

**К ПРОБЛЕМЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ***Левин В.Е. *, Прилепин М.Т. **, Баранова С.М. **.***Камчатский филиал ГС РАН Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия,
lev@emsd.iks.ru****Институт физики Земли РАН, Москва, 123995, Россия, prilepin@ifz.ru***Введение**

Человеческие жертвы и разрушения, причиняемые сильными землетрясениями, на долгое время дестабилизируют состояние общества и существенно влияют на бюджет страны, поэтому прогноз землетрясений – одна из наиболее значимых проблем, стоящих перед наукой в странах имеющих сейсмоактивные районы. Многолетний опыт научного изучения сейсмических событий и лабораторных исследований напряженного состояния горных пород дает основание заключить, что землетрясение – это механический процесс внезапного высвобождения заключенной в геофизической среде энергии, когда напряжения превосходят критические. Таким образом, первичным признаком подготовки землетрясения являются деформационные процессы, обуславливающие накопление напряжений в среде. Деформирование вызывает изменение свойств среды, в частности меняются скорости распространения сейсмических волн, перемещения флюидо-газовых компонент в литосфере, электрические и магнитные свойства пород. Все эти изменения могут быть с той или иной степенью уверенности зафиксированы инструментально и могут служить прогностическими признаками при прогнозе землетрясений. Отследить различные этапы подготовки землетрясений помогут наблюдения предвестников различной природы: деформационных, электромагнитных, характеристик анизотропного распространения поперечных волн, эманаций радона, уровня подземных вод и т.д.

Фоновые значения деформаций земной коры.

Для инструментальной оценки напряженного состояния геофизической среды в процессе подготовки землетрясений, важно знать деформационные характеристики в тектонически спокойных регионах в сопоставлении с тектонически активными регионами вне зон подготовки землетрясений. Именно такие характеристики и можно назвать “фоновыми” значениями. Конечно, для тектонически активных регионов получить такие характеристики достаточно непростая задача, поскольку для землетрясений с $M > 7$ линейные размеры зон подготовки составляют сотни и даже тысячу километров, а время подготовки занимает сотни лет. По-видимому, в первом приближении, такие данные можно получить для тех регионов, где произошли землетрясения, через год-полтора, когда закончилась афтершоковая деятельность. Набор инструментальных данных для “спокойных” и тектонически активных регионов позволил бы от чисто феноменологического их определения перейти к количественному описанию их различия. Для этого в настоящее время имеется необходимая аппаратура. Так, для изучения “точечных”, моноблоковых деформаций могут служить разного рода штанговые и интерференционные деформографы с базами в десятки-первые сотни метров, обладающие чувствительностью не хуже 10^{-9} - 10^{-10} . В принципе, такими деформографами можно определять как горизонтальные, так и вертикальные компоненты деформаций. Для изучения многоблоковых структур геофизической среды более целесообразны геодезические технологии в виде мультисистемного геодезического мониторинга [9]. “Чувствительность” упомянутых технологий для расстояний в первые километры – десятки километров может быть оценена величинами $1 \cdot 10^{-6}$ – $5 \cdot 10^{-7}$, а для расстояний в сотни километров величинами $1 \cdot 10^{-8}$ – $5 \cdot 10^{-9}$. Несмотря на менее высокую чувствительность по сравнению с деформографами, геодезические технологии дают более объективные результаты из-за меньшего влияния локальных условий, которым значительно больше подвержены деформографы. Показательные данные по параметрам фоновых деформаций верхних горизонтов земной коры тектонически активного региона набраны с помощью лазерного деформографа с длиной базы 75 м в горизонтальной штольне Баксанской нейтринной обсерватории. Максимумы деформаций соответствуют суточным и полусуточным волнам и по экспериментальным оценкам за интервал наблюдений более шести тысяч часов величины горизонтальных деформаций осредненно составили 1.3 - $1.5 \cdot 10^{-8}$ [10]. Интересные материалы по инструментальному определению фоновых деформаций получены в работе [5] для тектонически активного региона

