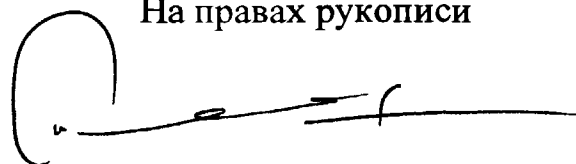


Министерство сельского хозяйства
Российской Федерации

Государственный
университет
по землеустройству

Ю4.200.9 00874

На правах рукописи



Докукин Петр Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИК АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ
ПО СПУТНИКОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ В ЛОКАЛЬНЫХ
ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 25.00.32 – Геодезия

Научный руководитель
доктор технических наук
В.И.Кафтан

Москва, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	7
1.1. Геодезические методы изучения современных тектонических движений и деформаций земной поверхности	7
1.2. Геодезические методы и задача прогноза землетрясений.....	12
1.2.1. Механизм и распространение землетрясений.....	12
1.2.2. Методы прогнозирования. Схема Мещерякова	18
1.3.3. Прогностические геодинамические полигоны.....	23
1.3. Международные организации, архивы измерительных данных и программное обеспечение обработки спутниковых измерений с целью определения движений и деформаций	30
1.3.1. Международная служба IGS	30
1.3.2. Архив данных спутниковых наблюдений Международного центра SOPAC	34
1.3.3. Современные программные продукты обработки СРНС измерений	35
1.3.3.1. Коммерческое программное обеспечение	36
1.3.3.2. Научное программное обеспечение.....	40
1.4. Выводы по главе 1	44
2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ В СПУТНИКОВЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЯХ.....	46
2.1. Разработка методики определения векторов смещений земной поверхности.....	46
2.3. Разработка методики определения деформаций по спутниковым наблюдениям с учетом корреляционных зависимостей	52
2.3.1. Обоснование выбора нового подхода	52
2.3.2. Установление локальной пространственной системы отсчета	53
2.3.3. Определение плановых деформаций.....	55
2.4. Анализ тектонических деформаций земной поверхности.....	60
2.4.1. Разработка программы вычисления смещений и деформаций	60
2.4.2. Деформации на разломе Сан-Андреас	70
2.4.3. Деформации, связанные с Новозеландским землетрясением	78
2.4.4. Тектонические деформации Московского региона.....	84
2.5. Выводы по главе 2	92
3. ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ СПУТНИКОВЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ.....	94
3.1. Анализ особенностей регистрации смещений в связи с землетрясением Паркфилд.....	94
3.2. Анализ предвестников Суматранских мега-землетрясений 2004 года	100
3.3. Проверка гипотезы о физическом механизме наблюдаемых деформаций	109
3.4. Выводы по Главе 3.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
ЛИТЕРАТУРА	124

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное внедрение современных спутниковых технологий в геодезическую деятельность на всех ее уровнях сегодня все в большей мере требует разработки новых и совершенствования существующих подходов к решению традиционных геодезических задач. Высокая точность и оперативность спутниковых геодезических методов позволяет получать несоизмеримо бóльшие чем прежде объемы полезной информации, что заставляет прибегать к совершенствованию современных компьютерных технологий, технических средств и программного обеспечения. Сегодня требующим наиболее высокой точности и оперативности измерений является такое геодезическое направление, как наблюдения за движениями и деформациями земной поверхности. Это научное и технологическое направление сегодня крайне актуально, во-первых, в связи с возрастанием числа природных и техногенных катастроф, что наблюдается во всем мире и, в частности, отмечается МЧС России, во-вторых, в связи с реализацией Концепции устойчивого развития нашего государства.

Одним из наиболее серьезных источников природных и техногенных катастроф является сейсмическая активность Земли. В наступившем столетии наблюдается явное усиление сейсмической активности. В подтверждение этого можно привести такие примеры, как сильнейшие землетрясения в регионе Зондских островов. С конца 2004 года по настоящее время там произошло три сильнейших и разрушительных землетрясения с магнитудами $8 \leq M \leq 9$. Исторические аналоги такой совокупности сейсмических событий трудно отыскать. В текущем году произошли разрушительные землетрясения в Лиме (Перу, 16 августа 2007 г., $M=7.9$, более 500 погибших и более 1000 раненых жителей), в Индонезии (о-в Суматра, 17 сентября 2007 г., $M>8$, погибло более 20 человек). На Дальнем Востоке России наблюдается усиление сейсмической активности. Примером тому является землетрясение в Невельске (о-в Сахалин, $M=6.0$, две

человеческих жертвы, значительные разрушения). Характер катастрофичности землетрясений по данным Национальной геофизической службы США показан в таблице.

**Число человеческих жертв от землетрясений за последнее
шестидесятилетие**

№	Десятилетия	Число человеческих жертв
1	1950-1960	9423
2	1960-1970	49948
3	1970-1980	431109
4	1980-1990	54232
5	1990-2000	105263
6	2000-2007	436417

Исследование современных тектонических движений также необходимо при крупном промышленном и гражданском строительстве (города, порты, ГЭС, водохранилища), эксплуатации месторождений угля, нефти, газа, подземных вод; данные используются при разработке методов прогноза землетрясений, вулканических извержений и др.

С сожалением, следует отметить, что состояние геодезических сетей наблюдений за движениями и деформациями на территории России сегодня нельзя считать удовлетворительным. Заложённая в прошлом столетии достаточно обширная и качественная для тех лет основа в виде классических геодезических сетей (геодинамических полигонов) сегодня недостаточно эффективно поддерживается и развивается. Методы обработки, анализа и интерпретации измерительных данных также отстают от требуемого уровня. Существующие теоретические и методические основы также достаточно качественны, но обеспечивают главным образом анализ и интерпретацию классических геодезических наблюдений, таких как линейно-угловые измерения и нивелирование.

Рассмотренные выше обстоятельства послужили основанием к выбору темы настоящей диссертационной работы, направленной на совершенствование и развитие геодезических методов исследования движений и деформаций с учетом использования современных спутниковых и компьютерных технологий. Сегодня основными измерительными средствами построения контрольных геодезических сетей являются спутниковые радионавигационные системы (СРНС) ГЛОНАСС (Россия) и GPS (США). В состоянии разработки находится Европейская система ГАЛИЛЕО. Разработаны сотни моделей высокоточных двухчастотных и двусистемных геодезических СРНС приемников. Имеются десятки комплексов программно-математического обеспечения обработки СРНС измерений. Несмотря на последние обстоятельства, разработанные измерительные и компьютерные средства не ориентированы на их достаточно эффективное использование с целью определения движений и деформаций. Поэтому перед автором диссертационной работы поставлена задача изучения современного состояния спутниковых методов деформационного анализа и областей их применения, выявления путей их совершенствования и разработки новых подходов и методик, обеспечивающих устранение выявленных слабых мест.

Следует отметить, что важнейшую роль в становлении и развитии исследований по избранной теме сыграли работы ведущих Российских ученых: Ю.Д. Буланже, М.Д. Герасименко, Т.В. Гусевой, В.В. Данилова, Н.П. Есикова, А.А. Изотова, В.И. Кафтана, Л.А. Кашина, Ю.В. Кемница, Ю.О. Кузьмина, В.А. Магницкого, Ю.И. Маркузе, С.И. Матвеева, Ю.А. Мещерякова, О.М. Остача, В.К. Панкрушина, А.К. Певнева, Л.П. Пеллинина, М.Т. Прилепина, К.Л. Проворова, Л.И. Серебряковой, В.А. Сидорова, С.К. Татевян, Ю.Е. Федосеева и других.

Диссертант опирается на накопленный обширный и полезный исторический опыт, теоретические основы анализа и интерпретации, разработанные уважаемыми предшественниками.

Исследования и разработки, представленные в диссертации выполнялись в рамках плана научно-методической работы Государственного университета землеустройства, планов НИР Центрального НИИ геодезии, аэросъемки и картографии. В процессе подготовки к исследованиям по теме диссертации, ее автором выполнялись работы по построению Государственной Высокоточной спутниковой геодезической сети (ВГС) в сейсмоактивных районах России в рамках Федеральной целевой программы по использованию глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в интересах гражданских потребителей, утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 15 ноября 1997 г. №1435. Это позволило приобрести опыт выполнения высокоточных СРНС измерений, их обработки и анализа.

В первой главе диссертационной работы рассмотрены основные типы деформаций земной поверхности и современные геодезические методы их изучения. Проанализированы возможности современных средств анализа и интерпретации повторных геодезических измерений, выявлены недостатки и слабые места.

Вторая глава работы посвящена разработке методики применения результатов спутниковых геодезических измерений при анализе деформаций земной поверхности, составления компьютерной программы определения смещений и деформаций, апробирования методики и программы на реальных геодезических сетях.

В третьей главе сделана попытка выявления предвестников одного из сильнейших землетрясений текущего столетия по результатам обработки спутниковых геодезических измерений, проанализированы результаты использования разработанной методики, получены статистические обоснования гипотез о физических механизмах зарегистрированных смещений и деформаций.

1. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

1.1. Геодезические методы изучения современных тектонических движений и деформаций земной поверхности

Земля постоянно изменяет форму, в результате чего происходят движения горных пород, которые могут быть вертикальными, горизонтальными, наклонными; они могут происходить очень медленно, или быть внезапными. В основе таких движений лежат сжатие и расширение, опускание и поднятие. Такие движения называют тектоническими, а если они происходят в настоящее время или протекали в последние столетия, их называют современными тектоническими движениями.

Крупномасштабные региональные движения (общее поднятие без внутренней деформации) называют эпейрогеническими или колебательными; движения, вызывающие формирование складок и разрывов, называют орогеническими (горообразовательными). В своей классификации В.Е.Хаин [10] подразделяет тектонические движения на существенно горизонтальные и существенно вертикальные.

По скорости и масштабам распространения эти движения подразделяют на вековые, предвестниковые, сейсмические и периодические. Скорость вековых движений, наблюдающихся повсеместно, составляет 1-5 мм/год; предвестниковые движения наблюдаются в сейсмоактивных районах со скоростью порядка 10мм/год и более; скорость сейсмических движений, сопровождающих землетрясения и другие геодинамические процессы, достигает метра и более. Периодические движения различной природы, генерируются как эндогенными, так и экзогенными периодическими процессами. В.А. Сидоров и Ю.О. Кузьмин развивают направление исследований современных суперинтенсивных короткопериодических деформаций со скоростями первых см/год, происходящих в зонах активных

разломов, как в сейсмоактивных, так и в платформенных зонах под влиянием флюидодинамических процессов в верхних слоях земной коры.

Существуют различные методы изучения современных тектонических движений: гидрографические и геолого-геоморфологические наблюдения, метод сравнения старых и новых карт, а также аэроснимков разных лет, анализ исторических и археологических материалов и др. [45]. Широкое применение при изучении современных тектонических движений нашли геодезические методы, такие как сети триангуляции и трилатерации, многократное нивелирование, методы космической геодезии и т.д., в настоящее время активно используются результаты спутниковых геодезических измерений. Современные возможности применения спутниковых радионавигационных систем (СРНС) в геодинамических исследованиях описаны, например в [41].

В работе [44] приведены результаты исследований горизонтальных движений земной коры по GPS измерениям на территории Киргизии и Казахстана. Получены максимальные скорости движений, составляющие 10-12 мм/год, что согласуется с более ранними исследованиями разными, в том числе и негеодезическими методами.

Результаты обработки непрерывных спутниковых наблюдений опорных станций (проводятся с 1995 года), расположенных на севере, в центре и на юге Сахалина, показали, что остров перемещается со скоростью 3-4 мм/год в западном направлении относительно Евразии и 3-5 мм/год в восточном направлении относительно Северной Америки. Кроме того, современные горизонтальные деформации в центральной части острова имеют компоненты сжатия и правостороннего сдвига и проистекают со скоростью 3-4 мм/год [63].

На Камчатке создана и продолжает развиваться система геодезического мониторинга современных движений земной коры на Камчатке [24], основанная на анализе результатов нивелирования, светодальномерных и спутниковых измерений.

С 1997 года на базе сейсмологической сети Геофизической сети РАН создана и развивается Деформационная сеть северной Евразии (NEDA), станции которой классифицированы Международной службой IGS (см. Раздел 1.3 настоящей диссертации) как глобальные станции. Измерения со станций обрабатываются тремя международными центрами и передаются в Геофизическую службу РАН, откуда, после анализа, поступают в глобальные центры данных, где производится обработка данных по всей Земле. Анализ временных рядов глобальной сети позволяет с достаточной определенностью получить поле взаимных скоростей отдельных точек на земной поверхности [39].

Спутниковые GPS измерения показали, что горизонтальные перемещения крупных литосферных плит происходят с достаточно большой скоростью: Австралийская плита движется навстречу Тихоокеанской со скоростью 46 мм/год; Южная Америка сближается с Австралией со скоростью 28 мм/год; Южная и Северная Америка в районе Карибского бассейна движутся навстречу друг другу со скоростью 8 мм/год; Тихоокеанская плита перемещается навстречу Южной Америке со скоростью 5 мм/год и т.д. Эти данные (рис. 1.1) хорошо совпадают со скоростями движения литосферных плит, вычисленными по линейным магнитным аномалиям океанов [20].

По результатам многократного нивелирования под руководством Ю.А.Мещерякова были построены карты современных вертикальных движений европейской части СССР и всей Восточной Европы. Высокоточное повторное нивелирование включили в измерительный комплекс на геодинамических полигонах (ГДП) [45].

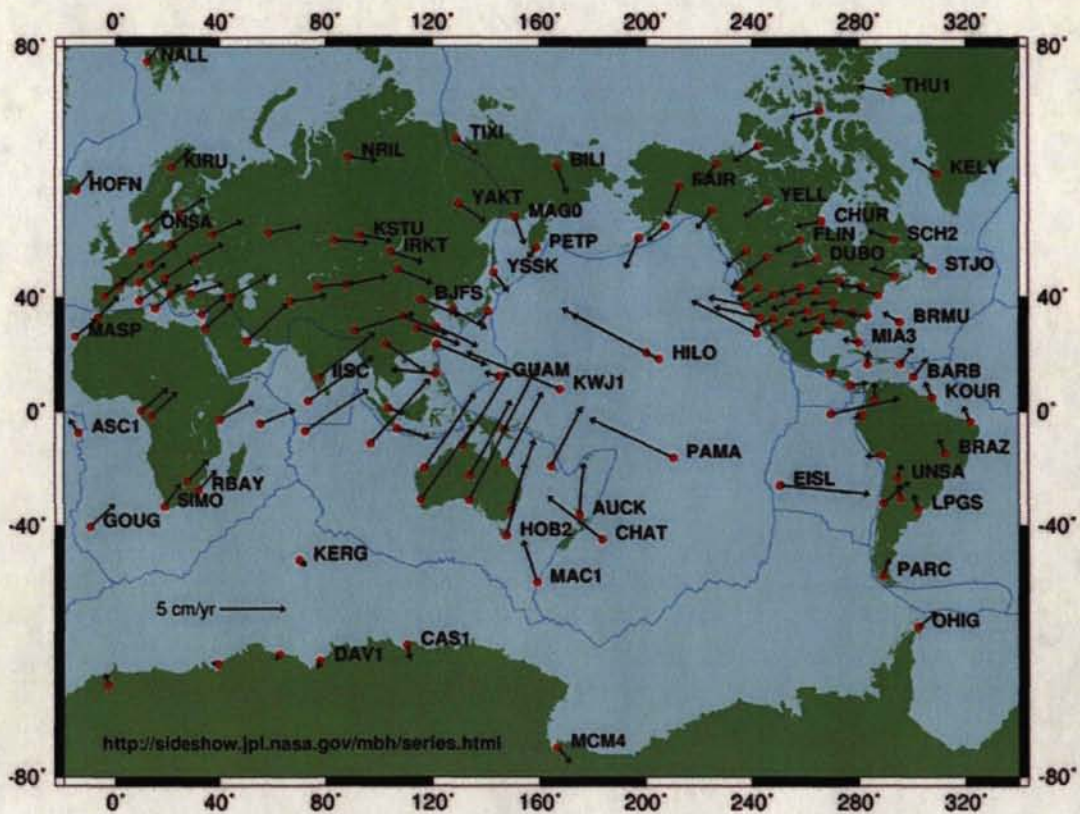


Рис. 1.1. Глобальное перемещение литосферных плит по информации <http://sideshow.jpl.nasa.gov>

По причине движения коровых плит и постоянного воздействия силы тяжести горные породы непрерывно находятся в поле сил переменной величины, создающих напряжения (внешние силы, действующие на единицу площади), приводящие к деформациям [1], которые, как отмечено в [10] представляют собой изменение формы и объема горных пород отдельных участков земной коры под действием тектонических сил.

