

**СРЕДНЕСРОЧНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ КАК
ПРОЯВЛЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
MEDIUM-TERM PRECURSORS OF STRONG EARTHQUAKES OF КАМЧАТКА AS AN
EXAMPLE OF THE GEOPHYSICAL FIELDS INTERACTION**

Г.Н. Копылова, Ю.К. Серафимова

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, gala@emsd.ru

The results of the researching of seismological, geodesic and hydro-geological precursors before thirteen strong earthquakes of Kamchatka ($M_w=6.6-7.8$) are presented. The systematization of these precursors was realized taking into consideration their composition and duration before separate events. The values of conjunction of precursors and earthquakes ($s=0.38-0.80$) were estimated. For precursors before most strong and nearest earthquakes the values of conjunction are increasing ($s'=0.43-1.0$). It is revealed, that the duration of some precursors does not depend from magnitude of earthquakes. The probable mechanisms of examined precursors generation are discussed on a base of up-to-date conceptions concerning of earthquakes preparation processes. The self-descriptiveness of the examined precursors is estimated for the seismic forecast.

Основным методом решения проблемы средне-краткосрочного прогноза землетрясений является проведение комплексных сейсмологических, геодезических, гидрогеологических и др. видов наблюдений в сейсмоактивных регионах. Основу такого подхода составляют представления об отражении процессов подготовки землетрясений в изменениях наблюдаемых параметров, которые могут служить предвестниками будущих сейсмических событий. Систематизация данных о проявлениях предвестников и оценка устойчивости их связи с последующими землетрясениями являются необходимыми этапами разработки методов сейсмического прогноза.

На Камчатке с 60-х гг. XX в. проводятся детальные сейсмологические наблюдения, со второй половины 70-х гг. XX в. проводятся наблюдения за режимом подземных вод на сети скважин и горизонтальными деформациями земной коры методом светодальномерных измерений. На рисунке приводится расположение наблюдательных пунктов и эпицентров 13-ти землетрясений 1987-2004 гг. с $M=6.6-7.8$. Особенности распределения во времени сильных землетрясений и проявления среднесрочных предвестников в изменениях слабой сейсмичности в соответствии с поведением прогностического параметра RTL [1], длин линий светодальномерных измерений, высокочастотного сейсмического шума (ВСШ), химического состава подземных вод и уровня воды в скважинах также рассматриваются в [2-5].

Особенностью сейсмического режима Камчатки является неравномерность во времени возникновения сильных землетрясений. В течение 1959-2004 гг. выделяются пять всплесков активности, когда на интервалах времени от 1.4 до 3.3 года происходили 2-6 землетрясений с величинами магнитуд порядка 7 и более. Такие всплески активности фиксируют периоды повышенного выделения сейсмической энергии, а также, предположительно, заключительные стадии предшествующих геодинамических процессов в Камчатской зоне перехода океан - континент. Неравномерность сейсмического режима может быть связана с особенностями воздействия планетарных и космических факторов на изменения напряженного состояния среды региона, а также с нестационарностью субдукционного процесса в пределах Камчатской зоны перехода континент-океан.

Данные регистрации предвестников перед рядом сильных землетрясений указывают, с одной стороны, на возможность их среднесрочного прогноза с заблаговременностью недели-месяцы и, с другой стороны, на развитие специфических геодинамических процессов в среде Камчатского региона на стадиях подготовки таких землетрясений.

По данным светодальномерных наблюдений из обсерватории Мишенная (рис.1 Б) в качестве предвестника рассматривается бухтообразное укорачивание длин измерительных линий в течение месяцев, указывающее на горизонтальное сжатие территории полигона. По данным наблюдений за химическим составом воды самоизливающихся скважин в качестве предвестника рассматриваются аномальные изменения концентраций компонентов состава воды и свободного газа. В качестве механизма формирования такого вида предвестника рассматривается изменение условий смешивания контрастных по химическому составу подземных вод в питающих скважины водоносных системах [3]. Такой процесс может эффективно развиваться только при

