УДК 550.31

МУЛЬТИСИСТЕМНЫЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА КАМЧАТКЕ И КОМАНДОРСКИХ ОСТРОВАХ

© 2006 г. В. Е. Левин¹, М. А. Магуськин², В. Ф. Бахтиаров¹, В. М. Павлов¹, Н. Н. Титков¹

¹Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006 ²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006 Поступила в редакцию 05.05.2005 г.

С целью изучения геодинамических процессов в зоне тройного конвергентного сочленения крупнейших литосферных плит: Евразийской, Северо-Американской и Тихоокеанской на Камчатке и Командорских островах за период 1972–2004 годы создана и развивается мультисистема геодезического мониторинга современных движений земной коры (МГМСДЗК). В состав мультисистемы входят сети триангуляции, нивелирные профили, светодальномерные сети, скважинный деформограф, светодальномер-рефрактометр. Начиная с 1997 г., измерения движений земной коры проводятся при помощи спутниковых GPS-приемников. В результате работы МГМСДЗК получены численные характеристики деформационных процессов, связанных с такими геодинамическими природными явлениями, как землетрясения и извержения вулканов. Обнаружены изменения напряженно-деформированного состояния земной коры во время БТТИ (1975 г.), кризиса в Карымском вулканическом центре (1996 г.), подготовки Кроноцкого землетрясения (1997 г.) и др. Получены значения скоростей вертикальных и горизонтальных деформаций п-ва Камчатка. На основе данных МГМСДЗК предложены математические модели наблюдаемых явлений, а также определены скорости движений, обусловленные геодинамическими процессами, происходящими в зоне субдукции литосферных плит северо-западной части Тихого океана.

ВВЕДЕНИЕ

В 1970-ые годы XX в. на Камчатском полуострове начались работы по созданию мультисистемы геодезического мониторинга современных движений земной коры (МГМСДЗК). В те годы научные задачи по изучению СДЗК были сформулированы так:

 детальные исследования локальных деформаций на небольших наиболее активных площадках и вулканах;

 измерение величин и накопления деформаций в наиболее сейсмоактивных районах;

 измерение тектонической активности крупных геологических структур Камчатки;

 выявление современных движений, связанных с развитием островных дуг.

Одним из главных направлений нашей работы было создание мультисистемы геодезического мониторинга, способной зарегистрировать современные движения земной поверхности, связанные с сейсмической и вулканической активностью. Предполагалось, что удастся быстро зарегистрировать на Камчатке предвестники землетрясений и извержений вулканов, тем более что на Гармском прогностическом полигоне Института физики Земли были получены обнадеживающие результаты по выявлению предвестников землетрясений.

Отчетливое понимание роли изучения современных движений земной коры в деле прогноза землетрясений было осознано после появления работы Х. Рида [23], в которой по результатам изучения Сан-Францискского землетрясения была предложена концепция подготовки и реализации одного типа землетрясений – концепция упругой отдачи - на разломе Сан-Андреас. По Х. Риду, разлом Сан-Андреас - крупный правосторонний сдвиг, борта которого смещаются относительно друг друга. На некоторых участках в определенные периоды движение прекращается разлом запирается, и в этом месте начинает накапливаться упругая энергия. Поскольку периферические части литосферы продолжают двигаться, на линии разлома накапливаются напряжения. Как только будут превзойдены силы сцепления бортов, произойдет движение с выделением сейсмической энергии, несущей разрушения. Эти представления, пусть упрощенные, показали, что следить за накоплением энергии можно, измеряя изменения взаимного положения (по горизонтали и вертикали) геодезических пунктов, расположенных по разные стороны разлома.

Известно, что внутренняя жизнь планеты в том или ином регионе на поверхности проявляется, в первую очередь, в виде различного вида деформаций, вплоть до разрывов и движений, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях, например, при Аляскинском землетрясении 1964 г. [22]. Слежение за накоплением этих деформаций является одним из способов прогноза сильных землетрясений и извержений вулканов. Для определения момента, когда начинается накопление деформаций, необходимо знать "фоновые" деформации, характерные для того или иного региона. Оценка "фоновых" значений - совсем не простая задача, особенно для районов континентальных окраин, где присутствие таких геодинамических процессов, как вулканизм и сейсмичность, делают эту задачу еще более сложной.

Классические геодезические построения звеньев триангуляции, где длина базисов измерялась инварными проволоками, а стороны треугольников составляли 10-25 км, каких-либо прогностических признаков дать не могли из-за малой частоты повторений (1 раз в год), но порядок годовых скоростей горизонтального и вертикального деформирования был определен вполне надежно. К моменту начала наших работ на Камчатке методы триангуляции и полигонометрии исчерпали себя, в смысле дальнейшего повышения точности определения плановых координат, изза ошибок измерения углов, которые не удавалось снизить меньше чем 0.5-0.7. Мы включили в МГМСДЗК светодальномеры. Разрешающая способность светодальномеров, использующих в качестве излучателей лазеры, достигала величин порядка одного миллиметра, однако практическая точность была много ниже из-за неточного знания интегрального показателя преломления по трассе измерений. В равнинной местности определение температуры, давления и влажности, даже в одной точке стояния инструмента, позволяет измерять линии длиной до 20-25 км с относительной ошибкой 1 · 10-6. Во всхолмленных и горных районах, к которым относится и Камчатка, погрешность возрастала до 2-3 · 10⁻⁶. Приходилось определять средние параметры атмосферы по лучу измерения, пролетая трассу на вертолете или самолете, оборудованных метеодатчиками. Это сильно удорожало работы с дальномерами.