Разделяют однородные и неоднородные деформации (рис. 1.2). Величина однородной деформации постоянна в каждом участке деформированного тела. Например, сжатая балка изменит свою форму, и в каждом месте измененной балки деформация будет одинаковой. Если же балку изгибать (неоднородная деформация), то ближе к ее верхней части будет наблюдаться растяжение, убывающее к центру, а в нижней половине балки будет происходить сжатие. Среди однородных деформаций выделяют сжатие-растяжение и сдвиг. Для сдвига необходимо действие двух противоположно направленных сил (пары сил) [20].

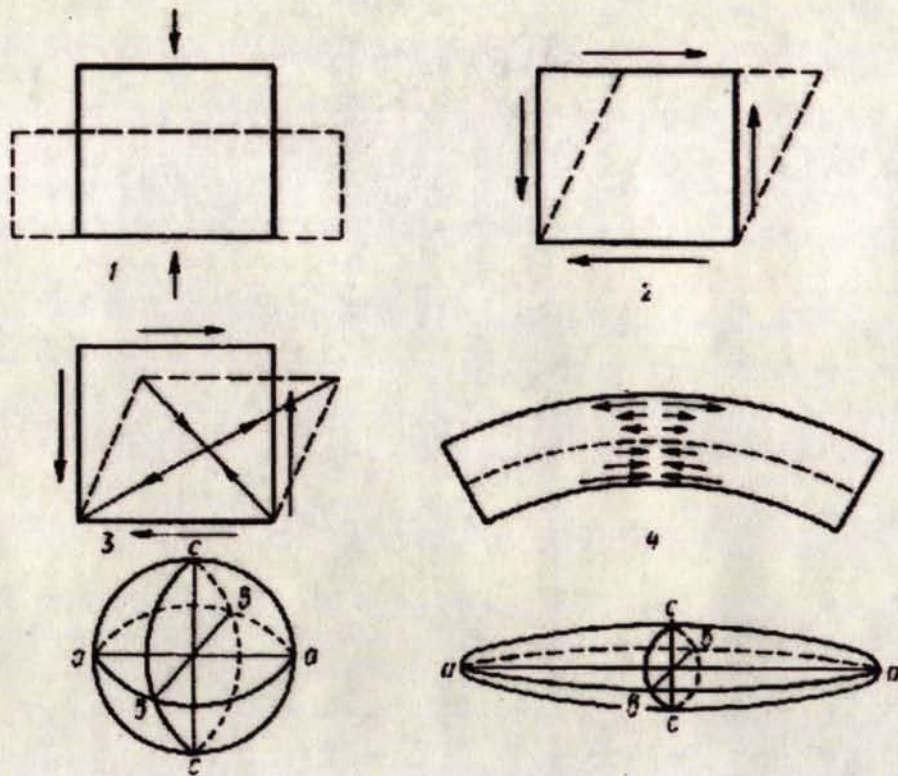


Рис.1.2. Виды деформации твердого тела (по В.В. Белоусову) [20]: Однородные деформации: 1 – сжатие, 2 – простой сдвиг, 3 – чистый сдвиг; неоднородная деформация: 4 – изгиб; эллипсоид деформации: 5 – первоначальная форма тела (шар), 6 – после деформации шар превратился в эллипсоид. Оси эллипсоида – главные оси деформации

Деформации подразделяют на упругие и пластические. Упругая деформация характеризуется тем, что после снятия нагрузки тело вновь принимает исходную форму. Пластическая деформация – некоторая ее остаточная величина, сохраняющаяся после снятия приложенной нагрузки.

Методы дифференциального описания деформаций по результатам линейно-угловых геодезических измерений рассмотрены в работе [9] и состоят в следующем. Пусть поверхность, на которой расположены жестко связанные с ней пункты, испытывает растяжение или сжатие в каком-либо направлении. В таком случае изменяются взаимные расстояния между пунктами, т.е. происходит деформация этой поверхности. Задача состоит в математическом описании произошедших деформаций на основе измерений

углов и линий между смежными точками в их исходном и сместившемся состояниях. То есть необходимо определить систему взаимосвязанных параметров, которые количественно характеризуют деформационный процесс. Основы метода были описаны в работе [81] и расширены на большое количество пунктов триангуляции японским геофизиком Цубои [82]. Метод совершенствовался и использовался в геодинамических исследованиях Ф. Фрэнком [53], О.М. Остачем [9], Н.П. Есиковым [15] и В.К. Кучаем [23].

Во второй главе настоящей рукописи представлена основанная на данном методе усовершенствованная методика определения деформаций, расширенная на использование повторных спутниковых СРНС измерений.

Определение деформаций земной поверхности по данным современных спутниковых измерений в связи с сильным землетрясением рассмотрено, например, в работах [47, 57]. Описание деформаций на основе спутниковых геодезических измерений в вулканическом районе дано в работе [52]. Оценка внутриплитных деформаций с использованием GPS представлена в [49]. Применение спутникового нивелирования в деформационном анализе рассмотрено в работе [50]. Вопросы проектирования деформационных сетей GPS изложены в [51]. Исследования деформаций по данным геодезических измерений в локальных сетях представлены в работе [62]. К сожалению, подавляющее большинство исследований деформаций земной поверхности с использованием спутниковых геодезических методов осуществлено за рубежом.

1.2. Геодезические методы и задача прогноза землетрясений

1.2.1. Механизм и распространение землетрясений

Землетрясение – одна из самых страшных природных катастроф, вызывающих не только опустошительные разрушения, но и уносящих десятки и сотни тысяч человеческих жизней.

Предсказание землетрясения – задача указания места, времени и силы будущего события. Данная задача до сих пор в полной мере не решена и это обусловлено сложностью изучения полей напряжений в геологически неоднородной среде, и главным образом слабой изученностью глобальных тектонических процессов, происходящих в литосфере и верхней мантии, вызывающих землетрясение [19].

Землетрясение – это тектонические деформации земной коры (или верхней мантии), разрядка которых вызывает сейсмические колебания в виде волн, которые при достижении земной поверхности производят разрушения. Первичная причина землетрясений связывается с выделением тепла в недрах Земли; более непосредственными причинами служат: образование тектонических разрывов; вулканизм и искусственное возбуждение сейсмичности, а также суммарное воздействие различных факторов [1].

Скорость распространения тектонических разрывов составляет несколько км/сек и этот процесс охватывает некоторый объем пород, носящий название очага землетрясения, центр которого представляет собой условно точечный источник короткопериодных колебаний и называется гипоцентром (рис. 1.3). Проекция гипоцентра на земную поверхность называется эпицентром землетрясения, интенсивность которого изображается линиями равной интенсивности – изосейстами. Область максимальных баллов вокруг эпицентра называется плейстосейстовой областью [20].

По глубине гипоцентров землетрясения подразделяют на три группы: мелкофокусные (0-60 км); среднефокусные (60-150 км); глубокофокусные (150-700 км). Гипоцентры расположены в верхней части земной коры на глубинах 10-30 км, где земная кора обладает наибольшей жесткостью и хрупкостью. Такие землетрясения образуются в результате смещения по разломам с обязательной сдвиговой компонентой.

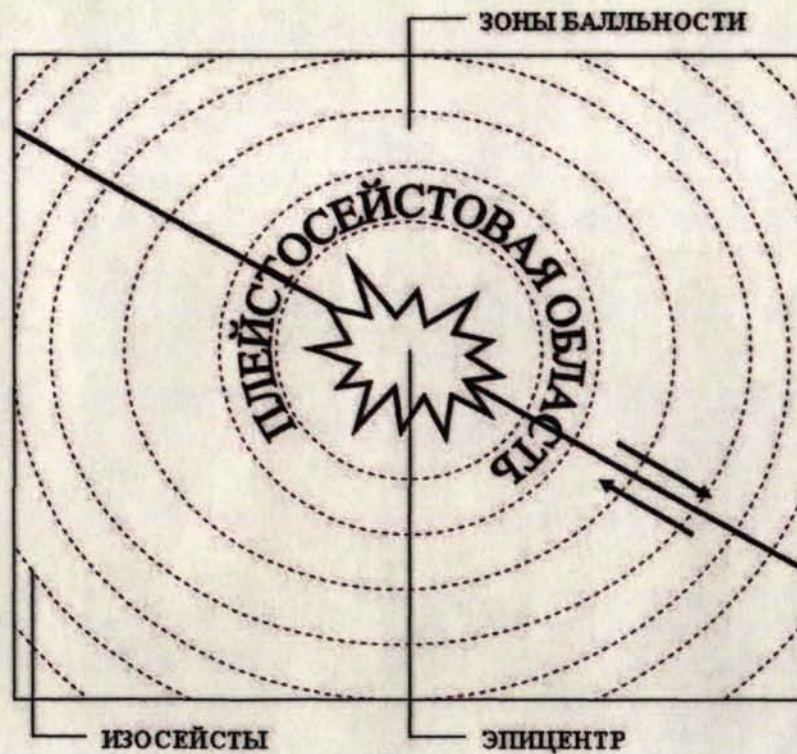


Рис. 1.3. Очаг землетрясения

Землетрясению предшествуют сейсмические толчки, свидетельствующие о критическом нарастании напряжений в горных породах – форшоки; после главного сейсмического удара (землетрясения) наблюдаются более слабые сейсмические толчки, указывающие на процесс разрядки напряжений при образовании новых разрывов в толще пород – афтершоки.

Быстрые неравномерные смещения масс горных пород вдоль плоскости разрыва вызывают разнонаправленные сейсмические волны, которые, достигая поверхности Земли, производят на ней основную разрушающую работу [20]. Сейсмические волны разделяют на поверхностные (волны Лява и Рэлея) и объемные, к которым относят продольные волны, представляющие собой чередования сжатия и растяжения, способные проходить через твердые, жидкие и газообразные вещества; и поперечные волны, которые при своем распространении сдвигают частицы вещества под прямым углом к направлению своего пути. Волны Лява вызывают колебания частицы пород в горизонтальной плоскости параллельно земной поверхности, под прямым

углом к направлению своего распространения; волны Рэлея возникают на границе раздела двух сред, заставляют двигаться частицы по вертикали и горизонтали в вертикальной плоскости, ориентированной по направлению распространению волн. Поверхностные волны распространяются медленнее чем объемные и быстро затухают как на поверхности, так и с глубиной. Сейсмические волны, вызываемые землетрясениями, регистрируют с помощью приборов сейсмографов, в основе которых лежат маятники, сохраняющие свое положение при колебаниях подставки, на которой они расположены.

Интенсивность землетрясения – внешний эффект землетрясения на поверхности Земли, выраженный в определенном смещении почвы, частиц горных пород, степени разрушения зданий, появлении трещин на поверхности и т.д., характеризуется в баллах (мера разрушений) и магнитудой (высвобожденная энергия). В России используют шкалу интенсивности MSK-64, согласно которой, принята следующая градация интенсивности (силы) землетрясений: 1-3 балла – слабые; 4-5 баллов – ощутимые; 6-7 баллов – сильные (разрушаются ветхие постройки); 8 баллов – разрушительные (частично разрушаются прочные здания, заводские трубы); 9 баллов – опустошительные (разрушается большинство зданий); 10 баллов – уничтожающие (разрушаются почти все здания и мосты, возникают обвалы и оползни); 11 баллов – катастрофические (разрушаются все постройки, происходит изменение ландшафта); 12 баллов – губительные катастрофы (полное разрушение, изменение рельефа местности на обширной площади).

Для количественной оценки меры полной энергии сейсмических волн выделившихся при землетрясении используют шкалу магнитуд M , предложенную Ч.Рихтером [35]. Магнитуда – безразмерная величина, определяемая соотношением:

$$M = \lg \frac{A}{T} + B \lg \Delta + \varepsilon,$$

где A и T – соответственно амплитуда и период колебаний в волне; Δ – расстояние от станции наблюдения до эпицентра; B и ε – постоянные, зависящие от условий расположения станций наблюдений.

В шкале магнитуд принята следующая градация: $M=0$ – землетрясение с максимальной амплитудой смещения в 1 мкм на эпицентральной дистанции в 100 км; $M=5$ – небольшие разрушения зданий; $M=7$ – опустошительное землетрясение. Самые сильные из зарегистрированных землетрясений имели магнитуду $M=8,9-9,0$. С возрастанием магнитуды увеличиваются размеры очагов землетрясения.

Энергия, выделяемая при землетрясениях, выражается формулой:

$$E = \pi^2 \rho V (A/T),$$

где ρ – плотность верхних слоев Земли; V – скорость сейсмических волн.

Между энергией землетрясения и его магнитудой существует связь, определяемая уравнением Гуттенберга, который показывает, что при увеличении магнитуды, энергия землетрясения сильно возрастает:

$$\lg E = 9,9 + 1,9M - 0,024M^2 .$$

Распространение современных землетрясений на земном шаре (рис. 1.4) в настоящее время установлено с большой точностью, как показано, например в [45].

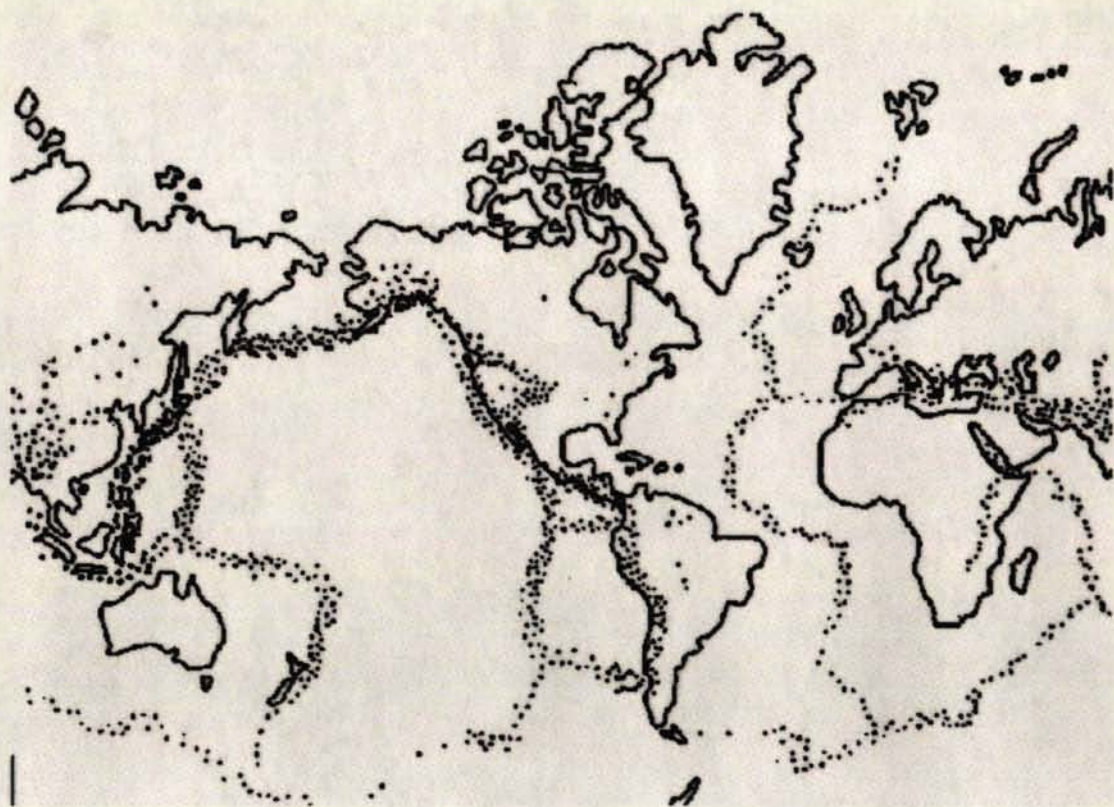


Рис. 1.4. Распространение эпицентров землетрясений

Из рис. 1.4. видны, что эпицентры землетрясений расположены в следующих зонах. Это Тихоокеанское кольцо, в котором эпицентры землетрясений совпадают с островными дугами: Алеутской, Курильской, Восточной Камчатки, Японской и т. д. На востоке Тихого океана это побережье Северной Америки, Мексика, Центральная Америка, Южная Америка, а также полоса вдоль Восточно-Тихоокеанского поднятия. В Атлантическом и Индийском океанах сейсмичность сосредоточена вдоль срединно-океанских хребтов. Восточно-Африканская рифтовая зона также отличается высокой сейсмичностью. Протяженная полоса современных Землетрясений приурочена к Альпийско-Средиземноморскому поясу: это побережье Алжира, Италия, Динариды, Балканы и Эгейское море, Турция, Крым, Кавказ, Иран, Афганистан, Памир, Тянь-Шань и т. д. В пределах России повышенной сейсмичностью отмечена Байкальская рифтовая зона.

