

О свойствах среднесрочных предвестников землетрясений и их практическом использовании

КОПЫЛОВА Г. Н.

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия
e-mail: gala@emsd.ru

Введение. Научный подход к решению проблемы прогнозирования землетрясений основывается на представлениях о стадийности процесса подготовки землетрясения и его отражении в изменениях геофизических, геохимических полей Земли, в режиме подземных вод, в поведении животных и пр. Примеры разнообразных явлений, наблюдаемых перед землетрясениями и называемых их предвестниками, приводятся в многочисленных публикациях, описывающих данные экспериментальных наблюдений в сейсмоактивных районах.

Последние годы характеризуются снижением интереса к проблеме прогнозирования сильных землетрясений с использованием предвестников (средне-краткосрочный прогноз землетрясений) в связи с ее сложностью, малым количеством достоверных данных о предвестниках и низкой эффективностью прогнозируемости времени землетрясений в диапазоне сутки-недели-месяцы-первые годы. Вместе с тем, в странах, территории которых относятся к сейсмически активным, где могут происходить сильные землетрясения, сопровождающиеся катастрофическими последствиями, в т. ч. в России, поиски предвестников землетрясений и изучение их свойств продолжаются [12]. В связи с высокой сейсмической опасностью в Камчатском крае, здесь осуществляются рядом организаций мероприятия по проведению геофизического мониторинга и оперативному прогнозированию сильных землетрясений с использованием различных видов предвестников [11].

При рассмотрении вопросов оперативного прогнозирования землетрясений с использованием предвестников необходимо четко разграничивать прогнозы землетрясений, выдаваемые специализированными советами по прогнозу землетрясений в официальные органы, и прогнозы, осуществляемые отдельными учеными и исследовательскими группами. Первый вид прогнозов имеет социальное значение, вторая группа прогнозов имеет преимущественно научный интерес. Социально значимые прогнозы выдаются в отношении наиболее сильных землетрясений, сопровождающихся негативными последствиями для населения, природной среды и инфраструктуры населенных пунктов вплоть до катастрофических. На Камчатке такими последствиями могут сопровождаться землетрясения с величинами магнитуды 7 и более [11]. При изучении предвестников землетрясений с оценкой возможности их использования для обеспечения социально значимых прогнозов необходимо ограничивать число землетрясений, включаемых в обучающие выборки, по величине их минимальной магнитуды ($M_{\text{пороговое}}$) и, соответственно, рассматривать свойства предвестников, которые проявлялись перед землетрясениями с $M \geq M_{\text{пороговое}}$.

При разработке научных прогнозов и соответствующей оценке свойств предвестников обычно не предусматривается ограничение на минимальную величину магнитуды рассматриваемых землетрясений. Это является существенным недостатком применения выявленных связей между предвестниками и относительно слабыми землетрясениями с $M < M_{\text{пороговое}}$ для обеспечения социально значимого прогноза сильных сейсмических событий в силу малого числа таких событий либо их полного отсутствия в обучающей выборке землетрясений.

В работе с использованием материалов из [4, 10] рассматриваются общие свойства пяти видов среднесрочных сейсмологических, геофизических и гидрогеологических предвестников, проявлявшихся в течение первых лет – месяцев перед камчатскими землетрясениями 1987-2004 гг. с $M \geq 6.6$ (табл.). Схема расположения гипоцентров землетрясений

приводится на рис. 1.

Таблица 1. Данные о землетрясениях с $M \geq 6.6$, произошедших в Камчатском регионе в 1987–2004 гг.