Поиски аппаратурного решения задачи по определению интегральных характеристик метеопараметров по лучу измерения увенчались успехом в 1956 году, когда был предложен дальномер-рефрактометр [14]. В этом устройстве расстояния измерялись на двух частотах, что позволяло определять разность оптических путей и вычислять интегральный показатель пре-

ломления по трассе измерений. Идея измерения разности оптических путей была проверена в лабораторных условиях на макете дальномера ЦНИИГАиК, а в 1958 г. эта же идея независимо была предложена американскими учеными П. Бендером и Т. Томсоном. Работа П. Бендера и Т. Томсона успешно продолжалась Г. Хаггетом и Л. Слейтером [20, 21], которые построили действующий макет, длительное время эксплуатировавшийся на разломе Холистер в Калифорнии при изучении современных деформаций земной поверхности для прогноза землетрясений. Позже, в 1979 г., дальномеры-рефрактометры стали выпускаться серийно под названием "Терраметр". Многолетний опыт их использования показал, что они обеспечивают точность измерения деформаций порядка 0.5 · 10⁻⁷ при длинах линий до 30 км.

Работа по реализации дальномера-рефрактометра длительное время велась в ЦНИИГАиК, ГОИ им. Вавилова [6], а в конце 1970-х годов XX в. – в Институте радиоэлектроники (ИРЭ) Академии наук радиоинженером С.В. Таракановым под руководством проф. Н.А. Арманда была разработана оригинальная схема дальномера-рефрактометра [1]. Испытание и доработка действующего макета прибора проводилась на Камчатке в обсерватории "Мишенная". При использовании дальномера-рефрактометра в МГМСДЗК были сделаны измерения [3] и внесены существенные изменения в схему прибора [2]. После доработки действующий макет дальномера-рефрактометра по ряду показателей стал лучше Терраметра.

GPS - Глобальная система определения местоположения разрабатывалась в основном для целей военно-морских сил и аэронавигации, но быстро и по достоинству была оценена и применена специалистами для решения геодинамических задач. Уже к середине последнего десятилетия прошлого века многие зарубежные фирмы стали выпускать специализированные геодезические приемники, при этом были значительно усовершенствованы методические вопросы учета влияния атмосферы за счет разработки более совершенных моделей строения сухой и влажной компонент воздуха. Наличие в GPS-приемниках возможности принимать две частоты позволило значительно ослаблять влияние ионосферы на скорость распространения сигнала, используя тот же дисперсионный метод, который был применен в прецизионных светодальномерах-рефрактометрах. Главным обстоятельством, влияющим на повышение точности, следует считать введение в 1994 г. специальной службы, работающей в рамках международной ассоциации, призванной обеспечивать гражданских потребителей GPS прецизионными орбитами спутников. Эта служба получила название IGS

(Международная Геодинамическая служба), которая отчетливо дала осознать, что главные вопросы к точности идут от специалистов, решающих геодинамические задачи. В этот разряд перешли задачи по изучению современных движений земной коры, задачи по изучению деформационных предвестников землетрясений, а в последние годы – изучение постсейсмических деформаций, движение глобальных литосферных плит и деформаций на границах плит. Достигнутые точности определения линейных деформаций характеризуются величинами 2 · 10⁻⁸ при расстояниях между пунктами 100-500 км. Горизонтальные компоненты скоростей пунктов в глобальной системе координат уверенно определяются на уровне $\pm 1-2$ мм/год, а вертикальные компоненты $\pm 5-$ 10 мм/год. Сегодняшний этап развития GPS исследований (с конца XX в. и по настоящее время) характерен развитием глобальных и региональных GPS сетей на основе постоянно работающих станций.

Изучение СДЗК на Камчатке и сейсмичность. При работе МГМСДЗК на Камчатке с 1971 г. и до настоящего времени накопилось несколько случаев регистрации горизонтальных или вертикальных деформаций, связанных с сейсмичностью района исследований. МГМСДЗК начинался с создания сети полигонов, которые сейчас охватывают практически всю территорию Камчатки (рис. 1 в [9] и рис. 1, приведенный здесь). Созданная МГМСДЗК позволяет проводить измерения с частотой от нескольких лет до нескольких часов и решать следующие научные задачи:

 Изучение движений земной поверхности на границе континентального и океанического блоков.

 Регистрация деформаций земной поверхности вблизи вулканов для получения численных характеристик, необходимых для построения моделей процессов извержения вулканов, а также прогностических признаков этих явлений.

 Изучение пространственно-временного характера движений, связанных с глубинными процессами, обуславливающими взаимодействие региональных структур в процессе развития островной дуги.

4. Смещения, связанные с землетрясениями.