Средней Азии (станция Комплексной Сейсмологической Экспедиции в Талгаре). Важной геологической особенностью региона наблюдений является то, что в 1 км от станции проходит Заилийский глубинный разлом. В работе анализируются данные, полученные с помощью кварцевого штангового экстензомера с базой 26 м. По материалам анализа серии наблюдений для суточных амплитуд волн M_2 и 0_1 получены осредненные значения $0.8 \cdot 10^{-8}$ и $0.3 \cdot 10^{-8}$ при их теоретических значениях соответственно $1.2 \cdot 10^{-8}$ и $0.5 \cdot 10^{-8}$. Заметное отличие указанных величин авторы объясняют именно наличием близко расположенного глубинного разлома. Отметим здесь предварительный результат изучения деформирования многоблоковой структуры по материалам GPS измерений. Накопленный к настоящему времени опыт показывает, что ошибки суточных измерений с помощью GPS линий в диапазоне 10-20 км могут быть оценены величинами не хуже $0.5 \cdot 10^{-7}$. Эти цифры по-существу представляют собой аппаратный шум при оценке деформаций в указанном диапазоне длин. Таким образом, GPS измерения позволяют “отлавливать” линейные деформации только превосходящие указанные величины. В частности, в регионе северной части Главного Кавказского хребта, где расположена Баксанская Нейтринная обсерватория, развита сеть пунктов GPS со сторонами 80-150 км, измеряемая периодически раз в 2 года с 1994 г. Набранные к настоящему времени материалы дают возможность оценить активность этого тектонического региона осредненно годовыми деформациями. По нашим оценкам эти величины составляют $0.5 \cdot 10^{-8}$.

Опыт анализа материалов наблюдений по обнаружению деформационных предвестников землетрясений с помощью деформографов.

Хотя в СССР существовало несколько обсерваторий с экстензомерами и наклономерами, могущих фиксировать землетрясения, нам известна только одна работа, 1989 года [12], в которой анализируются записи приборов, перекрывающих время события Спитакского землетрясения (7.12.1988, $M=7.0$). В работе [12] представлены краткие сообщения о материалах 18 станций наблюдения в бывших республиках СССР, а так же в Словении, Чехии, ГДР. Для наших целей представляют интерес лишь ближайшие к эпицентральной области станции. Ближайшая обсерватория – Гарни, (Армения) расположена в 100 км от эпицентра. В подземных штольнях обсерватории установлены 3 кварцевых деформографа штангового типа с длиной баз 30-50 м в направлении С-Ю, В-З, $S45^{\circ}E$. Чувствительность деформографов – на уровне $2 \cdot 10^{-10}$, регистрация приведена только по двум деформографам. Кроме того, в штольне установлен наклономер системы А.Е.Островского с чувствительностью к наклонам на уровне $0''01 - 0''001$. Запись приведена только с октября 1988 по январь 1989, поэтому данные трудно анализировать, так как нет длительных записей “фоновых” значений до и после события. Можно лишь отметить, что каких-либо явных предвестников на всем протяжении записей выделить трудно. С начала приведенной регистрации скорость изменения деформации, достигающая $2 \cdot 10^{-6}$ в месяц практически постоянна как до, так и после сейсмического события. Наблюдается ко-сейсмический скачок деформации в записи по направлению В-З, а по направлению С-Ю в период, близкий к событию, регистрации не было. Можно отметить также, что скорость деформации по направлению С-Ю примерно в 1.5-2 раза больше, чем по направлению В-З. Отметим, что скачки на записи, соизмеримые по величине, встречаются как до, так и после землетрясения. Возможно, что это связано с форшоками и афтершоками. Сам факт линейного изменения деформаций после главного толчка может говорить о неполной разрядке напряжений и было бы важно сопоставить данные с записями через год-полтора, когда афтершоковая активность спадает, но, к сожалению, таких данных нет. В статье В.Г.Абашидзе в том же сборнике [12] анализируются записи наклонов и деформаций, осуществляемых на Ингурской ГЭС. Как указывает автор “...наклономеры установлены на бортах разлома, проходящего в основании плотины, а кварцевые деформографы с базой 22,5 м – вкрест простирания разлома”. Расстояние станции от эпицентра – 270 км. Здесь картина более определенная в смысле хода деформаций. Прежде всего, сама величина суточных деформаций существенно больше фоновых значений и составляет величину, близкую к 10^{-6} , за 12 дней до события. Далее деформация меняется бухтообразно достигая минимума за два дня до события и далее почти линейно возрастает. Такого типа деформации, предвещающие землетрясения, неоднократно отмечались в литературе и специалисты склонны относить их к предвестниковым. Нарастание продолжается и после землетрясения практически с той же скоростью, т.е. точно указать момент будущего землетрясения нельзя, но проявить беспокойство – нужно. Конечно, по одной станции ничего нельзя сказать о месте будущего землетрясения. Рассмотрим запись деформационных процессов в период подготовки Спитакского землетрясения

