

Среднесрочные и краткосрочные индикаторы заключительной стадии подготовки крупных сейсмических событий в зоне Авачинского залива

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

Medium- and short-term indicators of the final stage of preparation for major seismic events in the Avacha Bay area

Gavrilov V.A., Buss Yu.Yu., Poltavtseva E.V., Morozova Yu.V., Sagaryarov I.A.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: vgavr1403@mail.ru*

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

Представлены результаты анализа данных комплексных скважинных измерений, полученные на заключительной стадии подготовки Камчатского мегаземлетрясения 29.07.2025 г. Выделены предвестниковые аномалии различного временного масштаба, присущие подготовке сильнейших ($M_w \geq 7.7$) землетрясений.

Согласно данным различных источников, у восточного побережья Камчатки с 1737 г. по настоящее время произошло не менее семи неглубоких землетрясений с магнитудой $M \geq 8.0$. Таким образом, средняя повторяемость сильнейших землетрясений в зоне восточного побережья Камчатки достаточно высокая – в среднем менее 40 лет. Это означает актуальность задачи создания в указанной зоне достаточно эффективной системы средне- и краткосрочного прогнозирования сейсмической опасности, способной, в том числе, выделять подготовку сильнейших ($M_w \geq 7.7$) землетрясений [2]. В этой связи, результаты комплексных геофизических наблюдений, полученные на заключительной стадии подготовки Камчатского мегаземлетрясения ($M_w = 8.8$), произошедшего 29 июля 2025 г. в зоне Авачинского залива, крайне важны для решения такой задачи.

Созданная в районе г. Петропавловск-Камчатский Сеть комплексных скважинных измерений в настоящее время обеспечивает непрерывный мониторинг процессов подготовки сильных землетрясений в зоне Авачинского залива по семи видам скважинных измерений [3]. В их число входят, в том числе, электромагнитные измерения с подземными электрическими антеннами; геоакустические измерения на глубинах до 1000 м; мониторинг изменений газонасыщенности и удельной электропроводности воды скважин; измерения температуры и уровня воды скважин. Как показывает анализ результатов исследований, подготовка Камчатского мегаземлетрясения надежно проявилась в 25-летних данных комплексных скважинных наблюдений в зоне Авачинского залива. При этом можно выделить наиболее важные результаты, отличающие заключительную стадию подготовки Камчатского мегаземлетрясения от подготовки менее сильных ($M_w < 7.7$) сейсмических событий, произошедших в Авачинском заливе до 29.07.2025 г.

Результаты мониторинга удельного сопротивления геосреды

Наиболее полно процессы подготовки Камчатского мегаземлетрясения отразились в результатах мониторинга удельного электрического сопротивления (УЭС) геосреды. Это объясняется очень высокой тензочувствительностью использованного в этом случае разработанного авторами «ЭМИ-метода» мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния геосреды [1], а также 20-летней продолжительностью временных рядов УЭС. Данные мониторинга изменений УЭС геосреды показали формирование рекордной по своим параметрам аномалии УЭС геосреды в зоне Авачинского залива за несколько лет до мегаземлетрясения (рис. 1).