Таким образом, землетрясения приурочены к областям высокой современной тектонической активности и связи с конвергентными или

дивергентными границами литосферных плит (где происходят либо сжатие, поглощение океанской коры в зонах субдукции, коллизии плит и т. д., либо растяжение, наращивание океанской коры, или раздвиг континентальной коры). В этих регионах непрерывно накапливаются тектонические напряжения, которые периодически разряжаются в виде землетрясений. В то же время существуют огромные асейсмичные пространства.

1.2.2. Методы прогнозирования. Схема Мещерякова

Приближение к моменту разрыва сопровождается различными физическими явлениями - предвестниками землетрясений. По наблюдениям за предвестниками, делаются попытки предсказать время наступления землетрясения, что теоретически кажется простым, но на практике оказывается весьма нелегким делом. Основной проблемой в данном случае является сложность ограничения области возможной регистрации предвестников.

К настоящему времени предложено много методов прогнозирования, цель которых обнаружение предвестников землетрясений. Проанализировав различные методы прогнозирования, Рикитаке в своей работе [34] выделил три класса предвестников землетрясений: А1, А2 и В. Информацию о геодезических деформационных предвестниках землетрясений можно найти, например, в работе [46].

Для большинства предвестников класса В (наклоны, деформации и др.) зависимость времени возникновения предвестников землетрясений от их энергии отсутствует.

Для предвестников класса А2 (вертикальные движения земной коры, наклон графика повторяемости землетрясений, микросейсмичность, переориентировка осей напряжений в очагах слабых землетрясений, аномальная ползучесть, характеристики распространения упругих волн, геомагнитные вариации, вариации электросопротивления горных пород, химический состав и уровень подземных вод, дебит источников) существует

прямая корреляционная зависимость между временем возникновения предвестников и энергией землетрясения с высоким коэффициентом корреляции.

Для краткосрочных предвестников класса А1 зависимость времени подготовки от энергии отсутствуют; физическая природа этих предвестников – асейсмическое медленное (крипоподобное) разрушение горных масс перед главным толчком. Предвестники класса А1 часто сопровождают землетрясения с магнитудой 6. Рикитаке предложил способ предсказания больших землетрясений, включающий наблюдения за деформациями коры геодезическими методами, выделение предвестникового сигнала класса А2, оценка зоны проявления предвестника, с помощью которой грубо определяется энергия и время возникновения землетрясения.

В 1968 году, по данным геодезических измерений в Японии, Ю.А. Мещеряков впервые предложил модель предвестника землетрясений [28]. В этой модели он выделил три фазы α , β , и γ , связанные с упругими деформациями. Впоследствии модель детализировалась другими исследователями, в результате чего в нее были добавлены фазы γ_1 , γ_2 , γ_3 и δ (рис 1.5).

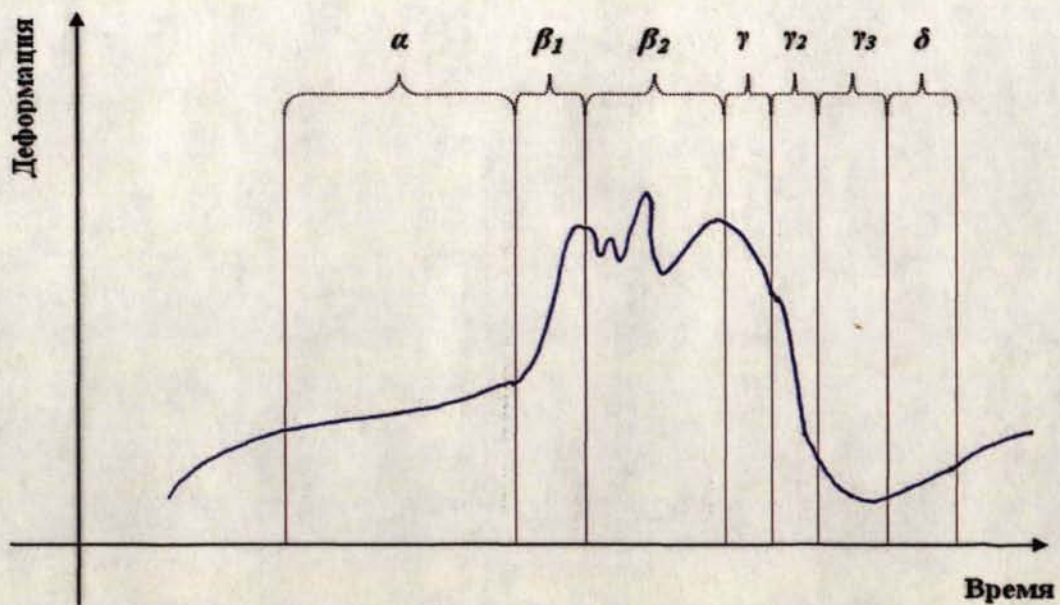


Рис. 1.5. График сейсмических состояний земной коры (схема Ю.А.Мещерякова)

С позиций теории упругости каждая фаза сейсмических движений состоит в следующем [38]:

Под действием сил, вызывающих тектонические движения, в материале Земли возникают упругие напряжения, противодействующие сдвигу и изгибанию слоев. Длительно, медленно растущая упруго-пластическая деформация сопровождается уплотнением большого объема горных пород (закрывание пор, мелких трещин и т.п.). Линейной во времени деформации земной коры соответствует фаза α , являющаяся упругим процессом.

Затем происходит относительно быстрая упругая деформация, которая также сопровождается уменьшением объема горных масс и нарушением кристаллических решеток отдельных материалов. Значение напряжений деформации приближается к известному пределу, в результате чего начинают стремительно развиваться микротрещины; наступает сейсмическая фаза β_1 .

Третий этап сейсмического состояния земной коры – пластическая деформация, она практически не сопровождается уменьшением объема горных пород, что соответствует неустойчивым пульсирующим смещениям – фазе β_2 . Фазы β_1 и β_2 объединяют в фазу β , которая представляет собой процесс предшествующих сейсмических деформаций. В это время начинается концентрация напряжений вокруг будущих сдвигов при землетрясении. По плоскости сдвига развиваются нарушения и возникают явления, подобные частичному плавлению. Непосредственно перед землетрясением начинаются досейсмические сдвиги, фаза γ_1 – процесс медленного скольжения по плоскости сдвига, который в условиях огромного всестороннего сжатия завершается резким сдвиговым перемещением горных масс – землетрясением. Сейсмические сдвиги, представленные фазой γ_2 , сопровождаются сейсмическими волнами различных спектров.

Затем происходит релаксация упругих напряжений, которые возникли из-за перемещения масс. Процесс сопровождается серией упруго-пластических разрывных нарушений в надочаговой зоне (афтершоки –

повторные толчки землетрясения) и завершается максимальным снятием упругих напряжений в зоне очага. Продолжаются послесейсмические сдвиги (фаза γ_3), которые стремительно переходят в спокойное равновесное состояние. При обратном сдвиге часть блока под действием силы тяжести сползает, опускается. Затем наступает конверсивная фаза δ , переходящая в фазу α , на этом завершается цикл сейсмических деформаций земной коры, сопутствующий землетрясению.

Схему, предложенную Ю.А. Мещеряковым [28], например, подтверждают упоминающиеся ниже результаты анализа данных многократного нивелирования на линии Шеки-Кюрдамир, расположенной на южных склонах Большого Кавказа [61].

В последние годы появляются сообщения о регистрации геодезических предвестников по GPS измерениям. Так, на Камчатке [24], с 1996 года проводятся непрерывные измерения в сети, состоящей из девяти GPS станций. По перемещениям шести камчатских станций по отношению к станции РЕТР по направлению N и E в течение интервала времени +/-55 дней от сильного землетрясения 5 декабря 1997 года, определены очень четкие постсейсмические и довольно четкие пресейсмические вариации.

Современные спутниковые GPS измерения позволяют также обнаруживать сейсмические волны, соответствующие фазе γ_2 схемы Мещерякова. Согласно [21], независимые GPS-определения на секундном интервале регистрируют горизонтальные и вертикальные колебания, длящиеся несколько минут с периодами 10-30 с, амплитудами 5-10 см даже для станций на расстоянии 4000 км от эпицентра.

Графики колебания земной поверхности в течении 11 минут в меридиане, первом вертикале и по высоте, вызванные Аляскинским землетрясением построены для станций наблюдения, расположенных на расстояниях 1650, 640, 2220, 2300, 2405 км от эпицентра (рис. 1.6).

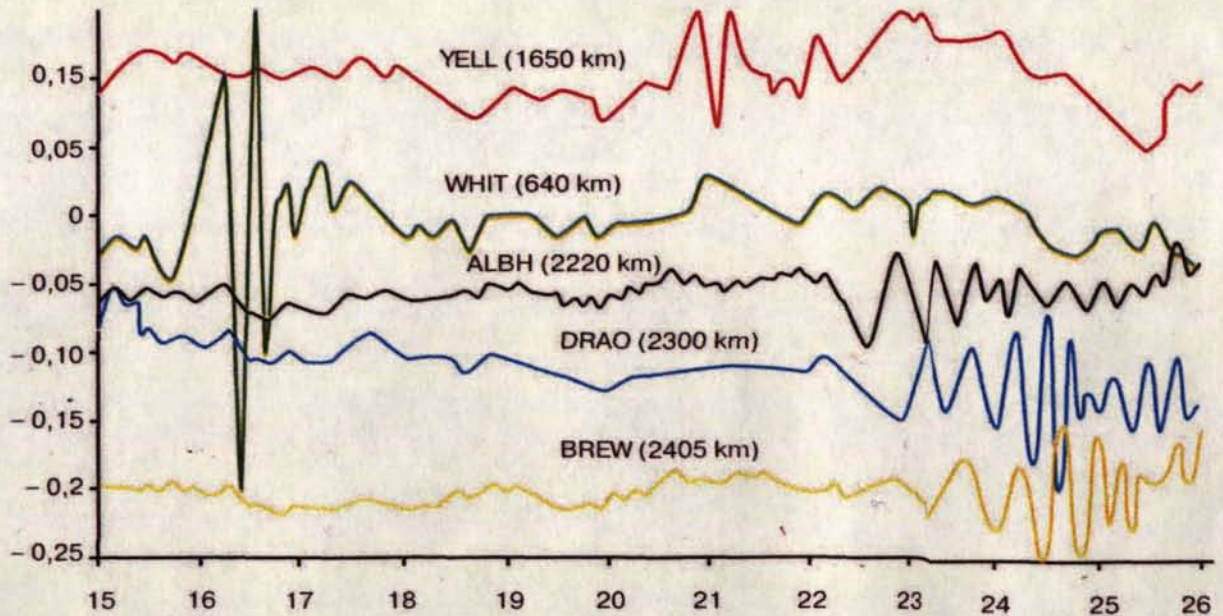


Рис. 1.6. График определения широты при секундном интервале записи во времени Аляскинского землетрясения 3 ноября 2002 года
(Магнитуда около 7,9)

В работе [79] описаны связанные с Суматранским землетрясением (26.12.2004, $M=9$) деформации земной поверхности, регистрируемые в Германии с помощью «высокочастотных» (1 Гц) спутниковых GPS-измерений. В табл. 1.1. представлены результаты некоторых исследований, связанных с изучением удаленных на 20-3900 км от эпицентров землетрясений смещений земной поверхности, регистрируемых по результатам применением 1 Гц спутниковых измерений.

Таблица 1.1.

**Краткие сведения о недавних сильнейших землетрясениях
и связанных с ними смещениях**

Расположение	Дата	Магнитуда	Расстояние от анализируемых пунктов до эпицентра, км	Смещения
Денали (Аляска)	3.11.2002	7,9	3900 [48]	мм (по горизонтальной компоненте)
			640-2405 [21]	5-10 мм (по всем компонентам)
Токаши-Око (Хоккайдо)	25.09.2003	8,1	70-240 [56]	дм (по всем компонентам)
Сан-Симеон (Калифорния)	22.12.2003	6,5	100 [58]	2-4 см (по всем компонентам)
Паркфилд (Калифорния)	28.09.2004	6,0	20-50 [70]	2 см (по всем компонентам)
Суматра-Андаман	26.12.2004	9,3	<3000 [73]	см

1.3.3. Прогностические геодинамические полигоны

Для изучения тектонических деформаций верхних слоев земной коры, предваряющих и сопровождающих землетрясения создаются прогностические геодинамические полигоны (ГДП). С помощью таких полигонов выявляют аномальные проявления тектонических деформаций, рассматриваемые в качестве геодезических предвестников землетрясений и вулканических извержений.

ГДП проектируют с учетом геологического строения, в районах, выбираемых на основе обобщенной статистической информации о произошедших землетрясениях, их периодичности и разрушительной силы. В первую очередь эти полигоны создаются в столицах республик, крупных экономических, промышленных и культурных центрах, расположенных в сейсмоактивных районах.

Размер ГДП принимают равным размеру области, радиус которой определяется из полученной на основе статистических исследований

эмпирической зависимости (1.6) средних радиусов областей (зон), в пределах которых проявляются измеримые смещения сопровождающие сильные землетрясения, от магнитуд этих землетрясений [38].

$$\log r = 0,51M - 2,27, \quad (1.6)$$

где r – радиус зоны, в которой геодезическими методами выявлены аномальные тектонические движения; M – магнитуда землетрясения.

Необходимая периодичность наблюдений определяется из эмпирического соотношения (1.7), приведенного в работе [38]:

$$\log t = 0,52M - 2,80, \quad (1.7)$$

где t – время подготовки землетрясения с магнитудой M .

В табл. 1.2. приведены расчетные средние радиусы зон r (1.6) и периоды продолжительности предшествующих деформаций земной коры (1.7). Исходя из этих данных геодезические построения на прогностических ГДП должны охватывать территорию с радиусом не более 50-60 км, так как речь идет об изучении сильных землетрясений. Повторные наблюдения в местах произошедших землетрясений целесообразно делать, в случае, когда магнитуда землетрясения превосходила 6.

Таблица 1.2.

Средние радиусы зон и продолжительность деформаций

Магнитуда M	$\log r$	Средний радиус зоны, км	$\log t$	Период, год
3	-0,74	0,18	-1,24	0,06
3,5	-0,49	0,33	-0,98	0,10
4	-0,23	0,59	-0,72	0,19
4,5	0,02	1,06	-0,46	0,35
5	0,28	1,91	-0,20	0,63
5,5	0,54	3,43	0,06	1,15
6	0,79	6,17	0,32	2,09
6,5	1,05	11,09	0,58	3,80
7	1,30	19,95	0,84	6,92
7,5	1,56	35,89	1,10	12,59
8	1,81	64,57	1,36	22,91
8,5	2,07	116,14	1,62	41,69
9	2,32	208,93	1,88	75,86

На ГДП проектируют контролирующие геодезические построения, включающие плановые и высотные построения, а также измерения силы тяжести по отдельным профилям, так как в соответствии с гипотезой тектоники плит, моделям дилатации и давления-проскальзывания, предвестники землетрясений выражаются как в вертикальных, так и в горизонтальных смещениях земной поверхности и локальных изменениях силы тяжести.