на станции г. Железноводска [12]. Эта станция находится в 300 км от эпицентра, в азимуте 15°. Кварцевый деформограф размещен в штольне длиной ~55 м и в азимуте С50°В. Прибор прописал бухтообразное изменение деформаций с амплитудой $\sim 2 \cdot 10^{-7}$ и продолжительностью в 3 недели. Более детальная кривая, построенная по часовым показаниям, прописывает еще одну бухту, с амплитудой близкой к $1 \cdot 10^{-7}$ непосредственно перед землетрясением. Момент землетрясения, как и в записи на станции Ингури, приходится на период подъема кривой. Представляется, что характер записи в целом за период с 9.11 по 6.12 должен был вызвать обеспокоенность сотрудников, работающих на станции и их стремление узнать, что происходит на соседних станциях. Какие уроки можно извлечь из анализа приведенного материала? Если из записей отдельных станций нельзя сделать достоверных выводов о готовящемся где-то в окрестности сейсмическом событии, то совокупный материал заставляет насторожиться. Однако, в то время при создании сети станций, не было организовано единого центра, куда бы стекались материалы всех станций и где было бы возможно проводить оперативный анализ данных с материалами наблюдений других геофизических параметров. Можно отметить только, что авторы статей сборника, написанных сразу после события, каких-либо соображений о готовящемся событии не высказали. Представляет интерес рассмотреть опыт записи деформационных характеристик Спитакского землетрясения с точки зрения времени проявления предвестников в сопоставлении с обобщенными данными по многим землетрясениям. Этот опыт отражен в статье С.И.Зубкова [4], где приведены зависимости времени проявления деформационных предвестников от магнитуды. Неопределенность этой зависимости, на наш взгляд, состоит в том, что она не отражает места проявления предвестника от эпицентрального расстояния, но то, что такая зависимость есть, показано в работе [13, 15]. Для магнитуды Спитакского землетрясения $M=7,0$ время проявления предвестника около 4х суток. (2-6 суток, в виду нелинейной зависимости). Приведенные ранее данные по станциям, где эти предвестники могут быть выделены более или менее явно, составляют: для Ингури 3-4 дня, Железноводска 2-3 дня, т.е. Спитакское землетрясение по этому параметру вполне вписывается в осредненную зависимость для многих землетрясений. На Камчатском полуострове с 1994 года в процесс мониторинга наблюдений для изучения деформационных процессов и их связи с сейсмичностью был включен скважинный деформограф конструкции Исиа. Деформограф представляет собой неизвлекаемый трехкомпонентный датчик, установленный в скважине глубиной 30 метров. Чувствительность деформографа $5 \cdot 10^{-8}$, наклономера $-0.1 \mu\text{кр}$, что позволяет регистрировать, как приливные волны, которые имеют амплитуду порядка 0.05 ppm, так и деформационные сигналы, связанные с землетрясениями различной магнитуды и на разном расстоянии от места установки нашего прибора [9]. Практически все зарегистрированные деформации упругие, кроме одного случая, связанного с землетрясением 31.12.1995 $M_w=5.8$, что, скорее всего, определяется локальными процессами в самой скважине и это подтверждает необходимость создания сети скважинных деформографов. С точки зрения времени проявления предвестника землетрясения представляет интерес запись горизонтальных пресеисмических и косейсмических деформаций, зарегистрированных скважинным деформографом от Нефтегорского землетрясения, где проявилась деформационная бухта на компонентах WN-ES, EN-WS с амплитудой до $0.3 \cdot 10^{-6}$ и за полутора суток до Нефтегорского землетрясения 27.05.1995 $M_w=7.5$, которое находилось на расстоянии 1063 км от места установки прибора [9] Общее время проявления деформационной бухты около 3 суток. В заключение отметим, что характер полученных деформационных материалов на разных прогностических полигонах – значим, несмотря на определенный примитивизм его представления в доступных нам сейчас данных. В совокупности по всем станциям он имеет определенную предсказательную силу: в интервале времени порядка 3х недель этот материал настораживает, а за 1,5 – 2 суток требует определенных административных действий. Однако, как показывает материал, деформометрические станции не подготовлены должным образом к решению прогностических задач. Нет сети деформографов, работающих по единой программе, аппаратура не унифицирована, не на всех станциях выполнены исследования корреляции показаний деформографов с изменением внешней температуры и давления в широком диапазоне величин, поскольку перед землетрясениями часто наблюдаются резкие изменения метеоусловий.

Обнаружение деформационных предвестников геодезическими методами.

Для разработки концепции построения сетей GPS с целью прогноза землетрясений важное значение имеют данные о характере деформационных процессов в зонах подготовки будущих землетрясений. К сожалению, данных о деформациях, предваряющих сейсмические события, в

настоящее время очень мало. Гораздо больше эмпирического материала, дающего представления о характере проявления постдеформационных процессов в функции магнитуды и параметров очага, его линейных размеров, глубины. До сих пор не потеряли своего значения данные по векторам смещений пунктов в эпицентральных областях, полученные по материалам триангуляционных работ в Японии. Благодаря высокой плотности пунктов, покрытия больших площадей и сохранности пунктов, ранее созданные сети триангуляции Японии часто “покрывали” эпицентральные области будущих землетрясений, доставляя после повторных съемок ценнейший материал для изучения деформационного поля эпицентральных областей [11, 13]. Поскольку к настоящему времени практически все острова Японии покрыты сплошной сетью GPS со сторонами порядка 15-25 км, можно надеяться на получение в скором времени не только постдеформационных, но и преддеформационных характеристик, так как точность GPS более чем на порядок выше точности сетей триангуляционных.

