

УДК 550.348

О ПРОЯВЛЕНИИ ПРЕДВЕСТНИКОВ СИЛЬНЫХ ($M_w \geq 6.6$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ

© 2025 г. Г. Н. Копылова*, Ю. К. Серафимова, В. А. Касимова

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН”,
бульвар Пийна, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

*e-mail: gala@emsd.ru

Поступила в редакцию 15.05.2024 г.

После доработки 15.11.2024 г.

Принята к публикации 12.12.2024 г.

Приводится обзор работ по поискам предвестников землетрясений в районе п-ова Камчатка в сравнении с главными элементами сейсмического режима территории за период детальных сейсмологических наблюдений в 1962–2022 гг. — кумулятивным графиком выделения сейсмической энергии и произошедшими сильными землетрясениями. Особенностью наблюдательной сети является расположение места большинства “несейсмологических” видов наблюдений за предвестниками на небольшой территории Петропавловск-Камчатского полигона (ПКП). Анализ 14-ти видов сейсмических, геофизических и геохимических предвестников семи мелко- и среднефокусных землетрясений 2005–2022 гг. с $M_w = 6.6–7.7$ показал рост числа предвестников N с увеличением параметра M_w/lgd_h (где d_h — гипоцентрального расстояния до центра ПКП (км)), характеризующего относительную интенсивность подготовки землетрясений в районе ПКП. Такая зависимость между N и M_w/lgd_h прослеживается для межплитовых (субдукционных) землетрясений в Камчатской части Курило Камчатской островной дуги, что согласуется с проявлениями предвестников 1987–2004 гг. и отражает свойство их комплексного проявления перед землетрясениями, наиболее сильными и близкими к территории ПКП. Перед такими событиями эффект комплексного проявления предвестников (ЭКПП) наблюдался у не менее 80% предвестников из всех рассматриваемых в настоящей работе. Для таких землетрясений соотношение между гипоцентральным расстоянием d_h и размером очага L (км) составляет $d_h/L = 3.8–1.6$, т.е. ЭКПП характерен для ближней и средней (промежуточной) зон очага будущего землетрясения. На примере четырех отдельных видов предвестников показано, что их пороговые величины d_h/L для событий с $M_w \geq 6.6$ составляют 5.0–8.5. Показано, что если при сейсмическом прогнозировании ЭКПП диагностирован в режиме реального времени, то, используя установленную для него пороговую величину $d_h/L \leq 3.8$, можно существенно ограничить возможный диапазон расстояний от будущего сильного землетрясения до района ПКП и Петропавловск-Елизовской городской агломерации с большей точностью, чем при использовании данных по отдельным видам предвестников.

Ключевые слова: землетрясения, предвестники, магнитуда, прогноз землетрясений, Камчатка

DOI: 10.31857/S0203030625010062, EDN: GIODUP

ВВЕДЕНИЕ

Проблема прогноза землетрясений является одной из широко обсуждаемых в науках о Земле в XX–XXI вв. Перспективы прогноза сильных землетрясений связаны с обнаружением их предвестников в изменениях сейсмичности,

деформациях земной коры, изучением параметров геофизических и геохимических полей.

Район п-ова Камчатка — один из наиболее сейсмоопасных регионов России. Здесь в течение нескольких последних десятилетий проводятся исследования по поиску предвестников землетрясений [Гордеев и др., 2013].

В настоящей работе приводится обзор таких исследований в сравнении с главными элементами сейсмического режима территории за период детальных сейсмологических наблюдений в 1962–2022 гг. Основное внимание уделяется ретроспективной оценке эффекта комплексного проявления предвестников, его связи с параметрами последующих землетрясений и перспективам его практического применения при прогнозировании сильных землетрясений на Камчатке.

СЕЙСМИЧНОСТЬ

Вблизи восточного побережья Камчатки возможны землетрясения с величинами магнитуд до 8–9, которые сопровождаются цунами и сотрясениями на побережье до 9–10 баллов по шкале MSK-64 [Медведев и др., 1965], что может привести к катастрофическим последствиям для населения и инфраструктуры урбанизированных территорий Камчатского края. Наиболее уязвимым для землетрясений является район Петропавловск-Елизовской агломерации с населением около 250 тыс. человек. Города Петропавловск-Камчатский, Елизово и Вилучинск расположены вблизи побережья Авачинского залива и находятся в зоне 9-балльных сотрясений согласно карте Общего сейсмического районирования РФ [Уломов и др., 2016]. При возникновении 9-балльного землетрясения здесь возможны безвозвратные потери среди населения и разрушение зданий и сооружений. Поэтому прогнозирование землетрясений с величинами магнитуд порядка 7 и более, которые могут сопровождаться сотрясениями до 7–9 баллов в этом районе, является необходимым для организации превентивных мероприятий – сейсмоукрепления домов и сооружений, реализации комплекса мер по предотвращению и ликвидации последствий.

В соответствии с актуальными каталогами землетрясений для района п-ва Камчатка ([Гусев, 2008; Гусев, Шумилина, 2004], <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map>, <http://sdis.emsd.ru>), за период детальных сейсмологических наблюдений с 1962 по 2022 г. средняя повторяемость землетрясений с $M_w \geq 7.5$ составляет 0.17 год^{-1} (10 событий за 60 лет), т.е. 1 событие в 6 лет (рис. 1а, табл. 1).

Главные особенности сейсмического режима в зоне ответственности Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН ($\varphi = 49\text{--}62^\circ \text{ с.ш.}$, $\lambda = 152\text{--}172^\circ \text{ в.д.}$) [Левина и др., 2012] отражаются в поведении кумулятивного графика выделения сейсмической энергии (см. рис. 1в, верхний график) в сравнении с произошедшими землетрясениями с $M_w \geq 6.8$, средняя повторяемость которых составляет 0.47 событий в год (28 событий за 60 лет), т.е. примерно одно событие в два года.

Из сопоставления графиков (см. рис. 1в) следует связь всплесков выделения сейсмической энергии с возникновением землетрясений с величинами $M_w \geq 7.5$. В 2008 и 2013 гг. рост выделения сейсмической энергии был обусловлен возникновением сильных землетрясений в верхней мантии на глубинах 610–630 км (см. табл. 1, № 7 ($M_w = 7.7$) и № 8 ($M_w = 8.3$)). Такие землетрясения, из-за глубокого расположения их очагов, сопровождались незначительными поверхностными проявлениями. Интенсивность сотрясений на территории п-ова Камчатка при таких землетрясениях составляла $I_{\text{MSK-64}} \leq 5$ баллов (см. табл. 1). То есть такие землетрясения, несмотря на их значительный энергетический эффект, не сопровождались катастрофическими последствиями для инфраструктуры, населения и природной среды Камчатского края, в то время как землетрясения с $M_w \geq 7.5$ в коре на глубинах $H = 7\text{--}48$ км сопровождались сотрясениями в плейстосейстовых областях интенсивностью $I_{\text{MSK-64}} \geq 5\text{--}6$ баллов. Во время Усть-Камчатского, Петропавловского, Кроноцкого и Олюторского землетрясений интенсивность сотрясений на территории Камчатского края достигала 7–9 баллов [Константинова, 2020; Сильные ..., 1975]. При этих землетрясениях в отдельных населенных пунктах отмечались конструктивные повреждения зданий и сооружений, негативные инженерно-геологические процессы – разжижение и просадка грунта, обвалы и осыпи. Именно такие мелко- и среднефокусные сейсмические события являются первостепенным объектом сейсмического прогнозирования с целью заблаговременной оценки времени и места их возникновения и организации превентивных мероприятий для уменьшения негативных последствий.

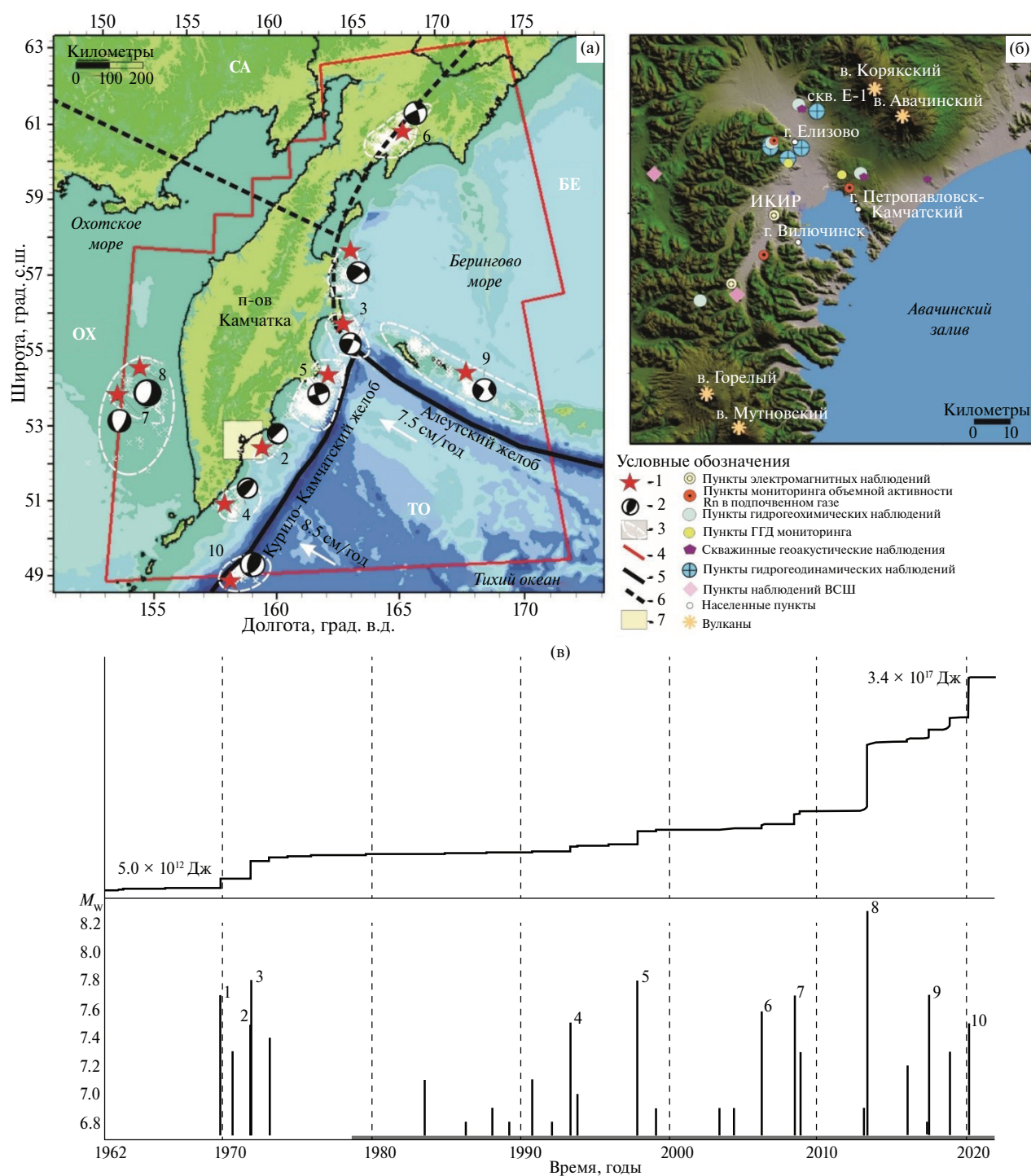


Рис. 1. Район п-ова Камчатка, расположение эпицентров землетрясений с $M_w \geq 7.5$ и их очагов по афтершокам первых суток (показаны белыми крестиками) за период 1962–2022 гг. (а): 1 – эпицентры землетрясений с $M_w \geq 7.5$ (нумерацию землетрясений см. в табл. 1), 2 – механизмы очагов по данным каталога CMT [http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html, дата обращения 14.10.2023], 3 – очаги землетрясений по афтершокам первых суток, 4 – границы зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН, 5 – границы литосферных плит Тихоокеанской океанической (ТО) и континентальных плит Охотоморской (ОХ), Берингской (БЕ) и Северо-Американской (СА) [Гордеев и др., 2015; Argus, Gordon, 1991; Kozhurin, 2007], 6 – предполагаемые границы литосферных плит, 7 – территория Петропавловск-Камчатского полигона; схема расположения пунктов по различным видам наблюдений на территории Петропавловск-Камчатского полигона (б); кумулятивный график выделения сейсмической энергии в диапазоне глубин 0–700 км в 1962–2021 гг. (верхняя панель) и распределение во времени землетрясений с $M_w \geq 6.8$ (нижняя панель: цифрами обозначены землетрясения с $M_w \geq 7.5$, номера соответствуют номерам в табл. 1) (в). Жирной горизонтальной линией показан период проведения работ на территории ПКП по поиску предвестников землетрясений с использованием комплекса методов (пояснения см. в тексте).

