

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА)

Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М.

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский,
gena@emsd.iks.ru, khat@emsd.iks.ru*

Введение

С 1977 г. на Камчатке проводятся непрерывные наблюдения за режимом подземных вод, организованные специально в связи с проблемой поиска и изучения гидрогеологических предвестников землетрясений. Сеть наблюдений состоит из 11 водопунктов (скважин и источников), объединенных в четыре гидрогеологические станции: Пиначево, Морозная, Хлебозавод и Верхняя Паратунка (рис. 1). Комплекс режимных наблюдений включает в себя измерения величин атмосферного давления и температуры воздуха, измерения температуры и расхода воды скважин и источников, отбор проб воды и газа для последующего анализа в лабораторных условиях. В общей сложности, измеряется и анализируется более 20 параметров. Интервал между режимными наблюдениями для станций Пиначево, Морозная и Хлебозавод, находящихся в окрестности г. Петропавловска-Камчатского, составляет 3 суток, для станции Верхняя Паратунка – 6 дней. В работе использовались данные режимных наблюдений за период с 1985 по 2007 гг.

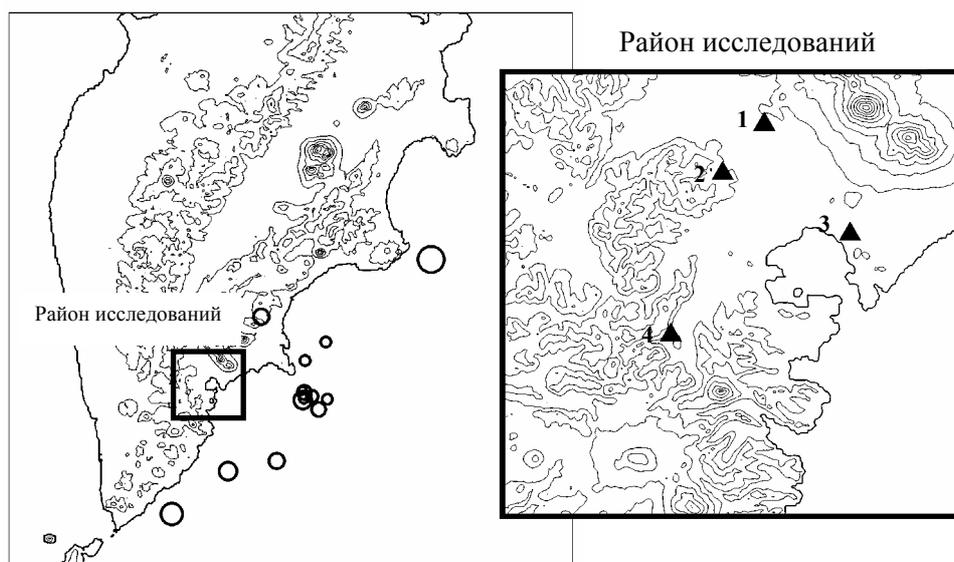


Рис. 1 Схема местоположения района исследований и эпицентров наиболее сильных землетрясений, произошедших в период с 1985 по 2007 гг. Номерами обозначены гидрогеологические станции: 1 – станция Пиначево, 2 – Морозная, 3 – Хлебозавод, 4 – Верхняя Паратунка. Круглыми маркерами обозначены эпицентры землетрясений. Размер маркера пропорционален магнитуде землетрясения.

Морфологическая типизация гидрогеохимических предвестниковых эффектов

Морфологическая типизация (классификация) это, вероятно, та часть работы, с которой должно начинаться любое исследование как предвестниковых эффектов в частности, так и любых других эффектов вообще, если они ассоциируются с процессом на выходе динамической системы. Применительно к гидрогеохимическим предвестниковым изменениям режима подземных вод под системой понимается система «пласт–скважина», а под входным процессом – изменение напряженно-деформированного состояния среды, инициированное подготовкой сильного сейсмического события. С этой точки зрения, характер изменения того или иного показателя накануне сильного землетрясения оказывается тем единственным, что достоверно известно как о самом процессе, если под ним подразумевается изменение напряженно-деформированного состояния среды, так и о состоянии системы «пласт–скважина», которое может меняться со

временем. Иными словами, морфологические особенности предвестниковых гидрогеохимических эффектов являются основой для понимания механизмов их формирования и, как следствие, основой для разработки моделей процессов, развивающихся в водонасыщенной горной породе перед сильными сейсмическими событиями.

