

ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: СТРАТИФИКАЦИЯ И ОБНАРУЖЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ДЕФОРМОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ EARTHQUAKE PRECURSORS: STRATIFICATION AND DETECTION BY LASER STRAINMETER SYSTEM

М. Н. Дубров

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, mnd139@ire216.msk.su

Dissemination of earthquake precursors from probably the inner core to upper ionosphere gives rise to their spatial and temporal interference. This way the stratigraphy of earthquake precursors can be considered as a particular display of these unusual geophysical phenomena. The correlation of processes in lithosphere and in adjacent geospheres has been observed by spatial distributed laser strainmeter system. The experience in laser geophysical studies of short-term earthquake precursors over past 30 years is summarized. The laser instruments were installed in non-seismic area (Moscow Region) and in active seismic (Pamirs and Tien Shan) regions.

Эффективность деформометрических наблюдений для целей диагностики состояния геологической среды в задачах прогнозирования землетрясений подтверждается длительным опытом применения этих инструментов на геофизических станциях и геодинамических полигонах. Отличительной особенностью деформографа, вытекающей из физического принципа его действия, является чувствительность не только к временным, но и к пространственным производным поля смещений исследуемой сплошной среды.

Наблюдения за движением земной поверхности ведутся деформографами (стрейн-сейсмографами) на протяжении уже более 100 лет. Однако значимые результаты в области поиска предвестников землетрясений получены только в последние десятилетия 20-го века. Регистрация аномального сжатия горных пород величиной $dL/L \sim 3,5 \times 10^{-6}$ за 4 месяца до землетрясения, выполненная кварцевыми деформографами на геофизической станции Кондара (Таджикистан) в 1967г. [1], - это один из первых опытов достоверного обнаружения предвестников с помощью инструментов, разработанных и используемых до настоящего времени в ИФЗ РАН [2, 3]. С тех пор накоплен значительный опыт применения этих приборов на отечественных геодинамических полигонах, расположенных в сейсмоактивных зонах Евразии. За рубежом исследования по применению деформографов для диагностики состояния горных пород, в том числе в системах прогноза землетрясений, ведутся наиболее интенсивно в США и Японии. С 1968г. движения земной коры в зонах разломов Сан-Андреас, Колаверас, Хейвард (Калифорния, США) контролируются сетью из 42 станций оснащенных кварцевыми деформографами. Высокоточные измерения деформаций земной коры ведутся и в Западной Европе: рекламируемая чувствительность инваровых деформографов Университета в Штутгарте и Карлсруэ (ФРГ) составляет $dL/L \sim 10^{-11}$. В последние десятилетия в геодинамических наблюдениях все шире применяются лазерные деформографы [4], значительно превышающие по метрологическим характеристикам приборы механического типа.

Несмотря на то, что к настоящему времени разработаны многочисленные методы и выявлено большое количество различного рода предвестников, наблюдающихся перед землетрясениями, проблема оперативного прогноза сейсмической опасности была и остается одной из важнейших нерешенных проблем в геофизике. Основными препятствиями на этом пути являются отсутствие глубокого понимания физических механизмов явлений, происходящих в процессе подготовки катастрофических событий и недостаточная инструментальная база для своевременного обнаружения предвестников указанных процессов на уровне фоновых помех.

Одна из общепринятых моделей подготовки землетрясений: дилатантно-диффузная модель [5] – подтверждается множеством предвестников, имеющих бухтообразную форму [6] и повсеместно регистрируемых перед мощными землетрясениями. Распределение предвестников, вероятно, от внутреннего ядра до верхней ионосферы приводит к их пространственному и временному наложению. В этой связи можно рассматривать стратиграфию предвестников землетрясений как особое отражение этих необычных геофизических явлений.