Таблица 1. Землетрясения 1969–2022 гг. с $M_w \geq 7.5$, произошедшие в Камчатском регионе в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН ($\phi = 49 - 62$ с.ш., $\lambda = 152 - 172$ в.д.)

№ п/п	Дата	Время ч:мин:с	Широта, ф, град. с.ш.	Долгота, λ , град. в.д.	Глубина, км	M_w^*	M_w по [ГШ, 2004; Г, 2008]	d_e^{**} (d_h), км	$M/\lg d_h$	Балл ^{***} , MSK-64	Примечание
1	22.11.1969	23:09:31	57.93	164.00	40	7.4	7.7	640 (641)	2.74	6–7 Усть-Камчатск; 4–5 Оссора; 4 Никольское; 3–4 Палана; 3 Эссо	Озерновское ЗТ
2	24.11.1971	19:35:29	52.71	159.47	110	7.3	7.5	66 (128)	3.56	7 ПТР, 6 Елизово; 5–6 Никольское; 5 Усть-Камчатск; 4–5 Мильково; 4 Усть-Большеречк; 3–4 Соболево	Петропавловское ЗТ
3	15.12.1971	08:29:55	55.97	163.35	20	7.6	7.8	447 (448)	2.94	6–7 Усть-Камчатск, Никольское; 3–4 Мильково, ПТР; 3 Тигиль	Усть-Камчатское ЗТ
4	08.06.1993	13:03:37	51.20	157.80	40	7.5	7.5	206 (209)	3.23	5 Вилучинск; ПТР; Елизово; 4 Усть-Большеречк, Мильково; 3 Усть-Камчатск; 2 Никольское	ЗТ на юге Камчатки
5	05.12.1997	11:26:51	54.64	162.55	10	7.8	7.8	315 (315)	3.12	5–6 ПТР; 5 Усть-Камчатск, Елизово; 4 Никольское, Мильково; 3 Эссо, Тигиль, Соболево; 2 Усть-Большеречк	Кроноцкое ЗТ

Таблица 1. Окончание

6	20.04.2006	23:25:02	60.98	167.37	1	7.6	7.6	1025 (1025)	2.52	9 Корф Юлоторское ..., 2007], 8–9 Тилички; 6 Каменское; 5–6 Оссора; 4–5 Палана; 2 Усть-Камчатск	Олюторское ЗТ
7	05.07.2008	02:12:04	53.99	152.84	576	7.7		394 (698)	2.71	4 Усть-Камчатск; 3–5 ПТР; 3–4 Усть- Большерецк; 3 Елизово; 3 Вилучинск	Мантийное ЗТ с эпицентром в Охотском море
8	24.05.2013	05:44:49	54.75	153.79	630	8.3		368 (730)	2.90	5 ПТР; 4–5 Елизово, Вилучинск, Усть-Камчатск; 4 Мильково, Тигиль, Никольское; 3–4 Усть- Большерецк, Эссо, Палана; 3 Соболево; 2 Оссора	Мантийное Охотоморское ЗТ в эпицентром в Охотском море
9	17.07.2017	23:34:14	54.35	168.90	7	7.7		690 (691)	2.71	5–6 Никольское; 3 Усть-Камчатск; 2–3 ПТР	Ближне-Алеутское ЗТ
10	25.03.2020	02:49:21	49.11	158.08	48	7.5		430 (433)	2.84	6–7 Северо- Курильск; 4–5 ПТР; 2–3 Никольское	Парамуширское ЗТ

Примечание. * – магнитуда по данным каталога NEIC [https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map, дата обращения 05.05.2024 г.]; ** – эпицентральное расстояние до г. Петропавловск-Камчатский (53.0° с.ш., 158.6° в.д.), в скобках указано гипотендральное расстояние; *** – балл землетрясения по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН [http://sdis.emsd.ru, дата обращения 05.05.2024 г.]; ПТР – г. Петропавловск-Камчатский; ГШ, 2004 – [Гусев, Шумилина, 2004]; Г, 2008 – [Гусев, 2008]; жирным шрифтом выделены землетрясения, предвестники которых рассматриваются в настоящей статье.

ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

С 1961 г. на Камчатке ведутся детальные сейсмические наблюдения и разрабатываются методы использования получаемых данных для прогноза сильных землетрясений. С 1977–1979 гг. на постоянной основе проводятся гидрогеохимические, гидрогеодинамические и другие виды наблюдений. Именно с этого времени, т.е. с конца 1970-х гг. начался этап поиска предвестников землетрясений по комплексу методов. В 1990–2000 гг. увеличивалось разнообразие способов наблюдения за предвестниками, но основное число пунктов наблюдений было по-прежнему сосредоточено на территории Петропавловск-Камчатского полигона (ПКП), включающего район Петропавловск-Елизовской агломерации (см. рис. 1а, 1б).

В работах [Чебров и др., 2011, 2013в; Копылова, Серафимова, 2009; Серафимова, Копылова, 2010] приведено описание сетей наблюдения за предвестниками, методик их выявления, используемых для прогнозирования землетрясений, а также ретроспективные оценки сейсмопрогностической эффективности отдельных методов по состоянию на первое десятилетие XXI в. Из этих работ следовал вывод о недостаточной эффективности отдельных методов для прогнозирования камчатских землетрясений с $M \geq 6.0$ и обеспечения вероятностной оценки среднесрочных и краткосрочных прогнозов сильных землетрясений.

В работах [Копылова, Серафимова, 2009; Серафимова, Копылова, 2010] было показано, что в условиях существующей сети прогностических наблюдений в районе ПКП предвестники проявлялись по комплексу методов перед землетрясениями с $M = 6.6–7.8$, произошедшими южнее полуострова Кроноцкий (55° с.ш.). Для таких землетрясений отношение величины магнитуды M_w к логарифму гипоцентрального расстояния до центра ПКП d_h (км) составляло $M_w/\lg d_h \geq 3.0$.

Во втором десятилетии XXI в. сейсмопрогностические исследования в районе п-ова Камчатка продолжали развиваться. Оценку сейсмической опасности, представленную в виде долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных прогнозов землетрясений, осуществляли специализированные советы по прогнозу

землетрясений путем экспертного анализа всех видов сейсмопрогностических данных [Чебров и др., 2011; Фирстов и др., 2016]. Большая часть видов наблюдений и сейсмопрогностических методов, на основе которых проводилось определение предвестников, реализовывались в Камчатском филиале Геофизической службы РАН. Исследования по прогнозированию землетрясений с предоставлением регулярных сейсмопрогностических заключений для Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) также осуществлялись Институтом космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН, Институтом физики Земли (ИФЗ) РАН, Институтом вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН, подразделениями Министерства природных ресурсов, проводящими мониторинг опасных эндогенных геологических процессов на территории Камчатского края [Чебров и др., 2021].

По некоторым видам наблюдений, в частности по измерениям объемной активности радона в почвенном газе, наблюдениям за высокочастотным сейсмическим шумом (ВСШ), гидрогеологическим наблюдениям в скважинах на территории ПКП, были обобщены результаты многолетних работ, направленных на обнаружение предвестников землетрясений, и уточнены оценки сейсмопрогностической эффективности соответствующих видов предвестников для прогнозирования землетрясений в районе п-ова Камчатка [Салтыков, 2017; Фирстов, Макаров, 2018; Копылова, Болдина, 2023; Kopylova, Boldina, 2020].

Разрабатывались и внедрялись в практику сейсмопрогностических исследований новые методы обработки данных каталога землетрясений Камчатки [Салтыков, 2011] и ведения непрерывных сейсмических записей на сети широкополосных станций территории п-ова Камчатка [Касимова и др., 2018; Копылова и др., 2021; Любушин и др., 2015; Kopylova et al., 2022], нацеленные на увеличение области прогнозирования землетрясений и сейсмопрогностическую оценку всей территории Камчатского края по сейсмологическим данным. В работе [Салтыков, Воропаев, 2017] рассматривалась возможность комплексирования

сейсмопрогностических данных по различным методам прогноза. В работе [Копылова, 2013] было предложено дополнить практику экспертных оценок сейсмопрогностических данных количественным параметром, характеризующим относительное число методов, по которым фиксировались сигналы, свидетельствующие о возможности возникновения сильного землетрясения. Полагалось, что изучение поведения такого параметра при сопоставлении с произошедшими землетрясениями может быть полезным при разработке формализованного подхода к анализу комплексного проявления предвестников.

В настоящей работе, в продолжение сейсмопрогностических исследований, освещенных в публикациях 2009–2016 гг., рассматриваются по литературным и авторским данным предвестники мелко- и среднефокусных землетрясений 2005–2022 гг. с магнитудами $M_w \geq 6.6$, произошедших в Камчатской части Курило-Камчатской островной дуги и в области ее сочленения с Алеутской островной дугой (см. рис. 1а, рис. 2).

Изучение эффекта комплексного проявления предвестников проводилось по данным о проявлении пяти видов предвестников сильных, $M_w \geq 6.6$, землетрясений 1987–2004 гг. [Серафимова, Копылова, 2010] совместно с результатами анализа 14-ти видов предвестников землетрясений 2005–2022 гг., представленными в настоящей работе. Под “эффектом комплексного проявления предвестников” (ЭКПП) понимается проявление перед отдельным землетрясением не менее 80% видов предвестников из всех рассматриваемых, т.е. не менее четырех видов предвестников из пяти для периода 1987–2004 гг. и не менее 11 видов из 14-ти для периода 2005–2022 гг.

В качестве параметров, характеризующих интенсивность подготовки отдельных землетрясений в районе ПКП, используются отношения M_w/lgd_h и d_h/L , где d_h – гипоцентрально-расстояние до центра ПКП (км), L – размер очага землетрясения (км). Параметр M_w/lgd_h , ранее использовавшийся в работах [Копылова, Серафимова, 2009; Серафимова, Копылова, 2010], в настоящей работе приводится для сохранения преемственности с предшествующими результатами изучения предвестников

камчатских землетрясений. Параметр d_h/L показывает относительную удаленность наблюдательных пунктов на территории ПКП от гипоцентра землетрясения в размерах его очага. Этот параметр имеет более ясный физический смысл по сравнению с параметром M_w/lgd_h и ранее использовался авторами при анализе гидрогеодинамических и гидрогеохимических предвестников камчатских землетрясений [Копылова и др., 2022; Kopylova, Boldina, 2020]. Для всех рассматриваемых землетрясений расчет размеров очагов L проводился по формуле $lgL = 0.43M - 1.27$ [Завьялов, Зотов, 2021].

В настоящей работе данные о землетрясениях 1962–2022 гг. были уточнены, величины их магнитуд приводятся в соответствии с каталогом землетрясений USGS/NEIS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map>). Данные о расположении и глубинах гипоцентров землетрясений приводятся по Региональному каталогу землетрясений Камчатки, составленному КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://sdis.emsd.ru>).

ПРОЯВЛЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

На рис. 1 выделен период работ по поиску предвестников землетрясений в районе п-ова Камчатка с использованием комплекса методов. При этом очаги землетрясений 1983–1991 гг. с магнитудами 6.8–7.1 (см. рис. 1в, нижняя панель) находились на значительном удалении от ПКП и величина отношения M_w/lgd_h для них составляла менее 3.0. Поэтому наиболее вероятной причиной отсутствия эффектов комплексного проявления предвестников перед большинством сильных землетрясений 1983–1991 гг. является значительная удаленность сейсмических событий от территории ПКП.