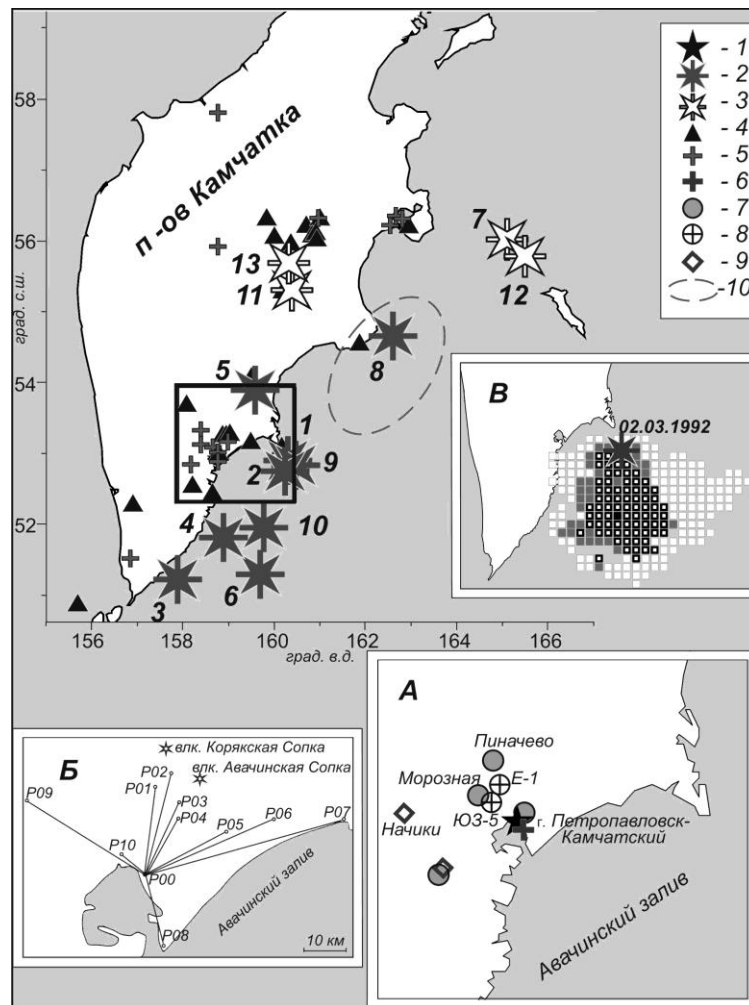


Рис.1 Карта эпицентров землетрясений 1987-2004 г. с $M \geq 6.6$ и расположение пунктов наблюдений (квадратом выделена территория Петропавловского полигона). На врезках: А - территория Петропавловского полигона и расположение пунктов наблюдений, Б - схема расположения линий светодальномерных измерений из обсерватории Мишенная, В - пространственное положение аномалии по параметру RTL, предвзявшей землетрясение 02.03.1992 г. Условные обозначения: 1 – центр сбора и обработки информации в г. Петропавловске-Камчатском; 2 – землетрясения с величинами отношения $M/lgR \geq 3.0$; 3 – землетрясения с величинами отношения $M/lgR < 3.0$; 4 – радиотелеметрические 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 - очаг Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г., $M_w = 7.8$.

неравномерном изменении проницаемости водовмещающих пород в водоносных системах. По данным уровневых наблюдений в скв. Е1 (рис.1 А) в качестве предвестника рассматривается понижение уровня воды с повышенной скоростью в течение недель – первых месяцев. Проявление такого предвестника объясняется увеличением емкости водовмещающих пород в водоносной системе и понижением в ней флюидного давления. Метод выделения предвестника в изменениях ВСШ основан на выделении стабилизации фазы его компоненты, связанной с воздействием приливной волны O_1 . В качестве механизма такого предвестника рассматривается усиление микросейсмической эмиссии вследствие разуплотнения (дилатансии) горных пород верхней части земной коры и понижение порога эффективного приливного воздействия [6].