На рис. 2 приведены землетрясения, от которых были зарегистрированы как вертикальные, так и горизонтальные компоненты деформаций земной коры. Методом повторного нивелирования были обнаружены изменения превышений по нивелирному профилю в районе мыса Африка, которые связаны с землетрясением (1) 15.12.1971 г. и с землетрясением (3) 28.12.1984 г. [16]. Относительные изменения отметок реперов до 80 мм совпадают по знаку с механизмом землетрясения – взброс для землетрясения 15.12.1971 [7] и сдвиг с небольшой взбросовой компонентой для землетрясения 28.12.1984. Измерения на отдельных локальных полигонах в районе Авачинского залива, в районе пос. Малки, хребта Кумроч, мысе Шипунском по поиску "живых" разломов, на которых мы могли бы зарегистрировать скорости перемещения их бортов, предполагаемых геологами, а также смещений, связанных с землетрясениями, не принесли успеха, т.е. за время наблюдений смещения, превышающие ошибки наблюдений, обнаружены не были. Приведем основные результаты МГМСДЗК в период 1972-1979 гг., когда периоды повторения наблюдений были месяцы и более.

 Доказана возможность высокоточных светодальномерных измерений с точностью 1–2 · 10⁻⁶.

2. Разработана специальная методика высокоточных дальномерных наблюдений, применимая и для круглогодичного светодальномерного мониторинга горизонтальной составляющей СДЗК с точностью до 1 · 10⁻⁶.

3. Подтверждена гипотеза, что значимые деформации СДЗК на геологических разломах могут проявляться только во время сильных (M > 7) землетрясений.

4. Для регистрации деформационных предвестников землетрясений и изучения фоновых значений деформаций района исследований необходимо проводить "непрерывные" светодальномерные измерения.

С 1979 г. в МГМСДЗК вошел светодальномерный мониторинг района Авачинского залива из обсерватории "Мишенная". Подобный мониторинг позднее был организован в США (Калифорния), в Японии и в СССР – на прогностических полигонах в Таджикистане (Гарм), в Киргизии (полигон ИВТАН), в Туркменистане (Ашхабад). За период проведения мониторинга наблюдались медленные упругие деформации Петропавловск – Авачинского полигона порядка 1–3 · 10⁻⁶ и быстрые упругие деформации порядка 1–3 · 10⁻⁶ при точности измерений 0.5–0.8 · 10⁻⁶ [4].

На основании временного ряда результатов светодальномерного мониторинга в районе Авачинского залива (рис. 3) наблюдается сжатие района (тренд) в крест сейсмофокальной зоны со скоростью 1 · 10⁻⁷/год (1–3 мм/год). Это сжатие обусловлено геодинамическими процессами зоны субдукции. Факт такого проявления СДЗК, а также скорости сжатия подтверждены данными GPS измерений.

Кроме наблюдаемого тренда (деформации сжатия) методом светодальномерного мониторинга зарегистрироваы упругие бухтообразные

МУЛЬТИСИСТЕМНЫЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ



Рис. 1. Схема GPS сети на Камчатке и Командорских островах (КАМNET) и скорости смещения пунктов сети КАМ-NET относительно пункта MAG0, расположенного в городе Магадан. Стрелка TO_CA показывает направление движения Тихоокеанской плиты относительно Североамериканской плиты. На врезке – смещения относительно пункта PETP, расположенного в г. Петропавловске-Камчатском.

ЛЕВИН и др.



Рис. 2. Землетрясения (эпицентры их обозначены звездочками и пронумерованы арабскими цифрами в хронологическом порядке), от которых были зарегистрированы как вертикальные, так и горизонтальные компоненты СДЗК. Кружками показаны нодальные поверхности *P*-волн сильных землетрясений.

вариации деформаций района Авачинского залива (рис. 3), которые мы связываем с землетрясениями (2) 17.10.1983 г., M_w = 7.0 (Δ = = 350 км), (5) 02.03.1992 г., M_w = 6.8 (Δ = 100 км) и (7) 05.12.1997 г., M_w = 7.8 (Δ = 350 км) (Δ – расстояние от места регистрации до эпицентра землетрясения). Уменьшение амплитуды деформационных бухт с течением времени, по-видимому, связано с увеличением напряжений в районе Авачинского залива, как следствие увеличения сжатия региона под влиянием геодинамических процессов, происходящих в зоне субдукции. Как видно на графике, произошедшие сильные землетрясения не снимают накопившиеся напряжения в районе Авачинского залива, но наиболее сильные сбросы напряжений до 2 · 10-6 происходят после землетрясений с M > 7.0. Кроме того, изменение скорости тренда может служить предвестником сильного (с M > 7) землетрясения в районе Авачинского залива.

На землетрясение (2) 17.08.1983 г. с M_w = 7.0 был дан удачный прогноз [19], благодаря чему нам впервые удалось зарегистрировать как горизонтальные, так и вертикальные смещения в эпицентральной зоне (рис. 4) до, во время и после сейсмического события. Светодальномерные измерения в эпицентральной зоне землетрясения 17.08.1983 г. с М_w = 7.0 были организованы как вдоль, так и в крест предполагаемого геологического разлома. Величины амплитуды косейсмического скачка деформации от 2 ppm до 4 ppm на взаимно-перпендикулярных линиях (линия 1-3 и линия 1-2), 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 Быс-



Рис. 3. Результаты светодальномерного мониторинга из обсерватории Мишенная. На врезках показаны схема расположения измеренных линий и эпицентры землетрясений.