Насколько нам известно, вопрос о том, какая компонента деформаций – вертикальная или горизонтальная более значима, представительна и универсальна для прогноза пока не исследовался. Исторически этот вопрос решался естественным образом: до появления дальномеров единственная возможность изучать деформационные процессы обеспечивалась только нивелированием, как наиболее точным геодезическим методом. Именно нивелировки совместно с геоморфологическими данными дали исключительно ценный научный материал, реализованный в картах современных вертикальных движений, для изучения деформирования больших площадей, как тектонически активных, так и “спокойных” территорий в интервалах времени, исчисляющихся уже многими десятками лет. Нивелирные работы использовались как для долгосрочного, так и среднесрочного прогноза [3, 13]. Так в 1971-1972 годах обнаружены методом повторного нивелирования изменения превышений по нивелирному профилю в районе мыса Африка (Камчатка), которые связаны с землетрясением 15.12.1971г., $M=7.7$. Изменения превышений по знаку совпадают с механизмом землетрясения (взброс) [9]. Однако, для краткосрочного и даже среднесрочного прогноза этот метод нецелесообразен в виду его громоздкости, длительности, зависимости от погодных условий и невозможности автоматизации при развитии сетей на больших площадях, хотя с точки зрения обеспечиваемой точности и надежности измерения вертикальной компоненты деформаций нивелировка стоит пока вне конкуренции по сравнению с вертикальной компонентой получаемой из GPS наблюдений. В связи со сказанным, в дальнейшем, имея в виду вопросы обнаружения среднесрочных и краткосрочных деформационных предвестников землетрясений, ограничимся только опытами с дальномерами и GPS.

Надо сказать, что хотя теперь все внимание исследователей обращено к GPS, дальнометрия до сих пор продолжает использоваться в научных исследованиях по проблеме прогноза землетрясений и этот метод следует пока сохранить, так как для расстояний порядка 5-10 км дальнометры-рефрактометры обеспечивают не только высокую точность измерения горизонтальной компонент деформаций – вплоть до $5 \cdot 10^{-8}$, но и обеспечивают получение информации в более короткие интервалы времени, вплоть до 5-15 минут, что пока проблематично для GPS. Уязвимая сторона лазерной дальнометрии – необходимость оптической видимости, т.е. не всепогодность. Это исключительно серьезный недостаток, не позволяющий при краткосрочном прогнозе опираться только на светодальнометрию. Первый опыт использования светодальномеров кратко описан в работе Т.Рикитакэ [13] где показана динамика изменения линии длиной 25 км, измеренная геодиметром. Линия пересекает разлом Сан-Андреас, в окрестностях которого в 1960 г. произошло землетрясение Холлистер с $M=5.0$. За 15 минут до землетрясения началось резкое изменение длины линии. Эти аномальные изменения можно трактовать как деформационные. Второй случай, представляющий для нас интерес, относится к исследованиям, связанным с изучением временных и пространственных деформаций кальдеры “Long Valley” в западной Калифорнии. Измерения также выполнены геодиметром, к этому времени уже двухволновым, гарантирующим измерение расстояний 10-15 км на уровне точности $1-2 \cdot 10^{-7}$ [19]. Ретроспективно можно отметить некоторые особенности характера изменения длин линий по всему региону. Отчетливо заметно, что линии, ближайšie (30-40 км) к положению будущего эпицентра землетрясения (Чалфат, 21.07.1986, $M=6.4$) практически не меняли своей длины, а более удаленные имели явную тенденцию к увеличению, до величин более чем на порядок, по сравнению с ошибками измерений. Эта тенденция сохранилась и после землетрясения, во время которого произошел незначительный, порядка $1 \cdot 10^{-6}$, скачок практически для всех линий. Лишь для одной линии заметно резкое изменение знака перед событием с образованием типичной бухты

с амплитудой $\sim 2 \cdot 10^{-6}$. Это изменение можно трактовать как прогностический признак, но вряд ли кто проявил тревогу, когда остальные 17 линий такого явного признака не обнаружили. Более детальные данные по линейным деформациям за месяц до и после землетрясения Чалфант 21.07.1986, на наш взгляд, каких-либо прогностических признаков не проявляют.

