

О ВЕРОЯТНОСТНОМ СРЕДНЕСРОЧНОМ ПРОГНОЗЕ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ И ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ПРЕДВЕСТНИКОВ

Копылова Г.Н.

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru

Введение

Научное направление, называемое «прогноз землетрясений», развивается уже несколько десятилетий в науках о Земле и имеет две основные составляющие:

- всестороннее исследование процессов и явлений, сопровождающих подготовку землетрясений, включая анализ результатов лабораторных экспериментов по деформированию и разрушению образцов горных пород, с целью обоснования потенциальной предсказуемости землетрясений (теоретические исследования по проблеме);

- разработка и реализация методов прогнозирования сильных землетрясений, основывающихся на эмпирическом опыте наблюдений за сейсмичностью, полями Земли, биологическим и др. природными объектами (практика прогнозирования землетрясений).

По первому направлению имеется ряд публикаций (например, [5-6]), обосновывающих потенциальную предсказуемость землетрясений вследствие стадийного изменения напряженно-деформированного состояния геолого-геофизической среды и проявления комплекса деформационных, геофизических и геохимических явлений, предшествующих акту разрушения - формированию разрыва или подвижки по разлому. Отметим также мнение автора теории подготовки тектонического землетрясения И.П. Добровольского о современном состоянии проблемы прогноза землетрясений [2]. Автором утверждается, что предшествующими научными исследованиями *показано существование решения проблемы прогноза землетрясений* и «в этом смысле проблему можно считать решенной и работу нужно переводить в практическую плоскость».

Оценка времени возникновения сильного землетрясения с надежностью, позволяющей осуществлять превентивные мероприятия для уменьшения ущерба от сейсмической катастрофы, является одной из наиболее важных задач в практике сейсмического прогноза. Такой сейсмический прогноз условно называется средне-краткосрочным. Решение задачи средне-краткосрочного прогноза связывается с использованием комплекса предвестников (прогнозных признаков) – специфических аномальных явлений в изменениях слабой сейсмичности, геофизических и др. полей Земли, свидетельствующих о приближении сильного землетрясения.

Принципиальные положения практики использования предвестников для прогноза времени сильных землетрясений можно сформулировать следующим образом:

- осуществление прогноза возможно только на основании комплекса предвестников, т. к. отдельные предвестники могут быть мало информативными;

- связь между предвестниками и последующими землетрясениями является вероятностной, т. к. явления, называемые предвестниками, могут проявляться не перед всеми землетрясениями с величинами магнитуды не менее заданной (например, $M \geq 5$ или $M \geq 6$), а только перед некоторыми из них; при этом они могут проявляться и без последующего такого землетрясения;

- формулировки прогнозов на основании предвестников должны сопровождаться оценками вероятности возникновения ожидаемого землетрясения и эффективности использования для прогноза различных видов предвестников или же их комплекса; эффективность должна показывать, насколько использование данного предвестника или их комплекса улучшает прогноз возникновения землетрясений, по сравнению со случайным угадыванием [1, 3-5, 7];

- все предвестники, методики их диагностирования, статистические оценки их связи с землетрясениями должны подвергаться независимой экспертизе.

Практическая реализация указанных принципов осуществляется путем проведения мониторинговых наблюдений за сейсмичностью, деформациями, параметрами полей Земли и создания Специализированных советов по прогнозу землетрясений, состоящих из специалистов-экспертов. Такие Советы осуществляют сбор информации о прогнозах по отдельным сейсмопрогностическим методам, их экспертизу и прогнозирование землетрясений на основе комплекса предвестников.

Опыт многолетней работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) приводится в [7]. Ниже, при

рассмотрении вопросов развития системы прогнозирования сильных землетрясений на Камчатке по комплексу предвестников, используются материалы из этой монографии.

О работах по средне-краткосрочному прогнозу сильных землетрясений на Камчатке

Обеспечение сейсмического прогноза для Камчатского края является одним из приоритетов в проведении научных исследований институтами РАН на Камчатке. В КФ ГС РАН, ИВИС ДВО РАН и ИКИР ДВО РАН в течение многих лет проводятся различные виды мониторинговых наблюдений за предвестниками землетрясений. Особенно активно такие работы проводятся с конца 70-х гг. XX в.