Лишь перед землетрясением 6 октября 1987 г. с магнитудой $M_w = 6.5$ ($M_s = 6.6$ по определениям ФИЦ ЕГС РАН [Зобин и др., 1990]), произошедшем на расстоянии $d_h = 115$ км от ПКП ($M/lgd_h = 3.2$), наблюдался ЭКПП по четырем видам предвестников из пяти рассматриваемых [Серафимова, Копылова, 2010]. Перед этим землетрясением предвестники в изменениях уровня воды в скважине Е-1 [Копылова, 2001], химического состава воды из двух самоизливающихся скважин [Копылова и др., 1994;

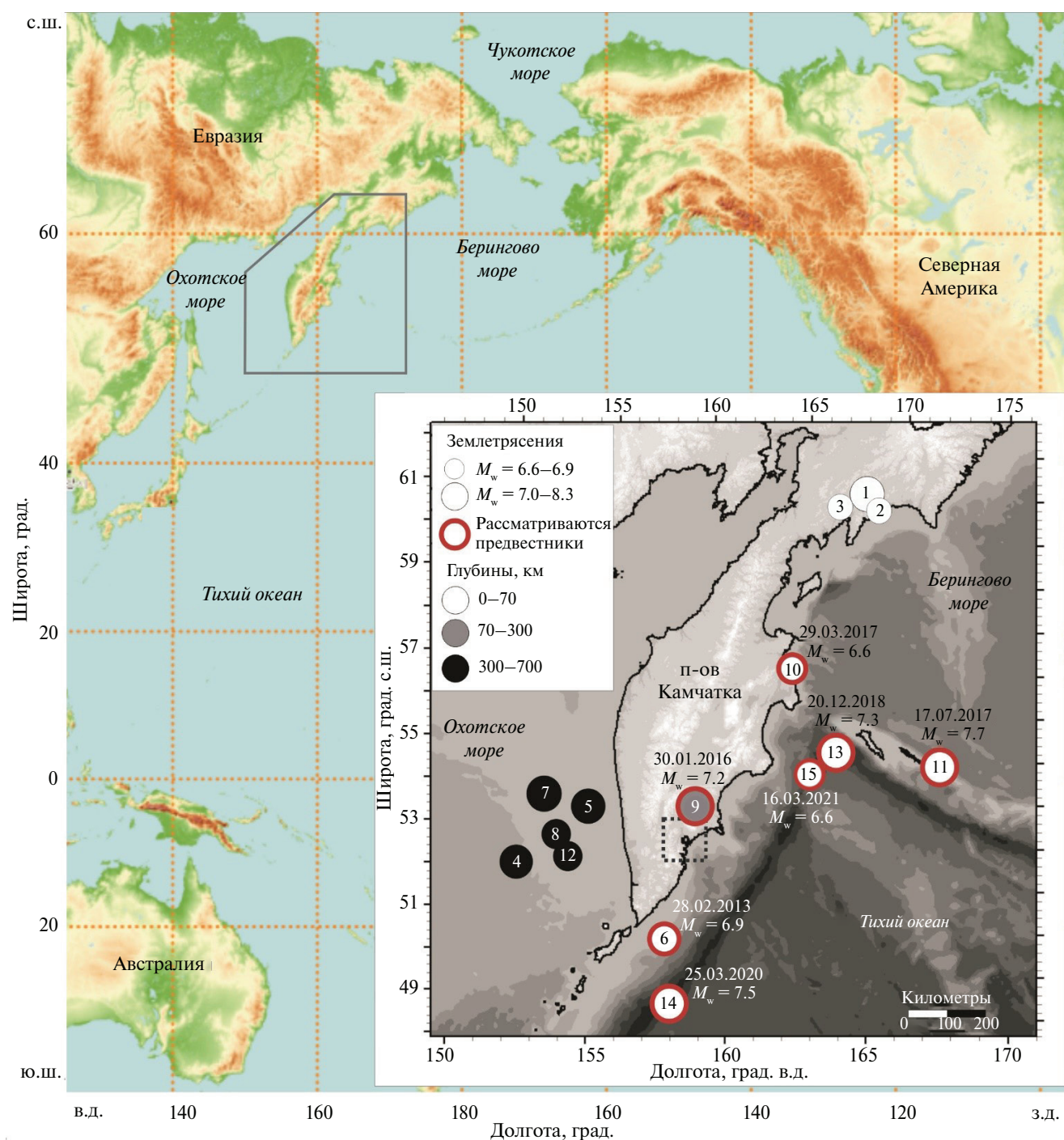


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений с $M_w \geq 6.6$ за период 2005–2022 гг. (нумерация согласно табл. 2). Белыми кружками показаны мелкофокусные землетрясения, серыми – среднефокусные, черными – глубокофокусные ($H = 300–700$ км). Красной обводкой отмечены мелко- и среднефокусные землетрясения, для которых рассматриваются предвестники, выявленные по различным видам наблюдений. Пунктирной линией выделена территория Петропавловск-Камчатского полигона (ПКП).

Хаткевич, 1994; Kopylova, Boldina, 2020] проявлялись одновременно с развитием аномалий сейсмичности и увеличением горизонтального сжатия территории ПКП по данным светодальнометрических измерений.

Примеры комплексного проявления предвестников землетрясений 1987–2004 гг. в изменениях сейсмичности (параметр RTL , по [Кравченко, 2005; Соболев, 1999, 2003]), гидрогеологических параметров (уровень воды [Копылова, 2001]

Таблица 2. Землетрясения 2005–2022 гг. с $M_w \geq 6.6$, произошедшие в Камчатском регионе в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН ($\phi = 49^\circ 62' \text{ с.ш.}$, $\lambda = 152^\circ 17' \text{ в.д.}$)

№ п/п	Дата	Время ч:мин:с	Широта, ϕ , град. с.ш.	Долгота, λ , град. в.д.	Глубина, км	Магнитуда* по NEIC	d_e^{**} , (d_h) км	$M/\lg d_h$	Балл***, MSK-64	Примечание
1	20.04.2006	23:25:02	60.98	167.37	1	7.6 mwc	1025 (1025)	2.52	9 Корф [Олюторское ..., 2007], 8–9 Тилички; 6 Каменское; 5–6 Оссора; 4–5 Палана; 2 Усть-Камчатск	Олюторское ЗТ [Олюторское ..., 2007]
2	29.04.2006	16:58:06	60.54	167.76	0	6.6 mwc	1000 (1000)	2.20	5–6 Тилички; 3–4 Каменское; 3 Оссора	афтершок Олюторского ЗТ
3	22.05.2006	11:12:01	60.75	166.10	3	6.6 mwc	967 (967)	2.21	6–7 Тилички; 4–5 Оссора; 4 Каменское; 3–4 Палана	афтершок Олюторского ЗТ
4	05.07.2008	02:12:04	53.99	152.84	576	7.7 mwc	394 (698)	2.71	4 Усть-Камчатск; 3–5 ПТР; 3–4 Усть-Большерецк; 3 Елизово; 3 Вилючинск	Мантйное ЗТ с эпицентром в Охотском море
5	24.11.2008	09:02:59	53.77	154.69	564	7.3 mwc	270 (625)	2.61	3 ПТР	Мантйное ЗТ с эпицентром в Охотском море
6	28.02.2013	14:05:50	50.67	157.77	61	6.9 mww	263 (270)	2.85	5–6 Северо-Курильск; 4–5 Вилючинск, ПТР; 4 Елизово	ЗТ у южной оконечности полуострова Камчатка
7	24.05.2013	05:44:49	54.75	153.79	630	8.3 mww	368 (730)	2.90	5 ПТР; 4–5 Елизово, Вилючинск, Усть-Камчатск; 4 Мильково, Тигиль, Никольское; 3–4 Усть-Большерецк, Эссо, Палана; 3 Соболево; 2 Оссора	Мантйное Охотоморское ЗТ с эпицентром в Охотском море [Чебров и др., 2013б]
8	01.10.2013	03:38:22	52.88	153.34	608	6.7 mww	350 (700)	2.35	3 ПТР	афтершок Охотоморского ЗТ
9	30.01.2016	03:25:12	53.85	159.04	178	7.2 mww	98 (203)	3.12	4–5 Вилючинск, ПТР; 4 Елизово, Мильково, Усть-Камчатск; 2 Усть-Большерецк	Жупановское ЗТ [Чебров и др., 2016]
10	29.03.2017	04:09:24	56.97	163.22	43	6.6 mww	526 (528)	2.42	6 Усть-Камчатск; 3 Никольское, Тигиль, Палана	Южно-Озерновское ЗТ [Чебров и др., 2017в]

Таблица 2. Окончание

11	17.07.2017	23:34:14	54.35	168.90	7	7.7 mww	690 (691)	2.71	5–6 Никольское; 3 Усть-Камчатск; 2–3 ПТР	Ближне-Алеутское ЗТ [Чебров и др., 2017б]
12	13.10.2018	11:10:22	52.53	153.87	498	6.7 mww	320 (590)	2.42	3–4 Северо-Курильск; 2–3 ПТР	Мангитное ЗТ с эпицентром в Охотском море
13	20.12.2018	17:01:55	54.91	164.71	54	7.3 mww	450 (453)	2.75	5–6 Никольское; 4–5 Усть-Камчатск; 3–4 ПТР, Елизово; 3 Оссора; 2–3 Мильково	ЗТ Угловое поднятия [Чебров и др., 2020]
14	25.03.2020	02:49:21	49.11	158.08	48	7.5 mww	430 (433)	2.84	6–7 Северо-Курильск; 4–5 ПТР; 2–3 Никольское	Парамуширское ЗТ [Прытков, Василенко, 2021]
15	16.03.2021	18:38:21	54.64	163.35	64	6.6 mww	359 (364)	2.58	4–5 Усть-Камчатск; 4 Никольское; 3 ПТР; 2 Вилочинск	ЗТ в районе Кроноцкого п-ва

Примечание. См. примечание к табл. 1.

и химический состав подземной воды из скважин [Копылова и др., 1994; Хаткевич, Рябинин, 2004]), в укорачивании длин линий светодальномерных измерений [Бахтияров, Левин, 1989; Левин и др., 2006] и в изменениях высокочастотного сейсмического шума (ВСШ) в пункте “Начики” [Гордеев и др., 2006] представлены в работах [Копылова, Серафимова, 2004, 2009; Серафимова, Копылова, 2010]. На рис. 3 демонстрируется пример комплексного проявления предвестников перед землетрясением 2 марта 1992 г., $M_W = 6.9$.

Предвестники землетрясений 2005–2022 гг.

В 2005–2022 гг. в пределах Камчатской сеismoактивной области в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН (см. рис. 1а) произошли 15 землетрясений с магнитудами $M_W = 6.6–8.3$, вызвавшие в населенных пунктах Камчатского края сотрясения от 2 до 8–9 баллов по шкале MSK-64 (<http://sdis.emsd.ru>) [Чеброва и др., 2020]. На рис. 2 показано расположение эпицентров этих землетрясений, в табл. 2 представлены их параметры.

На рис. 2 и в табл. 2 показаны семь землетрясений, произошедших в диапазоне глубин $H = 7–178$ км, для которых представлены диаграммы с выявленными предвестниками и временами их проявления (рис. 4). Данные о предвестниках содержатся в работах по отдельным видам наблюдений, а также в работах с описанием землетрясений с $M_W \geq 6.6$, в которых, как правило, приводятся данные о предвестниках, выявленных в режиме реального времени или ретроспективно по материалам работ КФ РЭС и авторским данным [Болдина, Копылова, 2017; Сильные ..., 2014; Чебров и др., 2013а, 2013в, 2016, 2017а, 2017б, 2020]. Общая характеристика предвестников землетрясений и область их применения, а также библиография и примеры использования сейсмопрогностических методик для выделения предвестников наиболее подробно рассмотрены в работе [Чебров и др., 2011].

В группе *сейсмических* методов рассматривались семь видов предвестников.

1. Форшоковая активизация [Чебров и др., 2017б, 2020].

2. Обнаружение сейсмических затиший по методике *RTL* (“*RTL*”).

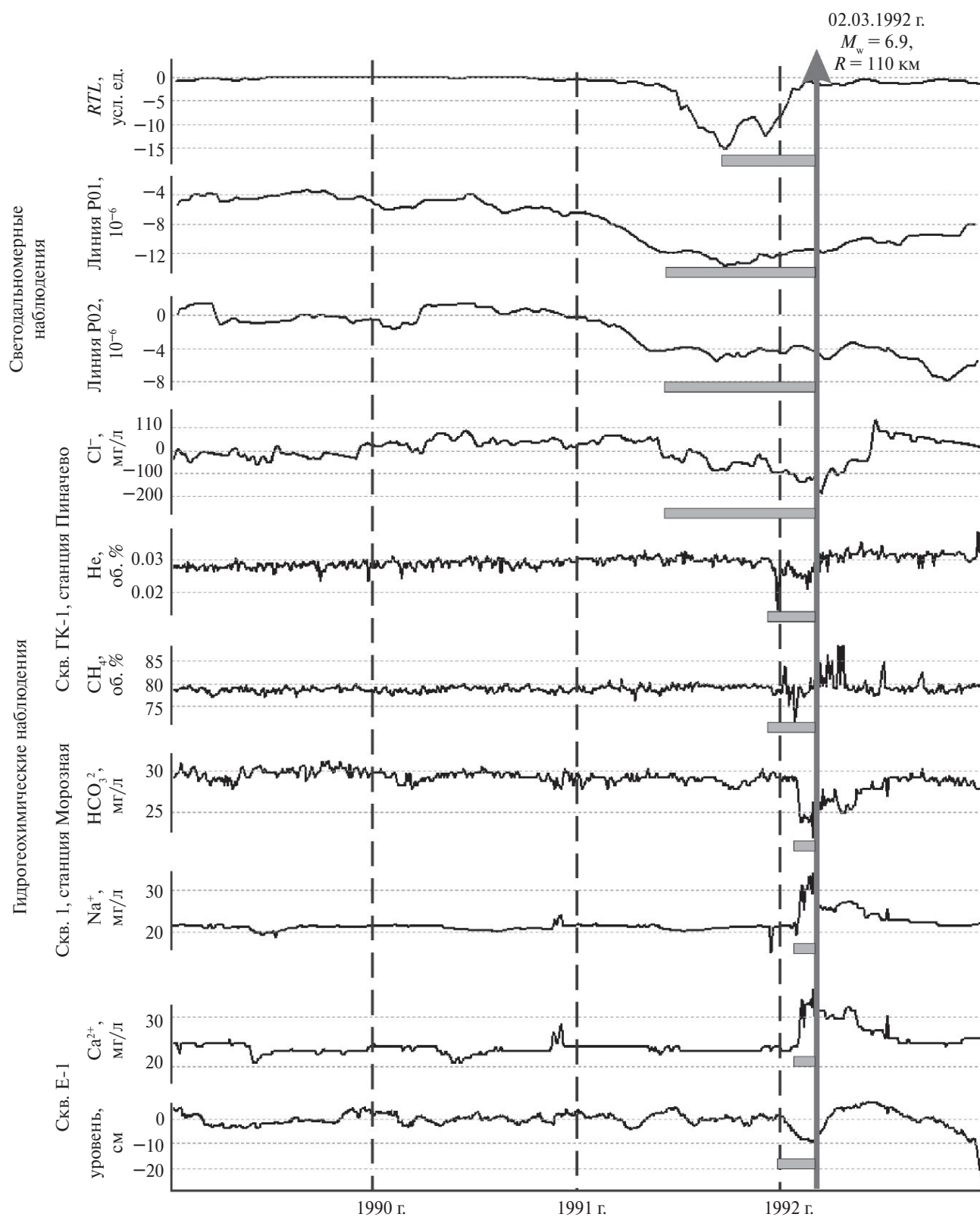


Рис. 3. Проявление предвестников перед землетрясением 2 марта 1992 г., $M_w = 6.9$.