трая и как случай, когда разлом проявился при сильном (M > 7) и близком ($\Delta = 7$ км) землетрясении. Измеренные инструментально компоненты СДЗК от данного сейсмического события до основного толчка скорость вертикальной компоненты смещений - 2 мм/день, а горизонтальной 6 мм/день, а после основного толчка -16 мм/год. Обращает на себя внимание похожий характер горизонтальных деформаций, зарегистрированных от землетрясений с разной магнитудой M = 5.3, M = 6.5 и M = 7.0, произошедших в разных районах Камчатки (рис. 5). Наблюдается упругий характер деформационных процессов, и чем больше энергия землетрясения, тем больше амплитуда горизонтальных деформаций. Это была первая в нашей практике надежно зарегистрированная аномалия горизонтальных деформаций, которую мы могли

определить как краткосрочный геодезический предвестник землетрясения.

Для повышения точности измерений горизонтальной составляющей деформаций земной поверхности впервые в нашей стране, на Камчатке в МГМСДЗК, был применен светодальномер рефрактометр. Долговременные измерения дистанций этим прибором показали, что его точность не хуже 1-2 · 10⁻⁷. Одной из серий наблюдений нами была зарегистрирована деформационная волна [3]. Ближайшее по времени к данному явлению было Олюторское землетрясение 08.03.1991 г., М = 7.0, удаленное от обсерватории "Мишенная" на 1050 км. Благодаря высокой точности светодальномера-рефрактометра был выделен момент вступления деформационной волны в районе наших наблюдений, и створное расположение отражателей с шагом в 20 км позволило определить ее скорость, которая составила 40 км/час.



Рис. 4. Горизонтальные и вертикальные смещения в эпицентральной зоне землетрясения 17.08.1983, М_w = 7.0: *a* – полигон "Быстрая". Цифрами отмечены пункты линейных измерений, пунктирная линия – нивелирный ход; *б* – график горизонтальных смещений; *в* – график вертикальных смещений.

Это пока единственный случай определения скорости деформационной волны, возникшей от землетрясения.

В 1994 г. в МГМСДЗК были включены скважинные деформометр и наклономер конструкции Исиа. Чувствительность деформометра – 5 · 10⁻⁸, наклономера – 0.1 мкр, что позволяло нам регистрировать как приливные волны, так и деформационные сигналы, связанные с землетрясениями различной магнитуды и на разном расстоянии от места установки нашего прибора [9].

Новый этап развития МГМСДЗК начался после создания Камчатской GPS сети станций (КАМNET) [8]. Сеть КАМNET включает в себя постоянные (стационарные) и мобильные станции (рис. 1).

С помощью сети KAMNET были зарегистрированы смещения пунктов, связанные с землетрясением (7) 05.12.1997 г., M_w = 7.8 [8] и землетрясением (8) 05.12.2003 г., M_w = 6.6 (рис. 6). Косейсмические деформации крупного субдукционного межплитового землетрясения 05.12.1997 г., M_w = 7.8 хорошо согласуются с векторами, рассчитанными по дислокационной модели с использованием опубликованного Гарвардского СМТ решения [17, 18]. На отдельных станциях КАМNET, особенно станции КВG, мы наблюдали постфактум аномальные изменения скорости движения пункта за месяц до землетрясения, которые можно рассматривать как среднесрочный геодезический предвестник [8]. При землетрясении (8) 05.12.2003 г. с M_w = 6.6 сетью КАМNET зарегистрированы косейсмические деформации на ближайшей к эпицентру землетрясения GPS станции ВКІ. Вектор смещений хо-



Рис. 5. Горизонтальные смещения, связанные с сильными землетрясениями на полигонах "Быстрая" (I) и "Мишенная" (II). *а* – положение полигонов на полуострове Камчатка; б – смещения на полигоне "Быстрая" (схема линий на рис. 4); в – смещения на полигоне "Мишенная" (схема линий на рис. 3).

рошо согласуется с вектором, рассчитанным по дислокационной модели (точечный источник) с использованием опубликованного Гарвардского СМТ решения (рис. 6). Величина модуля вектора смещений равна 22 мм.

По данным сети КАМNET определены средние скорости современных движений земной поверхности за период с 1997 по 2004 г. (рис. 1).

Наблюдаемые скорости смещений (деформаций) района Авачинского залива (PETP, NALY, KORC) (врезка на рис. 1) подтверждают величину скорости деформации (сжатие района) в крест сейсмофокальной зоны, ранее определенную нами по результатам светодальномерного мониторинга, которая составляет 0.1 ррт/год. Наблюдаемое растяжение района Авачинского залива вдоль сейсмофокальной зоны в период 2001–2003 гг. (рис. 3) может служить индикатором начала изменений напряженно-деформированного состояния среды исследуемого района. Наблюдается уменьшение скоростей смещений с юга на север по восточному побережью Камчатки (рис 1). Рез-

кое уменьшение величины модуля векторов происходит между Камчатским полуостровом (KBG) и Оссорой (Восточно-Камчатский сегмент). На основании этого факта и распределения сейсмичности в данном районе можно предположить наличие в этом районе границы между Северо-Американской и Евразиатской плитами. Для точного определения этой границы надо провести дополнительные GPS наблюдения в зоне стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг.