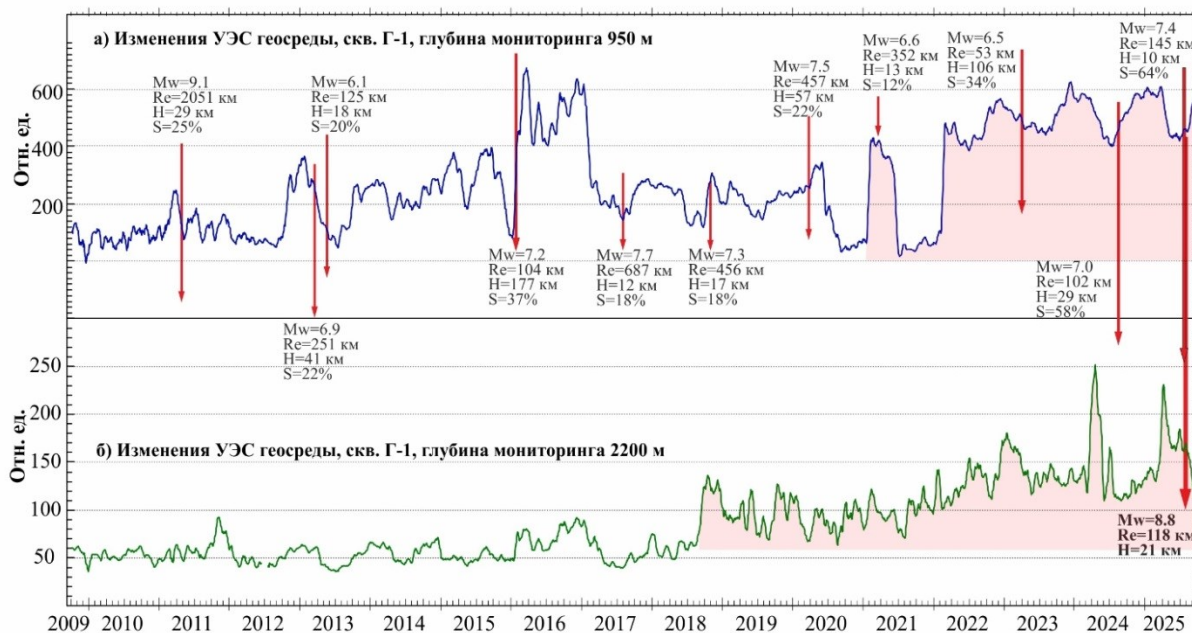


Рис. 1. Аномалии УЭС геосреды в зоне Авачинского залива по данным мониторинга на глубинах до 950 м и 2200 м.

По данным рис. 1 можно видеть, что накануне Камчатского мегаземлетрясения в зоне Авачинского залива сформировалась рекордная по своим параметрам (амплитуда, продолжительность) аномалия УЭС геосреды (отмечено розовым фоном). Для глубины мониторинга 2200 м аномалия впервые проявилась в сентябре 2018 г., а для глубины 950 м – в начале 2021 г. Подчеркнем, что ранее за 20 лет комплексных скважинных измерений в зоне Авачинского залива формирование подобных по масштабу аномалий в рядах УЭС не было отмечено. В рамках модели консолидации [4] такие результаты означают формирование трехмерной консолидированной неоднородности геосреды очень больших размеров. Своих максимальных размеров неоднородность достигает перед землетрясением, при этом размеры неоднородности накануне землетрясения близки к размерам будущего очага. В этом случае связь между размерами неоднородности и магнитудой землетрясения можно оценить выражением $L=10^{0.44M-1.29}$, где M – моментная магнитуда [5].

Форшоки Камчатского мегаземлетрясения

В 2024-2025 гг. в Авачинском заливе накануне Камчатского мегаземлетрясения произошло два сильных землетрясения – Шипунское-1 (17.08.2024, Mw=7.0) и Шипунское-2 (20.07.2025, Mw=7.4), вызвавших шестибалльные сотрясения в г. Петропавловск-Камчатский (см. рис. 1). Результаты деформационного мониторинга, отражающие подготовку указанных землетрясений, представлены на рис. 2. Можно видеть, что по характеру подготовки землетрясения Шипунское-1 и Шипунское-2 практически идентичны. При этом следует подчеркнуть, что продолжительность аномалий УЭС, предвещающих указанные землетрясения, были значительно меньше продолжительности аналогичных аномалий перед другими землетрясениями с такими же магнитудами, произошедшими в зоне Авачинского залива в 2005-2024 гг. В то же время скорости изменений аномалий УЭС, предвещающих землетрясения Шипунское-1 и Шипунское-2, были значительно выше (см. рис. 1). Кроме этого, на постсейсмических стадиях указанных землетрясений происходило лишь небольшое уменьшение УЭС геосреды, а уровень основной аномалии УЭС в зоне Авачинского залива при этом оставался аномально высоким (см. рис. 1). Такие результаты в рамках модели консолидации указывают на то, что землетрясения Шипунское-1 и Шипунское-2 не были «самостоятельными» сейсмическими событиями, а являлись маркерами

(индикаторами) заключительной стадии процесса подготовки гораздо более мощного сейсмического события – Камчатского мегаземлетрясения, произошедшего спустя 9 суток после землетрясения Шипунское-2.