С разработкой лазерных приборов удалось существенно повысить точность определения амплитуд деформационных предвестников и прояснить ряд спорных вопросов, возникающих при интерпретации деформографических данных, получаемых с помощью механических инструментов. Так, например, по данным 3-компонентной лазерной установки на станции Пиньон-Флэт (Калифорния), показано, что деформации, предшествующие землетрясению с $M=7.3$, не превышают 0.2% от наблюдаемых во время землетрясения. В настоящее время

лазерные деформографы применяются в системах геодинамического мониторинга в США, Японии, Италии. В нашей стране такие работы ведутся на полигоне ИРЭ РАН (Подмосковье), в ГАИШ МГУ (Северный Кавказ), а также в институтах ДВО РАН в Приморье и на Камчатке.

В настоящем исследовании разрабатывается технология раннего обнаружения предвестников землетрясений, которая строится на основе созданных в ИРЭ РАН высокоточных лазерно-интерферометрических методов измерения деформаций, а также результатов многолетних геофизических наблюдений, проводимых с применением разработанных методов и инструментов [7-9]. Важной чертой применяемого подхода является сопоставление результатов прецизионных наблюдений в твердой Земле (литосфере) с динамическими процессами, происходящими в прилегающих геосферах – атмосфере, гидросфере и ионосфере Земли, в также параллельный анализ данных, получаемых с использованием пространственно разнесенных инструментов.

Первый положительный опыт регистрации деформационного предвестника с помощью лазерного интерферометра ИРЭ представлен на рис.1(а). Нами была проведена обработка синхронных записей, выполненных в феврале-марте 1977 г. 500-метровым интерферометром на полигоне ИРЭ во Фрязино и 17-метровым кварцевым деформографом на станции ИФЗ “Протвино” [2]. Для обеих записей (см. рис.1а) характерно согласованное расширение пород в субмеридиональном направлении (S-E и NS) в период с 24.02.77 по 4.03.77 и их сжатие начиная с 5.03.77. Наблюдаемый четкий экстремум деформаций с точностью до суток совпадает по времени с разрушительным землетрясением 4.03.77 (Румыния, $M=7,0$). Более того, на обеих записях совпадают по времени также и локальные экстремумы деформаций: минимумы 26-27.02, 2-3.03, 7-8.03; максимумы 27-28.02, 6-7.03, 9-10.03, 16-19.03. Это свидетельствует о том, что регистрируемые приборами явления не являются локальными (расстояние между пунктами регистрации более 130 км), а наблюдаемая аномалия может быть связана с физическими процессами в период подготовки землетрясения. Вопрос о том, имеют ли обнаруженные явления тектоническое происхождение, до сих пор остается дискуссионным. Однако, дальное действие, характерное для проявления многих предвестников, подтверждается как результатами, приводимыми нами в дальнейших разделах работы, так и данными других авторов [5, 6].

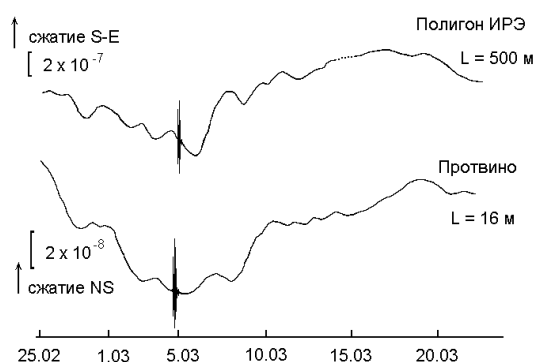


Рис.1(а) Фрязино, база 500 м

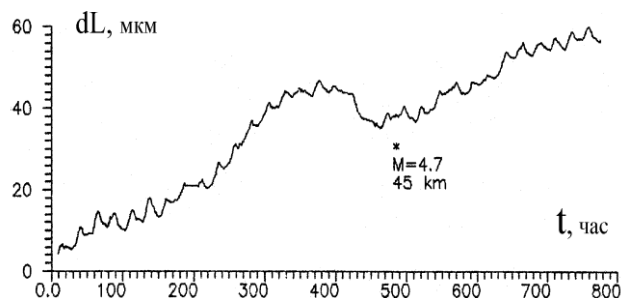


Рис.1(б) Чашма-Пойен, база 100 м

Подобные бухтообразные аномалии зарегистрированы 100-метровым лазерным деформографом на станции “Чашма-Пойен” в зоне Илякского тектонического разлома (Таджикистан) [7] для сравнительно слабых землетрясений в ближней зоне. Нами выделены четыре вида процессов с аномальным поведением деформографического сигнала:

а) Вариации среднесуточной скорости растяжения пород на фоне примерно линейного расширения, рис.1(б). Характерное время бухтообразной аномалии составляет несколько суток.

