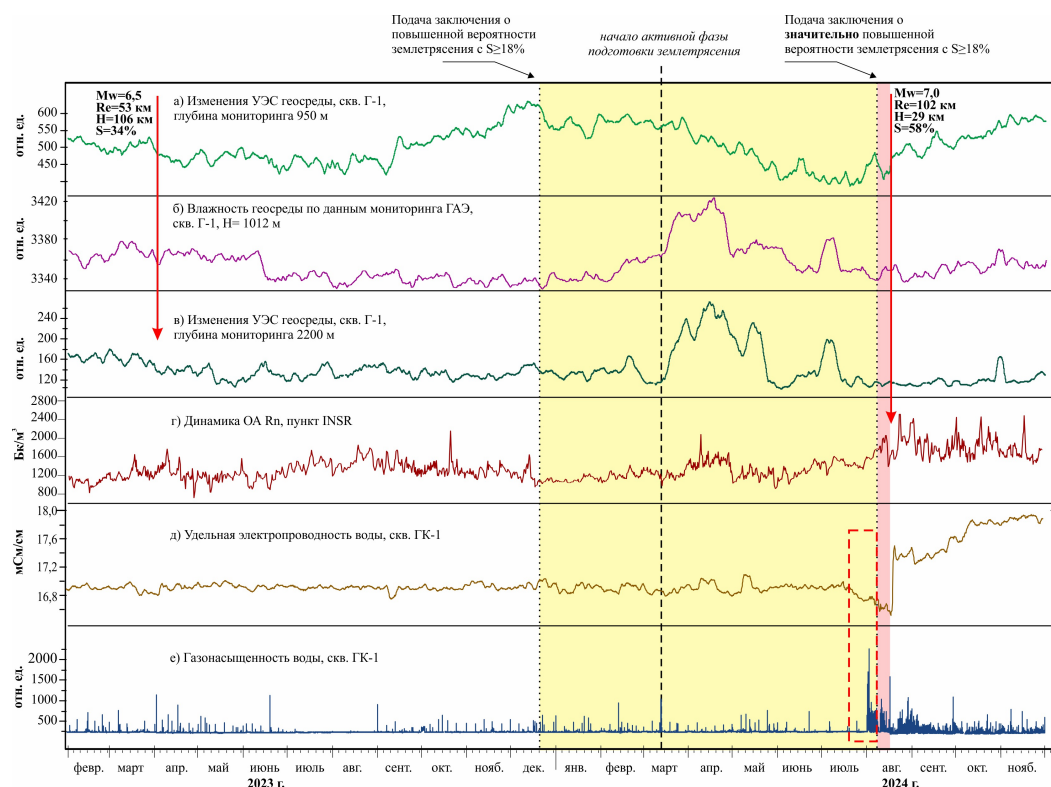


Рис. 6. Изменения характера данных рядов комплексных геофизических измерений, связанных с подготовкой Шипунского землетрясения. Жёлтым фоном отмечен интервал «повышенной вероятности» землетрясения с величиной $S \geq 18\%$. Розовым фоном – интервал «значительно повышенной вероятности». Прямоугольником отмечены изменения в рядах данных, послужившие основанием для заключения о «значительно повышенной вероятности»: (а) – изменения УЭС геосреды, скв. Г-1, глубина мониторинга 950 м; (б) – изменения влажности геосреды по данным геоакустических измерений, скв. Г-1, глубина установки геофона 1012 м; (в) – изменения УЭС геосреды, скв. Г-1, глубина мониторинга 2200 м; (г) – динамика объёмной активности подпочвенного радона (OA Rn) (данные предоставлены сотрудником КФ ФИЦ ЕГС РАН Е. О. Макаровым); (д) – удельная электропроводность воды скв. ГК-1; (е) – газонасыщенность воды скв. ГК-1.

Возможность надёжного выделения начала активной фазы подготовки землетрясения по данным текущих наблюдений с небольшой (до месяца) задержкой открывает путь к высокой эффективности не только среднесрочного, но и краткосрочного прогно-

зирования сейсмической опасности для района Петропавловск-Камчатской городской агломерации. Это достаточно сложная, но решаемая задача за счёт развития методической основы и технических средств сети комплексных геофизических измерений, функционирующей в указанном районе.