№ землетрясения	Дата ГГГГ ММ ДД	Время ЧЧ:ММ:СС	Широта, °С.Ш.	Долгота, °В.Д.	км Глубина,	R^* , км	M_w NEIC	M/l_gR	Баллы по шкале MSK64
1	1987 10 06	20:11:36	52.86	160.23	33 120	6.6	3.17	4–5 PET	
2	1992 03 02	12:29:39	52.76	160.20	20	110	6.9	3.38	5–6 PET
3	1993 06 08	13:03:37	51.20	157.80	40	210	7.5	3.23	5 PET
4	1993 11 13	01:18:07	51.79	158.83	40	140	7.0	3.27	5–6 PET
5	1996 01 01	09:57:46	53.88	159.44	0	110	6.9	3.38	4–5 PET
6	1996 06 21	13:57:06	51.27	159.63	2	210	7.0	3.01	3–5 PET
7	1996 07 16	03:48:25	56.00	165.05	40	540	6.6	2.42	–
8	1997 12 05	11:26:51	54.64	162.55	10	200	7.8	3.39	5–6 PET
9	1998 06 01	05:34:03	52.81	160.37	31	120	6.9	3.32	4–5 PET
10	1999 03 08 12:25:43	51.93	159.7 2	7	140	7.0	3.26	4–5 PET	
11	2003 06 16	22:08:02	55.30	160.34	190	340	6.9	2.73	3–4 PET
12	2003 12 05	21:26:14	55.78	165.43	29	540	6.7	2.45	2–3 PET
13	2004 06 10	15:19:55	55.68	160.25	208	380	6.9	2.68	3–4 PET

Примечание: R^* – гипоцентральное расстояние до г. Петропавловска-Камчатского; PET – г. Петропавловск-Камчатский.

Методика. Анализ среднесрочных предвестников перед землетрясениями из табл. проводился с использованием данных из [1, 3, 5–9]. В указанных публикациях представлены результаты многолетних наблюдений, описаны предвестники и даны оценки времени их проявления перед конкретными землетрясениями. Для количественной оценки предвестниковых аномалий использовался параметр T – время от начала проявления аномалии до момента землетрясения.

Следует отметить, что линии светодальномерных измерений из обсерватории Мишенная (рис. 1, Б), пункт регистрации ВСШ Начики и пункты наблюдений за режимом подземных вод расположены на сравнительно небольшой территории Петропавловского полигона (рис. 1, А). Методика анализа режима слабой сейсмичности по параметру RTL предполагает сканирование практически всей территории Камчатской сейсмоактивной зоны [5, 9].

В качестве примера на рис. 2 представлены проявления предвестников землетрясения 02.03.1992 г. с $M=6.9$, продолжительность которых изменялась от одного до девяти месяцев. По мере приближения момента землетрясения, число методов, по которым проявлялись предвестники, и число пунктов наблюдений, на которых фиксировались аномалии, постепенно увеличивалось и достигло максимума примерно за месяц до события.

На диаграммах рис. 3 показан состав и времена проявления предвестников перед землетрясениями из табл. Такой же характер проявления предвестников сохранялся и перед другими камчатскими землетрясениями, что указывает на относительное постоянство механизмов их образования.