В соответствии с оценками академика РАН С.А. Федотова, продолжительность развития очагов сильнейших ($M \geq 7.75$) землетрясений в пределах Курило-Камчатской сейсмоактивной зоны, которые могут сопровождаться катастрофическими последствиями для геологической среды и инфраструктуры населенных пунктов, составляет 100-200 лет (длительность сейсмического цикла). При этом происходит одновременное развитие нескольких таких очагов. Отсюда очевидно, что научно обоснованная оценка эффективности использования комплекса предвестников для прогноза времени сильнейших землетрясений возможна лишь на основании опыта специализированных наблюдений за предвестниками в течение нескольких сейсмических циклов. Отметим, что за время детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке с 1962 г. произошло всего два сильнейших землетрясения с $M \geq 7.75$ и только одно из них – Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г., $M = 7.8$, произошло в период проведения комплексных наблюдений за предвестниками.

Данные о предвестниках перед более слабыми землетрясениями с величинами магнитуд 5-7, имеющими повторяемость годы – первые десятилетия, несомненно, полезны для решения широкого круга научно-исследовательских и прикладных задач по созданию методов достоверного детектирования, систематизации и практического использования предвестников. Вместе с тем, наличие данных о предвестниках таких относительно слабых (фоновых) сейсмических событий не решает проблему прогнозирования времени сильнейших землетрясений. Поэтому научно обоснованный прогноз времени возникновения сильнейших землетрясений на Камчатке, по-видимому, является недостижимой задачей в обозримом будущем и для его осуществления необходимы целенаправленные усилия нескольких поколений исследователей в рамках национальных и межгосударственных научных программ по прогнозу сильнейших землетрясений.

Компромиссным подходом в практическом решении задачи средне-краткосрочного прогноза сильных землетрясений на Камчатке является использование методов (технологий), позволяющих на основе достоверно установленных предвестников формулировать прогноз времени возможного землетрясения с упреждением в первые годы – месяцы – недели с указанием оценок вероятности возникновения ожидаемого землетрясения и прогностической эффективности метода. При этом эффективность должна показывать, насколько использование данного вида предвестника или их комплекса улучшает прогноз, по сравнению со случайным угадыванием [1].

Создание таких «вероятностных методов прогнозирования времени сильного землетрясения» может основываться на проводимых на Камчатке мониторинговых наблюдениях за предвестниками, на их систематизации в сопоставлении с произошедшими сейсмическими событиями и их параметрическом описании. При таком подходе важную роль имеет постоянная систематизация предвестников в сопоставлении с произошедшими землетрясениями и их текущий ретроспективный анализ в целях уточнения и верификации параметров информативности предвестников для прогноза землетрясений.

Параметризация предвестников и пример вероятностного сейсмического прогноза

Параметризация предвестника на основе его ретроспективного анализа включает:

- определение параметров предвестника (амплитуды, продолжительности, заблаговременности и пр.);
- определение области и параметров землетрясений (магнитуда, район), перед которыми проявлялся данный вид предвестника;
- оценку параметров информативности использования предвестника для прогноза землетрясений.

В качестве параметров информативности предвестника для прогноза землетрясений можно использовать оценки вероятности связи предвестника и землетрясений, эффективности использования предвестника для прогноза, вероятности возникновения землетрясения при проявлении предвестника, вероятности «ложной тревоги». Заметим, что такие оценки могут различаться для различных интервалов времени. Но можно ожидать, что с увеличением интервала

времени эти величины будут стабилизироваться. В табл. 1 приводится пример параметризации предвестника, проявляющегося в изменениях уровня воды в скважине Е-1 по данным за 1996-2012 гг.