Заключение

Представленные в статье результаты показывают, что создание эффективной системы среднесрочного и краткосрочного прогнозирования сейсмической опасности для района Петропавловск-Камчатской агломерации возможно при использовании подхода, при котором главной целью является не точное краткосрочное прогнозирование сильных землетрясений, а качественная («низкая», «повышенная», «значительно повышенная») оценка текущей сейсмической опасности для указанного района. Оценки должны базироваться на текущих результатах непрерывного мониторинга процессов подготовки сильных землетрясений в зоне Авачинского залива, способных вызвать значительные (не менее 5 баллов) сотрясения в районе г. Петропавловска-Камчатского. Такой подход даёт возможность своевременно информировать власти и структуры МЧС в случае появления оснований для значительной вероятности сотрясений в районе г. Петропавловска-Камчатского на ближайшие 2–4 недели. Обязательным условием является наличие непрерывно функционирующей сети комплексных геофизических измерений (прежде всего, скважинных), данные которой позволяли бы проводить анализ результатов мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений в рамках выбранной базовой физической модели. Причём главная роль при этом отводится базовой модели: при отсутствии соответствия ключевых положений модели информационным возможностям используемой сети мониторинга, должны быть внесены необходимые изменения в состав проводимых измерений, чтобы добиться высокой эффективности обработки данных в рамках базовой модели. В этой связи можно отметить, что использование авторами модели консолидации И. П. Добровольского в качестве базовой физической модели подготовки сильных камчатских землетрясений, стало возможным, в основном, благодаря использованию новых оригинальных высокочувствительных методов скважинного мониторинга состояния геосреды, разработанных авторами, не имеющих аналогов на других отечественных и зарубежных сейсмопрогностических полигонах.

К настоящему времени авторами сделан ряд успешных прогнозов сильных камчатских землетрясений, вызвавших в районе Петропавловск-Камчатской агломерации сотрясения до 5–6 баллов. Наиболее обоснованный краткосрочный прогноз, базирующийся на модели консолидации, был сделан для Шипунского землетрясения. По мнению авторов, прогноз Шипунского землетрясения указывает на реальность успешного краткосрочного прогнозирования сильных камчатских землетрясений с «мягкими» требованиями к точности прогноза параметров землетрясения и с качественной оценкой вероятности прогнозируемого события.

Вместе с тем, необходимо подчеркнуть, что к настоящему времени удалось создать лишь основу системы, ориентированной на краткосрочное прогнозирование землетрясений, опасных для зоны Петропавловск-Камчатской агломерации. Не вызывает сомнений очень большой объем предстоящих работ, связанных с её развитием: расширением сети геофизических наблюдений, развитием системы обработки данных и анализа результатов мониторинга состояния геосреды, оптимизацией формата прогнозных заключений.

Благодарности. Исследования выполнены за счёт средств гранта РНФ (проект № 23-2700352).

Список литературы

Гаврилов В. А. О методе непрерывного мониторинга удельного электрического сопротивления горных пород // Сейсмические приборы. — 2013. — Т. 49, № 3. — С. 25–38. — EDN: [RZWZIH](https://doi.org/10.2205/2025es001054).