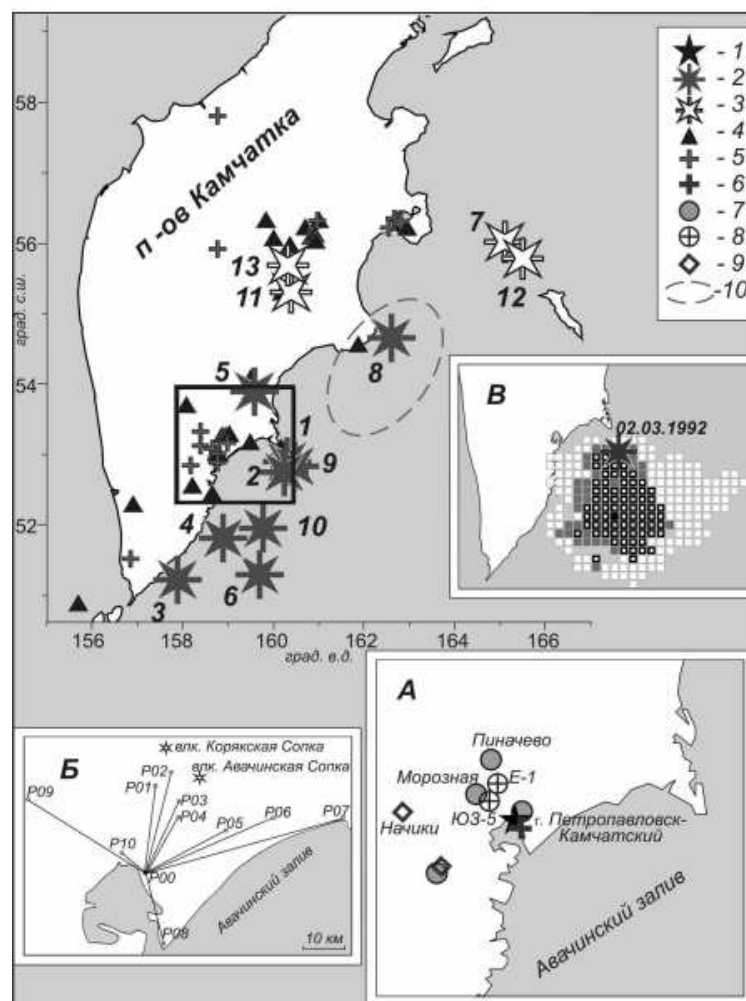


Рис. 1. Эпицентры землетрясений из табл. и расположение пунктов наблюдений. На врезках: А – расположение пунктов наблюдений за вариациями высокочастотного сейсмического шума (ВСШ), уровня и химического состава воды в скважинах на территории Петропавловского полигона; Б – схема расположения линий светодальномерных измерений из обсерватории Мишенная: $P00$ – обсерватория Мишенная, $P01, \dots, P10$ – линии светодальномерных измерений; В – пространственное положение аномалии RTL перед землетрясением 02.03.1992 г. [5]. Условные обозначения: 1 – г. Петропавловск-Камчатский; 2 – землетрясения с $M/lgR \geq 3$; 3 – землетрясения с $M/lgR < 3$; 4 – сейсмические станции; 5 – пункты GPS-наблюдений; 6 – обсерватория Мишенная; 7 – пункты гидрогеохимических наблюдений за составом подземных вод; 8 – пьезометрические скважины, на которых регистрируются вариации уровня воды; 9 – пункты наблюдений за высокочастотным сейсмическим шумом; 10 – очаговая зона Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г. ($M_w=7.8$).

В качестве показателя связи отдельных видов предвестников и землетрясений использовалась величина $s = n/m$, где n – число землетрясений, перед которыми проявлялся предвестник; m – число произошедших землетрясений. Величины s по отдельным предвестникам составили $s=0.38-0.80$ (см. табл. 4 в [10]). Если же рассматривать только наиболее сильные землетрясения, произошедшие сравнительно недалеко от территории Петропавловского полигона ($M/\lg R \geq 3$, $R=110-210$ км, рис. 1), то связь предвестников и землетрясений улучшается: $s'=0.43-1.0$. Это указывает на то, что наблюдательная сеть на территории Петропавловского полигона, ориентирована, в основном, на обнаружение предвестников землетрясений в пределах фрагмента Камчатской сейсмоактивной зоны, включающего южную часть Кроноцкого залива, Авачинский залив и Южную Камчатку (примерно $51^\circ - 54^\circ$ с. ш.).

Результаты корреляционного анализа зависимостей $T-M$ и $T-M/\lg R$ для отдельных предвестников показали отсутствие связи между временем проявления предвестников T и параметрами последующих землетрясений. Это свидетельствует о низкой информативности параметра продолжительности развития предвестников T при построении среднесрочных прогнозов по рассмотренным методам.

Заключение. Характерным свойством рассмотренных предвестников является их комплексное проявление на временных интервалах от первых лет-месяцев до недель перед наиболее сильными землетрясениями с величинами магнитуд M порядка 7 и более, сопровождавшихся сотрясениями с интенсивностью $I \geq 4-5$, а также увеличение числа предвестников по мере приближения момента землетрясения. Такое их проявление соответствует эффекту синхронизации полей Земли на стадиях подготовки сильных сейсмических событий.

Увеличение связи между предвестниками и землетрясениями наблюдается в области, приближенной к очагу готовящегося землетрясения, что проявляется в линейной зависимости числа предвестников и величины отношения $M/\lg R$ для отдельных землетрясений.