Зарегистрированные движения со средней скоростью V = 20 мм/год южной части полуострова Камчатка, примерно одинаковой для восточного и западного побережья, позволяют предположить, что выделяется особая геологическая структура (Южно-Камчатский сегмент), которая активно взаимодействует с Охотоморской плитой. Дополнительные GPS измерения вдоль Курильской островной дуги позволят определить границы Тихоокеанской и Охотоморской плит (Курильский сегмент). Измеренные вертикаль-



Рис. 6. Сравнение измеренного и рассчитанного горизонтальных векторов косейсмического скачка при землетрясении 05.12.2003, $M_w = 6.6$. Расчет сделан для точечного источника в упругом полупространстве с использованием СМТ решения для тензора сейсмического момента (на рисунке показан наилучший двойной диполь). При расчете для модуля сдвига принято значение $\mu = 2.9 \cdot 10^{10}$ H · м ($\lambda = \mu$). Вертикальные смещения также согласуются (наблюдения: -4.1 мм, расчет: -2.5 мм).

ные скорости позволяют сделать заключение, что Восточное побережье Камчатки поднимается со средней скоростью V = 20 мм/год. Скорости горизонтальных и вертикальных деформаций на полуострове Камчатка уменьшаются с востока на запад до 5 мм/год. Как для вертикальных, так и для горизонтальных смещений зона Центральной камчатской депрессии служит границей величин и направлений скоростей смещений СДЗК. Следует напомнить, что ошибки определения вертикальной компоненты при GPS измерениях в 2-3 раза больше, чем горизонтальной. Изменения направления скоростей СДЗК и их модулей в районе Центральной Камчатской депрессии (ESSO, KLU) может определяться еще и тем, что пункт (ESSO) расположен в зоне, где есть гидротермальные системы, а движение GPS пункта (KLU) определяется суперпозицией как тектонических деформаций от зоны субдукции, так и локальных деформаций от Ключевской группы вулканов. Для решения задачи разделения СДЗК на составляющие (вулканическую и тектоническую) необходимо уплотнить сеть GPS станций в этих районах.

СДЗК и вулканы Камчатки. Наличие на Камчатском полуострове действующих вулканов вносит дополнительную сложность в изучение зако-

номерностей связи СДЗК и сейсмичности, так как в период вулканической активности возникают локальные деформации вблизи действующих вулканов. Возникает задача разделения подвижек на вулканическую и тектоническую части. Классическим примером изучения СДЗК на вулкане были работы на БТТИ 1975-1976 гг. [5]. Полученные результаты наблюдений за СДЗК при всех фазах вулканического процесса позволили впервые сделать оценки отдельных физических величин вулканического процесса, в частности, величины избыточного давления, которая, при всей грандиозности самого процесса извержения, оказалась весьма скромной и составляла 100 кг/см² [15]. Построенная модель по данным горизонтальных подвижек [10] достаточно хорошо определяла положение источников деформаций (магматических очагов) данного извержения. Последующим МГМСДЗК в данном районе были определены скорости и остаточные деформации поствулканического процесса района БТТИ [11].

МГМСДЗК были зарегистрированы деформации во время извержения Авачинского вулкана, произошедшего 13 января 1991 г. [9].

Наиболее важные результаты МГМСДЗК на вулканах получены в Карымском вулканическом центре. Здесь, начиная с 1972 г., проводятся все виды геодезических работ [12]. Мы остановимся на исследовании последних событий, произошедших в Карымском вулканическом центре, – это землетрясение (6) 01.01.1996 г., М_w = 6.3 и извержения вулканов Карымский и Академии Наук.

События 1–2 января 1996 г. включали 2 вулканических извержения и одно сильное землетрясение. Приведем более детальный ход событий.

1. Рой микроземлетрясений под постройкой вулкана (его юго-восточной частью) на глубине около 3 км (начался ~02^h 1 января UT). Продолжался в течение нескольких часов (не менее четырех). Более определенно сказать трудно, так как после ~06^h 1 января UT записи отдельных микроземлетрясений выделить было невозможно.

 Рой форшоков (начался ~06^h 1 января UT) в очаговой области сильного землетрясения, эпицентры которых распространялись с севера (от озера Карымское) на юг приблизительно на 15 км, захватывая полосу такой же ширины.

3. Извержение из центрального кратера Карымского вулкана. Точный момент извержения неизвестен (в пределах 02^h−10^h 1 января UT). С тех пор извержение продолжается. Объем изверженных материалов в 1996 г. составил 1.6 · 10⁷ м³ [13].

ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ № 3 2006



Рис. 7. Модель деформационных источников на вулкане Карымский, связанных с подготовкой извержения 01.01.1996 г.: *a* – схема деформационных источников; *б* – разрез по линии А–В; D1, D2 – дайки.; V1, V2 – центры извержений; S – сферический магматический очаг; E – статический очаг землетрясения.