Опыт гидрогеологических наблюдений на Камчатке показывает, что гидрогеохимические предвестники могут проявляться перед землетрясениями с магнитудами $M \geq 5$, эпицентры которых удалены от пунктов наблюдения на расстояние (R) не превышающее 350 км. Для связи пространственных и энергетических характеристик землетрясений в единую зависимость использовалось хорошо известное соотношение вида [1]

$$\varepsilon = \left(\frac{R}{10^{0.413M-2.66}} \right)^{-3}.$$

С использованием этого соотношения выборка сейсмических событий осуществлялась следующим образом. Сначала из каталога отбирались все землетрясения с $M \geq 5$ и $R \leq 350$ км. Далее, для этих событий рассчитывалась величина параметра ε . В окончательную выборку включались только те землетрясения, для которых значение параметра ε равнялось или превышало 10^{-7} , что на порядок больше величины приливной деформации. Краткая характеристика этих землетрясений представлена в таблице, а пространственное расположение их эпицентров показано на рисунке 1.

Таблица. Краткая характеристика выборки сейсмических событий

Дата	Широта	Долгота	H , км	S , км	K_s	M	ε
19.05.1985	53.54	160.62	39	140	13.5	6.1 (mb)	1.04E-07
06.10.1987	52.86	160.23	33	109	14.1	6.3 (Ms)	5.16E-07
01.03.1990	53.29	160.24	25	108	13.5	5.6 (Ms)	2.26E-07
19.12.1990	52.77	160.65	24	139	13.5	5.9 (mb)	1.06E-07
02.03.1992	52.76	160.2	20	111	14.6	6.9 (Mw)	1.01E-06
08.06.1993	51.2	157.8	40	219	15.0	7.5 (Mw)	2.30E-07
13.11.1993	51.79	158.83	40	146	14.6	7.0 (Ms)	4.37E-07
07.05.1994	52.89	160.19	20	106	13.0	5.9 (mb)	1.18E-07
01.01.1996	53.88	159.44	0	101	14.3	6.6 (Ms)	8.58E-07
05.12.1997	54.64	162.55	10	308	15.5	7.8 (Mw)	1.69E-07
01.06.1998	52.81	160.37	31	120	13.8	6.9 (Mw)	2.55E-07
08.03.1999	51.93	159.72	7	149	14.3	7.0 (Mw)	2.70E-07
08.10.2001	52.63	160.49	24	134	14.1	6.5 (Mw)	2.78E-07
26.07.2005	52.78	160.22	29	111	13.3	5.8 (Mw)	1.56E-07

Примечание. H (км) – глубина гипоцентра. S (км) – эпицентральное расстояние. K_s – энергетический класс землетрясения. M – магнитуда землетрясения: mb – рассчитанная по объемным волнам, Ms – рассчитанная по поверхностным волнам, Mw – моментная магнитуда, рассчитанная на основе сейсмического момента. ε – величина относительных деформаций (параметр Добровольского). Величины магнитуд взяты из каталога USGS (http://neic.usgs.gov/neic/epic/epic_circ.html).

В качестве гидрогеохимических предвестников рассматривались значимые изменения химического и газового состава подземных вод, формирующиеся за 300 и менее суток до землетрясения. Верхняя граница (300 суток) установлена нами исходя из накопленного опыта. Она соответствует промежутку времени от начала формирования предвестника до момента сейсмического толчка перед самыми сильными событиями, произошедшими за период специализированных гидрогеологических наблюдений на Камчатке. Предвестник считался значимым, если его амплитуда превосходила доверительный интервал $\pm 2\sigma$ (σ – среднеквадратическое отклонение) [2], рассчитанный по всей длине рассматриваемого временного ряда.