На типовых прогностических геодинамических полигонах Роскартографией принята система геодезических построений, состоящая из двух уровней. Построения первого уровня предназначены для получения площадного распределения деформаций земной поверхности на обширных территориях и определения расположения локальных тектонически активных участков земной поверхности для создания построений второго уровня. К построениям первого уровня относились сплошная линейно-угловая сеть (рис. 1.7) и нивелирные линии (рис.1.8).

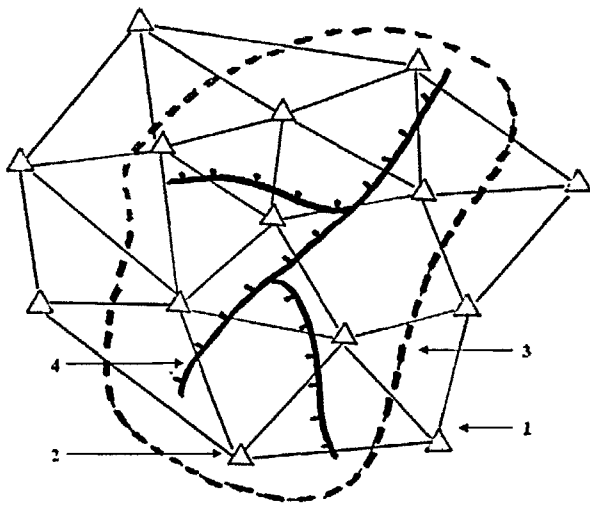


Рис. 1.7. Линейно-угловая сеть на прогностическом ГДП (1 – пункт плановой сети, расположенный на стабильной структуре; 2 – пункт внутри активной структуры; 3 – граница тектонически активной структуры; 4 - разлом)

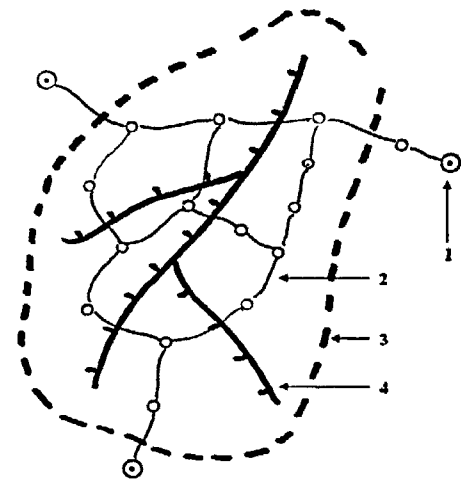


Рис. 1.8. Линии нивелирования на прогностическом ГДП (1 – нивелирный знак, расположенный на стабильной структуре; 2 – линия высокоточного нивелирования; 3 – граница тектонически активной структуры; 4 - разлом)

Линейно-угловая сеть охватывает всю активную тектоническую структуру и опирается на пункты, расположенных на стабильных участках. Сеть состоит около 30 пунктов, удаленных друг от друга на 5-10 км. Для ориентировки сети относительно единой общеземной системы координат, рекомендовано проводить астрономические определения трех азимутов Лапласа (с точностью не хуже $0,5''$), а также астрономических координат (с СКО определения широты – $0,2''$ и долготы – $0,02^s$) минимум до трех пунктов для вычисления уклонений отвеса.

Линии повторного нивелирования проектируются в виде полигонов и отдельных линий, пересекающих активные разломы; вдоль этих линий выполняются гравиметрические измерения, на пунктах, которые располагаются через 5 км и в пределах нескольких десятков метров совмещаются с реперами нивелирования.

Второй уровень включает деформационные площадки построения на локальных участках ГДП, приуроченных к зонам глубинных разломов, определяемым по геологическим и геофизическим данным, по результатам многократных геодезических измерений в сетях первого уровня. На этих площадках выполняют высокоточные линейные измерения и высокоточное нивелирование. В большинстве случаев деформационных площадки представляют собой геодезические четырехугольники, полностью контролирующие возможные смещения в зоне разлома. При сдвиговых смещениях вдоль разлома изменяются диагонали и длины поперечных линий, а стороны, расположенные вдоль разлома, должны оставаться без изменений. Для контроля деформаций типа сброса и надвига на разломах плановое построение дополняют нивелирными профилями, проложенными поперек разлома.

К геодезическим построениям второго уровня относят также геодезические наклонометры – сеть из крест-накрест расположенных линий нивелирования длиной 10-15 км. Такие построения создают для контроля измерения наклонов хорошо выделяемых тектонических блоках.

Короткие линии повторного высокоточного нивелирования на протяжении 1970-90 гг. являлись одним из важнейших элементов геодезических построений на геодинамических полигонах. Измерения на этих линиях выполнялись с частотой от двух раз в год до одного раза в месяц. Эти линии, по существу, являлись аналогом геофизических приборов – наклономеров, но в отличие от них линии многократного нивелирования обеспечивали большую длину базы (несколько десятков километров), что позволяло более уверенно регистрировать сигналы тектонической природы.

Линии многократного повторного нивелирования присутствовали на большинстве геодинамических полигонов ГУГК СССР. Наиболее информативными являлись линия Шеки-Кюрдамир в Азербайджане и линии Алма-атинского геодинамического полигона (Казахстан). Геодезические работы на полигонах выполнялись специалистами предприятий ГУГК СССР, научно-методическое руководство осуществлялось сотрудниками ЦНИИГАиК [31].

В отличие от большинства других полигонов, через которые проходили, как правило, одна-две линии высокоточного нивелирования, Алма-атинский полигон содержал шесть высокоточных линий, проложенных на склоне хребта Заилийский Алатау. Результаты многократных повторных измерений, выполненных на параллельных и близко прилегающих друг к другу линиях, продемонстрировали четкую реакцию динамики земной поверхности на подготовку сильных землетрясений (рис.1.9). Однообразный характер изменения высот по разным линиям показал, что эти изменения нельзя объяснить ошибками измерений.

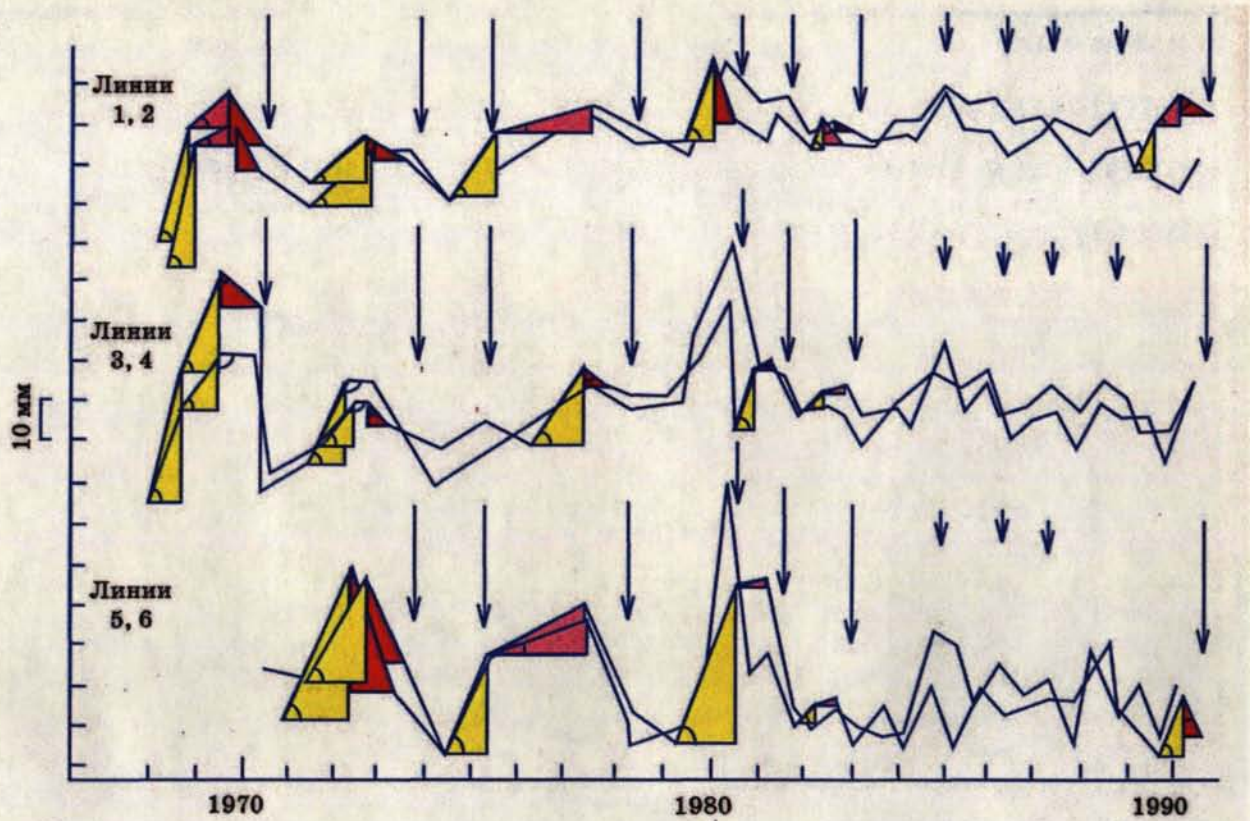


Рис. 1.9. Вертикальные смещения с сильными землетрясениями по линиям повторного нивелирования на Алма-атинском геодинимическом полигоне (длинные стрелки фиксируют моменты землетрясений с $M > 5,0$, короткие – с $M \leq 5,0$)

На линии Шеки-Кюрдамир [75, 61] было накоплено более сорока циклов высокоточного нивелирования, что позволило выявить реакцию наклонов земной поверхности на подготовку и разрядку сильных землетрясений (рис. 1.10), а также на степень подвижности тектонических разломов, которые пересекает эта линия (рис. 1.11).

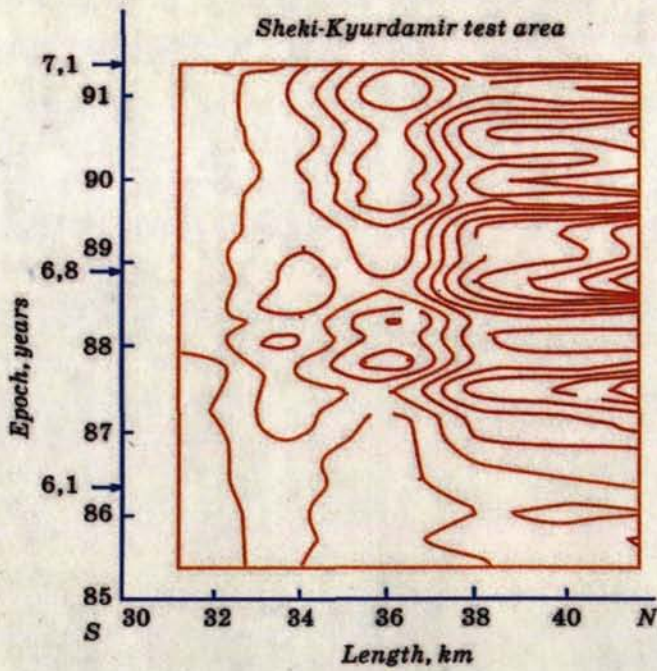


Рис. 1.10. Пространственно-временное распределение вертикальных смещений вдоль северного отрезка линии Шеки-Кюрдамир [Kaftan, Ostach, 1996] (на оси ординат указаны моменты и магнитуды сильнейших землетрясений)

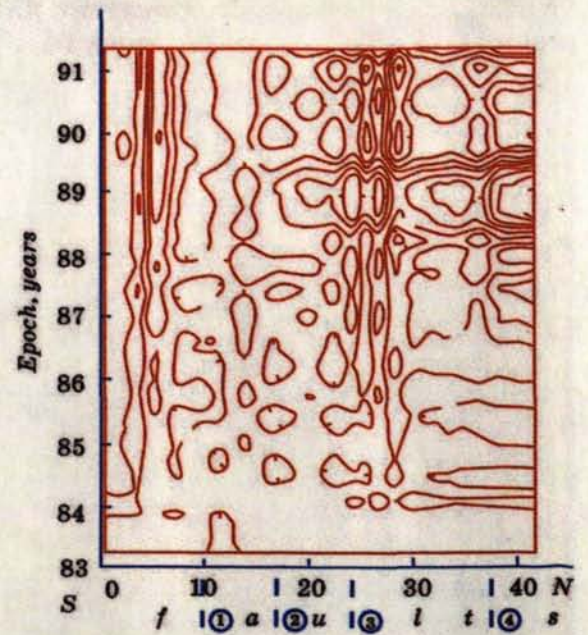


Рис. 1.11. Реакция повторного нивелирования на подвижность тектонических разломов [Kaftan, Ostach, 1996], положение которых отмечено номерами на оси абсцисс.

Таким образом, короткие линии многократного повторного нивелирования реагируют на подготовку и разрядку сильных землетрясений в регионе, а также позволяют установить степень подвижности пересекаемых ими разломов. Применение GPS сетей коротких базовых линий для анализа деформаций в горном районе рассмотрено, например, в работе [62].

В последние годы на геодинимических полигонах в сейсмоактивных регионах мира выполняются более точные и оперативные геодезические измерения с использованием спутниковых радионавигационных систем GPS. Перспективы и возможности применения спутниковых методов в геодинимических исследованиях рассмотрены в работах [40, 42, 43]. Результаты международных региональных исследований в сейсмоактивных районах представлены в трудах Международного семинара [77].

Организация системы планомерных спутниковых геодезических измерений на геодинимических полигонах предложена М.Т. Прилепиным

[33]. Одной из первоочередных задач автор выделяет «создание Международного прогностического полигона, в работах которого могли бы быть аккумулированы наработки как в части технологий сбора наблюдательного материала по различным предвестникам, так и принципам экспертной оценки ситуаций и выдачи рекомендаций для принятия решений». Важнейшим целевым назначением современных геодинимических полигонов профессор Прилепин считает регистрацию предвестников землетрясений, чему сегодня уделено недостаточно внимания при построении и развитии ГДП на территории России, несмотря на то, что накоплен обширный опыт в данном направлении, как в отечественных, так и в международных исследованиях.

1.3. Международные организации, архивы измерительных данных и программное обеспечение обработки спутниковых измерений с целью определения движений и деформаций

1.3.1. Международная служба IGS

Кратко рассмотрим направления геодинимических исследований, связанные с построением и развитием международных спутниковых геодезических сетей.

Основной в данном направлении является International GNSS Service (IGS) – международная служба (прежде именуемая Международной службой GPS для геодинимики), задачами которой являются сбор, архивация, распространение данных спутниковых наблюдений и использование их для расчета высокоточных эфемерид спутников, параметров вращения Земли, координат и скоростей станций слежения, получение и распространение данных о часах станций слежения и спутников, а также информации об ионосфере и тропосфере [64, 65].

IGS была организована в 1993 году Международной ассоциацией геодезии (МАГ) с целью объединения постоянных станций слежения за спутниками в единую сеть [3].

IGS состоит из сети станций наблюдений (около 50 основных станций, имеющих водородные стандарты частоты, и более 200 опорных станций), центров данных, центров анализа, координационных центров анализа и поддержания системы отсчета, центрального бюро и руководящего совета (рис. 1.12).



Рис. 1.12. Структура международной службы IGS

IGS собирает результаты спутниковых наблюдений со станций своей сети (рис. 1.13), распределяет, анализирует и архивирует результаты наблюдений спутников геодезического назначения. Данные хранятся и обмениваются в формате RINEX.



Рис. 1.13. Станции наблюдений IGS (по информации архива SOPAC)

RINEX (Receiver Independent Exchange format) – международный формат обмена данными спутниковых наблюдений, содержащий текстовую информацию об измерениях. Файл спутниковых измерений, конвертированный в данный формат, разделяется на файл данных наблюдений, файл навигационного сообщения GPS, файл метеорологических данных, файл навигационного сообщения ГЛОНАСС и файл навигационного сообщения геостационарных спутников систем SBAS [3]. Использование формата RINEX позволяет обрабатывать в стандартных программах, поставляемых со спутниковой аппаратурой, измерительные файлы с приемников других фирм-производителей.