В вариациях прогностического параметра RTL, который рассчитывается в окрестности очагов сильных землетрясений по данным об относительно слабых землетрясениях, в качестве предвестника рассматривается его бухтообразное изменение, указывающее на последовательную смену стадии сейсмического затишья на стадию активизации [1]. Пример площадного распространения аномалии сейсмического затишья перед землетрясением 02.03.1992 г. приводится на рис. В. Качественная характеристика механизма образования такого предвестника дана в [7] и включает процесс эволюции мезоструктуры «большой» области подготовки

землетрясения, размер которой может значительно превышать размеры будущего очага. В этой области могут формироваться зоны пластического течения геоматериала, соответствующие областям сейсмического затишья, а также зоны упрочнения геоматериала, в которых преобладает диссипация упругой энергии по механизму хрупкого разрушения и формируются области сейсмической активизации. В [8] подготовка землетрясения характеризуется достижением в области будущего очага предельного состояния за счет повышения уровня сдвиговых напряжений и снижения сил трения и эффективного сцепления на будущем разрыве. Наиболее благоприятные условия для формирования протяженного разрыва могут возникать при наличии в зоне разлома рядом с областью с высоким уровнем напряжений (область сейсмической активизации) области с низким уровнем напряжений (область сейсмического затишья).

Для каждого из 13-ти землетрясений (рис.1) определялся состав и времена проявления предвестников T по пяти рассматриваемым методам. Затем проводился анализ зависимостей количества методов N , по которым проявлялись предвестники, от величины параметра M/IgR (M – магнитуда землетрясения, R – эпицентрального расстояния до г. Петропавловска-Камчатского, км), а также $T - M$ и $T - M/IgR$. В качестве величины, характеризующей статистическую связь времен проявления предвестников T и параметров землетрясений M и M/IgR , использовался коэффициент ранговой корреляции Спирмена r при величине статистической значимости $p \leq 0.05$.

Для землетрясений с величинами $M/IgR \geq 3.0$ количество методов N , по которым проявлялись предвестники, варьирует от трех до пяти. Для землетрясений с величинами $M/IgR < 3.0$ $N = 0 - 2$. Такие землетрясения произошли севернее Кроноцкого полуострова (рис.), поэтому уменьшение величины M/IgR определяется их относительно большими эпицентральными расстояниями ($R = 340-540$ км) до территории Петропавловского полигона. Такая особенность проявления числа предвестников в зависимости от параметра M/IgR , учитывающего удаленность землетрясений от территории полигона, показывает, что при существующей конфигурации наблюдательной сети в среднесрочном режиме величина числа предвестников N является достаточно информативной при прогнозировании наиболее сильных и относительно «близких» землетрясений.

Результаты корреляционного анализа зависимостей $T - M$ и $T - M/IgR$ показали, что использование параметра продолжительности предвестников T не позволяет обеспечивать одновременную прогнозную оценку магнитуды и удаленности сильных землетрясений по комплексу рассмотренных методов. По полученным величинам r обнаружена прямая статистически значимая связь времени проявления предвестников T от величины магнитуды последующего землетрясения M только для сейсмических активизаций по параметру RTL , а также для понижений уровня воды в скв. Е1. По результатам корреляционного анализа связи $T - M/IgR$ не получены значимые величины r ни для одного из рассмотренных методов наблюдений [5].

По отдельным видам наблюдений имеются данные за ограниченное время, меньшее интервала времени 1987-2004 гг. Поэтому в качестве показателя связи землетрясений и предвестников использовалось отношение $s = n/m$, где n – число землетрясений, перед которыми проявлялся предвестник; m – число произошедших землетрясений в рассматриваемый период наблюдений по каждому методу (табл.1). Величина s характеризует вероятность связи отдельных видов предвестников и сильных землетрясений. Величина s' характеризует связь предвестников и наиболее сильных землетрясений, расположенных относительно близко по отношению к территории Петропавловского полигона ($M/IgR \geq 3.0$). Связь предвестников и землетрясений с $M \geq 6.6$ характеризуется величинами $s = 0.38-0.80$. Если рассматривать только наиболее сильные землетрясения, которые происходили относительно недалеко от территории Петропавловского полигона ($M/IgR \geq 3.0$, $R = 110-210$ км, рис.), то связь предвестников и землетрясений несколько улучшается ($s' = 0.43-1.0$). Это указывает на то, что наблюдательная сеть, расположенная на территории Петропавловского полигона, ориентирована, в основном, на диагностику предвестников землетрясений в пределах фрагмента Камчатской сейсмоактивной зоны, включающего южную часть Кроноцкого залива, Авачинский залив и Южную Камчатку (примерно $51-54^\circ$ с. ш.).