R — расстояние до центра Петропавловск-Камчатского полигона. Горизонтальными серыми полосами показано время проявления предвестников [Серафимова, Копылова, 2010, рис. 2].

Прогностический параметр RTL основан на выделении аномалии сейсмического затишья по трем функциям: эпицентральной R , временной T и энергетической L , характеризующим сейсмический режим [Соболев, Тюткин, 1996]; применяется для прогноза землетрясений с магнитудой более 6.0 [Салтыков и др., 2013; Чебров и др., 2011]. Пространственно-временные области с отрицательными значениями параметра RTL , равного произведению функций R , T и L , соответствуют зонам сейсмического затишья. В качестве прогностических признаков рассматриваются значения $RTL < -3$ длительностью не менее года. Ожидается, что землетрясение произойдет в окрестности такой аномалии в течение двух лет после выхода значений RTL на фоновые величины.

3. Обнаружение сейсмических затиший по методике Z -функции [Wyss, Habermann, 1988] (" Z -функция").

Рассматриваются и количественно оцениваются сейсмические затишья как статистически значимое уменьшение скорости потока землетрясений в ограниченном объеме среды. В качестве предвестников землетрясений рассматриваются области аномально низкой сейсмичности, в пределах которых или в ближайших их окрестностях в течение года возможно землетрясение с магнитудой не менее 6.0 [Салтыков и др., 2013; Чебров и др., 2011].

4. Вариации наклона графика повторяемости γ ("гамма").

Определяются пространственно-временные области статистически значимого уменьшения наклона графика повторяемости γ землетрясений. Ожидается, что землетрясение с магнитудой $M \geq 6.0$ произойдет в пределах области проявления значимых вариаций γ или на ее периферии [Салтыков и др., 2013].

5. Вариации отношения скоростей сейсмических волн V_p/V_s ("параметр τ "), по данным ИФЗ РАН.

Рассматриваются вариации времен пробега P - и S -волн от слабых близких землетрясений и их отношения T_s/T_p в пространстве и времени относительно долговременного среднего с выявлением пространственно-временных интервалов максимальных флуктуаций. Метод применяется для оценки изменений

напряженно-деформированного состояния среды в пределах Камчатской сейсмофокальной зоны, которые могут быть связаны с подготовкой землетрясений с $K_s \geq 12.5-13.0$ [Славина и др., 1993, 2004; Чебров и др., 2011].

6. Вариации параметров высокочастотного сейсмического шума (ВСШ), связанные с изменением приливного отклика среды перед сильными землетрясениями ("ВСШ").

Согласно этой оригинальной методике [Способ ..., 1998] при изучении вариаций сейсмической эмиссии в качестве эталонного сигнала используются земные приливы. При прогнозировании землетрясений в качестве информационного параметра рассматривается фазовый сдвиг между определенной волной приливного гравитационного потенциала и соответствующим ей компонентом огибающего ВСШ. Предвестник соответствует стабилизации фазового сдвига на некотором уровне в течение нескольких недель. Пороговые значения магнитуды ожидаемого землетрясения, начиная с величины $M \geq 5.0$, определяются соотношением магнитуда–расстояние [Салтыков, 2017; Чебров и др., 2011].

7. Вариации фонового сейсмического шума (ФСШ) по непрерывным записям на сети широкополосных сейсмических станций на территории п-ова Камчатка, Командорских островов и о. Парамушир, по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН и ИФЗ РАН.

Вариации ФСШ характеризуются временными рядами статистических параметров – обобщенным показателем Херста α^* , шириной носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$, вейвлетной спектральной экспонентой β , минимальной нормализованной энтропией вейвлет-коэффициентов шума En , определяемых ежесуточно для каждой станции сети за период наблюдений с 2011 г., и графиками изменения их медианных значений. Предвестниковые изменения параметров ФСШ проявляются за несколько месяцев – в первые годы до возникновения сильных землетрясений на картах в области их будущих очагов и на графиках их медианных значений в относительном уменьшении величин α^* , $\Delta\alpha$, β и в увеличении En [Касимова и др., 2018; Копылова и др., 2021; Любушин и др., 2015; Kopylova et al., 2022].

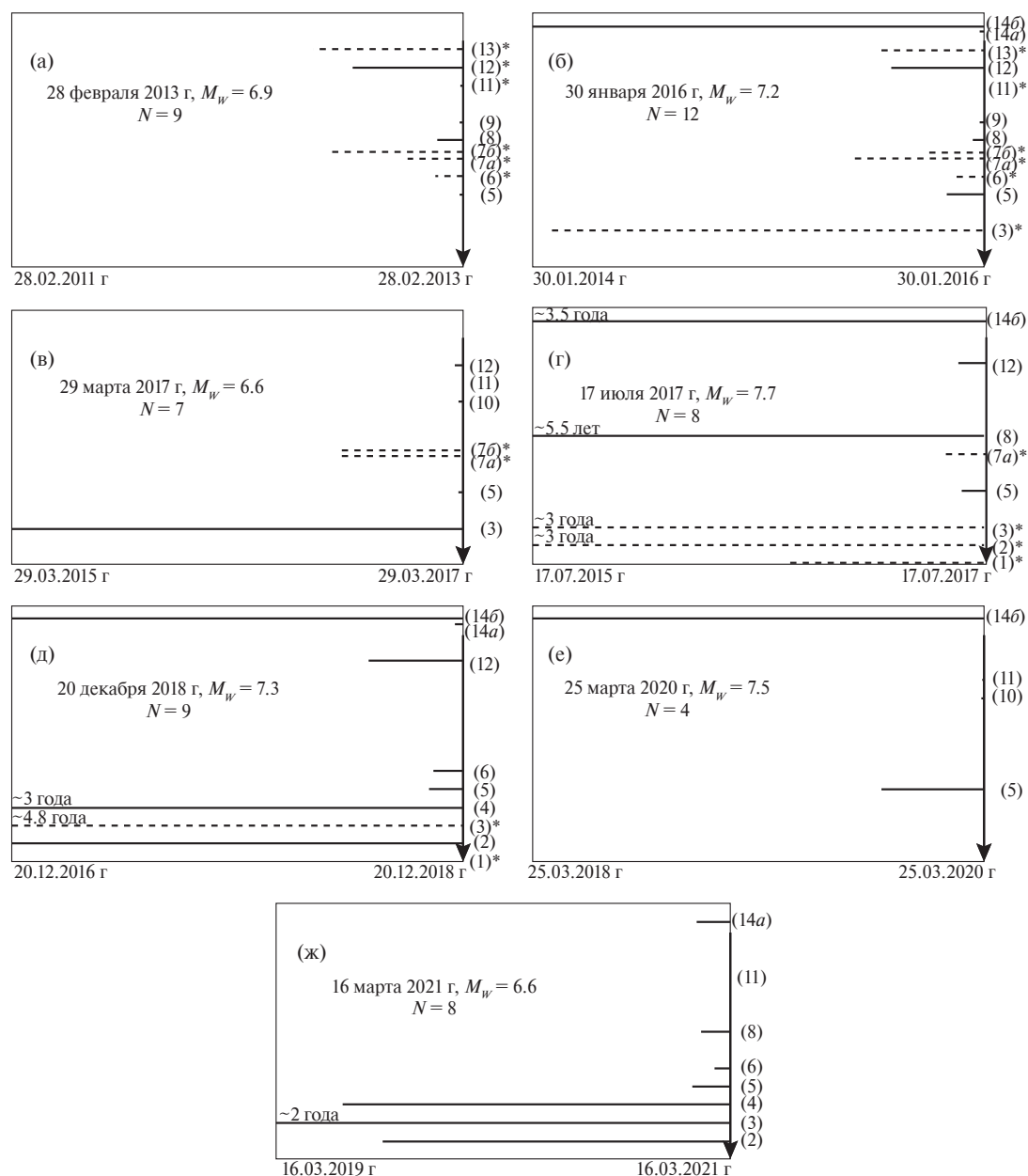


Рис. 4. Состав предвестников 1–14 и время их проявления перед семью мелко- и среднефокусными землетрясениями 2005–2022 гг. с $M \geq 6.6$ (см. табл. 2, рис. 2).

Горизонтальные оси соответствуют двум календарным годам, предшествующим землетрясениям; вертикальная стрелка – момент землетрясения; штриховыми горизонтальными линиями и звездочками отмечены предвестники, выявленные ретроспективно; сплошными горизонтальными линиями обозначены предвестники, выявленные в реальном времени.

1 – форшоковая активизация, 2 – “RTL”, 3 – “Z-функция”, 4 – “гамма”, 5 – “параметр τ ”, 6 – “ВСШ”, 7 – “ФСШ” (а – карты распределения статистических параметров, б – графики их медианных значений), 8 – гидрогеодинамические наблюдения в скважине Е-1, 9 – “ОНЧ”, 10 – “фазовый портрет”, 11 – ионосферные наблюдения, 12 – скважинные геоакустические наблюдения, 13 – гидрогеохимические наблюдения, 14 – “радон” (а – краткосрочный предвестник, б – длительный тренд (пояснения см. в тексте)).

(а)–(ж) – землетрясения (номера см. рис. 2, названия в табл. 2): (а) – № 6, ЗТ у южной оконечности п-ова Камчатка [Касимова и др., 2018; Сильные ..., 2014; Чебров и др., 2013а]; (б) – № 9, Жупановское [Болдина, Копылова, 2017; Гаврилов и др., 2017; Касимова и др., 2018; Коновалова, 2019; Копылова и др., 2017; Рябинин, 2022; Рябинин, Полетаев, 2021; Смирнов и др., 2017; Фирстов и др., 2017; Фирстов, Макаров, 2018; Чебров и др., 2016, 2017г]; (в) – № 10, Южно-Озерновское [Касимова и др., 2018; Коновалова, 2019; Чебров и др., 2017а, 2017г]; (г) – № 11, Ближне-Алеутское [Болдина и др., 2019; Копылова и др., 2019; Кравченко, Коновалова, 2019; Фирстов, Макаров, 2018, 2020; Чебров и др., 2017а, 2017б, 2017г]; (д) – № 13, Угловое поднятия [Коновалова, 2019; Фирстов, Макаров, 2020; Чебров и др., 2020]; (е) – № 14, Парамуширское [Копылова и др., 2021; Фирстов, Макаров, 2020; Чебров и др., 2021; Korylova et al., 2022]; (ж) – № 15, ЗТ в районе Кроноцкого п-ова [Болдина и др., 2022; Фирстов, Макаров, 2021; Чебров и др., 2021].

В группе *геофизических* методов рассматриваются пять видов предвестников.

8. Изменения уровня, температуры и электропроводности подземной воды в скважинах.

В скважине Е-1 обнаружены понижения уровня воды с повышенной скоростью, продолжительностью от суток до нескольких недель, предшествующие землетрясениям с магнитудами $M_w \geq 5.0$ на расстояниях до 370 км от скважины [Копылова, 2001; Копылова, Болдина, 2019; Чебров и др., 2011; Kopylova, Boldina, 2020].

Атмосферно-ионосферные параметры по данным наблюдений ИКИР ДВО РАН.

9. Наблюдения за электромагнитным ОНЧ-излучением (“ОНЧ”).