4. Сильное землетрясение (6) 01.01.1996 г. М_w = = 6.3, к югу от Карымского вулкана в 9 ч 57 мин UT. Инструментальный эпицентр землетрясения располагается в пределах форшокового роя – "Е" (рис. 7).

5. Извержение из Нового Эруптивного Центра (НЭЦ), образовавшегося в Карымском озере, в кальдере Академия Наук, вблизи ее северного края. Точный момент извержения неизвестен (в пределах 12^h 1 января UT – 0^h 2 января UT). Извержение продолжалось в течение 20 ч. Объем изверженных материалов составил 4.0 · 10⁷ м³ [13]. Для реконструкции источников упругих деформаций использованы относительные смещения геодезических пунктов в период между двумя эпохами (эпоха I: 1972–1995 гг. и эпоха II: август 1996–2000 гг.)

Предполагаем, что изменения, связанные с событиями и их подготовкой, произошли в течение 6 мес., с сентября 1995 по февраль 1996 года. Другими словами, магма в дайке под озером поднялась с глубины 8–10 километров за время не более чем 3–4 мес. Для расчетов использовались только горизонтальные смещения, т.к. ошибки вертикальных смещений для эпохи I недопустимо велики.

Интерпретация геодезических данных велась в предположении, что горизонтальные смещения геодезических пунктов порождены четырьмя индивидуальными источниками статических деформаций, возникшими в указанный период: двумя

ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ № 3 2006

дайками D1, D2, сферическим магматическим очагом S и статическим очагом землетрясения E (рис. 7). В качестве математических моделей этих источников были приняты: для даек – прямоугольные отрывные дислокации, для сферического магматического очага – центр расширения/сжатия и для статического очага землетрясения – прямоугольная сдвиговая дислокация. Значения параметров модели определялись в результате процедуры минимизации суммы квадратов невязок горизонтальных смещений. С учетом геологической обстановки и наблюдений были приняты следующие априорные ограничения на значения параметров первой группы.

Дайка D1 – вертикальна и в плане соединяет кратер Карымского вулкана с НЭЦ. Дайка D2 – вертикальна и в плане проходит вблизи НЭЦ. Точечный источник S находится под кратером Карымского вулкана. Очаг землетрясения E находится вблизи инструментального эпицентра. Для дайки D1 относительное изменение раскрытия составило 2.3 ± 1.7 м, а изменение объема $\Delta V1 =$ = $-18 \cdot 10^7$ м³. Изменение объема получилось отрицательным. Это значит, что объем дайки D1 уменьшился на величину – $\Delta V1$. Сжимаемость материала, по-видимому, не слишком велика, и этот объем должен был куда-то переместиться. Так как верхняя сторона дайки D1 находится на глубине 8 км, материал не мог выйти на поверхность.

Для дайки D2 относительное изменение раскрытия составило 3.2 ± 0.2 м, а изменение объема



Рис. 8. Результаты моделирования источников деформаций по геодезическим данным. Обозн. см. на рис. 7.

 $\Delta V2 = 15 \cdot 10^7 \text{ м}^3$. Объем дайки D2 увеличился на величину $\Delta V2$. Величина раскрытия 3.2 м для дайки D2 находится в хорошем согласии с раскрытием отрывных трещин, обнаруженных на поверхности к северу от Нового Эруптивного Центра до 2.5 м. Величина $\Delta V1 + \Delta V2 -$ суммарное изменение объема даек D1 и D2 – равна – $3 \cdot 10^7 \text{ м}^3$, может быть интерпретирована как объем материала, вышедшего из недр на поверхность. При этом можно предположить, что магма перетекала из дайки D1 в дайку D2 (т.е. дайка D2 росла, продвигаясь к поверхности, за счет подпитки из дайки D1) и частично изливалась из НЭЦ. Полученная по модели оценка объема изверженных из НЭЦ материалов $(3.0 \cdot 10^7 \text{ м}^3)$ сопоставима с оценкой $4.0 \cdot 10^7 \text{ м}^3$, приведенной в [13].

Значение смещения для источника S получилось отрицательным. Это значит, что источник S является центром сжатия. Изменение объема для S оказалось равным -1.0×10^7 м³, т.е. объем магматического очага уменьшился. Эта величина сопоставима с оценкой объема пород ($1.6 \cdot 10^7$ м³), изверженных из кратера вулкана Карымский за 1996 г., приведенной в [13].

Оценки параметров землетрясения были частично проверены по сейсмологическим данным [9]. Предложенная модель горизонтальных деформаций земной поверхности от четырех источников воздействия (рис. 7) дает хорошее согласие с измеренными горизонтальными смещениями геодезических пунктов (рис. 8):

 Суммарное изменение объемов источников D1 и D2 дает оценку объема изверженных из НЭЦ материалов, сопоставимую с опубликованными данными.

 Изменение объема источника S дает оценку объема изверженных из Карымского вулкана материалов, сопоставимую с опубликованными данными.