Таблица 1. Систематизация данных о сейсмопрогностической информативности урвнмерных наблюдений на скважине Е-1, Камчатка, и параметризация гидрогеодинамического предвестника (по данным за 1996-2012 гг.) [4]

Источник сейсмопрогностической информации	Данные урвнмерных наблюдений на скв. Е-1 (56.26°с.ш., 158.48°в.д.), содержащиеся в БД геофизических наблюдений на сервере КФ ГС РАН и результаты их обработки по методике [3-4]
Район мониторинга очагов землетрясений	Область в радиусе до 360 км от скважины
Изучаемый параметр	Суточная скорость изменения уровня воды, очищенная от влияния баровариаций и долговременного тренда
Сейсмопрогностический признак (предвестник)	Увеличение суточной скорости понижения уровня воды до $\leq -0.05 - -0.07$ см/сут в течение не менее 5-ти суток
Анализируемый период времени	1996 – октябрь 2012 г., время наблюдений $T = 4042$ сут (10.4 лет)
Результаты ретроспективного анализа предвестника для землетрясений с $M \geq 5.0$	
Число землетрясений (сейсмических событий), n	58
Наличие предвестника перед $З, m$	26 случаев
Суммарное «время тревоги», $\Sigma \tau$	1316 сут
Отношение $\Sigma \tau T$	$1316/4042 = 0.33$
Вероятность связи предвестника и землетрясений $P = m/n$	$26/58 = 0.45$
Эффективность использования предвестника для прогноза $I = P/(\Sigma \tau T)$	$0.45/0.33 = 1.4$
Эпицентральное расстояние $З$ до скважины, R	100–360 км
Длительность предвестника, T_p	8–70 сут
Время от начала предвестника до $З, T_a$	10–122 сут
Время от окончания предвестника до $З, dT$	82 – -56 сут
Всего случаев проявления предвестника	32 случая
Число соответствий «предвестник»→ $З$	26 случаев, вероятность возникновения землетрясения при проявлении «предвестника» $26/32 = 0.81$
Число случаев, когда после проявления предвестника не было $З$ («ложные тревоги»)	6 случаев, вероятность «ложной тревоги» $6/32=0.19$
Результаты ретроспективного анализа предвестника для землетрясений с $M \geq 5.9$	
Число землетрясений (сейсмических событий), n	11
Наличие предвестника перед $З, m$	8 случаев
Вероятность связи предвестника и землетрясений $P = m/n$	$8/11 = 0.73$
Эффективность использования предвестника для прогноза $I = P/(\Sigma \tau T)$	$0.73/0.33 = 2.2$
Результаты практического применения	Предоставление заключений в КФ РЭС с периодичностью один раз в неделю или при обнаружении предвестника в течение 2002–2012 гг.
Оценка эффективности поданных в КФ РЭС прогнозов по [7]	1.1 (для 2003–2008 гг.)

Примечание: $З$ – землетрясение; n – число землетрясений с $M \geq M_{\text{мин}}$, произошедших в районе мониторинга за анализируемый период времени; m – число случаев проявления предвестника перед землетрясениями.

28 февраля 2013 г. на южном участке Камчатской сейсмофокальной зоны на расстоянии 290 км от скв. Е-1 произошло землетрясение с $M = 6.9$ [8]. Предвестник в изменениях уровня воды начал проявляться с 16 января 2013 г., т. е. примерно за 1.5 месяца (рис. 1).