В шумовой составляющей естественного электромагнитного ОНЧ излучения за несколько суток до землетрясений с $M \geq 5.0$ появляются мощные импульсы, которые прекращаются за несколько часов или суток до события. Амплитуда суточного хода шумовой составляющей ОНЧ сигнала обычно понижается за несколько суток до землетрясения, а после сейсмического события в течение нескольких суток восстанавливается [Богданов и др., 2004; Дружин, 2002; Чебров и др., 2011].

10. Мониторинг вариаций геомагнитного и атмосферного электрического поля Земли (“фазовый портрет”).

Анализ фазовых соотношений между вертикальной составляющей электрического поля E_z и K -индексом геомагнитной активности показывает, что при синхронном достижении минимумов величинами E_z и K -индекса отмечается рост сейсмической активности и возникновение землетрясений с $K_s \geq 12.6$ [Богданов и др., 2004; Бузевич, Смирнов, 2001; Чебров и др., 2011].

11. Мониторинг параметров ионосферы (“ионосферные наблюдения”).

По результатам вертикального радиозондирования ионосферы обнаружены аномальные изменения критической частоты f_0F_2 регулярного слоя F_2 перед землетрясениями с $K_s \geq 13$ [Богданов и др., 2004; Чебров и др., 2011].

12. Мониторинг вариаций геоакустической эмиссии (ГАЭ) в скважине (“скважинные геоакустические измерения”), по данным ИВиС ДВО РАН.

Перед сильными землетрясениями наблюдаются исчезновение суточного хода и бухтообразные аномалии среднесуточного уровня ГАЭ [Гаврилов и др., 2006а, 2006б; Чебров и др., 2011; Gavrilov et al., 2020].

Также рассматриваются два *геохимических* метода.

13. Вариации химического состава подземной воды из самоизливающихся скважин (“гидро-геохимические наблюдения”).

В качестве предвестников землетрясений, для которых отношение $M_w/\lg d_h \geq 3.0$, рассматриваются аномальные изменения концентраций компонентов ионного состава воды и свободного газа [Копылова и др., 1994; Хаткевич, Рябинин, 2006; Чебров и др., 2011; Kopylova, Boldina, 2020, 2021].

14. Вариации объемной активности радона ^{222}Rn (ОА Rn) и концентраций водорода и углекислого газа в почвенном воздухе перед местными землетрясениями с $M \geq 5.0$ (“радон”) [Фирстов и др., 2006; Фирстов, Макаров, 2018; Чебров и др., 2011].

Кроме сравнительно кратковременных вариаций “радона”, в течение нескольких суток или недель, предшествующих местным землетрясениям с $M \geq 5.0$, в динамике ОА Rn проявляются длительные (1–3 года) тренды, которые рассматриваются в качестве предвестников землетрясений с $M > 7.5$ северо-западной окраины Тихого океана [Фирстов, Макаров, 2018].

Для семи мелко- и среднефокусных землетрясений 2005–2022 гг. определялся состав предвестников и время их проявления на основании опубликованных данных по перечисленным выше 14-ти сейсмопрогностическим методам. На диаграммах рис. 4 показаны моменты землетрясений и времена проявления отдельных предвестников на интервале времени два года до сейсмического события. Анализ этих диаграмм показывает, что перед некоторыми землетрясениями количество предвестников N варьирует от 4 до 12, а время их проявления составляло от первых суток до 2 лет и более (до ~5 лет). Из общего числа проявлений предвестников (57) 38 были выявлены в реальном времени ($38/57 \times 100\% = 66.7\%$). Для отдельных землетрясений отношение числа предвестников,

выявленных в реальном времени, к их общему числу N составило 44–100% (см. рис. 4).

Наименьшее число предвестников ($N = 4$) было зафиксировано перед Парамуширским землетрясением 25 марта 2020 г., $M_w = 7.5$ (№ 10 на рис. 1а и в табл. 1; № 14 на рис. 2 и в табл. 2), которое является “внешним” сейсмическим событием в Курило-Камчатской зоне субдукции. Очаг этого землетрясения находился под океаническим склоном глубоководного желоба в погружающейся Тихоокеанской океанической плите [Прытков, Василенко, 2021].

Другие рассматриваемые землетрясения, перед которыми число предвестников N составляло от 7 до 12, относятся к межплитовым (субдукционным) землетрясениям, возникающим при взаимодействии погружающейся Тихоокеанской океанической плиты с континентальными Охотоморской и Берингийской микроплитами (см. рис. 1а).

На рис. 5 показано соотношение между числом зарегистрированных предвестников N и параметрами последующих землетрясений – их магнитудами M_w и величинами $M_w/\lg d_h$. Оценка связи между числом предвестников N и параметрами землетрясений проводилась по величинам линейного коэффициента корреляции

Пирсона r и коэффициента ранговой корреляции Спирмена ρ [Большев, Смирнов, 1965].

Анализ графика на рис. 5а и величин $r = -0.11$ и $\rho = -0.02$ показывает отсутствие связи между числом проявившихся предвестников N и величинами магнитуд последующих землетрясений. Если использовать в качестве характеристики землетрясений параметр $M_w/\lg d_h$, то коэффициенты r и ρ увеличиваются до 0.47 и 0.61 соответственно (см. рис. 5в). При этом величины r и ρ также не являются статистически значимыми для набора из семи пар значений.

Аналогичные построения и расчеты коэффициентов r и ρ были выполнены для шести пар чисел предвестников N и параметров межплитовых землетрясений (см. рис. 5б, 5г), в этом случае данные по внутриплитовому Парамуширскому землетрясению были исключены. При сопоставлении числа предвестников N и величин магнитуд последующих землетрясений M_w (см. рис. 5б) получены статистически незначимые величины коэффициентов $r = 0.31$ и $\rho = 0.43$. При сравнении величин N и параметров землетрясений $M_w/\lg d_h$ (см. рис. 5г) получены коэффициенты $r = 0.96$ и $\rho = 0.97$, величины доверительных вероятностей которых для шести пар значений составляют 99.8% и 99.9%

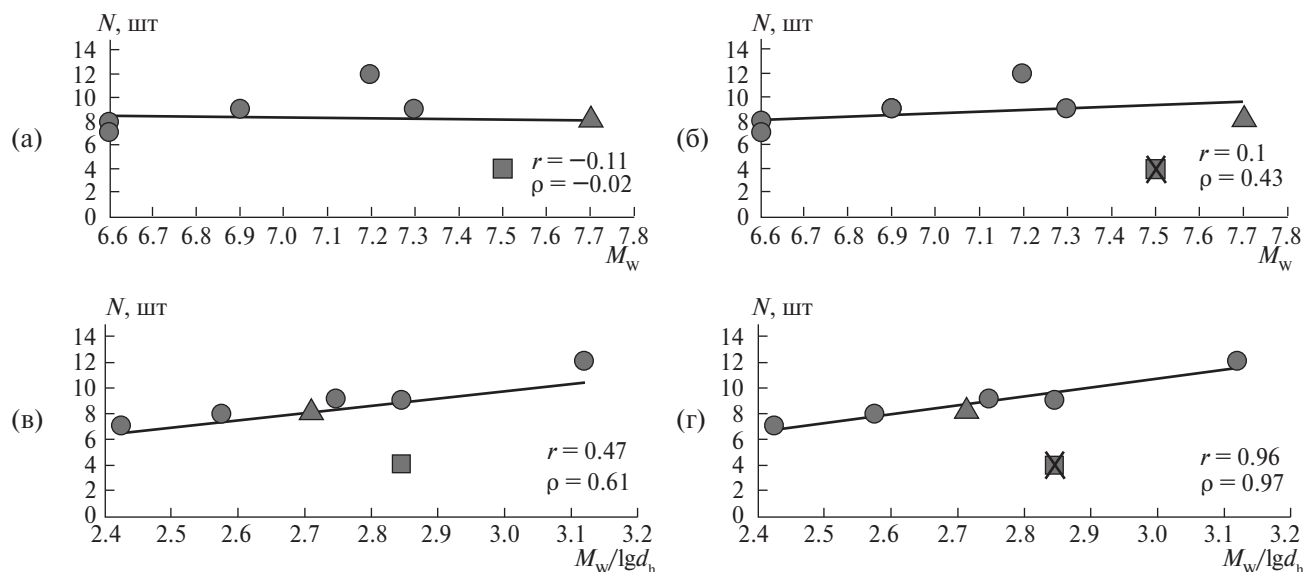


Рис. 5. Соотношение между числом предвестников N , проявившихся перед конкретным землетрясением по 14-ти рассматриваемым методам, и параметрами последующих землетрясений M_w (а, б) и $M_w/\lg d_h$ (в, г). r – коэффициент линейной корреляции Пирсона, ρ – коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Квадратом обозначено Парамуширское землетрясение (№ 10 на рис. 1 и в табл. 1; № 14 на рис. 2 и в табл. 2), треугольником – Ближне-Алеутское землетрясение (№ 9 на рис. 1 и в табл. 1, № 11 на рис. 2 и в табл. 2). Крестиком отмечены данные по внутриплитовому Парамуширскому землетрясению, не учитывавшиеся при расчетах (пояснения см. в тексте).

соответственно. Эти результаты указывают на отсутствие статистически значимой связи между числом предвестников и величинами магнитуд последующих землетрясений в диапазоне $M_w = 6.6–7.7$ и на наличие положительной связи между числом предвестников и параметром M_w/lgd_h для межплитовых землетрясений в Камчатской части Курило-Камчаткой островной дуги, включая Ближне-Алеутское землетрясение, произошедшее в зоне сочленения Курило-Камчаткой и Алеутской островных дуг.

Для шести землетрясений из семи рассматриваемых сейсмических событий величины параметра M_w/lgd_h составляют 2.42–2.85, менее 3 (см. рис. 5в), что обуславливается большой удаленностью их гипоцентров от территории ПКП ($d_h = 265–690$ км, см. табл. 2). Перед этими шестью землетрясениями количество предвестников N варьировало от четырех до девяти или 28–64% от общего числа рассматриваемых предвестников (см. рис. 4).

Для Жупановского землетрясения 30.01.2016 г. ($M_w = 7.2$) величина параметра $M_w/lgd_h = 3.12$. Перед этим землетрясением число предвестников было максимальным и составляло $N = 12$ из 14-ти рассматриваемых (86%). Ранее в работе [Чебров и др., 2016] указывалось на комплексное проявление предвестников перед этим сильным сейсмическим событием, произошедшем на минимальном расстоянии до центра ПКП (эпицентрального расстояние $d_e = 98$ км, см. табл. 2) в течение последнего десятилетия.

Ранее в работах [Копылова, Серафимова, 2009; Серафимова, Копылова, 2010] по данным наблюдений за предвестниками камчатских землетрясений 1987–2004 гг. было показано, что при существующей конфигурации наблюдательной сети, сосредоточенной, в основном, на территории ПКП, рост числа предвестников N является информативным признаком подготовки наиболее сильных и относительно “близких” землетрясений по отношению к территории полигона. Результаты анализа зависимости между числом предвестников N и параметром M_w/lgd_h для шести межплитовых землетрясений 2013–2020 гг. подтверждают этот вывод.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обнаружение роста числа различных видов предвестников наиболее сильных и близких к территории ПКП межплитовых землетрясений

1987–2022 гг., для которых параметр $M/lgd_h \geq 3.0$, является одним из наиболее важных результатов сейсмопрогностических исследований на территории п-ова Камчатка. Свойство комплексного проявления предвестников сильных и близких (к наблюдательной сети) землетрясений согласуется с ожидаемым эффектом проявления предвестников, который может найти применение при прогнозировании землетрясений при наличии ретроспективных оценок его связи с параметрами последующих землетрясений.

Эффект комплексного проявления предвестников сильных и наименее удаленных от территории ПКП землетрясений по данным 1987–2004 гг. подтвержден в настоящей работе на примере мелко- и среднефокусных межплитовых землетрясений 2005–2022 гг. Это позволяет объединить данные о проявлении предвестников и рассматривать ЭКПП в зависимости от параметров землетрясений за весь период проведения сейсмопрогностических исследований на Камчатке с использованием комплекса методов, принимая введенное выше ограничение ($\geq 80\%$) по проявлению предвестников перед конкретным землетрясением из их общего рассматриваемого числа. Общее число мелко- и среднефокусных землетрясений, предвестники которых анализировались в работе, составляет 18: 11 событий 1987–2004 гг. (табл. 3) и 7 событий 2005–2022 гг. (см. табл. 2).