О механизмах формирования предвестников. В соответствии с [7 - 8] в качестве основных структурных элементов областей подготовки землетрясений выделяются зоны разломов, характеризующиеся неоднородным строением и наличием участков с различной степенью диспергированности материала (мягкие и жесткие включения), и сложно построенные и эволюционирующие во времени «большие» области подготовки землетрясений, чувствительные к флюидо-метаморфическим и динамическим процессам в зонах разломов.

Таблица.1 Оценка параметров связи s и s' между проявлениями среднесрочных предвестников по отдельным методам и сильными землетрясениями Камчатки 1987-2004 гг.

	Метод RTL	Метод ВСШ	Гидрогео- химические наблюдения	Гидрогео- динамические наблюдения	Светодально- мерные наблюдения
Рассматрива- емый период наблюдений, годы	1987-2003	1992-2004	1987-2003	1987-1998, 2003-2004	1987-1998
n	9	9	6	8	3
m	12	12	12	10	8
$s=n/m$	0.75	0.75	0.50	0.80	0.38
n'		7	6	7	3
m'		8	9	7	7
$s'=n'/m'$		0.86	0.67	1.0	0.43

Сейсмофокальная зона Камчатки может рассматриваться в качестве главного регионального разлома, в пределах которого происходит формирование подавляющего большинства очагов землетрясений, в т. ч. сильнейших. С учетом максимальной удаленности пунктов наблюдений, на которых проявлялись предвестники, от сейсмофокальной зоны, размеры «больших» областей подготовки землетрясений могут составлять до первых сотен километров.

В [7] в качестве ведущих процессов при образовании структуры «большой области» рассматривается пластическое течение и хрупкое разрушение геоматериала, а также его дилатансионное разрыхление с образованием глубинных и поверхностных зон трещинной дилатансии. В [9] в качестве наиболее универсального механизма формирования предвестников рассматривается образование приповерхностных зон трещинной дилатансии на стадиях подготовки землетрясений вследствие действия касательных и растягивающих напряжений вблизи свободной поверхности. Латеральные размеры таких зон могут значительно превышать размеры очага будущего землетрясения.

В [8] предложено разделение полей напряжений, определяющих напряженно-деформированное состояние геологической среды, по масштабным уровням в соответствии с линейными размерами: региональный масштабный уровень с размерами до первых десятков – сотен километров и локальный масштабный уровень с размерами от первых километров до первых сотен метров. Вариации слабой сейсмичности и горизонтальные деформации континентальных районов по данным светодальномерных измерений на линиях длиной до первых десятков км определяются, в основном, региональным масштабным уровнем изменения поля напряжений. Эти показатели, по-видимому, отражают наиболее общие закономерности формирования мезоструктуры «больших» областей подготовки землетрясений. Проявление аномалий в их изменениях на стадиях подготовки землетрясений составляет первые годы, примерно от одного года до трех лет.

Аномалии в режиме скважин, в изменениях ВСШ, а также ряд других предвестников, регистрируемых на отдельных наблюдательных станциях, определяются преимущественно локальным масштабным уровнем изменения напряженно-деформированного состояния верхнего слоя земной коры. В качестве наиболее вероятного механизма их формирования можно рассматривать развитие приповерхностного слоя трещинной дилатансии («пограничного» по [9] или верхнего яруса дилатансионного разрыхления по [7]). Характер проявления рассмотренных гидрогеологических предвестников (понижение уровня воды с повышенной скоростью, понижение концентрации иона хлора) и предвестник в изменениях ВСШ качественно объясняются именно таким механизмом их формирования. Длительности таких предвестников перед землетрясениями обычно меньше, чем длительности предвестников в вариациях слабой сейсмичности и в горизонтальных деформациях земной коры, и составляет десятки суток – первые месяцы. Это может быть показателем относительной независимости развития во времени вариаций регионального и локальных полей напряжений, контролирующей образование соответствующих видов предвестников. Кроме этого, длительность развития предвестников в изменениях режима подземных вод и в ВСШ может также зависеть от местных геологических и гидрогеологических условий в районах наблюдательных пунктов, определяющих особенности механизмов формирования отдельных видов предвестников при развитии трещинной дилатансии в горных породах приповерхностного слоя земной коры.