Хотелось бы отметить, что важно иметь геодезическую сеть с линейными размерами – единицы - десятки км в районах, где в долгосрочном плане возможно сейсмическое событие. Оборудование полигона и начало наблюдений в комплексе методов должно быть начато на возможно ранней стадии. Обязателен постоянный мониторинг, по крайней мере, на нескольких пунктах, если нет возможности осуществлять его на всех пунктах. Адекватная обработка и анализ всех материалов должен осуществляться автоматизированно в режиме реального времени. Всем вышеперечисленным условиям отвечал светодальномерный мониторинг из обсерватории "Мишенная" на Камчатке в районе Авачинского залива. За период проведения светодальномерного мониторинга наблюдались медленные упругие деформации Петропавловск - Авачинского полигона порядка $3 \cdot 10^{-6}$ и быстрые упругие деформации порядка $1-3 \cdot 10^{-6}$ при точности измерений $0.5-0.8 \cdot 10^{-6}$ [1]. На основании временного ряда результатов светодальномерного мониторинга в районе Авачинского залива [9] наблюдается сжатие района (тренд) вкрест сейсмофокальной зоны со скоростью $1 \cdot 10^{-7}$ /год (1-3 мм/год). Данное сжатие, обусловлено геодинамическими процессами зоны субдукции. Кроме наблюдаемого тренда (деформации сжатия) методом светодальномерного мониторинга зарегистрированы упругие бухтообразные вариации деформаций района Авачинского залива [9], которые авторы связывают с землетрясениями 17.10.1983 $M_w=7.0$ ($\Delta=350$ км), 02.03.92 $M_w=6.8$ ($\Delta=100$ км) и 5.12.97 $M_w=7.8$ ($\Delta=350$ км) (где Δ – эпицентральное расстояние). Уменьшение амплитуды деформационных бухт с течением времени, по-видимому, связано с увеличением напряжений в районе Авачинского залива вследствие увеличения сжатия региона под влиянием геодинамических процессов в зоне субдукции. Сильные землетрясения не снимают накопившиеся напряжения в районе Авачинского залива. Наиболее значимые сбросы напряжений до $2 \cdot 10^{-6}$ происходят после землетрясений с $M > 7.0$.

На землетрясение 17.08.83 с $M_w=7.0$ был дан удачный прогноз [18], благодаря чему впервые удалось зарегистрировать горизонтальные смещения в эпицентральной зоне до, во время и после сейсмического события. Светодальномерные измерения в эпицентральной зоне землетрясения были организованы как вдоль, так и в крест предполагаемого геологического разлома. Измеренные инструментально горизонтальные компоненты смещений от данного сейсмического события: до основного толчка имела скорость 6 мм/день, а после основного толчка 16 мм/год. Величина амплитуды косейсмического скачка деформации от $2 \cdot 10^{-6}$ до $4 \cdot 10^{-6}$ на взаимно-перпендикулярных линиях, а также близкие по величине 16.9 мм/год и 16.4 мм/год скорости последующих афтершоковых деформаций сжатия и растяжения вдоль соответствующих линий, можно интерпретировать как движение по разлому вдоль реки Быстрая.

Изучение постсейсмических деформаций с помощью GPS.

Сейчас, насколько нам известно, есть только один эксперимент мониторинга деформаций, который по времени совпал с разрушительным землетрясением Landers Калифорния, 28 июня 1992, $M=7.3$ [16]. Мониторинг с выдачей результатов раз в сутки на 4х пунктах GPS сети со сторонами 108-205 км в течение 5 недель до землетрясения не выявил каких-либо заметных деформационных признаков подготовки событий, хотя два ближайших пункта наблюдения располагались в 60 и 80 км от концов разрывной зоны. К сожалению, материалы суточных наблюдений представлены только для 2х линий, далеко расположенных от разлома, тогда как наибольший интерес, по нашему мнению, представляет третья линия треугольника, ближе других расположенная к эпицентру и пересекающая разлом в его северной части. Внимательное рассмотрение данных позволяет выделить малые бухтообразные изменения за 6-3 дня до землетрясения, но это можно сделать только ретроспективно. Разброс суточных значений, особенно по восточной компоненте, достаточно велик, чтобы уверенно выделять бухты в реальном масштабе времени и считать их прогностическим признаком. Мы не анализируем вертикальную компоненту, которая, как хорошо известно, по GPS определяется в 2-3 грубее, чем горизонтальная. Этот эксперимент убедительно показал, что GPS сети со сторонами в первые сотни километров не могут служить целям краткосрочного прогноза: для этого должны строиться локальные сети.