3. По геодезическим данным определен механизм и моментная магнитуда (М_w = 6.3) Карымского землетрясения 01.01.1996 г. Эти определения подтверждаются сравнением синтетических и наблюденных широкополосных трехкомпонентных сейсмограмм на станции РЕТР.

Заключение. Подведем итоги работ по инструментальному изучению СДЗК на Камчатке более чем за 30 лет и предложим наше видение развития МГМСДЗК.

Результаты МГМСДЗК (2004 г.) на Камчатке следующие:

 На Камчатке создана МГМСДЗК, способная решать задачу поиска деформационных предвестников землетрясений и извержений. В МГМСДЗК мы используем наиболее передовые технологии. Благодаря этому нам удалось зарегистрировать деформации, связанные с землетрясениями и вулканическими извержениями, определить физические характеристики и построить модели деформационных процессов при таких природных явлениях, как Большое трещинное Толбачинское извержение 1975-1976 гг. и события в Карымском вулканическом центре в 1996-2000 гг. Зарегистрированные нами косейсмические деформации, связанные с землетрясениями в Кроноцком заливе 05.12.1997 г., M_w = 7.8 и землетрясением вблизи острова Беринга 05.12.2003 г., M_w = 6.6, находятся в хорошем согласии с теми значениями, которые получаются при вычислении по дислокационной модели, использующей опубликованное Гарвардское решение для тензора момента. Этот факт имеет очень важное значение, так как, с одной стороны, он подтверждает надежность всей нашей системы измерений и, особенно, хорошую точность GPS данных, а с другой стороны, – что и само Гарвардское решение для тензора момента является надежной оценкой истинного сейсмического тензора момента очага землетрясения.

2. Созданная нами МГМСДЗК, в которую с 1996 г. вписалась сеть GPS станций, позволяет нам решать такие геодинамические задачи, как:

5 ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ № 3 2006

 определять скорости и величины деформационных процессов всего Камчатского полуострова и Командорских островов;

 измерить величины и скорости накопления деформаций в сейсмоактивных районах;

 измерить тектоническую активность крупных геологических структур Камчатки;

 – определить границы плит и перейти к задаче выявления современных движений, связанных с развитием островных дуг.

Как дальше будет развиваться МГМСДЗК на Камчатке? В доспутниковую эпоху, как уже отмечалось ранее, основным методом был трилатерационный с использованием светодальномеров и светодальномеров-рефрактометров. Надо отметить, что, хотя теперь все внимание исследователей, занимающихся изучением СДЗК, обращено к GPS, дальнометрия до сих пор продолжает использоваться в научных исследованиях по проблеме прогноза землетрясений и извержений вулканов. И эта тенденция сохранится, так как для расстояний порядка 5-10 км дальномеры-рефрактометры обеспечивают не только высокую точность измерения горизонтальной компонент деформаций – вплоть до 5 · 10⁻⁸, но и получение информации в более короткие интервалы времени, вплоть до 5–15 мин, что пока проблематично для GPS. Уязвимая сторона лазерной дальнометрии – необходимость оптической видимости, т.е. невсепогодность. Что касается вертикальной компоненты деформаций, то приходится признать, что в оптическом диапазоне она может быть обеспечена пока только геометрическим нивелированием. Представляется, что нет перспектив применения при изучении деформационных предвестников землетрясений у наклономеров, так как при весьма высокой инструментальной точности им свойственна нестабильность показаний и существенное воздействие на показания атмосферных фронтов. Как показывает наш опыт работы, имеются перспективы у скважинных деформометров, если включить в МГМСДЗК сеть из нескольких приборов.

В последние годы возросло применение спутниковых радиоинтерферометров (INSAR) для целей изучения постсейсмических деформаций. Не вдаваясь в детали практической реализации этого метода, отметим его главное достоинство – INSAR позволяет изучать объекты дистанционно на больших площадях и регистрировать вертикальные деформации с точностью до первых сантиметров. Можно ли применять технологию INSAR для целей изучения вертикальной компоненты деформаций в процессе подготовки землетрясений, покажет время. Как всегда, одна из значимых проблем в данном вопросе – это влияние рефракции радиолуча, обусловленное различными градиентами показателя преломления приземных слоев воздуха при съемке в две эпохи.