Измерения поступают через центры оперативного сбора данных (Operational Data Centers) в региональные (Regional Data Centers) и затем в глобальные (Global Data Centers) центры хранения данных (предусмотрено дублирование на случай штатной или нештатной остановки сервера какого-либо из центров). Отсюда предоставляется доступ центрам обработки, а также публичный общий доступ.

В центрах обработки происходит весь цикл вычислений, направленных на извлечение неизвестных параметров из массивов фазовых и кодовых

измерений, а также вся деятельность по отладке и развитию этого процесса. В настоящее время действуют следующие центры обработки: Center for Orbit Determination in Europe (AIUB, Switzerland); European Space Operations Center (ESA, Germany); Scripps Institution of Oceanography (USA); Geo Forschungs Zentrum (Germany); Jet Propulsion Laboratory (USA); National Oceanic and Atmospheric Administration (USA); Natural Resources Canada (Canada); U.S. Naval Observatory (USA); Massachusetts Institute of technology (USA).

Каждый центр курирует свою часть глобальной сети и используют независимые алгоритмы, поэтому не все станции могут быть обработаны в нескольких центрах сразу, однако существует согласованный список пунктов (IGS Core), которые в обязательном порядке обрабатываются минимум тремя центрами, причем один из них должен находиться на другом континенте.

Задача координатора центров обработки состоит в выводе средних весовых значений однотипных решений, полученных из центров обработки, и их публикация на официальном сервере центрального бюро IGS и глобальных центрах хранения данных, в число которых в настоящее время входят: Crustal Dynamics Data Information System (NASA, GSFC, USA); Institute Geographique National (France); Scripps Institution of Oceanography (USA).

Центральное бюро осуществляет руководство всей системой, занимается согласованием и утверждением форматов обмена данными.

Все продукты IGS представлены в виде текстовых файлов, упакованных Unix-компрессией. Орбиты спутников даны в виде значений геоцентрических координат с интервалом в 15 минут.

Точность продуктов IGS достаточна для поддержки текущих научных целей, включая реализацию систем координат ITRF, мониторинг вращения Земли и деформации ее твердой и жидкой компонент, причем эта точность постоянно повышается [3].

1.3.2. Архив данных спутниковых наблюдений Международного центра SOPAC

Служба IGS имеет в своей структуре доступный для широкого круга пользователей (через Интернет-сайт <http://sopac.ucsd.edu>) архив данных спутниковых наблюдений SOPAC (The Scripps Orbit and Permanent Array Center), который служит глобальным центром хранения и анализа данных измерений на пунктах IGS, точных орбит и метеопараметров.

Главная научная задача архива SOPAC – поддержание высокой точности геодезических и геофизических измерений, используемых для изучения землетрясений, движений и деформаций тектонических плит, а также метеорологических процессов. По данным архива осуществляется также непрерывный мониторинг станций спутниковых GPS-наблюдений.

Архив состоит из нескольких основных разделов:

- Архив данных (Data Archive). В данном разделе доступны следующие подразделы:
- База данных архива (SOPAC Data Browsers). Здесь собственно и находятся файлы измерений в международном формате обмена данных RINEX (раздельно файлы измерений (obs) и навигационные файлы (nav)). Поиск файлов осуществляется по имени пункта и датам (начальной и конечной) наблюдений. Доступ к навигационным файлам и файлам измерений осуществляется через html или ftp-протоколы. Файлы загружаются в заархивированном виде, для их разархивации с сайта можно загрузить специальную программу Hatanaka. В подразделе находится также конвертор дат наблюдений в GPS формат.
- Сеть GPS-станций. Здесь доступна динамическая карта мира с расположенными на ней станциями спутниковых измерений (рис. 1.14), доступ к измерительной информации которых имеется в архиве SOPAC. Кроме GPS-пунктов, на карте показаны границы стран, крупнейшие города, границы тектонических плит. Пользователи могут изменять

масштаб карты угол обзора, а также выводить на карту эллипсы погрешностей и векторы смещений для каждого пункта.

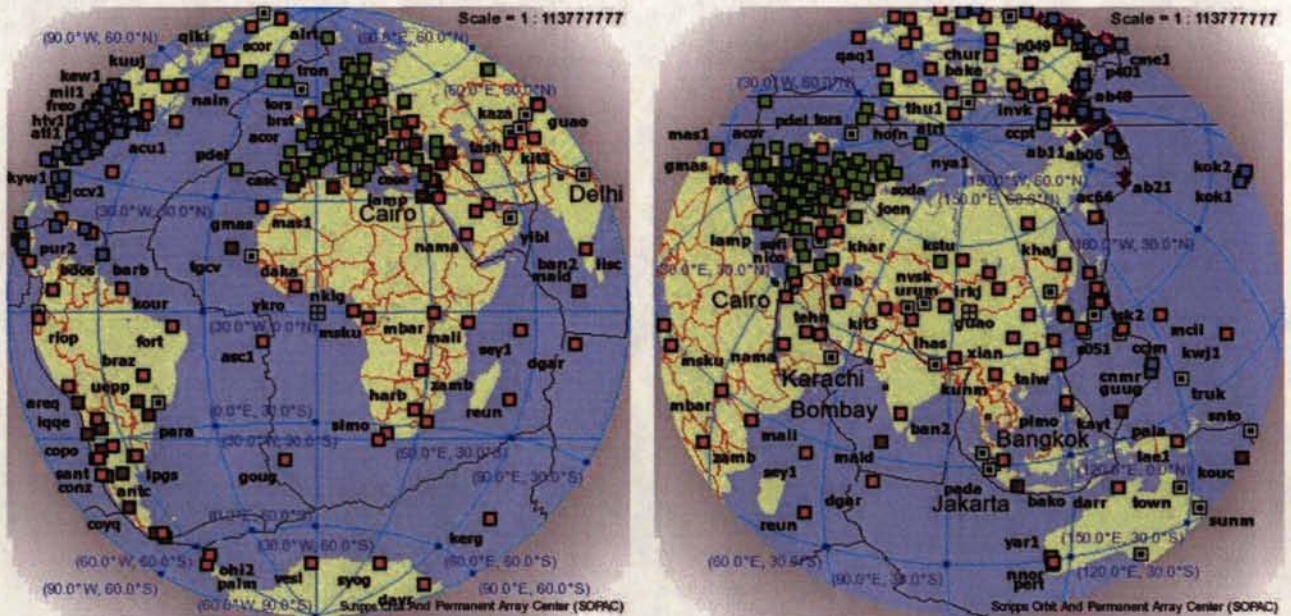


Рис. 1.14. Сеть GPS-станций в архиве SOPAC

- Новости и отчеты о состоянии и изменениях Архива.
- Параметры GPS-станций. Здесь можно посмотреть координаты GPS-станций, их фотографии, типы и технические характеристики работающих на станциях спутниковых приемников и антенн.
- Процессы. В этом разделе представлены координаты и скорости пунктов, временные ряды, а также аналитические ресурсы GAMIT, SCOUT и др.
- Проекты. Здесь представлены различные научные проекты IGS.

1.3.3. Современные программные продукты обработки СРНС измерений

Используемые для обработки результатов спутниковых геодезических измерений программы принято делить на коммерческое программное обеспечение, поставляемое производителями спутниковой аппаратуры, и многоцелевое научное программное обеспечение. Рассмотрение данных программных продуктов в настоящем разделе необходимо для выявления

возможностей их применения в анализе движений и деформаций. Это обеспечит более обоснованный выбор и конкретизацию направления исследований и разработок по теме диссертации.

1.3.3.1. Коммерческое программное обеспечение

Из коммерческих программ в России наиболее широкое распространение получили Trimble Geomatic Office компании Trimble Navigation, Pinnacle компании Javad Navigations Systems, Ashtech Solutions компании Thales Navigation и другие.

Все эти программные пакеты объединяет недоступность пользователю математических моделей (так называемых открытых кодов) продукта; работа в среде Windows; простой интуитивный интерфейс, рассчитанный на специалистов среднего уровня; относительная точность определения векторов базовых линий в несколько единиц 10^{-7} и др.

Trimble Geomatic Office (TGO) - комплекс программ [6] позволяющих выполнять обработку практически всех типов цифровых геодезических данных, полученных при работе с GPS оборудованием, электронными тахеометрами, лазерными дальномерами, программами дорожного проектирования и ГИС базами данных, а также объединять всю полученную информацию в единую систему данных.

В TGO имеется возможность обрабатывать и уравнивать GPS базовые линии, производить контроль и проверку качества данных (QA/QC), экспорт и импорт данных дорожного проектирования и геодезической съёмки, создавать цифровую модель местности и ситуации, пересчитывать в различные системы координат из WGS-84 и обратно, собирать и экспортировать ГИС данные, использовать цифровой картографический материал в качестве подложки, работать с кодами объектов, создавать отчётную документацию, управлять проектами, импортировать

архивированные проекты из ПО GPSurvey (предшественник TGO, продукт фирмы Trimble Navigation).

Программное обеспечение Pinnacle разработано для операционных систем семейства Windows и предназначено для постобработки GPS/ГЛОНАСС измерений. Программа реализует концепцию «планируй и выполняй» [6], т.е. пользователь имеет возможность спланировать свою сеть графически и установить каналы приема измерительных данных в программу, после чего программа выполняет всё то, что было спланировано, а также имеет возможность планировать и выполнять повторяющиеся сценарии в соответствии с предварительно составленным расписанием.

Основными модулями Pinnacle являются:

- Process (обработка) – обработка результатов измерений, хранимых в базе данных Pinnacle. Опция состоит из подмодулей:
- Static (статика) - позволяет обрабатывать средние и длинные базовые линии, даже при малом количестве участвующих в измерениях спутников;
- Rapid Static (быстрая статика) – используется для обработки коротких сессий;
- Pseudo kinematics (псевдо кинематика) - применяется для обработки измерений, созданных за несколько оккупаций, когда измерения на каждой точке трассы проводятся в процессе псевдо кинематической сессии.
- Adjustment (уравнивание) - содержит информацию, включающую краткие результаты, диаграммы, уравненные базовые линии, статистику по уравненной сети и отчеты;
- Network adjustment (уравнивание сети) – включает предварительный анализ уравниваемых данных (или предварительное уравнивание): этот этап преследует две основные цели. Во-первых, он позволяет пользователю установить связность данной GPS сети в целом. Во-вторых - осуществить предварительное выделение возможных грубых ошибок (blunders) в векторах базовых линий; уравнивание с минимальными ограничениями (Minimally constrained adjustment или уравнивание сети). Выполняется для

- Report Generator (генератор отчётов) осуществляет генерацию различных форм отчетов (включая графические, такие как диаграммы и графики) и экспорт данных из Pinnacle, предоставляет пользователю инструмент модификации отчетов в процессе работы Pinnacle, служит глобальным средством (типа компилятора), работает с выбранными DB-объектами различного типа.
- Comparing Two Subnets (сравнение двух подсетей). Сравнение двух уравненных подсетей, содержащих физически одни и те же точки. Существует три критерия сравнения координат точек подсети: критерий инверсии, критерий девиации и критерий дисперсии. При сравнении двух подсетей используется некоторый уровень доверия.
- User derived geoid (создание модели геоида). В PINNACLE™ пользователь может создать локальную модель геоида, базируясь на результатах уравнивания подсети.
- User derived control data list (создание списка опорных точек). В PINNACLE™ пользователь может создать новый список опорных точек, базируясь на результатах уравнивания подсети.

Программное обеспечение Ashtech Solutions предназначено для использования в среде Windows и служит для обработки GPS и GPS/GLONASS данных. Содержит в себе функции определения невязки полигона, автоматического анализа повторных наблюдений, уравнивания методом наименьших квадратов и контроля качества. Программа

поддерживает все модели выпускавшихся приёмников марки Ashtech, в ее среде возможно использование всех режимов сбора данных: статика, быстрая статика, псевдо-кинематика, непрерывная кинематика, stop&go, кроме того, Ashtech Solution обрабатывает файлы формата Rinex.

Программа состоит из следующих модулей:

- Модуль планирования (включает спутниковые системы GPS и ГЛОНАСС); Ashtech Solutions
- Модуль передачи данных;
- Модуль обработки векторов - обработка сырых данных с получением векторов и вычисление координат определяемых пунктов;
- Уравнивание;
- Параметры эллипсоида и картографические проекции. Данный модуль предусматривает создание параметров прямоугольных систем координат; обработку, уравнивание и экспорт координат точек в выбранную пользователем систему; создание новой модели эллипсоида по семи 7 параметрам перехода от любой модели; вычисление локальных систем координат и др.;
- Отчёт - выводится детальный отчёт о результатах обработки полевых измерений;
- Экспорт (экспорт обработанных данных в различные формате; функционирует модуль создания форматов экспортируемых данных для создания пользовательских форматов данных);
- Помощь on-line.

Программное обеспечение GrafNav/GrafNet (фирма NOVATEL) дает пользователю возможность обрабатывать статические сети и вычислять кинематические траектории, выполнять совместную обработку данных ГЛОНАСС и GPS измерений, экспортировать результаты обработки в большинство стандартных форматов. Программа поддерживает около 30-ти форматов измерений различных производителей, включая международный формат обмена данными RINEX. Несомненным достоинством программы

является возможность загрузки из Интернет данных с непрерывно работающих станций IGS и других глобальных сетей.

Рассмотрение возможностей основных типов коммерческого программного обеспечения наиболее известных фирм-производителей СРНС-аппаратуры показывает, что в этих программах не предусмотрены модули, обеспечивающие определение движений и деформаций земной поверхности, что существенно снижает эффективность их применения в геодинамических исследованиях.

1.3.3.2. Научное программное обеспечение

К научным программам относят: Bernese – Бернского Астрономического Университета; GAMIT – Массачусетского института технологий США; GIPSY Калифорнийского института технологий США и др.

Программное обеспечение GAMIT/GLOBK – пакет лицензированных программ обработки и анализа GPS измерений, имеющий текстовый интерфейс, разработанный с использованием языков программирования: C, FORTRAN и предназначенный для работы в операционной системе Linux.

GAMIT состоит из следующих модулей [6]:

- ARC – создание табулированных эфемерид спутников на основе начальных состояний;
- MODEL – создание файлов разностей измеренных и вычисленных значений, а также их частных производных поправок к параметрам для дальнейшей оценки;
- CFMRG – создание файла для управления комбинациями файлов разностей и выбора уравниваемых параметров для ввода в модуль SOLVE;
- SOLVE – вычисление поправок в оцениваемые параметры;

- AUTCLN - работает с одним или более файлами разностей, отмечает и при необходимости уничтожает срывы фазовых циклов в измерениях; исключает ненадежные данные, используя комбинации фазовых и кодовых измерений.

Порядок работы с GAMIT состоит из подготовки исходных данных, обработки отдельных сеансов, совместного уравнивания сеансов с использованием пакета программ GLOBK, предоставляемого пользователям в едином комплекте с пакетом GAMIT. Хотя GAMIT позволяет проводить совместную обработку многих сеансов наблюдений, для получения уравненных значений искомым параметров, более эффективным является применение GLOBK.

На выходе программа GAMIT выдает используемый для уравнивания сетей файл, содержащий ковариационную матрицу измерений.

В последних версиях программного пакета автоматизирован целый ряд действий: получение точных эфемерид, данных станций слежения IGS и параметров вращения Земли; преобразование данных измерений из формата приемника в RINEX-формат; обработка данных по выбранному сценарию и производство отчетов с графическим представлением результатов обработки и архивацией результатов.

Программный пакет Bernese написан на языке программирования FORTRAN-77 и предназначен для решения следующих задач:

- оперативной обработки одночастотных и двухчастотных наблюдений на небольшой территории;
- обработки постоянно действующих сетей;
- разрешения неоднозначности на длинных линиях (до 2000 км с использованием высокоточных орбит);
- создания моделей ионосферы и тропосферы; комбинации различных типов приемников (калибровка положения фазового центра антенны);
- определения орбит и оценки параметров вращения Земли;

- разработки методов решения свободных сетей.