В США в составе сети мониторинга границ литосферных плит в течение 5 ближайших лет предполагается установить 875 базовых GPS станций с приемниками нового типа Trimble NetRS. Сто базовых приемников сформируют опорную сеть постоянно действующих станций на расстоянии 200 км друг от друга. Остальные будут располагаться группами вокруг зон сбросовых нарушений, вулканов и т. д. Дополнять сети GPS должны 175 скважинных тензометров группами по 4-6 инструментов. Важность развития стационарных GPS сетей в тектонически активных районах хорошо иллюстрируется на примере сети, развиваемой в Южной Калифорнии специально для изучения деформационных процессов в регионе мегаполиса Лос Анджелес. Из планируемых 200 станций уже запущено в работу 47 станций, с расстояниями между ними 20-50 км. 16 октября 1999 г. в окрестности сети на разломе произошло землетрясение с $M=7.1$. Ближайшая к разрыву станция GPS оказалась на расстоянии около 30 км, а наиболее удавленная ~ 200 км. Обработка материалов GPS измерений, законченная через две недели после землетрясения, включала четыре дня до землетрясения (октябрь: 12-15) и пять дней – после землетрясения (октябрь 17-21). Ошибки определения смещений оцениваются авторами величинами 1-1.5 мм для горизонтальных и 4.5 мм – для вертикальных компонент. Постобработка и сравнение данных за четыре дня до и пять дней после события показали, что 34 станции сети зафиксировали косейсмические подвижки. Ближайшая к очагу станция (~ 30 км) имела подвижку около 200 мм, а удаленные (100-150 км) порядка 3-5 мм. Для ближайшей станции основная подвижка на 170 мм произошла во время главного толчка и на 10 мм после афтершока с $M=5.6$, произошедшего на 13 минут позже главного толчка. За последние 5 дней подвижка ближайшей станции не превышала 2-3 мм. О каких-либо предвестниковых деформационных процессах авторы не сообщают. Мы должны констатировать, что неуспех в получении прогнозных деформационных характеристик может быть объяснен недостаточной густотой сети: ближайшие к очагу пункты располагаются в 30-50 км. Авторы анализируют только вектора смещений отдельных пунктов, тогда как целесообразно выполнять анализ более “чувствительных” характеристик – деформаций сдвига, главных деформаций, площадной дилатации. Еще один факт хотелось бы подчеркнуть. Построенная сеть постоянных GPS станций уверенно зафиксировала подвижки пунктов от землетрясения с $M=7.1$ в радиусе 100-150 км от очага, что хорошо подтверждает ранее приводимые цифры о размерах зоны, вовлеченной в подготовку землетрясения.

На Камчатке с помощью GPS сети KAMNET были зарегистрированы смещения пунктов связанные с землетрясением 05.12.1997, $M=7.8$ [8] и землетрясением (12) 5.12.2003, $M=6.6$ [9]. На отдельных станциях KAMNET наблюдались, как постфактум, аномальные подвижки амплитудой до 20 мм за месяц до землетрясения, которые можно рассматривать, как среднесрочный геодезический предвестник [8]. Ближайшая ($\Delta=41$ км) к эпицентру землетрясения 5.12.2003 с $M=6.6$ GPS станция ВК1 сети KAMNET зарегистрировала косейсмическую деформацию. Анализ временного ряда GPS измерений на этом пункте GPS перед землетрясением не выявил вариаций смещений (предвестников) [9] подобных тем, которые были перед Кроноцким землетрясением 5.12.1997 [8].

Построение GPS сетей для изучения деформационных предвестников.

По существу, GPS-сеть, построенная в тектонически активном регионе для целей прогноза, представляет собой “многобазовый деформограф”, чувствительность которого может варьировать в пределах $5 \cdot 10^{-7}$ до $5 \cdot 10^{-9}$ в зависимости от выбираемой длины базы. Построенная для главной задачи – определения деформационных предвестников с целью прогноза землетрясений с магнитудой $M > 7.0$, GPS сеть может решать целый ряд научных и практических задач. Длительные периоды наблюдений на сети доставят важный цифровой материал по эволюции деформационных характеристик региона (главные деформации, деформации сдвига, дилатации), для уточнения карт сейсмического районирования. Среди научных выделим также задачу изучения механизма очага и релаксационных процессов постсейсмического события, если сеть покроеет хотя бы часть эпицентральной области происшедшего землетрясения. Полученные скорости GPS пунктов позволят составить детальные карты современных движений, как по горизонтальной, так и вертикальной компоненте. За десятилетний интервал годовые скорости вертикальных движений будут определяться на уровне 0.3-0.5 мм/год, с меньшими затратами, чем при использовании нивелировок. В практическом плане GPS сеть может служить основой при решении инженерно-технических задач самого различного назначения. Современные точностные возможности GPS системы можно охарактеризовать следующим образом. По опыту обычных полевых геодезических измерений за 3 часовой цикл может быть обеспечена точность измерения линии

длиной 10-20 км не хуже 1-2 см. В условиях стационарных измерений, когда может быть изучено и ослаблено влияние основных ошибок, связанных с неточным учетом влажности, влиянием многопутности лучей и “блужданием” фазового центра приемника, для указанных длин линий ошибка может быть уменьшена до уровня 0.5 мм. Изучение изменений скорости линейной деформации по всей сети даст материал для оценки магнитуды готовящегося землетрясения – по размеру площади, на которой проявляются деформации.