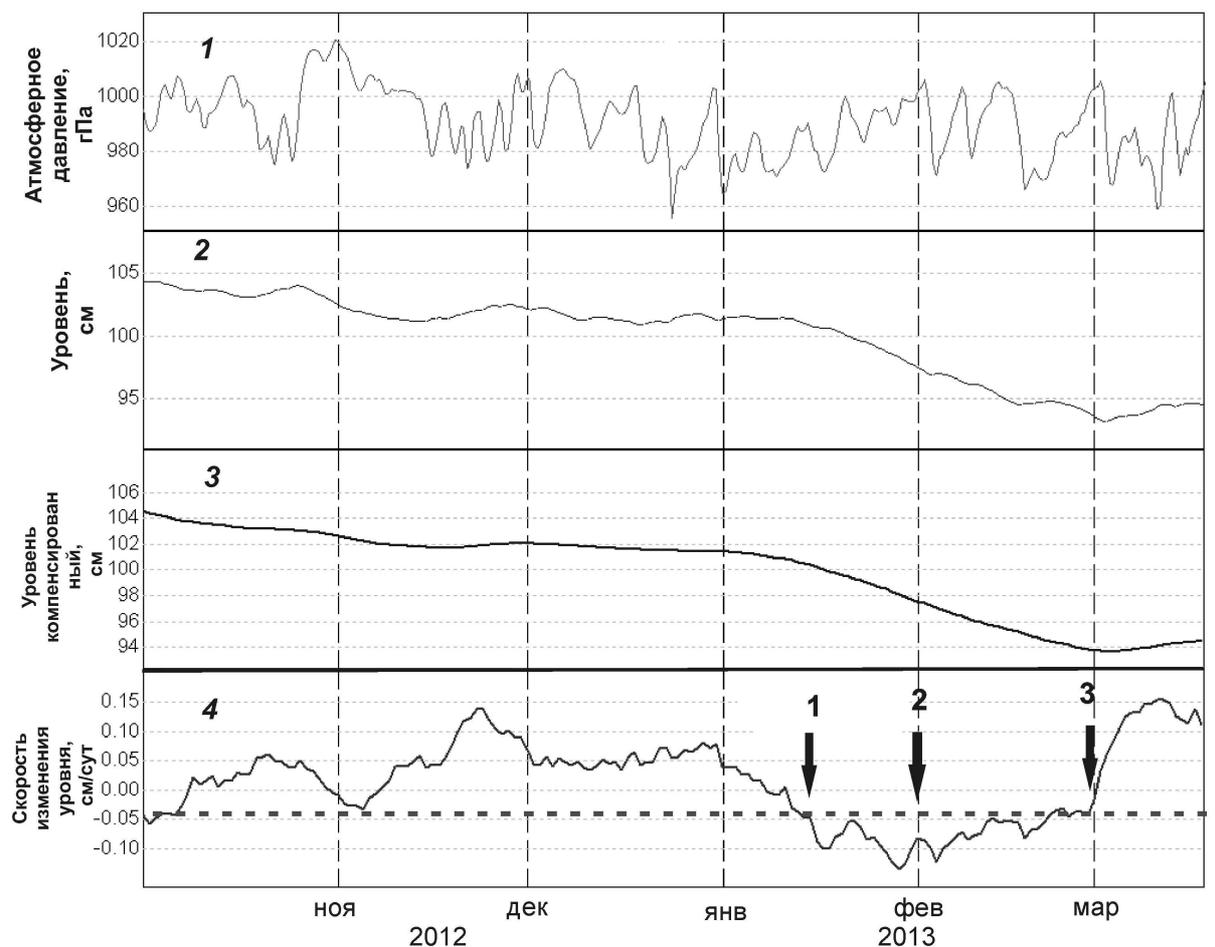


Рис. 1. Изменения уровня воды в скважине Е-1 с 1 октября 2012 г. по 18 марта 2013 г., включающие проявление предвестника в связи с землетрясением 28 февраля 2013 г.: 1 и 2 – данные 5-минутной регистрации атмосферного давления и уровня воды, 3 – среднесуточные изменения уровня воды с компенсированными баровариациями, 4 – суточная скорость изменения уровня воды с учетом скорости нисходящего тренда. На графике 4 стрелками показаны: 1 – 16 января 2013 г., начало проявления предвестника; 2 – 1 февраля 2013 г., дата подачи прогноза в КФ РЭС; 3 – 28 февраля 2013 г., дата землетрясения. Горизонтальная пунктирная линия – пороговое значение суточной скорости изменений уровня воды.

1 февраля 2013 г. на основе этого предвестника был подан прогноз в КФ РЭС в следующей формулировке: «В течение времени 1-2 месяца повышена вероятность возникновения землетрясения с $M \geq 5.0$ на расстоянии до 350 км от скважины. Оценки надежности прогноза по ретроспективным данным:

- вероятность события с $M \geq 5.0$ $p = 0.45$, прогнозная эффективность предвестника $I = 1.4$;
- вероятность события с $M \geq 5.9$ $p = 0.73$, прогнозная эффективность предвестника $I = 2.2$ ».

Произошедшее 28 февраля землетрясение с $M = 6.9$ на расстоянии 290 км от скважины Е-1 соответствует прогнозу от 1 февраля по величине магнитуды, по времени и по местоположению, т. е. прогноз от 1 февраля является оправдавшимся. Кроме этого, поданный прогноз сопровождался статистическими оценками его надежности в отношении землетрясений с различными величинами магнитуды с использованием результатов параметризации предвестника (табл. 1), поэтому он может рассматриваться как «вероятностный», а используемый при его формулировке предвестник следует считать параметрическим.