б) Кратковременные отклонения от регулярного хода деформаций длительностью десятки минут и амплитудой до 8×10^{-9} . В спокойный период прибор регистрирует сравнительно плавный ход деформаций, связанный с приливом и сезонной волной, рис.1(б).

в) Частота n появления локальных микроземлетрясений с магнитудой $M < 3,0$ – за 800 часов зарегистрировано около 40 сейсмособытий с абсолютной амплитудой деформаций 0,01-0,05 мкм. Эти события мы относим к локальным – удаление меньше 100 км.

г) Частота N спонтанных переносов начала отсчета на записи, не связанных с автоматическим переключением системы регистрации при ее выходе за пределы диапазона.

Перечислим особенности этих процессов до и после близкого землетрясения 10.08.79 г. ($M=4,7$, удаление 45 км). Среднесуточная скорость деформационного дрейфа, рис.1(б), за 7-9 суток до землетрясения возрастает более чем в 4 раза, достигая величины 9,5 мкм/сутки против средней скорости 2 мкм/сутки. Затем она меняет знак на противоположный (растяжение сменяется сжатием) за трое суток до землетрясения. Повторная смена знака скорости дрейфа сопровождается землетрясением. Частота и амплитуда кратковременных отклонений от регулярного хода деформации нарастает, достигая максимума в день землетрясения, после чего начинает падать. Частота n появления локальных микроземлетрясений обнаруживает аномалию в интервале ± 3 суток относительно времени землетрясения: за 6 суток не зарегистрировано ни одного локального события, не считая двух афтершоков через 0,5 ч и 5 ч после основного толчка. При этом частота n возрастает в 2-3 раза за 4 суток до землетрясения. И, наконец, частота N спонтанных переносов системы регистрации за 4-5 суток до землетрясения снижается до $N < 6$ раз в сутки против среднего значения $N \sim 12 \div 15$ раз в сутки. Это и предыдущее явление можно интерпретировать как предвестник в виде сейсмического затишья перед землетрясением (см. далее). Описанные экспериментальные результаты находятся в соответствии с существующими моделями механизмов подготовки землетрясений [5].

Возможность выделения предвестников в высокочастотном диапазоне была показана при изучении микросейсмических колебаний почвы, вызванных антропогенными источниками [8]. Нами установлено, что регистрируемые повсеместно лазерными деформографами сейсмоакустические колебания на выделенных частотах $f_i = 50/i$ Гц, $i = 1, 2, \dots$ имеют промышленное происхождение – вызваны работой мощных электрических машин. Являясь помехой для сейсмических приборов, эти сигналы обычно исключаются из наблюдений путем применения соответствующих заграждающих фильтров. Однако, как оказалось, эти достаточно когерентные колебания могут быть успешно использованы для изучения геофизических процессов в верхних слоях земной коры. Имея чрезвычайно малую амплитуду деформаций $10^{-11} - 10^{-12}$, эти спектральные пики выделяются, если предприняты специальные меры против проникновения в измерительные каналы мощных электрических сетевых помех на тех же частотах. Мы обнаружили, что поведение некоторых пиков может быть связано с медленными геофизическими процессами, имеющими отношение к механизмам подготовки землетрясений. В результате анализа записей огибающей сейсмоакустического сигнала в районе пика $f_2 = 24-25$ Гц общей продолжительностью около 1 года были отмечены участки записей, на которых в среднем шумоподобное поведение сигнала огибающей приобретает упорядоченный квазипериодический вид [8]. Продолжительность участков колебаний с характерными периодами 10-100 с изменяется от нескольких часов до нескольких суток, а их появление с вероятностью 0,9 совпадает по времени с наиболее сильными землетрясениями. Таким образом, мы здесь, как и в предыдущем случае, наблюдаем бухтообразные вариации прогностического параметра, которым является амплитуда огибающей сейсмоакустического сигнала. По времени появления и длительности данный предвестник в соответствии с [5, 6] относится к краткосрочным предвестникам.