При наличии уже созданной нами МГМСДЗК и включения в нее новых способов наблюдений, например INSAR, а также сгущения сети GPS и сети скважинных деформометров, особенно в районах активных вулканов и эпицентральных зонах готовящихся сильных землетрясений, позволят нам получить новые данные о СДЗК и приблизиться к построению геодинамических моделей для всей зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арманд Н.А., Бахтиаров В.Ф., Бисярин В.П. и др. Двухволновый лазерный дальномер-рефрактометр // Радиотехника и электроника. 1990. Вып. 11. С. 2420–2426.
- Бахтиаров В.Ф., Бисярин В.П., Левин В.Е. Способ определения расстояния: Авторское свидетельство № 180212.
- Бахтиаров В.Ф., Левин В.Е. Применение светодальномеров в геодезической обсерватории "Мишенная" (Камчатка) для регистрации движений земной поверхности // Оптический журн. 1993. № 10. С. 82–85.
- Бахтиаров В.Ф. Левин В.Е. Деформации земной поверхности по данным круглогодичных светодальномерных наблюдений из обсерватории Мишенная, Камчатка, с 1979 по 1985 г. // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 94–101.
- Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка, 1975–1976 г. / Под ред. С.А. Федотов. Монография. М.: Наука, 1984. 635 с.
- Волконский В.Б., Попов Ю.В., Чижов С.А. и др. Применение АИГ: ND³⁺ лазера для измерения расстояний дисперсионным методом. // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. № 12. С. 2490–2492.
- Гусев А.А., Зобин В.В., Кондратенко А.М., Шумилина Л.С. Усть-Камчатское землетрясение 15.XII // Землетрясения в СССР в 1971 году. М.: Наука, 1975. С. 172–184.
- 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.
- Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтиаров В.Ф. и др. 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. 2004. С. 113–135.
- Левин В.Е., Энман В.Б. Моделирование смещений земной поверхности вблизи новых Толбачинских вулканов за период 1971–1976 гг. // Вулканология и сейсмология. 1981. № 2. С. 98–119.

- Магуськин М.А., Левин В.Е., Бахтиаров В.Ф. Деформации земной поверхности в районе Большого Трещинного Толбачинского. извержения 1975– 1976 гг. в период 1978–2000 гг. и их возможные причины // Вулканология и сейсмология. 2003. № 6. С. 55–61.
- Магуськин М.А., Энман В.Б., Селезнев Б.В., Шкред В.И. Особенности смещений земной поверхности на вулкане Карымский по геодезическим и фотограмметрическим данным за период 1970–1981 гг. // Вулканология и сейсмология. 1980. № 4. С. 49–64.
- Муравьев Я.Д., Федотов С.А., Будников В.А. и др. Вулканическая деятельность в Карымском центре в 1996 г.: вершинное извержение Карымского вулкана и фреатомагматическое извержение в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 38–70.
- Прилепин М.Т. Светомодуляционный способ определения среднего показателя преломления воздуха вдоль некоторой линии // Тр. ЦНИИГАиК. 1957. Вып. 114. С. 127–130.
- Федотов С.А., Энман В.Б., Магуськин М.А. и др. Деформации земной поверхности вблизи новых Толбачинских вулканов (1975–1976 гг.) // Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976. М.: Наука, 1978. С. 189–199.
- Федотов С.А., Энман В.Б., Магуськин М.А. и др. Деформации земной поверхности на Восточном побережье Камчатки и их связь с сейсмичностью. // Вулканология и сейсмология. 1988 № 1. С. 24–39.
- 17. Burgmann R., Kogan M.G., Levin V.E. et al Rapid aseismic moment release following the 5 December, 1997 Kronotsky, Kamchatka, earthquake // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. № 7. P. 1331–1333.
- Gordeev E., Gusev A., LevinV. et al Preliminary Analysis of Deformations at the Eurasia-Pacific-North America plate junction from GPS data // Geophys. J. Int. 2001. V. 147. P. 189–198.
- Gusev A. Temporal variations of the coda decay rate on Kamchatka:are they real and precursory? //J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 8381–8396.
- 20. *Hugget G.R.* Two-color terrametr // Tectonophysics. 1981. V. 71. № 1. P. 29–39.
- Slater.L.E., Hugget G.R. A Multiwavelangth Distance Measuring Instruments for Geophysical Experiments // J. of Geophys. Res. 1976. V. 81. № 35. P. 6299–6306.
- Plafker G. Tectonic deformation associated with the 1964 Alaska earthquake. // Sciense. 1965. V. 148. № 3678. P. 1731–1736.
- Raid H.F. The California earthquake of April 18, 1906.
 V. 2. The mechanics of earthquake. The Carnegie Inst. Wash. 1910.

ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ № 3 2006

Multisystem Geodetic Monitoring of Recent Crustal Movements in Kamchatka and the Commander Islands

V. E. Levin¹, M. A. Maguskin², V. F. Barhtiarov¹, V. M. Pavlov¹, N. N. Titkov¹

Kamchatkan Experimental and Methodical Seismological Department, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia

> ² Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia

A multisystem for geodetic monitoring of recent crustal movements (MGMRCM) has been set up and is still being developed in Kamchatka and the Commander Islands during the period 1972–2004 with a view to studying the geodynamic processes in the zone of triple convergent junction of major lithosphere plates, namely, the Eurasian, North American, and Pacific plates. The multisystem includes triangulation networks, leveling lines, geodimeter networks, a borehole strainmeter, and a geodimeter-refractometer. Since 1997, recent crustal movements have been measured using satellite GPS receivers. This MGMRCM work yielded numerical characteristics of deformation processes related to such geodynamical phenomena in nature as earthquakes and volcanic eruptions. We detected stress and strain changes in the crust during the Great Tolbachik Fissure Eruption of 1975, the 1996 crisis in the Karymskii volcanic center, the precursory perion of the 1997 Kronotskii earthqake and others. We obtained rates of vertical and horizontal strain for Kamchatka. This MGMRCM data set was used to develop mathematical models of the observed phenomena, as well as to determine the rates of movements due to the geodynamical processes that are going on in the northwestern Pacific subduction zone.