Для приближенного определения эпицентра будущего землетрясения целесообразно анализировать поле векторов смещения всех станций наблюдения по всем эпохам наблюдений. Анализ величин и направлений векторов позволяет достаточно уверенно фиксировать положение активных разломов и возможных “запертых” участков. Наиболее стабильная по времени зона векторов станций наблюдения отвечает запертому участку и, следовательно, наиболее вероятному положению эпицентральной зоны. Если готовиться к предсказанию землетрясения в среднесрочном и краткосрочном плане с магнитудой 7.0-7.5 по шкале Рихтера, то разрушительные последствия можно ожидать в радиусе 100-150 км с центром в эпицентре события. Геодезическая сеть, обеспечивающая точность измерения линейных деформаций на уровне $1-2 \cdot 10^{-7}$, способна “почувствовать” назревание события даже с $M=6.4$ (см. выше землетрясение Чалфант, Калифорния). Таким образом, если мы будем иметь в окрестности “защищаемого” объекта 3-5 перманентных станций с расстояниями между ними 5-10 км, то деформационные предвестники от готовящегося землетрясения с $M \geq 5$ с эпицентром в зоне 20-30 км вокруг защищаемого объекта могут быть обнаружены этой сетью постоянных станций. Поскольку площадь, вовлеченная в подготовку землетрясения, прямо связана с магнитудой, то следующим этапом должно быть построение сети GPS, наблюдаемой периодически вокруг объекта с радиусами 30-70 км и с учетом разломной зоны региона. Расстояния между пунктами должны быть выдержаны в пределах 15-25 км с такой геометрией построения, которая обеспечивала бы вычисления сдвиговых деформаций на уровне $5 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7}$. Наблюдения на этой сети должны выполняться не реже 2 раз в год. Сеть станций в кольце с радиусами 70-100 (2я очередь со сторонами 15-25 км развивается выборочно, по разломным зонам с учетом тектонической активности по сейсмическим данным). Наблюдения на этой сети должны проводиться в первые годы не реже 1 раза в год, а в последующем в соответствии с тектонической обстановкой в изучаемом регионе. В ряде конкретных условий предлагается применение лазерных дальномеров-рефрактометров типа Терраметр или комбинации: GPS – дальномер. Последнее, особенно важно при организации сетей “сейсмической защиты” объекта. Современные дальнометры при наличии видимости позволяют практически в реальном масштабе времени отслеживать деформационные изменения вокруг объекта, тогда как при использовании GPS требуется определенное время на обработку.

Как показывают результаты проведенных ранее экспериментов, скорости изменения деформаций за 10-15 мин перед землетрясением могут достигать значений порядка $2-3 \cdot 10^{-6}$, а суточные скорости могут составлять $2-7 \cdot 10^{-7}$ за 1-3 сут до события. Эти цифры могут быть использованы как ориентировочные для разработки принципов обработки данных GPS наблюдений. Главная проблема здесь – обеспечение относительной точности на уровне не хуже $1 \cdot 10^{-7}$ для сети мониторинга по массивам данных, набранных за очень короткие промежутки времени (15-30 мин). Это непростая задача, и здесь требуются дальнейшие разработки, как в части набора наблюдательных данных, так и технологии обработки. Благоприятные обстоятельства, связаны с тем, что работа идет длительное время на одних и тех же пунктах, координаты которых хорошо известны.

Заключение

Деформационные предвестники первичны по отношению к изменениям других параметров среды, наблюдающимся перед сейсмическим событием, и изучение деформаций на разных стадиях подготовки землетрясений может внести весомый вклад при решении задачи прогноза в долгосрочном, среднесрочном и краткосрочном плане. Инструментальное изучение деформационных характеристик среды на больших площадях тектонически активных районов важно так же для уточнения карт сейсмического районирования.

Аппаратурной основой решения задачи об изучении деформационных предвестников будет технология GPS, позволяющая осуществлять в приемлемые сроки покрытие больших площадей, с необходимой густотой пунктов и обеспечивающая точность определения деформационных характеристик на уровне фоновых значений. Особо следует отметить всепогодность GPS, что имеет исключительное значение для решения задачи краткосрочного,

сутки-часы до события, прогноза. Однако здесь следует иметь в виду, что предстоят дополнительные исследования для обеспечения точности, чтобы выдавать результаты через малые интервалы времени (15-30 минут); в настоящее время технология GPS на столь малых интервалах времени необходимой точности обеспечить не может, но переход к регистрации с частотой в 1 сек для стационарных GPS станций решит данную проблему.