Вернемся к морфологической типизации предвестниковых гидрогеохимических эффектов. Как показывают результаты многочисленных наблюдений за режимом подземных вод в различных сейсмоопасных регионах, большинство предвестниковых вариаций имеют бухтообразный характер [4]. Реже встречаются ступенчатые и импульсные изменения.

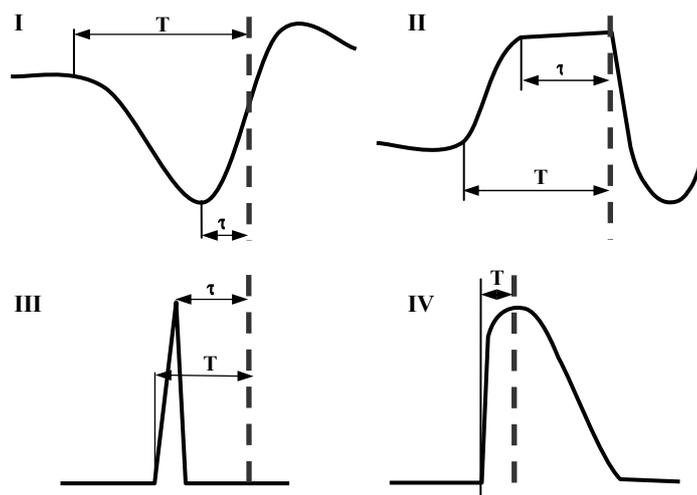


Рис. 2 Основные типы гидрогеохимических предвестниковых эффектов: I – бухтообразные, II – ступенчатые, III – импульсные, IV – скачкообразные. T – время предвестника, τ – время экстремума. Пунктирной линией обозначен условный момент землетрясения. (Обозначения времени предвестника и времени экстремума для первого и второго типов эффектов взяты из работы [4]).

Анализ формы гидрогеохимических предвестниковых эффектов, наблюдавшихся в режиме подземных вод перед сильными камчатскими землетрясениями, показал, что наиболее характерными являются бухтообразные и скачкообразные вариации [5]. Что касается результатов морфологической типизации гидрогеохимических предвестников землетрясений представленных в данной работе, то все их разнообразие удалось свести к четырем типам (рис. 2). Из них наиболее распространенными оказались бухтообразные и импульсные формы вариаций. Далее, по мере распространения, следуют скачкообразные и ступенчатые формы. Бухтообразная форма предвестниковых вариаций в подавляющем большинстве случаев представляет собой достаточно длительное (сотни суток) уменьшение содержания в воде растворенных веществ и газов, с частичным или полным восстановлением к моменту землетрясения. К медленным предвестниковым изменениям относятся и ступенчатые формы, длительность которых соизмерима с длительностью бухтообразных предвестников. Импульсная форма, напротив, выглядит как относительно быстрое увеличение и такое же быстрое восстановление концентрации макрокомпонентного и газового состава длительностью до нескольких десятков суток. Отличие предвестника импульсного типа от предвестника скачкообразного типа заключается лишь в том, что у последнего восстановление концентрации наблюдается после сейсмического события. Таким образом, четыре морфологических типа предвестников по длительности существования можно разделить на две группы – относительно медленные и быстрые изменения концентрации растворенного в воде вещества и газа. Кроме того, есть основание утверждать, что наиболее часто наблюдаемые медленные бухтообразные и быстрые импульсные формы предвестниковых кривых в большинстве случаев имеют разные знаки. Столь выраженные различия в скорости и характере изменения концентрации, установленные для этих двух морфологических типов предвестников, позволяют сделать предположение о различной природе тех процессов, которые развиваются в водонасыщенной горной породе перед сильными землетрясениями.

Сопоставление результатов морфологического анализа гидрогеохимических предвестниковых эффектов по разным пунктам наблюдения также позволяет сделать ряд интересных заключений. К примеру, обнаружено, что для одних пунктов наблюдения (скважин) наиболее характерным типом предвестниковых изменений является отрицательная бухтообразная форма, для других – положительная импульсная. Другими словами, получается, что преобладающая форма проявления предвестникового признака оказывается различной для разных пунктов наблюдения. Еще один вывод из результатов морфологического анализа, о котором необходимо упомянуть, заключается в том, что последовательность предвестниковых эффектов того или иного типа является уникальной для каждой конкретной системы «пласт – скважина». Иными словами, тип предвестникового эффекта, проявляющегося в вариациях одинаковых компонентов, но в разных пунктах наблюдения, перед одним и тем же сейсмическим событием оказывается различным.