Возможные причины нестабильности проявления предвестников перед сильными землетрясениями Камчатки. Для рассмотренных предвестников характерна определенная нестабильность их связи с землетрясениями с $M=6.6-7.8$ ($s=0.38-0.80$) и некоторое улучшение этой связи с относительно близкими и сильными событиями ($s'=0.43-1.0$). Такая нестабильность связи рассмотренных предвестников и сильных землетрясений и некоторое ее улучшение для относительно близких и наиболее сильных событий дает основание полагать, что формирование предвестников может контролироваться не только процессами подготовки отдельных землетрясений, но и геодинамическими процессами, связанными с возникновением групп сильных землетрясений на Камчатке. Во время сейсмических активизаций, включающих несколько сильных землетрясений, а также их форшоки и афтершоки, поля напряжений регионального и локального масштабных уровней могут испытывать значительные флуктуации вследствие наложения процессов подготовки отдельных землетрясений, их реализации и релаксации среды на постсейсмических стадиях. Слабая статистическая связь между временем проявления большей части рассмотренных предвестников и параметрами землетрясений также указывает на правомочность гипотезы о многофакторном характере формирования предвестников.

Следует также отметить, что для некоторых из рассмотренных предвестников величины минимального порога магнитуды землетрясений, перед которыми они могут проявляться, составляют меньше 6.6 (примерно $M=4$ для ВСШ и примерно $M=5$ для гидрогеологических предвестников). Т. е. такие предвестники фиксировались и перед более слабыми сейсмическими событиями, чем события с $M \geq 6.6$. При этом оценки связи таких предвестников с более сильными событиями обычно улучшаются, по сравнению с оценками их связи с событиями минимального порогового уровня по магнитуде.

Нестабильное проявление предвестников в изменениях ВСШ и в режиме подземных вод перед землетрясениями с M порядка 5 может, с одной стороны, указывать на эпизодическую детерминированную связь процессов их подготовки и соответствующих видов предвестников. Т. е. на возможное формирование протяженных областей трещинной дилатансии на расстояниях в сотни километров от областей будущих очагов относительно слабых землетрясений.

С другой стороны, проявления предвестников перед слабыми землетрясениями может быть и случайным по отношению к слабым событиям. В этом случае проявления аномальных изменений в поведении рассматриваемых параметров, а также и собственно слабые сейсмические события, могут быть связаны с более масштабными геодинамическими процессами, определяющими возникновение сейсмических активизаций в Камчатской зоне перехода континент-океан. В качестве источников таких геодинамических процессов могут выступать протяженные концентраторы избыточных напряжений при затруднении в перемещении океанического и континентального блоков земной коры [7], активизация структурно-метаморфических преобразований на отдельных участках сейсмофокальной зоны [8] и др.

Литература

1. Соболев Г.А. Стадии подготовки сильных камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4-5. С. 63-72.
2. Копылова Г.Н. Пространственно-временные вариации геодинамического режима Камчатки по данным инструментальных наблюдений // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. Ч. 2. С. 288-291.
3. Копылова Г.Н. О связи режима подземных вод с сейсмичностью и деформациями земной коры на стадиях подготовки сильных землетрясений // Разведка и охрана недр. 2008. № 7. С. 37-45.
4. 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.
5. 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.
6. Салтыков В.А. Предвестниковые вариации высокочастотного сейсмического шума перед сильными землетрясениями Камчатки 1992-2004 гг. // Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2004. С. 116-120.
7. Гольдин С.В. Макро- и мезоструктура очаговой области землетрясения // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 1. С. 5-14.
8. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 406 с.
9. Алексеев А.С., Белоносов А.С., Петренко В.Е. О концепции междисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. Вычислительная сейсмология. Вып. 32. М.: ГЕОС, 2001. С. 81-97.