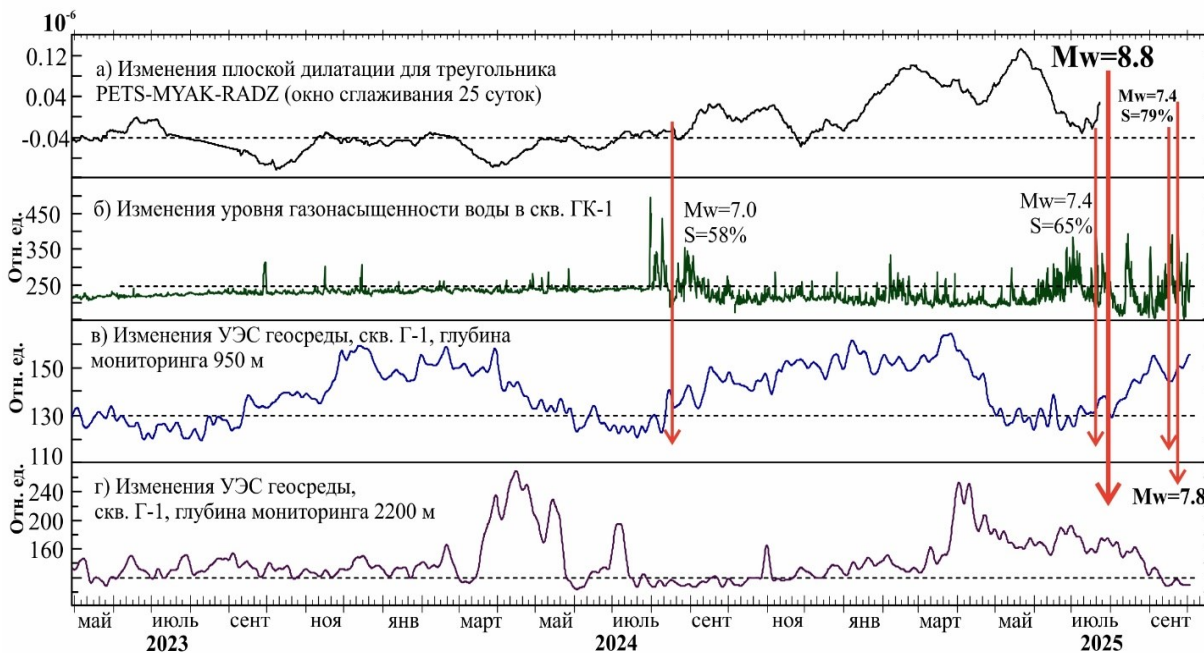


Рис. 2. Отражение заключительной стадии подготовки Камчатского мегаземлетрясения в результатах комплексных скважинных измерений и деформационного мониторинга.

Изменения газонасыщенности воды скважин

Среди результатов, приводимых на рис. 2, обращают на себя внимание аномальные по своему уровню изменения газонасыщенности воды скв. ГК-1 (рис. 2б), имевшие место накануне обоих землетрясений. Суть разработанного авторами метода непрерывного мониторинга изменений газонасыщенности воды скважин заключается в регистрации шумов дегазации, возникающих при выходе пузырьков газа (прежде всего, метана) из воды скважины в атмосферу, с помощью гидрофона, устанавливаемого в измерительную скважину на глубину порядка 200-300 м [3]. Измерения проводятся совместно с мониторингом изменений удельной электропроводности воды скважины. Согласно модели консолидации, результаты таких измерений отражают процесс распада жесткой неоднородности и формирование очага будущего землетрясения. Учитывая, что подобные по амплитуде и продолжительности аномалии в рядах мониторинга изменений газонасыщенности воды скважин ранее не отмечались, такой характер в данных, по мнению авторов, также можно считать индикаторами заключительной стадии процесса подготовки Камчатского мегаземлетрясения. Отметим, что появление указанных аномалий накануне землетрясений Шипунское-1 и Шипунское-2 позволило авторам сделать оправдавшиеся краткосрочные прогнозы этих землетрясений.

Заключение

Проведенные исследования позволили установить, что подготовка Камчатского мегаземлетрясения 2025 г. сопровождалась предвестниковыми аномалиями различного временного масштаба, присущими подготовке сильнейших ($M_w \geq 7.7$) землетрясений. К таким аномалиям можно отнести:

1) Формирование в контролируемой зоне долговременных (5-10 лет и более) значительных по амплитуде аномалий УЭС геосреды.

2) Регистрация на фоне продолжительных аномалий УЭС геосреды сильных ($M_w \geq 7.0$) землетрясений, значительно отличающихся по характеру подготовки от предыдущих землетрясений с близкими магнитудами.

3) Появление результатов, указывающих в рамках модели консолидации на начало распада жесткой неоднородности очень больших размеров.

Исследования выполнены в рамках госзадания ИВиС ДВО РАН (тема № FWME-2024-0010) и госзадания КамГУ им. Витуса Беринга (тема № FZSS-2025-0007).

Список литературы

1. *Гаврилов В.А.* Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы: эмпирические закономерности и физические механизмы: дис. на соиск. уч. ст. докт. физ.-мат. наук. Москва, 2017. 385 с.
2. *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. <https://doi.org/10.2205/2025ES001054>
3. *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.
4. *Добровольский И.П.* Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 240 с.
5. *Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9-26.