Отдавая приоритет технологии GPS, следует продумать вопросы комплексирования аппаратуры: двухволновые лазерные дальномеры и скваженные деформографы не потеряли своего значения и данные по ним могут существенно повысить информативность и достоверность результатов, особенно для краткосрочного прогноза.

Как показал анализ материалов наблюдений на GPS сетях, частично перекрывающих эпицентральные области землетрясений, прогностических деформационных признаков четко не обнаруживается даже для сильных землетрясений. Обусловлено это, на наш взгляд, тем, что построенные сети со сторонами в десятки-сотни километров, а также и характер обработки результатов, не отвечают задачам краткосрочного обнаружения деформационных предвестников. Для этих целей должны строиться сети со сторонами 5-10 км, при этом выдача результатов должна следовать каждые 15-30 минут, а не раз в сутки, как это было для указанных выше землетрясений.

Список литературы

- 1.Бахтиаров В.Ф. Левин В.Е. Деформации земной поверхности по данным круглогодичных светодальномерных наблюдений из обсерватории Мишенная, Камчатка, с 1979 по 1985 г.г. Вулканология и сейсмология. 1989 №2. с.94-101
- 2.Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И., Леонов В.Л., Чебров В.Н. Коровая сейсмичность Камчатки, Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно методической сейсмологической партии. Петропавловск-Камчатский, КПД, 2004, с. 62-74.
- 3.Гусева Т.В. Современные движения земной коры в зоне перехода от Памира к Тянь-Шаню. М., ИФЗ, 1986, 171с.
- 4.Зубков С.И. Времена возникновения предвестников землетрясений. Физика Земли, 1987, № 5 с. 87-91.
- 5.Латынина Л.А., Г.И. Аксенович. О приливных деформациях на станции "Талгар". Сб. Приливные деформации Земли, Наука, М. 1975.
- 6.Латынина Л.А., Ризаева С.Д. Об изменениях приливных деформаций перед землетрясениями. Изв. АН СССР, Физика Земли, № 9, 1975, с. 97-103.
- 7.Латынина Л.А. Задачи наземных локальных деформационных измерений. Сб. Напряженно-деформационное состояние и сейсмичность литосферы, СОРАН, 2003, с.25-31.
- 8.Левин В.Е., Гордеев Е.И., Бахтиаров В.Ф., Касахара М. Предварительные результаты GPS мониторинга на Камчатке и Командорских островах, Вулканология и сейсмология, 2002, № 1, с.3-11.
- 9.Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтиаров В.Ф., Павлов В.М., Прилепин М.Т., Титков Н.Н. Современные движения земной коры на Камчатке и их связь с сейсмической и вулканической активностью. Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. К 25-летию Камчатской опытно методической сейсмологической партии. Петропавловск-Камчатский, КПД, 2004, с. 113-135.
- 10.Милуков В.К., Кравчук В.К. Наблюдения спектра деформаций Земли лазерным интерферометром-деформографом. Вестник МГУ, сер.3 Физика, Астрономия 1996, №2, с.14-18.
- 11.Моги К. Предсказание землетрясений, М.: Мир, 1988, 382 с.
- 12.Нерсесов И.Л., Латынина Л.А., Деформационные процессы в период, предшествующий Спитакскому землетрясению. АН СССР, ИФЗ, М. 1989, 93с.
- 13.Рикитаке Т. Предсказание землетрясений, М.Мир, 1979 г., с. 388
- 14.Сидорин А.Я. О краткосрочных предвестниках двух землетрясений на Гармском полигоне. Сейсмические приборы. Вып. 35, 2001, с. 19-30.
- 15.Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993, 313 с.
- 16.Bock Y., et.al. Detection of Crustal Deformation from the Landers Earthquake Sequence Using Continuous Geodetic Measurements // Nature, 1993, No. 361, p.337-340.
- 17.Hurst K.J. et.al. The coseismic geodetic signature of the 1999 Hector Mine earthquake. G.R.L., 2000,v. 27, No. 17, p. 2733-2736.
- 18.Gusev A. Temporal variations of the coda decay rate on Kamchatka: are they real and precursory? J.Geophys. Res, 1997,102, p. 8381-8396
- 19.Langbein J. Deformation of the Long Valley Caldera, Eastern California, from mid-1983 to mid-1988: Measurements Using Two-Colour Geodimeter // J.Geophys., Res. 1989, Vol. 94, No. B4, p. 3833-3849.