- Гаврилов В. А. Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы: эмпирические закономерности и физические механизмы. — М. : Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 2017. — 385 с. — EDN: [EOCKRK](#).
- Гаврилов В. А., Бусс Ю. Ю., Дещеревский А. В. и др. От мониторинга процессов подготовки к краткосрочному прогнозу сильных камчатских землетрясений // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. Труды Девятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 24–30 сентября 2023 г. — Петропавловск-Камчатский, 2023а. — С. 216–221.
- Гаврилов В. А., Бусс Ю. Ю., Соломатин А. В. и др. О выборе базовой физической модели подготовки сильных камчатских землетрясений // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXVII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. — Петропавловск-Камчатский, 2024. — С. 165–168. — EDN: [MBEUTP](#).
- Гаврилов В. А., Дещеревский А. В., Власов Ю. А. и др. Сеть комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Сейсмические приборы. — 2021. — Т. 57, № 3. — С. 52–78. — <https://doi.org/10.21455/si2021.3-5>. — EDN: [SBTYKX](#).
- Гаврилов В. А., Ландер А. В. и Морозова Ю. В. Сопоставление данных скважинных геоакустических и электромагнитных измерений с данными по механизмам очагов землетрясений // Доклады Академии наук. — 2019. — Т. 484, № 6. — С. 745–749. — <https://doi.org/10.31857/s0869-56524846745-749>.
- Гаврилов В. А., Полтавцева Е. В., Титков Н. Н. и др. Мониторинг изменений напряженно-деформированного состояния геосреды в районе Петропавловского геодинамического полигона по данным комплексных скважинных и grs-измерений на активной фазе подготовки Жупановского землетрясения (30.01.2016; Mw=7.2) // Геодинамика и тектонофизика. — 2023b. — Т. 14, № 6. — С. 0732. — <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-6-0732>.
- Добровольский И. П. Теория подготовки тектонического землетрясения. — Москва : АН СССР; Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта, 1991. — 224 с.
- Добровольский И. П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 240 с. — EDN: [MUWSCF](#).
- Долуханов М. П. Распространение радиоволн. Учебник для вузов. — М. : Связь, 1972. — 336 с.
- Киссин И. Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. — М. : Наука, 2009. — 328 с.
- Короновский Н. В., Захаров В. С. и Наймарк А. А. Непредсказуемость сильных землетрясений: новое понимание проблемы и ее решение // Вестник Московского Университета. Серия 4. Геология. — 2021. — № 3. — С. 17–25. — EDN: [PMRRCC](#).
- Пархоменко Э. И. Электрические свойства горных пород. — М. : Наука, 1965. — 164 с.
- Пархоменко Э. И. Геоэлектрические свойства минералов и горных пород при высоких давлениях и температурах. — М. : Наука, 1989. — 198 с.
- Пархоменко Э. И. и Бондаренко А. Т. Влияние одностороннего давления на электрическое сопротивление горных пород // Известия АН СССР. Серия геофизическая. — 1960. — № 2. — С. 326–332.
- Ризниченко Ю. В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. — М. : Наука, 1976. — С. 9–26.
- Сидорин А. Я. Предвестники землетрясений. — М. : Наука, 1992. — 192 с. — EDN: [KXLOKT](#).
- Соболев Г. А. и Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестники. — М. : Наука, 2003. — С. 269. — EDN: [RVEBFL](#).
- Федотов С. А. Сильные камчатские землетрясения 1971 года. — Владивосток : Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР, 1975. — 156 с.
- Федотов С. А. и Соломатин А. В. Долгосрочный сейсмический прогноз (ДССП) для Курило-Камчатской дуги на VI 2019-V 2024 гг.; свойства предшествующей сейсмичности в I 2017-V 2019 гг. Развитие и практическое применение метода ДССП // Вулканология и сейсмология. — 2019. — № 6. — С. 6–22. — <https://doi.org/10.31857/s0203-0306201966-22>.
- Чебров В. Н., Кугаенко Ю. А., Абубакиров И. Р. и др. Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с $K_s = 15.7$, $M_w = 7.2$, $I = 6$ (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. — 2016. — 1(29). — С. 5–16. — EDN: [VSNTCB](#).
- Чебров В. Н., Салтыков В. А. и Серафимова Ю. К. Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998-2009 гг. — М. : Светоч Плюс, 2011. — 304 с.
- King R. W. P. and Smith G. S. Antennas in matters: fundamentals, theory and applications. — Cambridge, MA : MIT Press, 1981. — 875 p.

- Nur A. Dilatancy, pore fluids, and premonitory variations of ts/tp travel times // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1972. — Vol. 62, no. 5. — P. 1217–1222. — <https://doi.org/10.1785/bssa0620051217>.
- Sholz C. H., Sykes L. R. and Aggarwal Y. P. Earthquake Prediction: A Physical Basis // Science. — 1973. — Vol. 181, no. 4102. — P. 803–810. — <https://doi.org/10.1126/science.181.4102.803>.
- Yamazaki Y. Tectonoelectricity // Geophysical Surveys. — 1977. — Vol. 3, no. 2. — P. 123–142. — <https://doi.org/10.1007/bf01449189>.