Для периода 1987–2004 гг. принято, что общее число рассматриваемых предвестников составляет пять, для периода 2005–2022 гг. — 14. Отметим определенную условность этих чисел для указанных интервалов времени. Во-первых, отдельные виды наблюдений за предвестниками имели технические перерывы, когда данные перед некоторыми землетрясениями отсутствовали. В таких случаях принималось решение, что “предвестник не проявлялся”. Во-вторых, в работе использовались преимущественно опубликованные данные о предвестниках и можно было предполагать, что описание некоторых их видов перед отдельными из рассматриваемых землетрясений могли отсутствовать¹. Такая

¹ Исключение составляют предвестники: “ФСШ” (вариации фонового сейсмического шума) в 2011–2022 гг., изменения уровня воды в скважине Е-1 в 1987–2022 гг. и вариации химического состава воды из самоизливающихся скважин в 1987–1998 гг. Мониторинг этих видов предвестников, а также ведение баз данных наблюдений осуществлялись непосредственно авторами либо с их участием.

Таблица 3. Уточненные данные о мелко- и среднефокусных землетрясениях 1987–2004 гг. с $M_w \geq 6.6$, по [Серафимова, Копылова, 2010, табл. 1]

Дата	Время ч:мин:с	Широта, град. с.ш.	Долгота, град. в.д.	Глубина, км	d_h , км	M_w	$M/\lg d_h$	L , км	d_h/L	Баллы по шкале MSK-64
06.10.1987	20:11:36	52.86	160.23	33	115	6.5 6.6**	3.15 3.20	34 37	3.4 3.1	4–5 РЕТ
02.03.1992	12:29:39	52.76	160.20	20	110	6.9	3.38	50	2.2	5–6 РЕТ
08.06.1993	13:03:37	51.20	157.80	40	210	7.5	3.23	90	2.3	5 РЕТ
13.11.1993	01:18:07	51.79	158.83	40	140	7.0	3.26	55	2.5	5–6 РЕТ
01.01.1996	09:57:46	53.88	159.44	0	140	6.6	3.08	37	3.8	4–5 РЕТ
21.06.1996	13:57:06	51.27	159.63	2	203	6.7	2.90	41	5.0	3–5 РЕТ
05.12.1997	11:26:51	54.64	162.55	10	200*	7.8	3.39	121	1.6	5–6 РЕТ
08.03.1999	12:25:43	51.93	159.72	7	140	6.9	3.22	50	2.8	4–5 РЕТ
16.06.2003	22:08:02	55.30	160.34	190	340	6.9	2.73	50	6.8	3–4 РЕТ
05.12.2003	21:26:14	55.78	165.43	29	540	6.7	2.45	41	13.1	2–3 РЕТ
10.06.2004	15:19:55	55.68	160.25	208	377	6.9	2.68	50	7.6	3–4 РЕТ

Примечание. * – расстояние до центра очаговой области; ** – магнитуда M_s по данным Геофизической службы РАН [Зобин и др., 1990]; РЕТ – г. Петропавловск-Камчатский.

ситуация также соответствовала заключению “предвестник не проявлялся”.

Таким образом, авторская интерпретация двух возможных причин неполных исходных данных о предвестниках отдельных землетрясений понижает вероятность ошибки в выделении ЭКПП при повышении вероятности заключения, что ЭКПП перед этим землетрясением не проявлялся. С учетом предполагаемого прогностического значения ЭКПП используемый подход более точен в определении наличия либо отсутствия ЭКПП.

Для землетрясений 1987–2004 гг., перед которыми был выделен ЭКПП, использовались данные из работы [Серафимова, Копылова, 2010] (см. рис. 3, табл. 2). Уточненные параметры землетрясений с $M_w \geq 6.6$ для этого периода времени представлены в табл. 3. При этом два землетрясения из первоначального перечня были исключены из рассмотрения из-за понижения величин их магнитуды в актуальном каталоге USGS/NEIS (16.07.2016 г., $M_w = 6.5$, $d_h = 540$ км, и 01.06.1997 г., $M_w = 6.4$, $d_h = 120$ км).

Всего ЭКПП проявлялся перед семью землетрясениями: перед шестью землетрясениями 1987–2004 гг. и одним землетрясением 2005–2022 гг. Перед землетрясением 01.01.1996 г.

(см. табл. 3), по данным работы [Серафимова, Копылова, 2010], было зафиксировано всего три предвестника из пяти (60%). При этом данные равномерных наблюдений в скважине Е-1 в это время отсутствовали из-за технического перерыва. В более поздних работах [Копылова, Болдина, 2023; Kopylova, Boldina, 2020] было показано, что этому землетрясению предшествовало проявление гидрогеохимических предвестников в трех самоизливающихся скважинах на территории ПКП. На основании этих данных, а также проявлении трех видов предвестников в сейсмичности, ВСШ и химическом составе воды из скважины ГК-1, землетрясение 1 января 1996 г. было включено в число событий, которым предшествовал ЭКПП.

В табл. 4 представлены данные о землетрясениях, перед которыми проявлялся ЭКПП, с указанием для каждого из них величины магнитуды, доли проявившихся перед ним предвестников из рассматриваемого их числа (в %) и параметров d_h/L и $M/\lg d_h$, характеризующих интенсивность подготовки землетрясения в районе ПКП. Для этих землетрясений величины отношений составили $M/\lg d_h = 3.08–3.39$ и $d_h/L = 1.6–3.8$.

Таблица 4. Данные о землетрясениях района п-ова Камчатка, которым предшествовал эффект комплексного проявления предвестников (ЭКПП)

Дата	Магнитуда	Доля проявившихся предвестников от их общего числа, %	Параметры интенсивности подготовки землетрясения в районе ПКП	
			d_h/L	M/lgd_h
06.10.1987	6.5(6.6)	80	3.4(3.1)	3.15(3.20)
02.03.1992	6.9	100	2.2	3.38
08.06.1993	7.5	80	2.3	3.23
13.11.1993	7.0	80	2.5	3.26
01.01.1996	6.6	80*	3.8	3.08
05.12.1997	7.8	100	1.6	3.39
30.01.2016	7.2	86	3.0	3.12

Примечание. * – с учетом комплексного проявления гидрогеохимических предвестников в трех скважинах территории ПКП [Копылова, Болдина, 2023].

О соотношении между параметрами землетрясений M/lgd_h и d_h/L

На рис. 6 демонстрируется соотношение между параметрами M_w/lgd_h и d_h/L , характеризующими относительную интенсивность подготовки землетрясений в районе ПКП, для всех 18-ти рассматриваемых землетрясений. Анализ этого рисунка показывает линейную корреляцию между двумя используемыми в работе параметрами интенсивности подготовки землетрясений в районе ПКП при величине коэффициента корреляции Пирсона $r = -0.93$, значимого для 18 пар значений с доверительной вероятностью 99.9%. Это позволяет применять для предварительных выводов о параметрах землетрясений, перед которыми проявляется ЭКПП, обе рассматриваемые величины, а также показывает, что ЭКПП возникал перед семью из восьми землетрясений (88%), для которых величины $M_w/lgd_h = 3.08–3.39$ и $d_h/L = 1.6–3.8$. Исключение составляет землетрясение 8 марта 1999 г., $M_w = 7.0$ (см. табл. 3), параметры которого соответствуют указанному интервалу величин. Однако перед этим землетрясением проявился лишь один вид предвестника – изменение сейсмичности по параметру RTL . По другим четырем видам сейсмопрогностических наблюдений, а также по данным о химическом составе подземных вод из скважин ПКП аномалии-предвестники перед землетрясением 8 марта 1999 г. не наблюдались. Мы полагаем, что отсутствие предвестников

в изменениях гидрогеологических и других наблюдаемых параметров было обусловлено тем, что событие 8 марта 1999 г. произошло всего через 15 месяцев после наиболее сильного Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., когда еще продолжались постсейсмические деформационные процессы по данным GPS-наблюдений [Gordeev et al., 2004] и восстановление режимов функционирования наблюдательных скважин после сильного сейсмического воздействия.

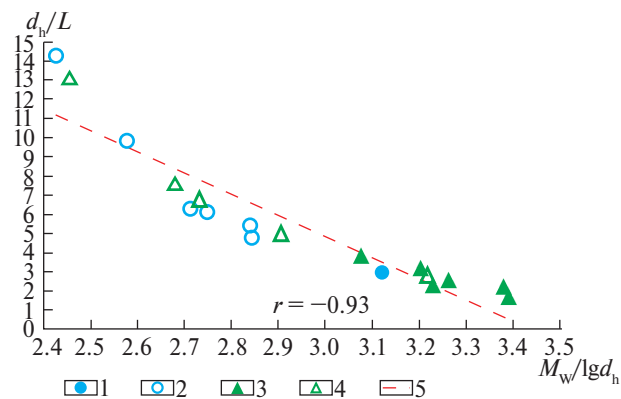


Рис. 6. Соотношение между параметрами землетрясений 1987–2022 гг. M_w/lgd_h и d_h/L с учетом наличия/отсутствия эффекта комплексного проявления предвестников. 1, 2 – проявление 14-ти видов предвестников перед землетрясениями 2005–2022 гг. при наличии и отсутствии ЭКПП соответственно; 3, 4 – проявление пяти видов предвестников перед землетрясениями 1987–2004 гг. при наличии и отсутствии ЭКПП соответственно; 5 – линейный тренд связи между M_w/lgd_h и d_h/L ; r – коэффициент корреляции Пирсона.

Несмотря на это исключение, полученные оценки параметров землетрясений $M_w/\lg d_h \geq 3.08$ и $d_h/L \leq 3.8$, перед которыми возникал ЭКПП, по данным специализированных наблюдений за предвестниками на Камчатке, могут найти применение для дальнейшего изучения ЭКПП и его использования в практике прогнозирования землетрясений в районе ПКП.

Обнаружение ЭКПП в режиме реального времени может указывать на подготовку землетрясения с $M_w \geq 6.6$ на расстояниях от ПКП не более нескольких (≤ 3.8) характерных размеров очага такого землетрясения. То есть в случае обнаружения ЭКПП можно полагать, что ПКП, а также Петропавловск-Елизовская агломерация находятся на сравнительно небольшом расстоянии от очага готовящегося сильного землетрясения, соответствующего его ближней – промежуточной (средней) зоне. Для оценки удаленности будущего землетрясения от ПКП (R , км) можно использовать модифицированную формулу расчета размера очага из работы [Завьялов, Зотов, 2021]: $R \leq 3.8 \times 10^{(0.43M - 1.27)}$.

Сопоставление ЭКПП с данными по отдельным видам предвестников

На рис. 7 показано соотношение между параметрами землетрясений M_w и d_h/L , перед которыми возникал ЭКПП, в сопоставлении с проявлениями четырех отдельных видов предвестников (ВСШ, уровень воды в скважине Е-1, акустические измерения в скважине Г-1, радон в почвенном воздухе) и теоретическими оценками зоны деформационных предвестников ($d_h = 10^{0.43M}$) по [Dobrovolsky et al., 1979], а также проявлениями гидрогеологических предвестников в нескольких ($n = 2-4$) скважинах на территории ПКП.

Приведенные на рис. 7 эмпирические оценки нижнего порога магнитуды прогнозируемого землетрясения M в диапазоне магнитуд 5.0–8.0 заимствованы из публикаций по трем видам предвестников: $M = -3.64 + 4.06 \lg d_e$ – ВСШ по данным станции “Начики”, где d_e – эпицентральное расстояние в км [Салтыков, 2017]; $M = 2.51 \lg d_h + 0.6$ – изменения уровня воды в скважине Е-1 [Копылова, 2001]; $\lg d_h = 0.36M - 0.04$ – изменения концентрации почвенного радона,

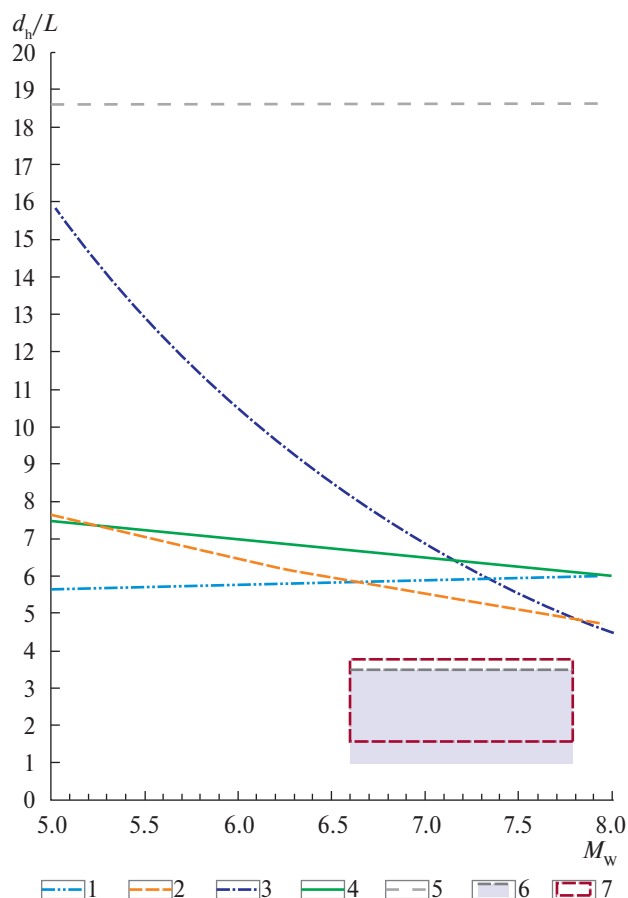


Рис. 7. Эффект комплексного проявления предвестников перед землетрясениями по данным наблюдений 1987–2022 гг. на Камчатке в зависимости от параметров землетрясений M_w и d_h/L в сравнении с проявлениями предвестников по четырём отдельным видам наблюдений, комплексным проявлением гидрогеологических предвестников и теоретической оценкой области деформационных предвестников. 1–4 – границы нижнего порога магнитуды прогнозируемого события по отдельным видам предвестников: 1 – скважинные геоакустические наблюдения [Gavrilov et al., 2020], 2 – радон в почвенном воздухе [Фирстов, Макаров, 2018], 3 – наблюдения высокочастотного сейсмического шума (ВСШ) на пункте “Начики” [Салтыков, 2017], 4 – уровень воды в скважине Е-1 [Копылова, 2001]; 5 – верхняя граница зоны деформационных предвестников по [Dobrovolsky et al., 1979]; 6 – проявление гидрогеологических предвестников в 2–4 скважинах Петропавловск-Камчатского полигона по [Копылова, Болдина, 2023; Kopylova, Boldina, 2020]; 7 – эффект комплексного проявления предвестников по данным настоящей работы.