Другой пример сейсмоакустического предвестника показан на рис.2. Лазерный деформограф во Фрязино за 19-27 ч до алтайских землетрясений 27.09.2003 г. ($M_s=7,3$ и $M_s=6,7$) зафиксировал микросейсмический предвестник в виде "замирания" амплитуды узких спектральных пиков в

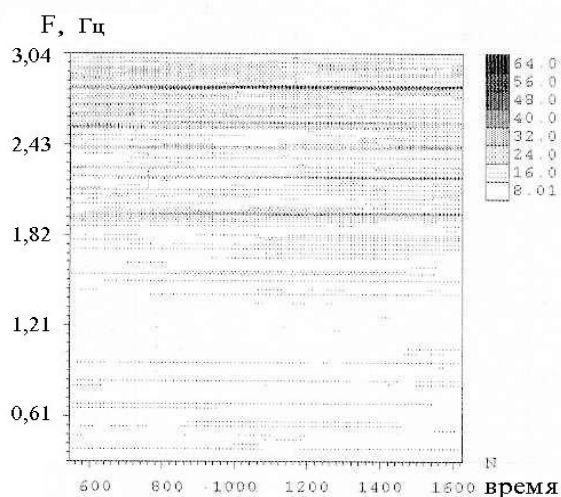


Рис.2(а)

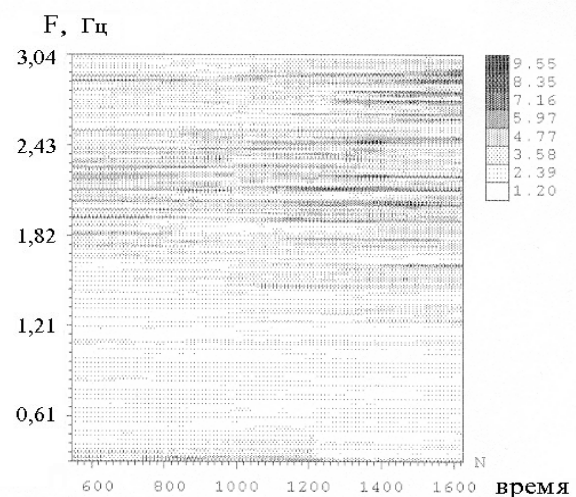


Рис.2(б)

диапазоне частот 1-3 Гц. Амплитуды наиболее интенсивных в этом диапазоне пиков 1,94 Гц и 2,79 Гц, составляющие около 64 отн.ед до развития предвестника (рис.2а), уменьшаются более чем в 7 раз и во время "затишья" на рис.2(б) практически не выделяются на случайном шумовом фоне с максимальным уровнем амплитуд 9-10 единиц (предельная амплитуда деформаций порядка $dL/L=10^{-11} - 10^{-12}$). Наблюдаемый предвестник классифицируется как сейсмическое затишье [5].

Системой пространственно разнесенных инструментов нами исследована микроструктура атмосферно-литосферных динамических взаимодействий, проявляющихся в виде квазиволновых возмущений атмосферного давления и деформаций земной поверхности, распространяющихся со скоростями 30-50 км/ч. Установлено, что увеличение амплитуды спорадических возмущений часто сопровождается ростом сейсмической активности Земли. В частности, зарегистрированы интенсивные колебания с периодами от 2-3 минут до 4-5 ч за десятки минут и за 1-2 дня до начала землетрясений с магнитудами $M=4-5$ и $M=7-8$ соответственно (рис.3).