Вместе с тем, ретроспективные статистические оценки связи отдельных видов предвестников и произошедших землетрясений показывают их недостаточную надежность для практического прогнозирования времени возникновения сильных землетрясений [1, 2, 5, 11]. Величины $s=0.38-0.80$, характеризующие вероятность связи рассмотренных предвестников и сильных землетрясений, сравнительно невелики и возрастают до $s'=0.43-1.0$ для предвестников и землетрясений, произошедших южнее Кроноцкого полуострова, что определяется, в первую очередь, конфигурацией наблюдательной сети, размещенной на территории Петропавловского полигона [4, 10].

При прогнозировании сильных землетрясений вблизи Петропавловского полигона, а также сильнейших региональных землетрясений, может быть полезным параметр, показывающий относительное число зарегистрированных предвестников по отношению к всей их совокупности [2]. Для прогнозирования землетрясений севернее Кроноцкого полуострова необходимо развитие наблюдательной сети.

Имеется много причин, объясняющих нестабильность связи между землетрясениями и отдельными предвестниками и их совокупностью [4]. Первыми в их числе стоят высокий уровень зашумленности временных рядов данных наблюдений вследствие комплексного воздействия природных и техногенных факторов, а также сложность формирования предвестников полями напряжений разного масштабного уровня. Предвестники в вариациях слабой сейсмичности и в горизонтальных деформациях континентальных районов определяются, в основном, региональным масштабным уровнем изменения поля напряжений. Предвестники в режиме подземных вод и в вариациях ВСШ определяются, в основном, локальным масштабным уровнем изменения поля напряжений. Их формирование может быть связано с эпизодами развития приповерхностных зон трещинной дилатансии в горных породах.