зарегистрированные на территории ПКП [Фирстов, Макаров, 2018].

При построении указанных выше зависимостей для трех предвестников авторы соответствующих публикаций использовали величины магнитуд землетрясений из Регионального каталога землетрясений Камчатки (ВСШ, уровень воды

в скважине Е-1) и из каталога USGS/NEIS (“радон”). В формулах также указываются величины эпицентральных или гипоцентральных расстояний землетрясений для оценки удаленности землетрясений от наблюдательных пунктов. При построении зависимостей (см. рис. 7) полагалось, что такие различия в исходных параметрах землетрясений сравнительно невелики и ими можно пренебречь для предварительных оценок.

Для электромагнитных и геоакустических предвестников, зарегистрированных в скважине Г-1 в г. Петропавловск-Камчатский [Gavrilov et al., 2020] приводится зависимость их проявления от параметров землетрясений как $L^*/d_h \geq 0.19$, где размер очага $L^* = 10^{0.44M - 1.29}$. Здесь для расчета L^* авторами применялась формула расчета размера очага землетрясения из работы [Ризниченко, 1976]. Как показано в работе [Завьялов, Зотов, 2021, рис. 5], оценки размера очага землетрясения по величине магнитуды практически совпадают при использовании формул из работ [Ризниченко, 1976; Завьялов, Зотов, 2021]. Поэтому различия в размерах очагов землетрясений по двум формулам в случае этого вида предвестника также не учитывались (см. рис. 7).

В работах [Копылова, Болдина, 2023; Копылова, Болдина, 2020] даны количественные оценки проявления гидрогеологических предвестников в нескольких скважинах на территории ПКП в зависимости от параметров землетрясений $M_w = 6.6–7.8$ и $d_h/L^* = 1.0–3.6$. В случае этого вида предвестников расчет величин L^* также изначально проводился по формуле из работы [Ризниченко, 1976], которая, как отмечалось выше, дает сопоставимые величины размеров очагов землетрясений с оценками по формуле из работы [Завьялов, Зотов, 2021].

Как следует из анализа рис. 7, для событий с $M_w = 6.6–7.8$ приблизительные оценки пороговых величин d_h/L по четырем видам предвестников составляют 5.0–8.5, т.е. превышают максимальную величину $d_h/L = 3.8$, установленную в настоящей работе в качестве пороговой для ЭКПП. При этом эффект комплексного проявления гидрогеологических предвестников в нескольких скважинах на территории ПКП характеризуется значениями параметров землетрясений $M_w = 6.6–7.8$ и $d_h/L = 1.0–3.6$

[Копылова, Болдина, 2023; Kopylova, Boldina, 2020], которые сопоставимы со значениями этих параметров при проявлении ЭКПП (см. табл. 4).

Результаты анализа данных по четырем наиболее изученным видам предвестников, комплексному проявлению предвестников на Камчатке также показывают, что теоретические оценки верхней границы зоны деформационных предвестников, представленные в работах [Dobrovolsky et al., 1979; Сидорин, 1992], $d_h = 10^{0.48M}$, в 3–5 и до 10 раз превосходят область проявления ЭКПП, а также пороговые области проявления отдельных видов предвестников во всем рассматриваемом диапазоне магнитуд 5.0–8.0.

Практическим следствием этого результата исследования ЭКПП является возможность более точной корректировки района возникновения сильного ($M_w \geq 6.6$) землетрясения (значительного его уменьшения) на основе диагностики ЭКПП в режиме реального времени, по сравнению с использованием предвестников по отдельным видам наблюдений и теоретических оценок зоны проявления деформационных предвестников по [Dobrovolsky et al., 1979; Сидорин, 1992].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным комплексных сейсмопрогностических наблюдений, сосредоточенных, в основном, на территории Петропавловск-Камчатского полигона, расположенного в восточной части п-ова Камчатка, рассмотрены проявления предвестников перед восемнадцатью сильными мелко- и среднефокусными землетрясениями 1987–2022 гг. с $M_w = 6.6–7.8$.

Для периода 1987–2004 гг., с использованием данных о пяти видах предвестников (изменения сейсмичности, высокочастотного сейсмического шума, уровня и химического состава подземной воды, длин линий светодальномерных измерений), было показано, что в условиях имеющейся наблюдательной сети предвестники проявляются по комплексу методов перед землетрясениями, для которых величина $M_w/\lg d_h \geq 3.0$ [Серафимова, Копылова, 2010].

Для периода 2005–2022 гг. рассмотрены 14 видов сейсмических, геофизических и

геохимических предвестников перед семью мелко- и среднефокусными землетрясениями. Обнаружено, что число предвестников N , предшествующих отдельным землетрясениям, варьировало от 4 до 12 при отсутствии связи между N и магнитудой M_w последующего землетрясения.

Для межплитовых (субдукционных) землетрясений обнаружено увеличение числа предвестников N с ростом величины параметра землетрясений $M_w/\lg d_h$. Это подтвердило наличие выявленного ранее по данным 1987–2004 гг. эффекта комплексного проявления предвестников (ЭКПП) перед землетрясениями, наиболее сильными и близкими к территории полигона.

Для периода 1987–2022 гг. выполнено ретроспективное исследование ЭКПП, соответствующего проявлению не менее 80% предвестников из пяти их видов в 1987–2004 гг. и 14 видов предвестников в 2005–2022 гг. Показано, что ЭКПП проявлялся перед семью землетрясениями с $M_w = 6.6$ –7.8, произошедшими на гипоцентральных расстояниях $d_h = 110$ –200 км от Петропавловск-Камчатского полигона. Для таких землетрясений величины $M_w/\lg d_h = 3.08$ –3.39, а величины отношения гипоцентрального расстояния к размеру очага землетрясения $d_h/L = 1.6$ –3.8.

Полученные оценки параметров землетрясений, перед которыми фиксировался ЭКПП, могут быть полезными при средне- и краткосрочном прогнозировании сильного землетрясения в районе Петропавловск-Елизовской городской агломерации. Диагностика ЭКПП в режиме реального времени позволяет более надежно определить магнитуду ($M_w \geq 6.6$) и удаленность будущего сильного землетрясения по сравнению с использованием данных по отдельным методам сейсмопрогностических наблюдений и теоретической оценкой области деформационных предвестников по [Dobrovolsky et al., 1979; Сидорин, 1992]. Как показано в работе, отдельные виды предвестников и теоретические расчеты дают существенно завышенные оценки области подготовки сильного ($M_w \geq 6.6$) землетрясения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. А.Д. Завьялову, д.ф.-м.н. Г.Г. Кочаряну и к.ф.-м.н. А.В. Соломатину за обсуждение работы и полезные рекомендации, направленные на ее улучшение.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

В работе использованы данные, полученные на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” (<http://www.gsras.ru/unu>), развернутой при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № 075-00682-24.

Работа выполнена по проекту РНФ № 22-17-00125.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахтияров В.Ф., Левин В.Е.* Деформации земной поверхности по данным круглогодичных светодальномерных наблюдений из обсерватории Мишенная, Камчатка, с 1979 по 1985 гг. // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 94–101.
- Богданов В.В., Бузевич А.В., Виницкий А.В. и др.* О влиянии солнечной активности на атмосферные и сейсмические процессы Камчатки // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН / Отв. ред. Е.И. Гордеев, В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 259–278.
- Болдина С.В., Копылова Г.Н., Чубарова Е.Г.* Гидрогеодинамические эффекты сильных землетрясений 2017–2018 гг. // Труды Седьмой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 29 сентября – 5 октября 2019 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 27–31.
- Болдина С.В., Копылова Г.Н.* Эффекты Жупановского землетрясения 30 января 2016 г., $M_w = 7.2$, в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 863–880.
- <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0321>

- Болдина С.В., Копылова Г.Н., Кобзев В.А.* Исследование эффектов землетрясений в изменениях давления подземных вод: аппаратура и некоторые результаты наблюдений в скважинах полуострова Камчатка // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. С. 1–13.
<https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0594>
- Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. 464 с.
- Бузевич А.В., Смирнов С.Э.* Метод прогноза камчатских землетрясений по вариациям геомагнитного и атмосферного электрического полей Земли на фоне гелиомагнитосферных процессов // I Российско-Японский семинар “Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений”, Хабаровск, 26–29 сентября 2000 г. / Под ред. Ф.Г. Корчагина. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. 285 с.
- Гаврилов В.А., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В.* Успешный прогноз сильнейшего Жупановского землетрясения (30.01.2016 г., $M_w = 7.2$) на основе данных комплексных скважинных измерений // Труды Шестой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 40–43.
- Гаврилов В.А., Власов Ю.А., Денисенко В.П. и др.* Опыт комплексных скважинных геофизических наблюдений в целях мониторинга состояния геосреды // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006а. № 2. Вып. 8. С. 44–53.
- Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В.* Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2006б. № 1. С. 52–67.
- Гордеев Е.И., Пинегина Т.К., Ландер А.В., Кожурин А.И.* Беренгия: сейсмическая опасность и фундаментальные вопросы геотектоники // Физика Земли. 2015. № 4. С. 58–67.
<https://doi.org/10.7868/S0002333715030035>
- Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Предвестники камчатских землетрясений (по материалам Камчатского отделения Федерального центра прогнозирования землетрясений, 1998–2004 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 3–13.
- Гордеев Е.И., Федотов С.А., Чебров В.Н.* Детальные сейсмологические исследования на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 3–17.
- Гусев А.А.* О реальности 56-летнего цикла и повышенной вероятности сильных землетрясений в Петропавловске-Камчатском в 2008–2011 гг. согласно лунной цикличности // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 55–65.
- Гусев А.А., Шумилина Л.С.* Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004. № 3. С. 34–42.
- Дружин Г.И.* Опыт прогноза Камчатских землетрясений на основе наблюдений за электромагнитным ОНЧ излучением // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 51–62.
- Завьялов А.Д., Зотов О.Д.* Новый способ определения характерного размера очаговой зоны // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. С. 22–29.
<https://doi.org/10.31857/S0203030621010065>
- Зобин В.М., Гордеев Е.И., Бахтияров В.Ф. и др.* Шипунское землетрясение 6 октября 1987 г. // Землетрясения в СССР в 1987 г. М.: Наука, 1990. С. 116–133.
- Касимова В.А., Копылова Г.Н., Любушин А.А.* Вариации параметров фонового сейсмического шума на стадиях подготовки сильных землетрясений в Камчатском регионе // Физика Земли. 2018. № 2. С. 81–95.
<https://doi.org/10.7868/S0002333718020072>
- Коновалова А.А.* Проявление сейсмических аномалий перед сильными землетрясениями Камчатки // Труды Седьмой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 29 сентября – 5 октября 2019. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 277–281.
- Константинова Т.Г.* Поведение грунтов и зданий при сильных землетрясениях [Научное электронное издание: монография]. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. 188 с.
- Копылова Г.Н.* Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987–1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 39–52.
- Копылова Г.Н.* О вероятностном среднесрочном прогнозе сильных землетрясений Камчатки и параметризации предвестников // Труды Четвертой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 382–386.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки. Петропавловск-Камчатский: ООО “Камчатпресс”, 2019. 144 с.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Сейсмогидрогеологические эффекты как проявление триггерного воздействия землетрясений на подземные воды (на примере скважин Петропавловск-Камчатского полигона,