Программа состоит из следующих модулей [6]:

- Transfer (передача данных) - генерация формата Bernese из RINEX-формата (наблюдения, информация, передаваемая по радиоканалу, метеоданные).
- Orbit (орбитальная часть) - генерация стандартных орбит; корректировка орбит, генерация орбит в точном орбитальном формате, сравнение орбит и т.д.
- Processing (обработка) - обработка кодовых данных, предварительная обработка двухчастотных кодовых и фазовых данных (программа обрабатывает все основные данные, записываемые высокоточными GPS-приемниками, при этом могут использоваться пять различных линейных комбинаций частот L1 и L2), оценка параметров на основе GPS-наблюдений (программа GPSEST) и на основе суперпозиции систем нормальных уравнений (программа ADDNEQ). Программы GPSEST и ADDNEQ используются для обработки базисных линий, сеансов, кампаний и множественных кампаний. ADDNEQ дает возможность получать различные комплексные решения (например, ежегодные координаты) с использованием (например, ежедневным) систем нормальных уравнений без повторной обработки наблюдений.
- Simulation (моделирование) - Создание моделей спутниковых наблюдений на основе статистической информации (СКО наблюдений, систематические ошибки, сбои циклов).
- Service (сервис) – просмотр редактирование файлов данных в двоичной системе, сравнение наборов координат, вывод на экран невязок и т.д.

Модуль Processing - ядро программы Bernese; программы оценки параметров GPSEST и ADDNEQ в свою очередь являются ядрами обрабатывающего модуля.

В GPSEST составляются уравнения наблюдений для фазовых и/или кодовых измерений, создаются и обращаются нормальные уравнения,

результаты записываются в файлы, система нормальных уравнений (не обратная) записывается в выходной файл для дальнейшего использования. Последовательное использование строится на формировании вторых разностей для кодовых и фазовых наблюдений. Все результаты базируются на оценке по методу наименьших квадратов, причем вам дается возможность правильно моделировать корреляции. Имеется полностью автоматическая система сохранения для начальных фазовых неоднозначностей. Ранее разрешенные неоднозначности (например, в режиме базисных линий) могут быть представлены в качестве известных на более поздних этапах обработки (например, в режиме сеансов). Параметры, которые уже оценивались ранее (неоднозначности, орбиты, координаты, тропосфера, ионосфера), могут использоваться в качестве априорно известных величин при дальнейшем выполнении программы. GPSEST используется для получения результатов для, так называемого, сеанса, то есть временного интервала, покрываемого одной смежной спутниковой дугой (очень часто это одни сутки).

Системы нормальных уравнений, составленные как в программе GPSEST, так и в программе ADDNEQ, могут быть перегружены в программу ADDNEQ. Результирующие файлы записываются так же, как в программе GPSEST. Все результаты также базируются на оценке по методу наименьших квадратов, и также используются такие методы как фильтр Калмана и т.д. ADDNEQ предоставляет такие уникальные возможности, как: объединение $n > 1$ односуточных дуг в n -суточную дугу или включение новых параметров (например, скоростей изменения координат станции) в годовые решения. Веса, включенные в системы нормальных уравнений в GPSEST, могут быть удалены или изменены в ADDNEQ. Физическая модель может быть изменена в программе ADDNEQ. Например, здесь возможно добавить стохастические параметры орбит, изменить количество тропосферных параметров (для станции или суток). Поскольку нет необходимости составлять уравнения наблюдений, программа ADDNEQ очень эффективна. Большие серии решений могут быть получены за несколько минут.

В программном обеспечении Bernese GPS версии 4.0 в качестве основных измеряемых величин всегда используются вторые разности. Это позволяет аппроксимировать спутниковые часы на основе позиционирования одной точки (single point) в программе обработки CODSPR до точной оценки параметров в программе GPSEST.

Благодаря функционированию международной службы IGS, орбитальная ошибка, являвшаяся основным источником ошибок в крупных сетях до 1992 года, впоследствии стала все менее и менее значимой. После 1993 года орбиты IGS позволяют достигать миллиметровой точности в плановом положении и точности на уровне 1 см по высоте даже для региональных сетей диаметром в несколько тысяч километров, при условии использования такого качественного программного обеспечения, как Bernese [6].

Рассмотрев основные программные комплексы обработки глобальных спутниковых геодезических сетей можно отметить, что в отличие от коммерческих программ они ориентированы не только на обработку статических сетей, но и на определение векторов скоростей движения геодезических пунктов из обработки продолжительных массивов СРНС измерений в сетях геодинамического назначения. Другой важной особенностью научных комплексов является доступность их исходных модулей, что позволяет вносить соответствующие изменения в эти пакеты. Примером такой доработки является расширение пакета Bernese на обработку ГЛОНАСС измерений, сделанное германским исследователем Хайнцем Хабричем.

1.4. Выводы по главе 1

Исторический анализ современных исследований движений и деформаций земной поверхности на геодинамических полигонах и в глобальных сетях, рассмотрение распространенных программных средств

обработки и анализа измерений позволил сделать следующие основные выводы.

- В Российской практике спутниковые методы недостаточно широко применяются для изучения движений и деформаций земной поверхности. В то же время они сегодня являются основным источником данных о деформировании верхних слоев земной коры.

- Существующие в отечественной практике методы анализа движений и деформаций земной поверхности по геодезическим данным ориентированы на классические линейно-угловые геодезические измерения.

- В отечественной практике недостаточно внимания уделяется задачам регистрации предвестников землетрясений, созданию специальных геодезических построений в составе геодинамических полигонов.

- Программы фирм-производителей спутниковой геодезической аппаратуры не предусматривают блоков (опций) обработки повторных спутниковых измерений с целью анализа деформаций за исключением научных пакетов программ, рассчитанных на обработку глобальных СРНС сетей, где предусмотрено определение скоростей движений геодезических пунктов. В то же время наиболее высокая точность и детальность определения деформаций земной поверхности возможна сегодня лишь в локальных геодезических построениях, обработку которых осуществляют именно стандартными пакетами программ фирм-производителей спутниковой геодезической аппаратуры.

На устранение указанных недостатков были направлены последующие исследования и разработки по теме диссертации.

2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ В СПУТНИКОВЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЯХ

2.1. Разработка методики определения векторов смещений земной поверхности

Известный американский сейсмолог Ч.Ф.Рихтер [35] в связи с определением координат эпицентров землетрясений по регистрации сейсмических волн на разных сейсмостанциях отмечал, что «... разностные методы менее подвержены влиянию несовершенства наших знаний ...».

Известно, что и при производстве спутниковых фазовых геодезических измерений разностные (относительные) методы дают существенно большую точность по сравнению с абсолютными методами. Это достигается за счет формирования разностей фазовых измерений: первые разности – между приемниками (исключаются поправки часов спутника); вторые разности – между спутниками (исключаются поправки часов приемника) и третьи разности – между различными моментами времени (исключается эффект многозначности).

Уравнивание разностей повторных наблюдений с целью определения векторов пространственных смещений геодезических пунктов более эффективно чем раздельное уравнивание циклов повторных измерений в кинематических геодезических сетях, это происходит из-за существенного однообразия физических условий измерений в каждом цикле, что обеспечивает более эффективные оценки при обработке разностей наблюдений. Это послужило для нас поводом выбрать подход уравнивания разностей повторных наблюдений в контрольных геодезических сетях. Этот факт был подтвержден по данным классических геодезических измерений и использован в своих исследованиях М.Д. Герасименко, С.А. Шароглазовой и В.И. Кафтаною. Данный подход был реализован ими в ряде методик,

применяемых ранее в классических геодезических сетях, контролирующими тектонически активные зоны и районы техногенных нагрузок.

При уравнивании разностей повторных измерений, согласно методу наименьших квадратов, справедливо записать уравнения поправок:

Для первой эпохи измерений

$$v_1 = Ax_1 - l_1.$$

Для второй эпохи измерений

$$v_2 = Ax_2 - l_2.$$

Для их разностей получим

$$v_2 - v_1 = A(x_2 - x_1) + (l_1 - l_2) \quad (2.1)$$

В выражении (2.1)

$$l_1 = M_0' - M_1 \quad \text{и} \quad l_2 = M_0' - M_2,$$

где M_0' - предварительное значение, M_1 и M_2 - измеренные значения.

Тогда свободные члены для случая разностей будут

$$l_1 - l_2 = M_2 - M_1 \quad \text{или} \quad l_{12} = M_2 - M_1.$$

Если брать одни и те же предварительные значения, то уравненные измерения будут равны

$$\overline{M}_1 = M_0' + v_1 \quad \text{и} \quad \overline{M}_2 = M_0' + v_2,$$

Тогда для разностей повторных измерений получим

$$v_2 - v_1 = M_2 - M_1,$$

т.е.

$$v_2 - v_1 = v_{12}.$$

Теперь можно записать уравнения поправок для разностей повторных измерений

$$v_{12} = A dx_{12} + l_{12}, \quad (2.2)$$

где dx_{12} – пространственное смещение пункта геодезической сети; l_{12} – разность повторных измерений второй M_2 и первой M_1 эпох M_2-M_1 ; v_{12} – поправки к измеренным разностям повторных измерений.

Большинство программ обработки спутниковых геодезических измерений дают векторы базовых линий сети $\Delta x'$ (индекс-штрих означает измеренное значение вектора, а также номер цикла повторных измерений в сети из n пунктов) в пространственной глобальной системе отсчета (в большинстве случаев WGS-84) и их ковариационные матрицы $Q_{\Delta x}$, диагональные члены которых представляют собой дисперсии приращений координат базовых линий, недиагональные – их ковариации. В общем случае вектор и ковариационная матрица имеют вид:

$$\Delta x' = \begin{pmatrix} \Delta X'_1 \\ \Delta Y'_1 \\ \Delta Z'_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta X'_n \\ \Delta Y'_n \\ \Delta Z'_n \end{pmatrix}, \quad Q_{\Delta x'} = \begin{pmatrix} q'_{xx_1} & q'_{xy_1} & q'_{xz_1} & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ q'_{xy_1} & q'_{yy_1} & q'_{zy_1} & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ q'_{xz_1} & q'_{zy_1} & q'_{zz_1} & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & q'_{xx_n} & q'_{xy_n} & q'_{xz_n} \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & q'_{xy_n} & q'_{yy_n} & q'_{yz_n} \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & q'_{xz_n} & q'_{yz_n} & q'_{zz_n} \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Соответственно для второго цикла измерений:

$$\Delta x'' = \begin{pmatrix} \Delta X''_1 \\ \Delta Y''_1 \\ \Delta Z''_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta X''_n \\ \Delta Y''_n \\ \Delta Z''_n \end{pmatrix}, \quad Q_{\Delta x''} = \begin{pmatrix} q''_{xx_1} & q''_{xy_1} & q''_{xz_1} & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ q''_{xy_1} & q''_{yy_1} & q''_{zy_1} & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ q''_{xz_1} & q''_{zy_1} & q''_{zz_1} & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & q''_{xx_n} & q''_{xy_n} & q''_{xz_n} \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & q''_{xy_n} & q''_{yy_n} & q''_{yz_n} \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & q''_{xz_n} & q''_{yz_n} & q''_{zz_n} \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

Получаем вектор разности повторных наблюдений $X''-X'$. В последующем изложении вектор разностей векторов базовых линий будем принимать в качестве свободного члена уравнений поправок, и обозначать как $l = \Delta X' - \Delta X''$.

Ковариационную матрицу разностей векторов базовой линии получаем путем суммирования одноименных элементов ковариационных матриц векторов первого и второго цикла измерений, с учетом ее общей близдиагональной структуры ковариационная матрица разностей для всей сети равна сумме ковариационных матриц первого и второго циклов (формулы 2.3 и 2.4), т.е.

$$Q_l = Q_{\Delta x'} + Q_{\Delta x''}. \quad (2.5)$$

Далее приступаем к уравниванию разностей повторных спутниковых наблюдений и определяем векторы пространственных смещений dX с оценкой их точности:

$$dX = -(A^T Q_l^{-1} A)^+ A^T Q_l^{-1} l = -Q_{dX}^+ L. \quad (2.6)$$

В данном выражении матрица коэффициентов уравнений поправок имеет вид, зависящий от схемы спутниковой геодезической сети, и состоит из единиц и нулей. Число ее строк равно утроенному числу $3m$ базовых линий, а число столбцов – утроенному числу $3n$ пунктов контрольной сети. Строка каждой компоненты базовой линии содержит 1 для элемента с номером j пункта, на который направлен пространственный вектор, и -1 для элемента с номером пункта i , с которого определяется направление вектора базовой линии. Так, например, для уравнений поправок вектора базовой линии с первого пункта на третий соответствующая матрица будет выглядеть, как

$$A_{1-3} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Из аналогичных подматриц для каждой из базовых линий составляется полная матрица уравнений поправок.

Ввиду того, что неподвижные пункты сети на данном этапе неизвестны, решение (2.6) представляет собой свободное уравнивание с использованием псевдообратной матрицы.

Получив решение (2.6) оценку точности векторов пространственных смещений получаем по формуле:

$$m_{dX} = \mu \sqrt{Q_{dX_{ii}}}.$$

На этом этапе уравнивания спутниковых измерений завершается и можно приступать к дифференциальному описанию пространственных деформаций.

Для проверки эффективности определения векторов смещений геодезических пунктов нами используется дисперсионное отношение, предложенное В.И.Кафтаном (В.И.Кафтан, 1986). Им была получена формула связи разностей повторных измерений l , поправок из уравнивания v и определяемых смещений x

$$l^T P l = v^T P v + x^T N x.$$

Так как поправки из уравнивания к измеряемым элементам представляют собой математические ожидания случайных ошибок, а искомые характеристики – математические ожидания (в нашем случае) пространственных смещений геодезических пунктов, то соответствующее дисперсионное отношение будет показывать эффективность выявления смещений по отношению к ошибкам измерений

$$F = \frac{x^T N x}{v^T P v} \quad (2.7)$$

С использованием данной характеристики можно проверить статистическую гипотезу о равенстве дисперсий и пользуясь критерием Фишера (Смирнов, Белугин, 1969) оценить соответствующую доверительную вероятность. Очевидно, что чем больше значение F , тем выше эффективность выявления смещений, или, иначе говоря, искомые характеристики более значимо превышают ошибки их определения.

Для нашего случая при числе степеней свободы $k = 6$ и 1% доверительном пределе можно полагать, что при значениях $F > 8.47$ [37] гипотеза о равенстве дисперсий ошибок и искомым смещений опровергается,

т.е. характеристики смещений статистически значимо превышают ошибки измерений.

2.3. Разработка методики определения деформаций по спутниковым наблюдениям с учетом корреляционных зависимостей

2.3.1. Обоснование выбора нового подхода

Одним из методов геофизической интерпретации результатов повторных наблюдений является метод дифференциального описания деформаций в механике сплошных сред именуемый методом конечных элементов. В данном методе характеристиками описания изменений ограниченных участков земной поверхности являются деформации этих участков. Метод подробно описан, например, в работе [15], и широко применяется для описания изменений земной поверхности, контролируемых геодезическими сетями геодинамических полигонов и деформационных площадок (См. главу 1). Теория метода дифференциального описания деформаций хорошо разработана в отношении анализа повторных наблюдений в классических геодезических сетях: линейно-угловых и повторного нивелирования. В то же время математический аппарат анализа деформаций в сетях спутниковых повторных наблюдений до сих пор не реализован и не описан в литературных источниках.

Во-первых, потому, что непосредственное описание деформаций в трехмерной геоцентрической системе отчета крайне неудобно для их интерпретации и сравнительного анализа. В этом случае теряется наглядность результатов анализа.

Во-вторых, недостаточно высокая точность определения высот из спутниковых измерений по сравнению с определением плановых компонент [32], не позволяет эффективно использовать весь объем измерительной информации для трехмерного описания. Здесь ошибки высот будут

нежелательно искажать результаты определения пространственных характеристик.

Таким образом, на сегодняшний день наиболее эффективным представляется раздельный анализ плановых и вертикальных деформаций по результатам повторных спутниковых наблюдений. Для этой цели можно предложить описанную ниже следующую методику [18].