О развитии системы прогноза землетрясений по комплексу предвестников

В настоящее время при прогнозировании землетрясений экспертами КФ РЭС используется порядка 20-ти методов и предвестников [7], т. е. присутствует их комплекс. Вместе с тем, процедура принятия решений о прогнозе на основании комплекса методов и предвестников не вполне ясна и требует уточнения и развития.

Одним из перспективных направлений совершенствования системы средне-краткосрочного прогноза сильных землетрясений на Камчатке является более эффективное использование комплекса предвестников экспертами КФ РЭС. Для этого необходимо:

- иметь параметрическое описание всех предвестников;
- обязательно разделять предвестники на «параметрические» и «непараметрические», т. е. для которых имеется или отсутствует параметрическое описание;
- при использовании совокупности предвестников для прогноза необходимо вводить повышенные весовые коэффициенты для предвестников, имеющих параметрическое описание и ретроспективные оценки эффективности их использовании для прогноза, превышающие вариант «случайного угадывания» землетрясений.

Для разработки формализованного подхода к анализу комплекса предвестников представляется полезным создание временного ряда параметра, характеризующего относительное число методов (предвестников), свидетельствующих о возможности возникновения сильного землетрясения $\alpha(t_i) = \beta(t_i)/\gamma(t_i)$, $i = 1, 2, \dots, b$; $t_1 = 0$, $t_2 = t_1 + 7$, ..., $t_b = t_{b-1} + 7$, где t_i – время i -ого заседания КФ РЭС в сутках, i – порядковый номер заседания КФ РЭС (предполагается, что заседания проводятся с интервалом 7 суток); $\gamma(t_i)$ – число рассматриваемых сейсмопрогностических методов и видов предвестников на время t_i ; $\beta(t_i)$ – число методов (предвестников), по которым авторами сейсмопрогностических методик на время t_i отмечалось наличие аномалий, предвестников, «тревожных признаков» и т. д.

В результате ретроспективный анализ изменения временного ряда $\alpha(t_i)$ в сопоставлении с произошедшими землетрясениями определяется порогового значения магнитуды землетрясений $M_{\text{пор}}$ и пространственно-временные закономерности распределения землетрясений с $M \geq M_{\text{пор}}$, сопровождающихся предшествующими повышениями значений $\alpha(t_i)$; оцениваются времена заблаговременности проявления повышенных значений $\alpha(t_i)$ перед землетрясениями с $M \geq M_{\text{пор}}$. Это позволяет сформулировать важнейшие выводы о наличии/отсутствии связи ряда $\alpha(t_i)$ и сильных землетрясений Камчатки. Если такая связь выявляется, то дается ее качественное и параметрическое описание.

Кроме этого, будет полезным выполнение анализа статистических свойств временных рядов $\beta(t)$, $\gamma(t)$, $\alpha(t)$ и определение пороговых значений величины $\alpha(t)$, при которых можно ожидать землетрясения с заданными величинами M (при условии, что заданная $M \geq M_{\text{пор}}$) с различными значениями вероятности.

Дальнейшее развитие такого направления повышения информативности и обоснованности комплекса предвестников для среднесрочного прогноза сильных землетрясений Камчатки будет определяться результатами параметризации отдельных сейсмопрогностических методов и предвестников, используемых КФ РЭС при подготовке прогнозных заключений, и с обоснованием введения для них весовых коэффициентов при построении временного ряда $\alpha(t_i)$.

Список литературы

1. Гусев А.А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109-119.
2. Добровольский И.П. О проблеме прогноза тектонического землетрясения // Геофизические исследования. 2010. № 1. Т. 11. С. 35-46.
3. 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.
4. Копылова Г.Н., Сизова Е.Г. О предвестнике землетрясений, проявляющемся в изменениях уровня воды в скважине Е-1, Камчатка // Вулканизм и связанные с ним процессы. Матер. конф., посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 116-125.
5. Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: ИФЗ РАН, 2011. 56 с.
6. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
7. 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.
8. 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. 2013. № 1. Вып. 21. С. 10-16.