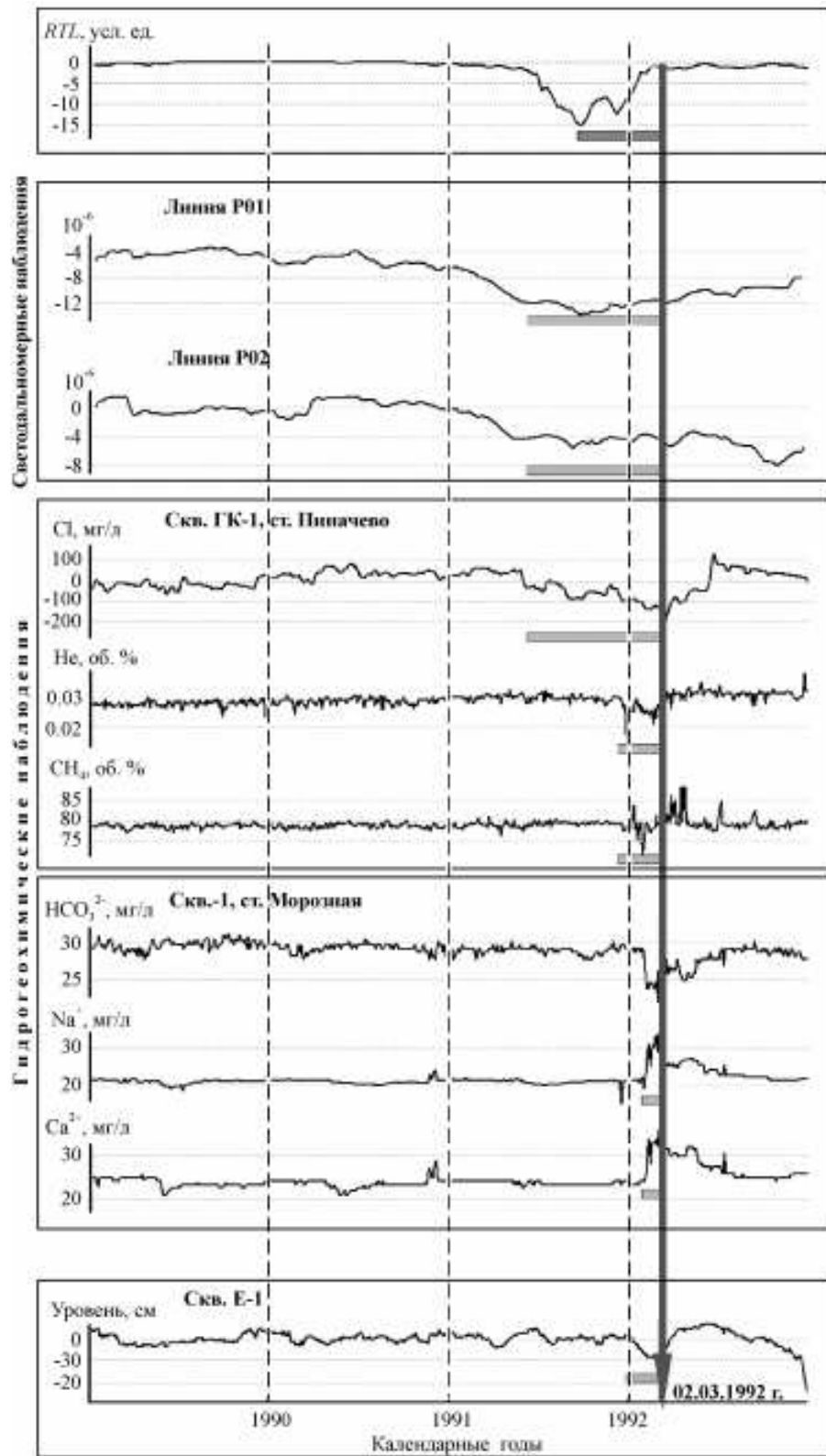


Рис. 2. Проявление предвестников перед землетрясением 02.03.1992 г. с $M_w=6.9$ по [4]. Вертикальная стрелка – момент землетрясения, R – расстояние до центра Петропавловского полигона, км. Серые утолщенные линии – временные интервалы проявления каждого из выявленных предвестников.