2.3.2. Установление локальной пространственной системы отсчета

Так как векторы смещений, полученные из уравнивания свободной сети (2.4), отнесены к системе отсчета с началом в центре тяжести пространственных координат пунктов данной сети X_m, Y_m, Z_m , для раздельного анализа плановых и вертикальных деформаций удобно использовать топоцентрическую систему отсчета с началом в той же точке и его новыми координатами E_0, N_0, U_0 . (рис. 2.1)

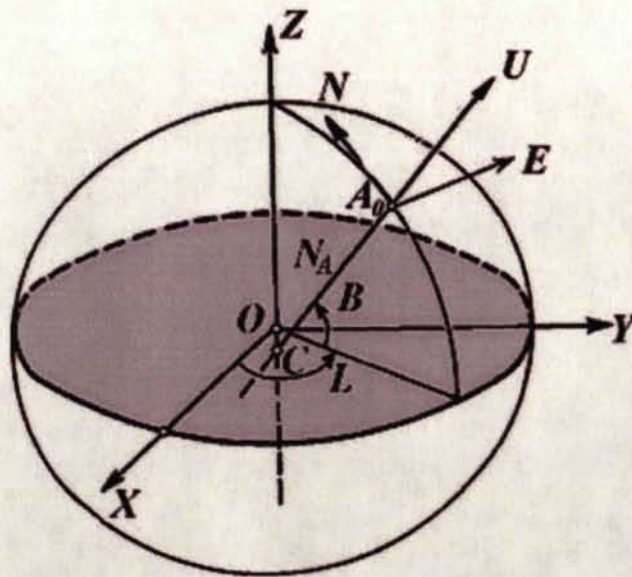


Рис. 2.1. Локальные системы пространственных координат [3]

В данном случае координаты E_i, N_i, U_i отнесенные к плоскости, касательной к поверхности некоторого эллипсоида, центр которого совпадает

с началом первоначальной пространственной системы координат, а касание его поверхности с плоскостью новых координат происходит в точке с координатами X_m, Y_m, Z_m , будут определяться следующей формулой.

$$\begin{bmatrix} E_i \\ N_i \\ U_i \end{bmatrix} = r \cdot \begin{bmatrix} X_i - X_m \\ Y_i - Y_m \\ Z_i - Z_m \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

где ротационная матрица r имеет вид

$$r = \begin{bmatrix} -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ -\sin B_0 \cos L_0 & -\sin B_0 \sin L_0 & \cos B_0 \\ \cos B_0 \cos L_0 & \cos B_0 \sin L_0 & \sin B_0 \end{bmatrix}.$$

Координата U_i представляет собой расстояние от координатной плоскости E_i, N_i до данной точки по нормали к этой плоскости. B_0, L_0 - геодезические широта и долгота точки с координатами X_m, Y_m, Z_m .

Заметим, что формула (2.8) применяется как для преобразования собственно координат пунктов, так и их смещений (2.6). Для доказательства этого утверждения выполним преобразование координат из геоцентрической системы отсчета (в данном случае WGS-84) в локальную систему отсчета.

Известно, что связь координаты двух пунктов рассматриваемых систем координат определяется, как

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ N_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix},$$

и

$$\begin{pmatrix} E_2 \\ N_2 \\ U_2 \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix}.$$

Получим искомые разности координат в локальной системе отсчета:

$$\begin{pmatrix} dE_{12} \\ dN_{12} \\ dU_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_2 \\ N_2 \\ U_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} E_1 \\ N_1 \\ U_1 \end{pmatrix},$$

тогда их можно получить как

$$\begin{pmatrix} dE_{12} \\ dN_{12} \\ dU_{12} \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} dX_{12} \\ dY_{12} \\ dZ_{12} \end{pmatrix}.$$

В последующем изложении мы не будем касаться деформационного анализа высотных компонент, так как он не требует специальной модернизации и может быть применен к спутниковым пространственным сетям в его существующем на сегодняшний день виде.

2.3.3. Определение плановых деформаций

Для последующей оценки точности искомым деформационных характеристик получим ковариационную матрицу топоцентрических векторов смещений пунктов

$$Q_{dx} = f_{dx} Q_{dX} f_{dx}^T, \quad (2.9)$$

где Q_{dx} - ковариационная матрица пространственных компонент смещений, полученная из уравнивания разностей спутниковых измерений (2.6), а f_{dx} - матрица частных производных функций плановых и вертикального

смещений dE_i , dN_i , dU_i от соответствующих пространственных трехмерных аргументов ΔX , ΔY , ΔZ .

Теперь, имея значения компонент двумерных плоских векторов смещений dE_i и dN_i , получим формулы описания плановых деформаций в пределах конечных элементов контрольной сети (треугольников).

Для каждого треугольника в плоской прямоугольной системе координат имеем значения координат его вершин E_i , N_i и разностей координат (горизонтальных смещений) dE_i , dN_i полученных из уравнивания повторных спутниковых измерений. Тогда плановые деформации сдвига, дилатации и вращения: γ_1 , γ_2 , Δ и ω получаем по формулам, приведенным О.М.Остачом в работе [9] и адаптированным для применения в предлагаемой топоцентрической системе отсчета E_i , N_i , U_i , т.е. их соответствующих плановых компонент:

$$d = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \Delta \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \cdot \Gamma_1^T l; \\ c \cdot \Gamma_2^T l; \\ c \cdot L_1^T l, \\ c \cdot \Omega_1^T l. \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

где

$$\begin{aligned} \Gamma_1^T &= [-\Delta N_{23} \quad -\Delta E_{23} \quad \Delta N_{13} \quad \Delta E_{13} \quad -\Delta N_{12} \quad -\Delta E_{12}] \\ \Gamma_2^T &= [\Delta E_{23} \quad -\Delta N_{23} \quad -\Delta E_{13} \quad \Delta N_{13} \quad \Delta E_{12} \quad -\Delta N_{12}] \\ L_1^T &= [-\Delta N_{23} \quad \Delta E_{23} \quad \Delta N_{13} \quad -\Delta E_{13} \quad -\Delta N_{12} \quad \Delta E_{12}] \\ \Omega_1^T &= \frac{1}{2} [\Delta E_{23} \quad \Delta N_{23} \quad -\Delta E_{13} \quad -\Delta N_{13} \quad \Delta E_{12} \quad \Delta N_{12}] \\ l^T &= [dE_1 \quad dN_1 \quad dE_2 \quad dN_2 \quad dE_3 \quad dN_3] \\ c &= [(E_2 - E_1)(N_3 - N_1) - (E_3 - E_1)(N_2 - N_1)] \end{aligned} \quad (2.11)$$

В данных формулах индексы $i=1, 2$ и 3 являются номерами вершин соответствующего треугольника, пронумерованных по ходу часовой стрелки.

Деформации максимального и минимального растяжения получаем по формулам

$$E_1 = \frac{1}{2}(\Delta + \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}), \quad E_2 = \frac{1}{2}(\Delta - \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}), \quad (2.12)$$

а азимут главной оси деформаций определяется выражением

$$\operatorname{tg} 2\theta_0 = -\frac{\gamma_2}{\gamma_1}. \quad (2.13)$$

Оценку точности компонент деформаций в пределах каждого треугольника выполняем путем получения их ковариационной матрицы:

$$Q_d = f_d Q_{dx} f_d^T, \quad (2.14)$$

где Q_{dx} – ковариационная матрица топоцентрических компонент векторов смещений (2.9). Матрица частных производных искомых компонент деформаций по аргументам плановых смещений будет иметь вид

$$f_d = \begin{bmatrix} c \cdot \Gamma_1^T; \\ c \cdot \Gamma_2^T; \\ c \cdot L_1^T; \\ c \cdot \Omega_1^T. \end{bmatrix}$$

Далее определяем средние квадратические ошибки компонент деформаций по формуле

$$m_{di} = \mu \sqrt{Q_{dii}}.$$

Выведем формулы для оценки точности деформаций максимального и минимального растяжения и азимута их осей, как функций от четырех главных деформационных характеристик.

Для последующей оценки точности в отношении параметра γ , продифференцируем выражение $\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}$:

$$\begin{aligned} m_\gamma^2 &= \left(\frac{\partial \gamma_1}{\partial \gamma} \right)^2 m_{\gamma_1}^2 + \left(\frac{\partial \gamma_2}{\partial \gamma} \right)^2 m_{\gamma_2}^2; \\ \frac{\partial \gamma_1}{\partial \gamma} &= \frac{1}{2} \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \cdot 2\gamma_1 = \frac{\gamma_1}{\gamma}; \\ \frac{\partial \gamma_2}{\partial \gamma} &= \frac{1}{2} \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \cdot 2\gamma_2 = \frac{\gamma_2}{\gamma}; \end{aligned}$$

Тогда для случая равноточных измерений, получим

$$m_\gamma^2 = \left(\frac{\gamma_1}{\gamma} \right)^2 m_{\gamma_1}^2 + \left(\frac{\gamma_2}{\gamma} \right)^2 m_{\gamma_2}^2. \quad (2.15)$$

Для оценки точности параметров E_1 и E_2 , продифференцируем (2.12) и для равноточного случая получим:

$$m_{E_{1,2}}^2 = \frac{1}{4} \left[m_\Delta^2 + \left(\frac{\gamma_1}{\gamma} \right)^2 m_{\gamma_1}^2 + \left(\frac{\gamma_2}{\gamma} \right)^2 m_{\gamma_2}^2 \right] = \frac{1}{2} (m_\Delta^2 + m_\gamma^2) \quad (2.16)$$

Для оценки точности угла Θ_0 , продифференцируем (2.13):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \gamma_1}{\partial \Theta_0} &= \frac{1}{2} \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right)^2} (-\gamma_2) \left(-\frac{1}{\gamma_1^2}\right) = \frac{1}{2} \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right)^2} \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1^2}\right) = \\
&= \frac{1}{2} \frac{1}{\left(\frac{\gamma_1^2}{\gamma_1^2} + \frac{\gamma_2^2}{\gamma_1^2}\right)} \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1^2}\right) = \left(\frac{\gamma_1^2}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}\right) \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1^2}\right) = \frac{1}{2} \frac{\gamma_2}{\gamma^2}; \\
\frac{\partial \gamma_2}{\partial \Theta_0} &= \frac{1}{2} \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right)^2} \left(-\frac{1}{\gamma_1}\right) = \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{\gamma_1^2}{\gamma_1^2} + \frac{\gamma_2^2}{\gamma_1^2}} \left(-\frac{1}{\gamma_1}\right) = \\
&= \frac{1}{2} \frac{\gamma_1^2}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \left(-\frac{1}{\gamma_1}\right) = -\frac{1}{2} \frac{\gamma_1}{\gamma^2}.
\end{aligned}$$

Таким образом, формулы СКО угла для равноточного случая Θ_0 будет иметь вид:

$$m_{\Theta_0}^2 = \frac{1}{4} \frac{\gamma_2^2}{\gamma^4} m_{\gamma_1}^2 + \frac{1}{4} \frac{\gamma_1^2}{\gamma^4} m_{\gamma_2}^2 = \frac{1}{4\gamma^4} (\gamma_2^2 m_{\gamma_1}^2 + \gamma_1^2 m_{\gamma_2}^2) \quad (2.17)$$

Наиболее строго мы получим СКО главных деформаций и дирекционного угла главной оси с учетом полученной ковариационной матрицы Q_d .

Используя частные производные из выражений 2.16 и 2.17 сформируем матрицу функцию для характеристик E_1, E_2 и Θ_0 .

$$Q_{E,\Theta} = f_{E,\Theta} Q_d f_{E,\Theta}^T,$$

где

$$f_{E,\Theta} = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_1}{2\gamma} & \frac{\gamma_2}{2\gamma} & \frac{1}{2} & 0 \\ \frac{\gamma_2}{2\gamma^2} & \frac{\gamma_1}{2\gamma^2} & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Тогда

$$m_{E,\Theta} = \mu \sqrt{Q_{E,\Theta_{ii}}}. \quad (2.18)$$

Таким образом, получена формула строгой оценки точности параметров деформаций земной поверхности.

2.4. Анализ тектонических деформаций земной поверхности

2.4.1. Разработка программы вычисления смещений и деформаций

Представленный в 2.3 алгоритм определения смещений и деформаций по данным спутниковых геодезических измерений реализован в специальной компьютерной программе DEFO4 [18], составленной с использованием среды программирования Matlab V.6.5 (алгоритм представлен в виде блок-схемы на рис. 2.2).

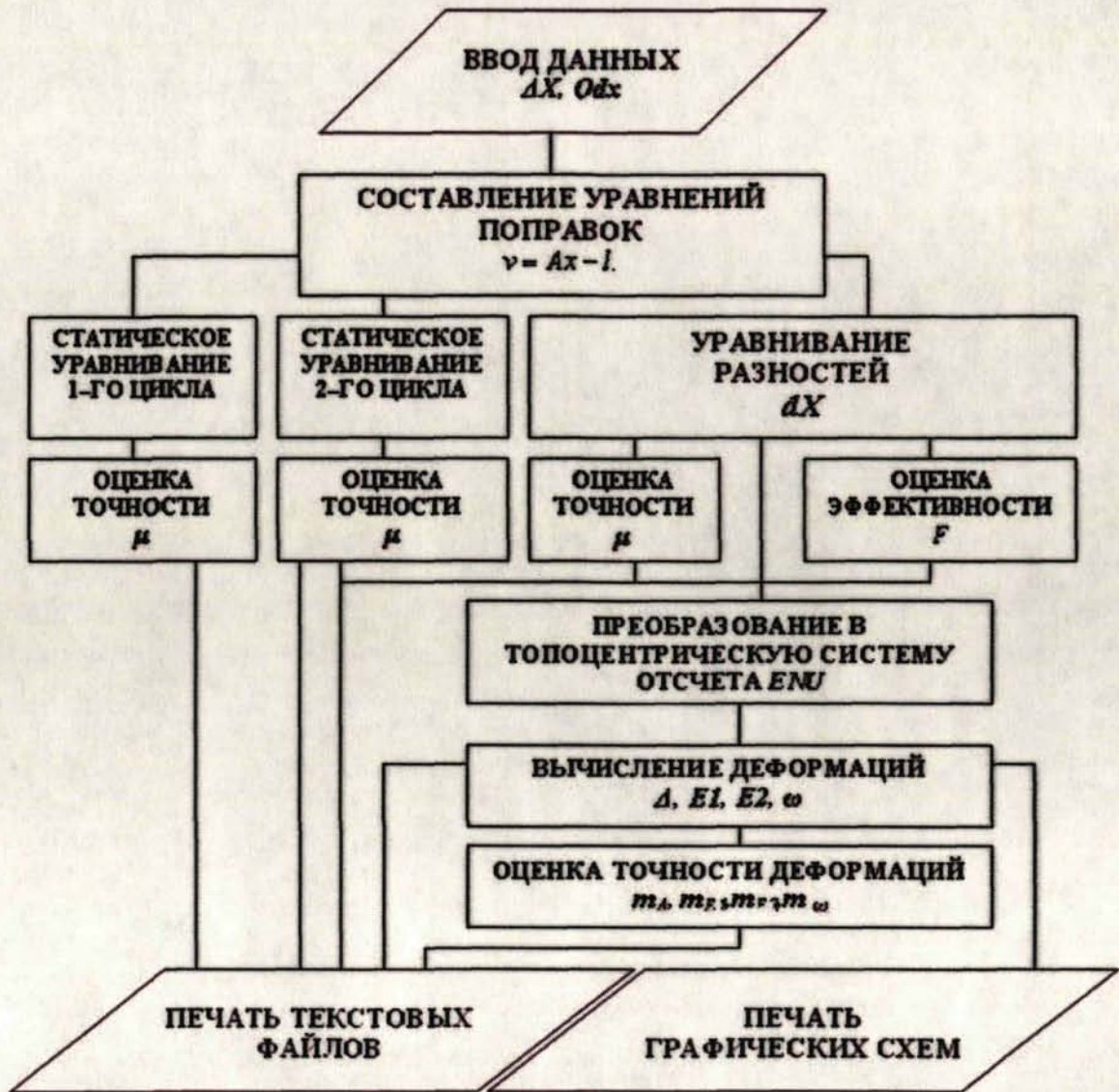


Рис. 2.2. Алгоритм программы определения смещений и деформаций DEFO4

Следует отметить, что язык программирования Matlab является интерпретатором, т.е. составленные программы существуют лишь в виде m-файлов (script-файлов), представляющих собой последовательность команд без входных и выходных параметров, для выполнения которых необходимо находиться в среде Matlab. Однако для подобных программ существуют компиляторы, транслирующие программы на языке Matlab в коды языков программирования C и C++, что решает проблему создания исполняемых программ, изначально написанных в среде Matlab [30, 2].