APPROACHES TO SHORT-TERM PREDICTION OF SEISMIC HAZARD FOR THE AREA OF AVACHA BAY (KAMCHATKA)

V. A. Gavrilov^{*} , Yu. Yu. Buss , E. V. Poltavtseva , and Yu. V. Morozova 

Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

****Correspondence to:** Valery Gavrilov, vgavr1403@mail.ru

The article summarizes the experience of many years of research related to the creation of a geophysical system capable of providing sufficiently effective short-term prediction of seismic hazards for the Avacha Bay area, where the largest settlements of Kamchatka are located. The authors use an approach in which the main goal is not accurate short-term prediction of strong earthquakes, but a qualitative («low», «elevated», «significantly elevated») assessment of the current seismic hazard for the controlled area. Qualitative assessments of seismic hazard are based on the current results of continuous monitoring of the preparation of strong earthquakes in the Avacha Bay area, which can cause significant tremors in the Petropavlovsk-Kamchatsky area. This approach makes it possible to inform the authorities and structures of the Ministry of Emergency Situations in a timely manner if there are grounds for a significant probability of concussions of at least 5 points in the Petropavlovsk-Kamchatsky area for the next 2–4 weeks. Igor Dobrovolsky's consolidation model is used as a basic physical model for the preparation of strong Kamchatka earthquakes.

Keywords: seismic hazard prediction, active earthquake preparation phase, consolidation model, borehole measurement network, electrical resistivity.

Citation: Gavrilov V. A., Buss Yu. Yu., Poltavtseva E. V. , and Morozova Yu. V. (2025), Approaches to Short-Term Prediction of Seismic Hazard for the Area of Avacha Bay (Kamchatka), *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES5008, <https://doi.org/10.2205/2025ES001054>, EDN: VEJDLM

Received: August 12, 2025

Accepted: September 18, 2025

Published: September 26, 2025



© 2025. The Authors.

References

- Chebrov V. N., Kugaenko Yu. A., Abubakirov I. R., et al. The January 30th, 2016 Earthquake with $K_s = 15.7$, $M_w = 7.2$, $I = 6$ in the Zhupanovsky Region (Kamchatka) // Bulletin of Kamchatka Regional Association «Educational-Scientific Center». Earth Sciences. — 2016. — 1(29). — P. 5–16. — EDN: [VSNTCB](#) ; (in Russian).
- Chebrov V. N., Saltykov V. A. and Serafimova Yu. K. Earthquake Prediction in Kamchatka. Based on the work of the Kamchatka Branch of the Russian Expert Council on Earthquake Prediction, Seismic Hazard and Risk Assessment in 1998-2009. — M. : Svetoch Plyus, 2011. — 304 p. — (In Russian).
- Dobrovolskiy I. P. Theory of Tectonic Earthquake Preparation. — Moscow : USSR Academy of Sciences; Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, 1991. — 224 p. — (In Russian).
- Dobrovolskiy I. P. Mathematical Theory of Preparation and Prediction of a Tectonic Earthquake. — M. : FIZMATLIT, 2009. — 240 p. — EDN: [MUWSCF](#) ; (in Russian).
- Dolukhanov M. P. Radio Wave Propagation. Textbook for Universities. — M. : Svyaz', 1972. — 336 p. — (In Russian).
- Fedotov S. A. Strong Kamchatka Earthquakes of 1971. — Vladivostok : Institute of Volcanology, Far Eastern Scientific Center, USSR Academy of Sciences, 1975. — 156 p. — (In Russian).
- Fedotov S. A. and Solomatin A. V. Long-Term Earthquake Prediction (LTEP) for the Kuril-Kamchatka island arc, June 2019 to May 2024; Properties of Preceding Seismicity from January 2017 to May 2019. The Development and Practical Application of the LTEP Method // Journal of Volcanology and Seismology. — 2019. — Vol. 13, no. 6. — P. 349–362. — <https://doi.org/10.1134/S0742046319060022>.
- Gavrilov V. A. Method for Continuous Monitoring of Electrical Rock Resistivity // Seysmicheskie pribory. — 2013. — Vol. 49, no. 3. — P. 25–38. — EDN: [RZWZIH](#) ; (in Russian).