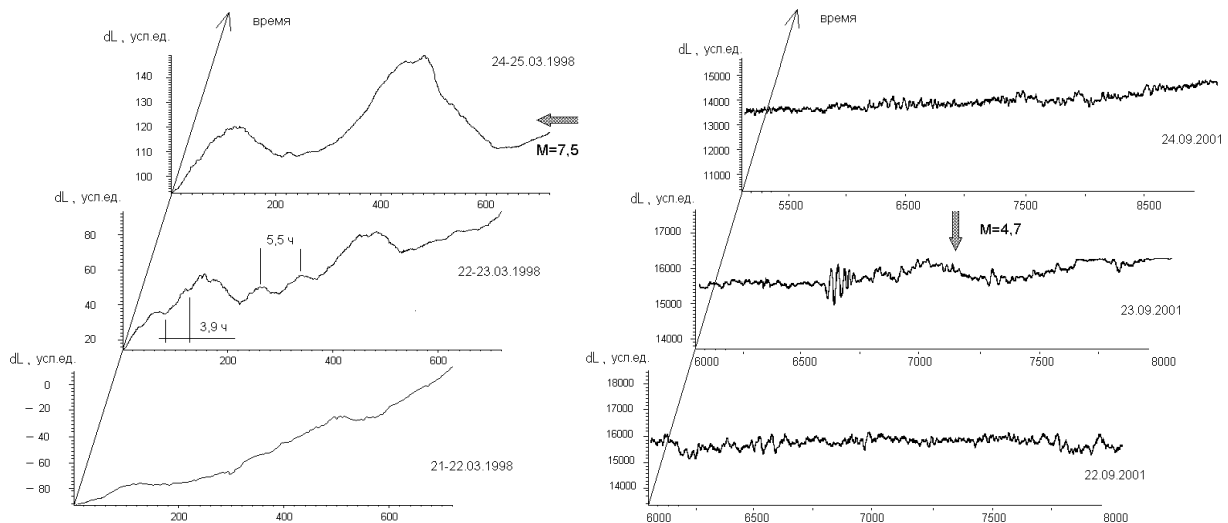


Рис.3(а) Фрязино, база 10 м, длительность 48 ч

Рис.3(б) Фрязино, база 100 м, длительность 2 ч

Таким образом, связь регистрируемых нами процессов с сейсмической активностью Земли в настоящее время можно считать доказанной, а наблюдаемые вариации прогностических параметров могут быть использованы для разработки технологии раннего обнаружения предвестников землетрясений и других природоопасных явлений. Представляется важным также исследование возможной реакции контролируемых геосфер на воздействия техногенного происхождения, в том числе, использование разрабатываемых методов при выполнении геофизического и геоэкологического мониторинга.

Литература

1. Латынина Л.А., Кармалеева Р.М., Ризаева С.Д., Старкова Э.Я., Мардонов Б. Деформации земной поверхности в Кондаре перед землетрясением 3.10.1967 г. В кн.: Поиски предвестников землетрясений на прогностических полигонах, М., "Наука", 1974, с.48-51.
2. Латынина Л.А., Кармалеева Р.М. Деформографические измерения. М., "Наука", 1978, 154 с.
3. Латынина Л.А. О методе локальных измерений деформаций земной коры, Наука и технология в России, 2002, №4(55), с.5-7.
4. Agnew D.C., Wyatt F.K. Long-Base Laser Strainmeters: A Review, Inst. Geophys. & Planet. Phys., Univ. California, San Diego, Scripps Institution of Oceanography Technical Report, 6 Jan 2003 <http://repositories.cdlib.org/sio/techreport/2>
5. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений, М., "Наука", 1993, 313 с.
6. Волков Б.И., Добровольский И.П., Зубков С.И., Секерж-Зенькович С.Я. Временные формы предвестников землетрясений, Физика Земли, 1999, №4, с.81-84.
7. Алешин В.А., Бородзич Э.В., Дубров М.Н., Еремеев А.Н., Яницкий И.Н. Лазерный деформограф на геодинамическом полигоне в Таджикистане. Радиотехника и электроника, 1980, т.25, №8, с.1781-1784.
8. Dubrov M. N. and Alyoshin V. A. Laser strainmeters: new developments and earthquake prediction applications, Tectonophysics, 1992, v.202, N2-4, pp.209-213.
9. Дубров М.Н., Казанцева О.С., Манукин А.Б., Понятовская В.И. Исследование синхронных деформаций земной поверхности и вариаций уровня подземных вод, Физика Земли, 2007, №5, с.71-79.