- полуостров Камчатка) // Физика Земли. 2023. № 3. С. 78–95.
<https://doi.org/10.31857/S0002333723030079>
- Копылова Г.Н., Болдина С.В., Полетаев В.А. Гидрогеологические эффекты Жупановского землетрясения 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$ // Труды Шестой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 49–53.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В., Серафимова Ю.К. Предвестники землетрясений в изменениях ионного и газового состава подземных вод: обзор мировых данных // Геохимия. 2022. Т. 67. № 10. С. 921–941.
<https://doi.org/10.31857/S0016752522100053>
- Копылова Г.Н., Касимова В.А., Любушин А.А. и др. Эффекты когерентности в изменениях параметров фонового сейсмического шума, Камчатка, 2011–2017 гг. // Труды Седьмой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 29 сентября – 5 октября 2019 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 72–77.
- Копылова Г.Н., Любушин А.А., Таранова Л.Н. Новая прогностическая технология анализа вариаций низкочастотного сейсмического шума (на примере районов Дальнего Востока России) // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 1. С. 75–91.
<https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.05>
- Копылова Г.Н., Серафимова Ю.К. О проявлении некоторых среднесрочных предвестников сильных ($M_w \geq 6.6$) землетрясений Камчатки 1987–2004 гг. // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 4. С. 17–33.
- Копылова Г.Н., Серафимова Ю.К. Процессы подготовки сильных ($M \geq 6.6$) землетрясений Камчатки 1987–1993 гг. по данным многолетних комплексных наблюдений // Вулканология и сейсмология. 2004. № 1. С. 55–61.
- Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М. Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 53–70.
- Кравченко Н.М. Оценка эффективности прогностического параметра RTL // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2005. № 2. Вып. 6. С. 99–107.
- Кравченко Н.М., Коновалова А.А. Аномалии сейсмического затишья перед Ближне-Алеутским землетрясением 17 июля 2017 г. // Труды Седьмой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 29 сентября – 5 октября 2019 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 287–289.
- Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтияров В.Ф. и др. Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 54–67.
- Левина В.И., Митюшкина С.В., Ландер С.В., Чеброва А.Ю. Сейсмичность Камчатского региона за период детальных сейсмологических наблюдений // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений / Под ред. Е.И. Гордеева, В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2012. С. 105–137.
- Любушин А.А., Копылова Г.Н., Касимова В.А., Таранова Л.Н. О свойствах поля низкочастотных шумов, зарегистрированных на Камчатской сети широкополосных сейсмических станций // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 2. Вып. 26. С. 20–36.
- Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР, 1965. 11 с.
- Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований / Отв. ред. В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. 290 с.
- Прытков А.С., Василенко Н.Ф. Парамуширское землетрясение 25 марта 2020 г., $M_w = 7.5$ // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 5. № 2. С. 113–127.
<https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.2.113-120.121-127>
- Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27.
- Рябинин Г.В. К вопросу о механизме изменения химического состава воды самоизливающихся скважин в условиях нестационарного режима (на примере скважины ГК-1, полуостров Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2022. № 4. Вып. 56. С. 75–89.
- Рябинин Г.В., Полетаев В.А. Изменения ионно-солевого состава термоминеральных вод в связи с сильнейшими землетрясениями ($M_L \geq 7.0$) юго-востока полуострова Камчатка // Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием “Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов, Петропавловск-Камчатский, 26 сентября – 2 октября 2021 г. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 283–287.
- Салтыков В.А. О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений // Физика Земли. 2017. № 2. С. 84–96.
<https://doi.org/10.7868/S0002333717010124>

- Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.
- Салтыков В.А., Воропаев П.В. Подход к проблеме комплексирования при прогнозе землетрясений // Труды Шестой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. Петропавловск-Камчатский, 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 174–178.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М., Коналова А.А. Параметрическое представление динамики сейсмичности Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 65–84.
- Серафимова Ю.К., Копылова Г.Н. Среднесрочные предвестники сильных ($M \geq 6.6$) землетрясений Камчатки 1987–2004 гг.: ретроспективная оценка их информативности для прогноза // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 3–12.
- Салтыков В.А., Сеницына В.И., Чебров В.Н. Способ контроля напряженного состояния земной коры для прогноза сильных землетрясений: Патент РФ № 2105332 // Б.И. 1998. № 5.
- Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 192 с.
- Сильные Камчатские землетрясения 1971 года / Под ред. С.А. Федотова. Владивосток: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1975. 157 с.
- Сильные камчатские землетрясения 2013 года / Под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2014. 252 с.
- Славина Л.Б., Мячкин В.В., Белянкин Г.А. Закономерности проявления во времени и пространстве кинематических предвестников землетрясений // Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясений. 1993. № 1. С. 131–138.
- Славина Л.Б., Мячкин В.В., Левина В.И. Опыт применения кинематических предвестников сейсмического поля для прогнозов землетрясений на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 216–227.
- Смирнов С.Э., Бычков В.В., Корсунова Л.П., Хегай В.В. Ионосферные и аэроэлектрические аномалии перед камчатским землетрясением 30.01.2016 // Труды Шестой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 185–189.
- Соболев Г.А. Сейсмические свойства внутренней и внешней зоны очага землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2003. № 2. С. 3–12.
- Соболев Г.А. Стадии подготовки сильных камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4/5. С. 63–72.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4. С. 64–74.
- Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г. и др. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–121.
- Фирстов П.П., Копылова Г.Н., Соломатин А.В., Серафимова Ю.К. О прогнозировании сильного землетрясения в районе полуострова Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 4. Вып. 32. С. 106–114.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О. Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2018. 148 с.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О. Долговременные тренды подпочвенного радона на Камчатке как индикаторы подготовки землетрясений с $M > 7.5$ в северо-западном обрамлении Тихого океана // Геосистемы переходных зон. 2020. Т. 4. № 3. С. 270–288. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.3.270-278.279-287>
- Фирстов П.П., Макаров Е.О. Отклик в поле подпочвенных газов на подготовку землетрясения 16 марта 2021 г. с $M_w = 6.6$ (район Кроноцкого полуострова) // Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием “Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов”, Петропавловск-Камчатский, 26 сентября – 2 октября 2021 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 312–315.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О., Глухова И.П. Особенности динамики подпочвенных газов перед Жупановским землетрясением 30.01.2016 г. с $M = 7.2$ (Камчатка) // ДАН. 2017. Т. 472. № 4. С. 462–465.
- Фирстов П.П., Широков В.А., Руленко О.П. и др. О связи динамики подпочвенного радона (^{222}Rn) и водорода с сейсмической активностью Камчатки в июле–августе 2004 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 49–59.
- Хаткевич Ю.М. О возможности среднесрочного прогноза землетрясений интенсивностью свыше 5 баллов, проявляющихся в городе Петропавловске-Камчатском // Вулканология и сейсмология. 1994. № 1. С. 63–67.

- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН / Отв. ред. Е.И. Гордеев, В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 96–112.
- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке в связи с поиском предвестников землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 34–42.
- 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. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 5–16.
- Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А. и др. Сильное землетрясение 28.02.2013 г. у юго-восточного побережья Камчатки с магнитудой $M_w = 6.8$ по данным оперативной обработки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013а. № 1. Вып. 21. С. 9–16.
- Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А. и др. Глубокое охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. с магнитудой $M_w = 8.3$ – сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013б. № 1. Вып. 21. С. 17–24.
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Опыт выявления предвестников сильных ($M \geq 6.0$) землетрясений на Камчатке в 1998–2011 гг. по материалам КФ РЭС // Вулканология и сейсмология. 2013в. № 1. С. 85–95.
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., 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.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р. и др. Сильные землетрясения на Камчатке в 2016–2017 гг. // Труды Шестой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017а. С. 89–96.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р. и др. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w = 7.8$ на границе Командорской сейсмической брешии // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017б. № 3. Вып. 35. С. 22–25.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В. и др. Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 г. с $M_w = 6.6$, $K_S = 15.0$, $I = 6$ (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017в. № 3. Вып. 35. С. 7–21.
- Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В. и др. Землетрясение Углового поднятия 20 декабря 2018 г. $M_w = 7.3$ в зоне сочленения Камчатского и Алеутского океанических желобов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 1. Вып. 45. С. 100–117. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-1-45-100-117>
- Чебров Д.В., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. О деятельности Камчатского филиала Российского экспертного совета в 2014–2017 гг. // Труды Шестой научно-технической конференции “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, Петропавловск-Камчатский, 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 195–200.
- Чебров Д.В., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. О деятельности Камчатского филиала Российского экспертного совета в 2019–2021 гг. // Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием “Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов”, Петропавловск-Камчатский, 26 сентября – 2 октября 2021 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 316–322.
- Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
- Argus D.F., Gordon R.G. No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1 // Geophys. Res. Lett. 1991 V. 18. P. 2039–2042. <https://doi.org/10.1029/91GL01532>
- Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I. Estimation of the Size of Earthquake Preparation Zones // Pure Appl. Geophys. 1979. V. 117. P. 1025–1044.
- Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Deshcherevskii A.V. et al. Stress–Strain State Monitoring of the Geological Medium Based on The Multi-instrumental Measurements in Boreholes: Experience of Research at the Petropavlovsk-Kamchatskii Geodynamic Testing Site (Kamchatka, Russia) // Pure Appl. Geophys. 2020. V. 177. P. 397–419. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02311-3>
- Gordeev E.I., Gusev A.A., Levin V.E. et al. Preliminary analysis of deformation at the Eurasia-Pacific-North America plate junction from GPS data // Geophys. J. Int. 2001. V. 147(1). P. 189–198.
- Kozhurin A.I. Active Faulting in the Kamchatsky Peninsula, Kamchatka-Aleutian Junction // Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region / Eds J. Eichelberger, E. Gordeev, M. Kasahara, J. Lees. Washington, DC: American Geophysical Union, 2007. P. 107–116.

Kopylova G., Boldina S. Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study from the Kamchatka Peninsula // *Front. Earth Sci.* 2020. V. 8. № 576017.

<https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017>

Kopylova G., Boldina S. Preseismic Groundwater Ion Content Variations: Observational Data in Flowing Wells of the Kamchatka Peninsula and Conceptual Model // *Minerals*. 2021. V. 11. № 7. P. 1–17.

<https://doi.org/10.3390/min11070731>

Kopylova G., Kasimova V., Lyubushin A., Boldina S. Variability in the Statistical Properties of Continuous Seismic Records on a Network of Stations and Strong Earthquakes: A Case Study from the Kamchatka Peninsula, 2011–2021 // *Appl. Sci.* 2022. V. 12 № 8658.

<https://doi.org/10.3390/app12178658>

Wyss M., Habermann R.E. Seismic quiescence precursory to a past and a future Kurile Island earthquake // *Pure and Applied Geophysics*. 1979. V. 117. Iss. 6. P. 1195–1211.

<https://doi.org/10.1007/bf00876215>

ON THE MANIFESTATION OF PRECURSORS OF STRONG EARTHQUAKES ($M_w \geq 6.6$) IN KAMCHATKA

G. N. Kopylova*, Yu. K. Serafimova, V. A. Kasimova

*Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

**e-mail: gala@emsd.ru*

A review of work on the search for earthquake precursors during the period of detailed seismological observations in the Kamchatka Peninsula in 1962–2022 is presented in comparison with the cumulative graph of seismic energy release and the most powerful earthquakes. A feature of the observation network for earthquake precursors is the location of most “non-seismological” types of observations in a small area of the Petropavlovsk-Kamchatsky test site (PKTS). Analysis of the 14 types of seismic, geophysical and geochemical precursors before seven 2005–2022 shallow and intermediate earthquakes with $M_w = 6.6–7.7$ showed an increase in the number of precursors N with an increase in the parameter $M_w/\lg d_h$ (d_h is the hypocentral distance to the center of PKTS in km), which characterizes the relative intensity of earthquake preparation in the PKTS area. Such a relationship between N and $M_w/\lg d_h$ traced for interplate (subduction) earthquakes in the Kamchatka fragment of the Kuril-Kamchatka Island arc as well as consistent with the manifestations of precursors in 1987–2004 and reflects the integrated manifestation of precursors before earthquakes that are the strongest and closest to the PKTS territory. Before such events, the effect of integrated manifestation of precursors (EIMP) was observed in no less than 80% of the precursors of all considered in this work. For such earthquakes, the ratio between the hypocentral distance d_h and the size of the earthquake source L (km) is $d_h/L = 3.8–1.6$, i.e., the manifestation of EIMP is characteristic of the near and middle (intermediate) zone of the future earthquake. Using the example of four separate types of precursors, it is shown that their threshold values $d_h/L = 5.0–8.5$ for events with $M_w \geq 6.6$. If, during seismic forecasting, the EIMP is diagnosed in real time, then using the threshold value $d_h/L \leq 3.8$ set for it, it is possible to significantly reduce the estimate of the distance of a future strong earthquake from the PKTS area and the Petropavlovsk-Yelizovo urban agglomeration, compared with the use of data on individual types of precursors.

Keywords: earthquakes, precursors, magnitude, earthquake forecast, Kamchatka