- Gavrilov V. A. Influence of Variable Electromagnetic Fields on Geoacoustic Processes: Empirical Patterns and Physical Mechanisms: Doctor thesis. — M. : Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, 2017. — 385 p. — EDN: [EOCKRK](#) ; (in Russian).
- Gavrilov V. A., Buss Yu. Yu., Deshcherevskiy A. V., et al. From Monitoring Preparation Processes to Short-Term Prediction of Strong Kamchatka Earthquakes // Problems of Complex Geophysical Monitoring of Seismically Active Regions. Proceedings of the Ninth All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation, September 24-30, 2023. — Petropavlovsk-Kamchatsky, 2023a. — P. 216–221. — (In Russian).
- Gavrilov V. A., Buss Yu. Yu., Solomatin A. V., et al. On the Choice of a Basic Physical Model for the Processes Preceding of Strong Kamchatka Earthquakes // Volcanism and Related Processes. Proceedings of the XXVII annual scientific conference dedicated to the Volcanologist Day. — Petropavlovsk-Kamchatsky, 2024. — P. 165–168. — EDN: [MBEUTP](#) ; (in Russian).
- Gavrilov V. A., Deshcherevskii A. V., Vlasov Yu. A., et al. Network of Multidisciplinary Borehole Measurements at the Petropavlovsk-Kamchatsky Geodynamic Testing Area // Seismic Instruments. — 2022. — Vol. 58, no. 2. — P. 121–138. — <https://doi.org/10.3103/S0747923922020050>.
- Gavrilov V. A., Lander A. V. and Morozova Yu. V. Comparison of Borehole Geoacoustic and Electromagnetic Data with Data of Earthquake Focal Mechanisms // Doklady Earth Sciences. — 2019. — Vol. 484, no. 2. — P. 217–221. — <https://doi.org/10.1134/S1028334X19020193>.
- Gavrilov V. A., Poltavtseva E. V., Titkov N. N., et al. Monitoring of Changes in the Stress-Strain State of Geoenvironment at the Petropavlovsk Geodynamic Testing Site Based on the Multi-Instrumental Borehole and GPS Data During the Active Phase of Preparing the Zhupanovsky Earthquake (January 30, 2016, Mw 7.2) // Geodynamics & Tectonophysics. — 2023b. — Vol. 14, no. 6. — P. 0732. — <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-6-0732>. — (In Russian).
- King R. W. P. and Smith G. S. Antennas in matters: fundamentals, theory and applications. — Cambridge, MA : MIT Press, 1981. — 875 p.
- Kissin I. G. Fluids in the Earth's Crust: Geophysical and Tectonic Aspects. — M. : Nauka, 2009. — 328 p. — (In Russian).
- Koronovskii N. V., Zakharov V. S. and Naimark A. A. The Unpredictability of Strong Earthquakes: New Understanding and Solution of the Problem // Moscow University Geology Bulletin. — 2021. — Vol. 76, no. 4. — P. 366–373. — <https://doi.org/10.3103/S0145875221040074>.
- Nur A. Dilatancy, pore fluids, and premonitory variations of ts/tp travel times // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1972. — Vol. 62, no. 5. — P. 1217–1222. — <https://doi.org/10.1785/bssa0620051217>.
- Parkhomenko E. I. Electrical Properties of Rocks. — M. : Nauka, 1965. — 164 p. — (In Russian).
- Parkhomenko E. I. Geoelectrical Properties of Minerals and Rocks at High Pressures and Temperatures. — M. : Nauka, 1989. — 198 p. — (In Russian).
- Parkhomenko E. I. and Bondarenko A. T. Influence of Unilateral Pressure on the Electrical Resistance of Rocks // Izvestiya AN SSSR. Seriya geofizicheskaya. — 1960. — No. 2. — P. 326–332. — (In Russian).
- Riznichenko Yu. V. Dimensions of the Crustal Earthquake Source and Seismic Moment // Research on the Physics of Earthquakes. — M. : Nauka, 1976. — P. 9–26. — (In Russian).
- Sholz C. H., Sykes L. R. and Aggarwal Y. P. Earthquake Prediction: A Physical Basis // Science. — 1973. — Vol. 181, no. 4102. — P. 803–810. — <https://doi.org/10.1126/science.181.4102.803>.
- Sidorin A. Ya. Earthquake Precursors. — M. : Nauka, 1992. — 192 p. — EDN: [KXLOKT](#) ; (in Russian).
- Sobolev G. A. and Ponomarev A. V. Physics of Earthquakes and Precursors. — M. : Nauka, 2003. — P. 269. — EDN: [RVEBFL](#) ; (in Russian).
- Yamazaki Y. Tectonoelectricity // Geophysical Surveys. — 1977. — Vol. 3, no. 2. — P. 123–142. — <https://doi.org/10.1007/bf01449189>.