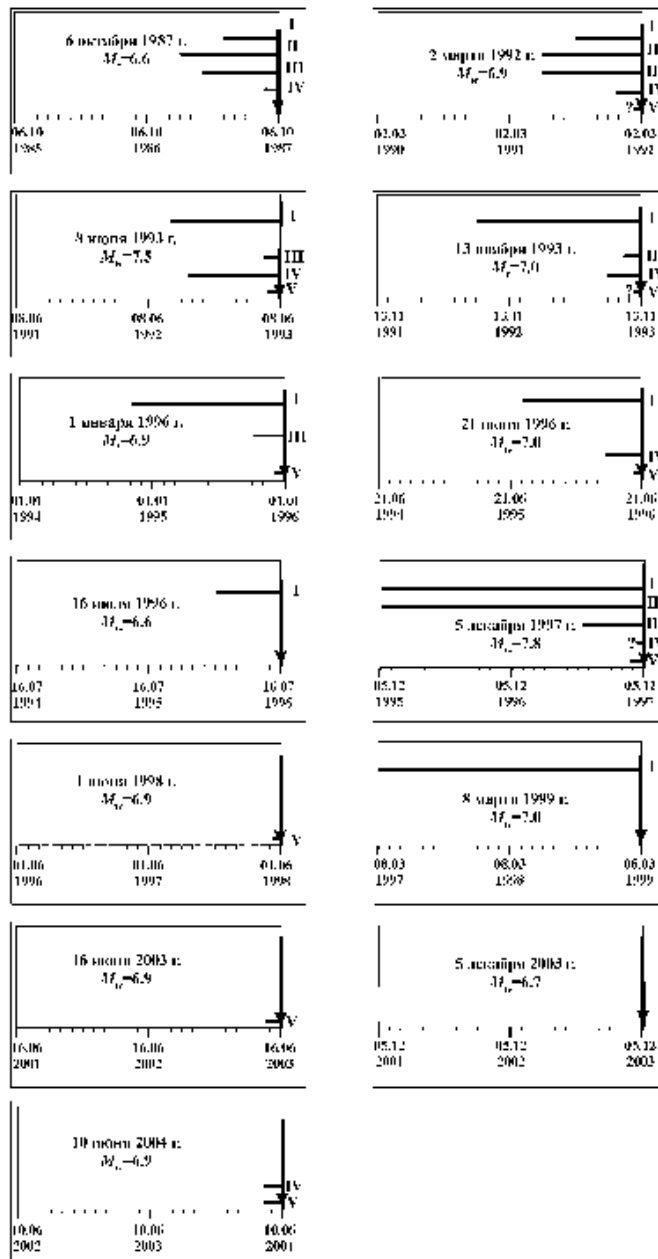


Рис. 3. Состав предвестников (I–V) и время их проявления (горизонтальные линии) перед землетрясениями 1987–2004 гг. (табл. 1). По горизонтальным осям отложены два календарных года, предшествующих землетрясению; стрелка – момент землетрясения. I – аномалии слабой сейсмичности по параметру RTL; II – укорачивание длин линий светодальномерных измерений; III – уменьшение концентрации иона хлора в воде скважины ГК-1, ст. Пиначево; IV – понижение уровня воды в скв. Е-1; V – стабилизация фазы приливной компоненты O_1 в изменениях ВСШ (пункт Начики); ? – предвестник выявлен, но нет данных о его продолжительности.

Геодинамические и флюидо-метаморфические процессы в сейсмофокальной зоне, предшествующие сильным землетрясениям, могут быть источниками вариаций регионального и локальных полей напряжений в континентальных районах Камчатки и, соответственно, причинами пространственно-временных изменений наблюдаемых параметров мониторинга. Такие процессы могут развиваться не только на стадиях подготовки отдельных сильных землетрясений, но и в связи с подготовкой групп сильных землетрясений в пределах Камчатской сейсмоактивной зоны или сейсмических активизаций [4]. Вместе с тем, опыт многолетних наблюдений показывает, что рассмотренные предвестники проявлялись в комплексе, в основном, перед наиболее сильными сейсмическими событиями (Кроноцкое землетрясение 05.12.1997 г., $M_w=7.8$), а также перед наиболее близкими к территории Петропавловского полигона (Камчатские землетрясения 06.10.1987 г. и 02.03.1992 г.).

Наиболее актуальными научными задачами при обеспечении средне-краткосрочного прогнозирования землетрясений на Камчатке являются:

- продолжение наблюдений за рассмотренными и другими параметрами геофизического мониторинга для пополнения статистики по проявлениям предвестников именно перед сильными землетрясениями, прогнозирование которых имеет социальное значение;
- развитие системы наблюдательных пунктов за предвестниками вдоль восточного побережья Камчатки южнее и севернее Петропавловского полигона;
- создание открытых баз данных по различным параметрам мониторинга за многолетний период и обеспечение открытого доступа к архивам работы специализированных советов по прогнозу землетрясений в целях более углубленного изучения отдельных предвестников и их комплекса с использованием широкого набора статистических оценок их связи с землетрясениями различного энергетического уровня.

Литература

1. 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.
- 2 Копылова Г.Н. О вероятностном среднесрочном прогнозе сильных землетрясений Камчатки и параметризации предвестников // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Четвертой научно-техн. конф. - Обнинск: ГС РАН, 2013. - С. 382-386.
3. 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.
4. 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. - № 4. - Т.10. - С. 17-33.
5. Кравченко Н.М. Оценка эффективности прогностического параметра RTL // Вестник КРАУНЦ. Сер. науки о Земле. - 2005. - № 2. - Вып. № 6. - С. 99–107.
6. Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтиаров В.Ф. и др. Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. - 2006. - № 3. - С.54–67.
7. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Предвестники сильных землетрясений на Камчатке по данным мониторинга сейсмических шумов // Вулканология и сейсмология. - 2008. - № 2. - С.110–124.
8. Соболев Г.А. Стадии подготовки сильных камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. - 1999. - № 4/5. - С.63–72.

9. Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2004. - С.96–112.

10. Серафимова Ю.К., Копылова Г.Н. Среднесрочные предвестники сильных ($M \geq 6.6$) землетрясений Камчатки 1987-2007 гг.: ретроспективная оценка их информативности для прогноза // Вулканология и сейсмология. - 2010. - № 4. - С. 3-12.

11. 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.

12. Jordan T. H., Chen Y-T., Gasparini P. et al. Operational earthquake forecasting. State of knowledge and guidelines for utilization. ICEF Final Report 30 May 2011 // Annals of Geophysics. - 2011. - V. 54. - No. 4. - P. 315-391.