Анализ гидрогеохимических предвестниковых эффектов

Одной из важнейших статистик предвестниковых эффектов, анализу которой уделяется незаслуженно мало внимания, является распределение времен экстремальных значений, т. е. промежутков времени, отсчитываемых от экстремального значения предвестниковой кривой до момента сейсмического толчка. Между тем, установление вида этого распределения и оценка его параметров могут оказаться очень полезными для разработки вероятностного подхода к прогнозированию времени возникновения сейсмического события. Иллюстрацию этого утверждения можно найти в работе [4], где показано, что по данным наблюдений на территории бывшего СССР и Китая до 70% предвестниковых гидрогеодинамических аномалий имели время экстремума от 0 до 20 суток. К сожалению, в этой работе отсутствует характеристика вида распределения, хотя, если руководствоваться представленными рисунками, на которых изображены гистограммы распределения времен экстремумов, то можно предположить, что распределение имеет форму, близкую к экспоненциальному.

Для оценки вида распределения времен экстремумов (τ) использовались три наиболее распространенных закона распределения случайной величины, значения которой ограничены областью $0 \leq x < \infty$ (x – случайная величина). Это – экспоненциальное распределение, логнормальное распределение и распределение Вейбулла. Для оценки качества аппроксимации указанными распределениями эмпирических данных использовался тест Колмогорова–Смирнова. Результаты теста показали, что распределение времен экстремумов лучше всего описывается распределением Вейбулла (рис. 3). Наиболее любопытным моментом здесь является то, что вероятность обнаружения максимальных значений предвестниковых вариаций не увеличивается экспоненциально, по мере приближения к моменту землетрясения, а имеет точку экстремума, после которой вероятность резко уменьшается. Значение абсциссы этой точки получилось равным 60 суткам. Результат этой оценки может быть использован для выдачи экспертного заключения о сейсмической опасности с указанием вероятного промежутка времени возникновения сейсмического события.

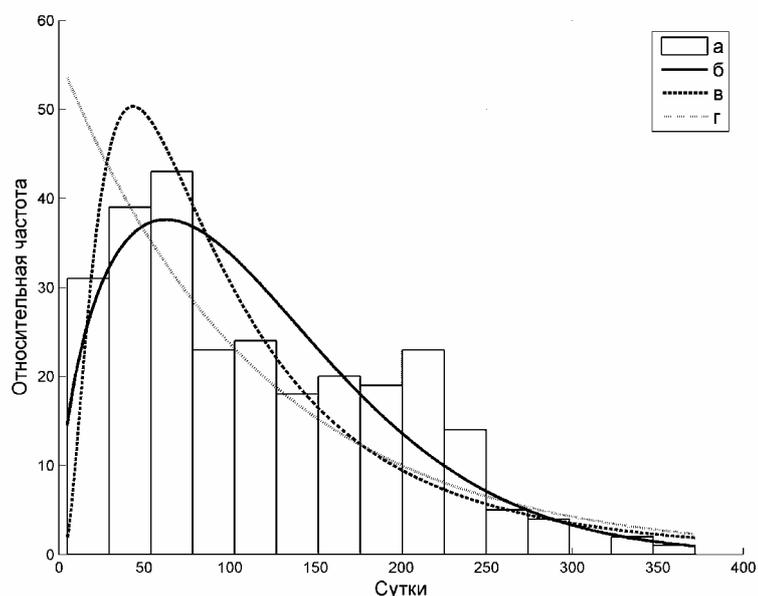


Рис. 3. Гистограмма распределения времен экстремальных значений (τ) для всех типов предвестников (а) и ее аппроксимация кривыми, соответствующими законам распределения Вейбулла (б), логнормальному (в) и экспоненциальному (г).

Следующий этап анализа был посвящен оценке корреляции между параметрами предвестниковых эффектов (времени предвестника, времени экстремума и амплитуды предвестниковой вариации) и характеристиками землетрясений (магнитудой и эпицентральной расстоянием). В отличие от работ других авторов (например, [2], [3]), где рассматривалась подобная задача, оценка корреляции проводилась отдельно для двух наиболее распространенных морфологических типов предвестников – бухтообразного и импульсного типов. В качестве критерия тесноты корреляционной связи использовался непараметрический коэффициент

корреляции Спирмена. Использование непараметрического критерия может быть оправдано как минимум по двум причинам. Во-первых, распределения оцениваемых параметров сильно отличаются от нормального. Во-вторых, объем выборки значений анализируемых величин оказывается недостаточным для обоснованного использования традиционного параметрического коэффициента корреляции.

Результаты корреляционного анализа показали, что значимые коэффициенты ранговой корреляции получились только у бухтообразных предвестниковых эффектов. Значения же самих коэффициентов оказались невысоки и составили: 0.54 для параметров T и M , 0.4 для параметров τ и M , 0.43 для T и R . Интересно, что при оценке тесноты связи между характеристиками сейсмических событий и амплитудой предвестников коэффициенты корреляции оказались незначимыми. Этот результат является подтверждением результатов подобных оценок, полученных другими авторами, в которых показано, что время предвестника и время экстремума, в отличие от амплитуды или абсолютного значения, являются более устойчивыми прогностическими характеристиками предвестниковых эффектов. Что касается бухтообразных изменений газового состава подземных вод, а также всех выделенных импульсных вариаций, то приходится полагать, что время их возникновения, равно как и их амплитуда, являются величинами, не зависящими от характеристик сейсмических событий. Иными словами, факт наблюдения, например, значимого импульсного предвестника, позволяет лишь предполагать, что в определенном временном интервале возможно возникновение сейсмического события. Сколько-нибудь достоверная оценка энергетических и/или пространственных характеристик землетрясения в этом случае вряд ли возможна.

Обсуждение результатов

В основе постановки задачи данной работы лежит одна из главных проблем в изучении предвестников землетрясений – проблема их морфологического многообразия. Как показано выше, характер изменения одного и того же показателя режима подземных вод перед сильными сейсмическими событиями может существенно отличаться не только по наблюдениям в разных точках, но и по наблюдениям в одном и том же пункте. По-видимому, не будет являться преувеличением тезис о том, что за все время исследований так и не удалось выявить универсальный прогностический признак изменения того или иного показателя, факт проявления которого с достаточной степенью достоверности можно было бы рассматривать как предвестник грядущего сейсмического события. Многообразие предвестников, нестабильность их проявления во времени и в пространстве ни в коей мере не способствует пониманию механизма их образования. Более того, сам факт многообразия предвестниковых эффектов наводит на мысль о том, что вряд ли можно говорить о каком-то одном универсальном механизме, ответственном за появление предвестников. В пользу этого, в частности, свидетельствуют результаты морфологической типизации, которые показывают, что одинаковый характер изменения того или иного показателя перед землетрясением является скорее исключением из правил, нежели закономерностью. С другой стороны, анализ распределения времен экстремумов позволяет сделать вывод, что проявление гидрогеохимических предвестниковых эффектов разного морфологического типа, в среднем, подчиняется одной и той же временной закономерности, что дает основание говорить о принципиальной возможности предсказания времени сильного землетрясения. Возможность же прогноза энергии сейсмического толчка и/или удаленности его эпицентра от пунктов наблюдения, по крайней мере, по данным гидрогеохимических наблюдений на Камчатке, пока следует рассматривать как трудно реализуемую.

Список литературы

1. Добровольский И. П. Механика подготовки тектонического землетрясения. М., 1984. 188 с.
2. Зубков С.И. Радоновые предвестники землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1981. №6. С. 74–105.
3. Киссин И.Г. Высокоамплитудные предвестники землетрясений и чувствительные зоны земной коры // Физика Земли. 1988. №6. С. 3–13.
4. Киссин И.Г. О соотношении между предвестниками землетрясений и постсейсмическими эффектами // ДАН. 1997. Т. 354. №6. С. 804–808.
5. 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.