Программа составлена для вычисления смещений и деформаций в контрольных геодезических сетях, представляющих собой геодезической четырехугольник с определенной последовательностью нумерации пунктов и базовых линий (рис. 2.3).

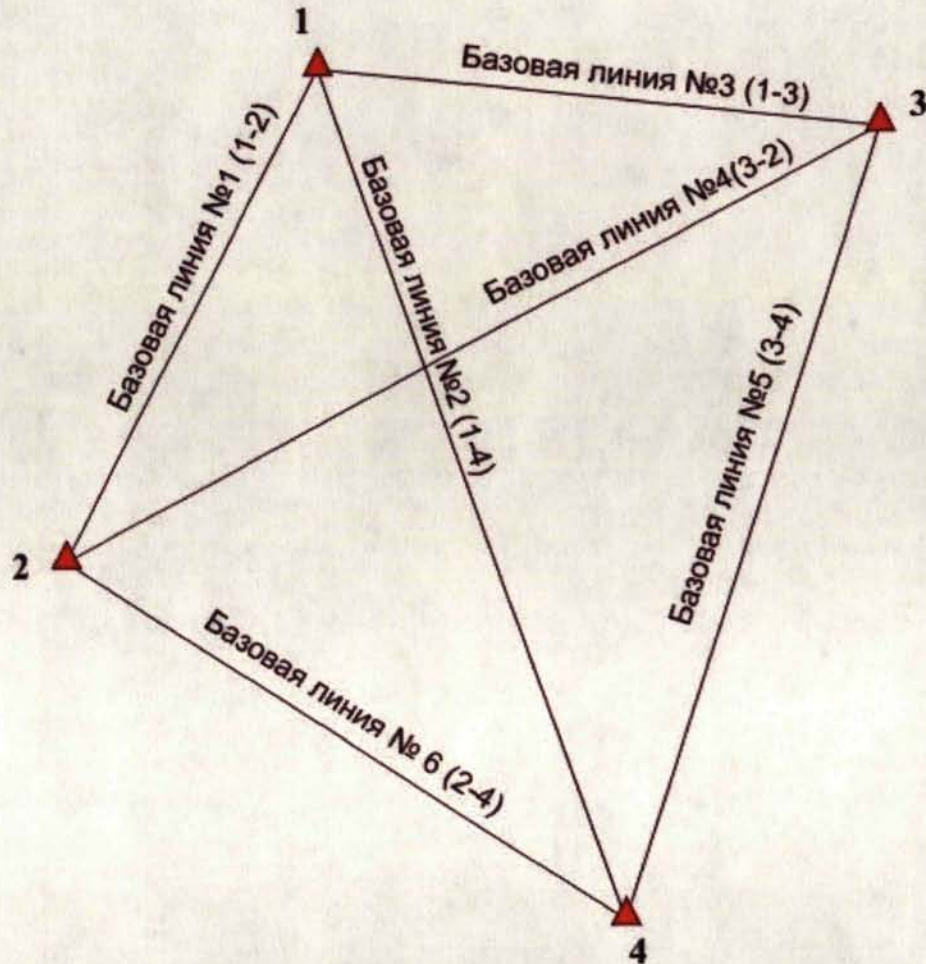


Рис. 2.3. Общий вид контрольной геодезической GPS сети, согласно нумерации, используемой в компьютерной программе

Порядок работы с программой следующий.

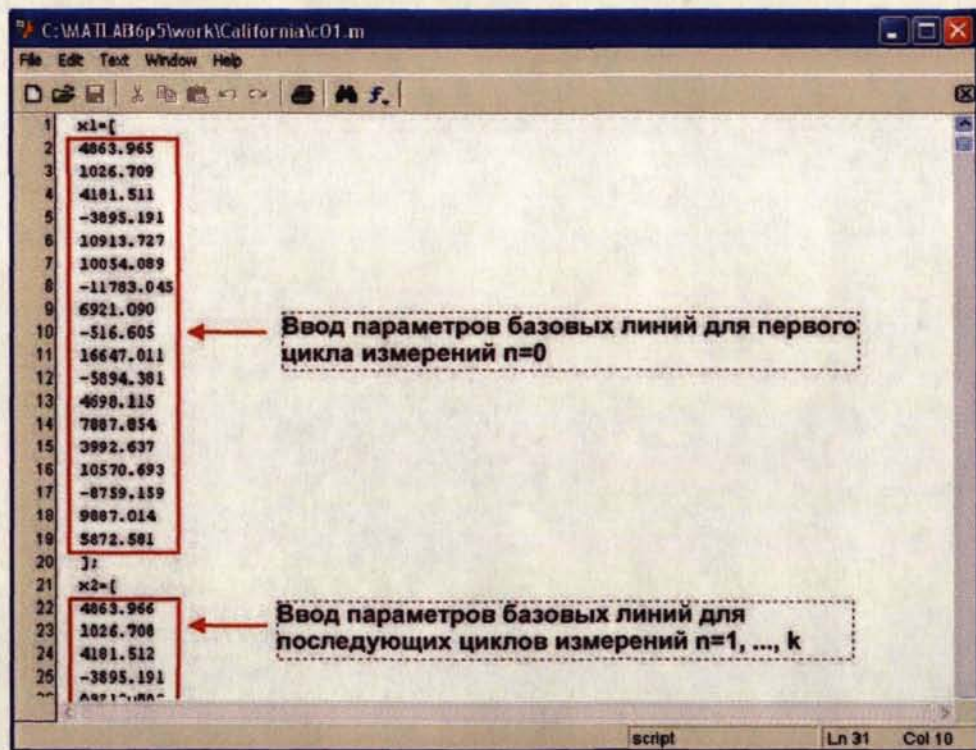
1. **Подготовка исходных данных.** Исходными данными для вычислений деформаций являются геодезические координаты пунктов, параметры базовых линий (пространственные приращения), образующих контрольную сеть, и их ковариационные матрицы, вычисленные для $n=0, \dots, k$ -числа циклов измерений в любом стандартном программном

пакете обработки результатов спутниковых геодезических измерений (например, Trimble Geomatic Office, GPSurvey, Pinnacle и т.д.). В соответствии с принятой в программе нумерацией (рис. 2.3), исходные данные для каждого цикла измерений должны быть представлены в виде матриц (2.19).

$$X^n = \begin{pmatrix} dX_{1-2}^n \\ dY_{1-2}^n \\ dZ_{1-2}^n \\ dX_{1-4}^n \\ dY_{1-4}^n \\ dZ_{1-4}^n \\ dX_{1-4}^n \\ dY_{1-3}^n \\ dZ_{1-3}^n \\ dX_{1-3}^n \\ dY_{3-2}^n \\ dZ_{3-2}^n \\ dX_{3-4}^n \\ dY_{3-4}^n \\ dZ_{3-4}^n \\ dX_{2-4}^n \\ dY_{2-4}^n \\ dZ_{2-4}^n \end{pmatrix}; Q^n = \begin{pmatrix} q_{XX_{1-2}}^n & q_{XY_{1-2}}^n & q_{XZ_{1-2}}^n & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 \\ q_{XY_{1-2}}^n & q_{YY_{1-2}}^n & q_{YZ_{1-2}}^n & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 \\ q_{XZ_{1-2}}^n & q_{ZY_{1-2}}^n & q_{ZZ_{1-2}}^n & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & q_{XX_{2-4}}^n & q_{XY_{2-4}}^n & q_{XZ_{2-4}}^n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & q_{XY_{2-4}}^n & q_{YY_{2-4}}^n & q_{ZY_{2-4}}^n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & q_{XZ_{2-4}}^n & q_{ZY_{2-4}}^n & q_{ZZ_{2-4}}^n \end{pmatrix}, \quad (2.19)$$

где $n=0, \dots, k$ – циклы измерений. Представить разности координат и ковариационные матрицы в таком виде удобно в табличном процессоре Ms Excel.

- Ввод исходных данных в текст программы.** Для каждого цикла измерений необходимо составить отдельный m -файл, содержащий текст программы, в который с помощью буфера обмена копируются разности координат и ковариационные матрицы первого и n -го циклов измерений (рис. 2.4, 2.5).



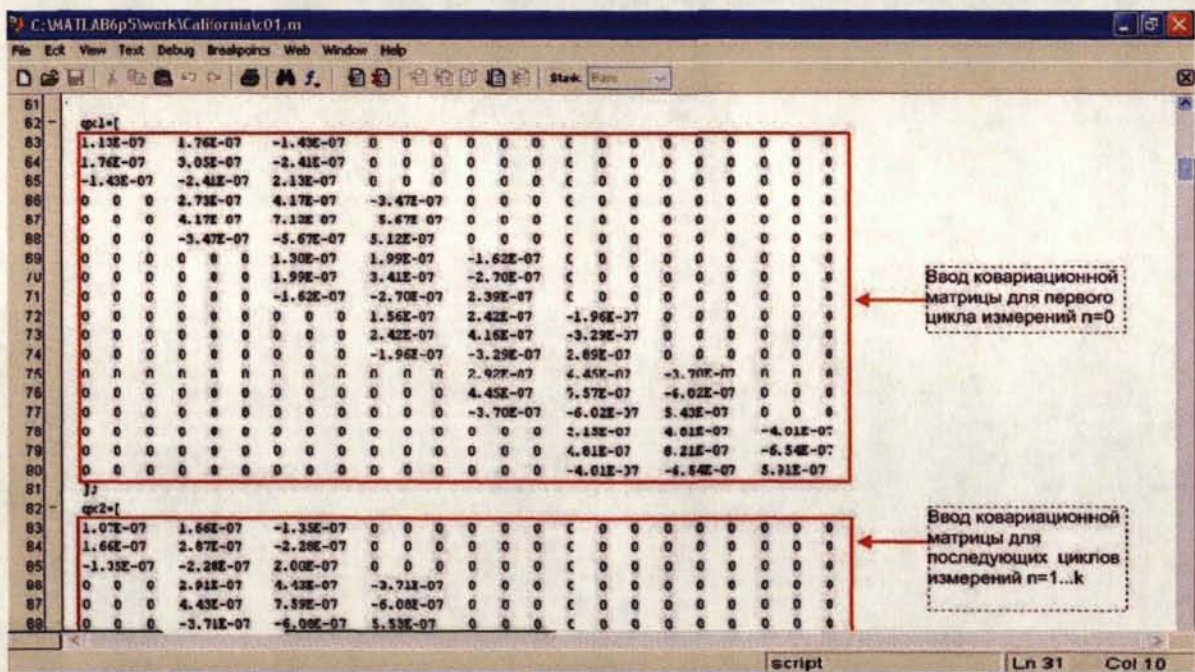
```

1 x1=[
2 4863.965
3 1026.709
4 4181.511
5 -3895.191
6 10913.727
7 10054.089
8 -11783.045
9 6921.090
10 -516.605
11 16647.011
12 -5894.381
13 4698.115
14 7887.854
15 3992.637
16 10570.693
17 -8759.159
18 9887.014
19 5872.581
20 ];
21 x2=[
22 4863.966
23 1026.708
24 4181.512
25 -3895.191
  
```

Ввод параметров базовых линий для первого цикла измерений $n=0$

Ввод параметров базовых линий для последующих циклов измерений $n=1, \dots, k$

Рис. 2.4. Ввод параметров базовых линий в текст программы



```

61
62 cov1=[
63 1.13E-07 1.76E-07 -1.43E-07 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
64 1.76E-07 3.05E-07 -2.41E-07 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
65 -1.43E-07 -2.41E-07 2.13E-07 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
66 0 0 0 2.73E-07 4.17E-07 -3.47E-07 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
67 0 0 0 4.17E-07 7.13E-07 5.67E-07 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
68 0 0 0 -3.47E-07 -5.67E-07 5.12E-07 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
69 0 0 0 0 0 0 1.30E-07 1.99E-07 -1.62E-07 0 0 0 0 0 0 0 0
70 0 0 0 0 0 0 1.99E-07 3.41E-07 -2.70E-07 0 0 0 0 0 0 0 0
71 0 0 0 0 0 0 -1.62E-07 -2.70E-07 2.39E-07 0 0 0 0 0 0 0 0
72 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1.56E-07 2.42E-07 -1.96E-07 0 0 0 0 0
73 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2.42E-07 4.16E-07 -3.29E-07 0 0 0 0 0
74 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1.96E-07 -3.29E-07 2.69E-07 0 0 0 0 0
75 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2.69E-07 4.45E-07 -3.70E-07 0 0 0 0 0
76 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4.45E-07 7.57E-07 -6.02E-07 0 0 0 0 0
77 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -3.70E-07 -6.02E-07 5.43E-07 0 0 0 0 0
78 0 0 0 0 0 0 0 0 0 5.43E-07 8.01E-07 -4.01E-07 0 0 0 0 0
79 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4.01E-07 8.21E-07 -6.54E-07 0 0 0 0 0
80 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -6.54E-07 -8.44E-07 5.71E-07 0 0 0 0 0
81 ];
82 cov2=[
83 1.07E-07 1.66E-07 -1.35E-07 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
84 1.66E-07 2.87E-07 -2.28E-07 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
85 -1.35E-07 -2.28E-07 2.00E-07 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
86 0 0 0 2.91E-07 4.43E-07 -3.71E-07 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
87 0 0 0 4.43E-07 7.59E-07 -6.08E-07 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
88 0 0 0 -3.71E-07 -6.08E-07 5.53E-07 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  
```

Ввод ковариационной матрицы для первого цикла измерений $n=0$

Ввод ковариационной матрицы для последующих циклов измерений $n=1 \dots k$

Рис. 2.5. Ввод ковариационных матриц в текст программы

3. **Контроль вычислений.** Контроль решения нормальных уравнений осуществляется стандартным способом с использованием леммы Гаусса. Вычисление компонент деформаций осуществляется параллельно по двум видам формул: матричных и эквивалентных им отдельных формул для каждой компоненты деформации.

4. **Создание исполнительного файла.** После ввода образуется ряд m -файлов, количество которых равно числу циклов измерений. Для последовательного исполнения этих файлов необходимо составить исполнительный m -файл состоящий из одного столбца, элементами которого являются имена файлов с исходными данными и текстом программы. Чтобы запустить программу следует выбрать в контекстном меню (которое вызывается нажатием правой кнопки мыши на исполнительном файле, находящемся в окне Current Directory) команду Run.
5. **Вычисления.** В ходе своей работы программа выполняет следующие задачи: статическое уравнивание результатов измерений, уравнивание разностей координат, преобразование координат в локальную систему, вычисление параметров векторов смещений и эллипсов ошибок, вычисление параметров деформаций, формирование отчетной текстовой и графической информации.
6. **Получение результатов вычислений.** На выходе программа выдает четыре текстовых файлов с расширением txt: enumenu.txt (содержащий параметры векторов смещений e , n , u и их ошибки m_e , m_n и m_u , данных последовательно для пунктов 1, 2, 3 и 4), ele2dwm.txt (содержащий параметры деформаций земной поверхности E_1 , E_2 , Δ , ω и их ошибки m_{E_1, E_2} , m_Δ и m_ω , данных последовательно для треугольников 132, 234, 134 и 142), tetamtet.txt (содержащий углы Θ и их ошибки m_Θ , данных последовательно для треугольников 132, 234, 134 и 142) и mi12mi.txt (содержащий ошибки единицы веса $\mu_{\text{стат.}}$ и $\mu_{\text{разн.}}$). Кроме указанных текстовых файлов программа DEFO4 выдает графические схемы векторов горизонтальных смещений и распределения главных деформаций земной поверхности, примеры которых показаны на рис. 2.6 и рис. 2.7. Реальные размеры эллипсов ошибок имеют масштаб в 10 раз меньший, чем на рисунке (для их читаемости).

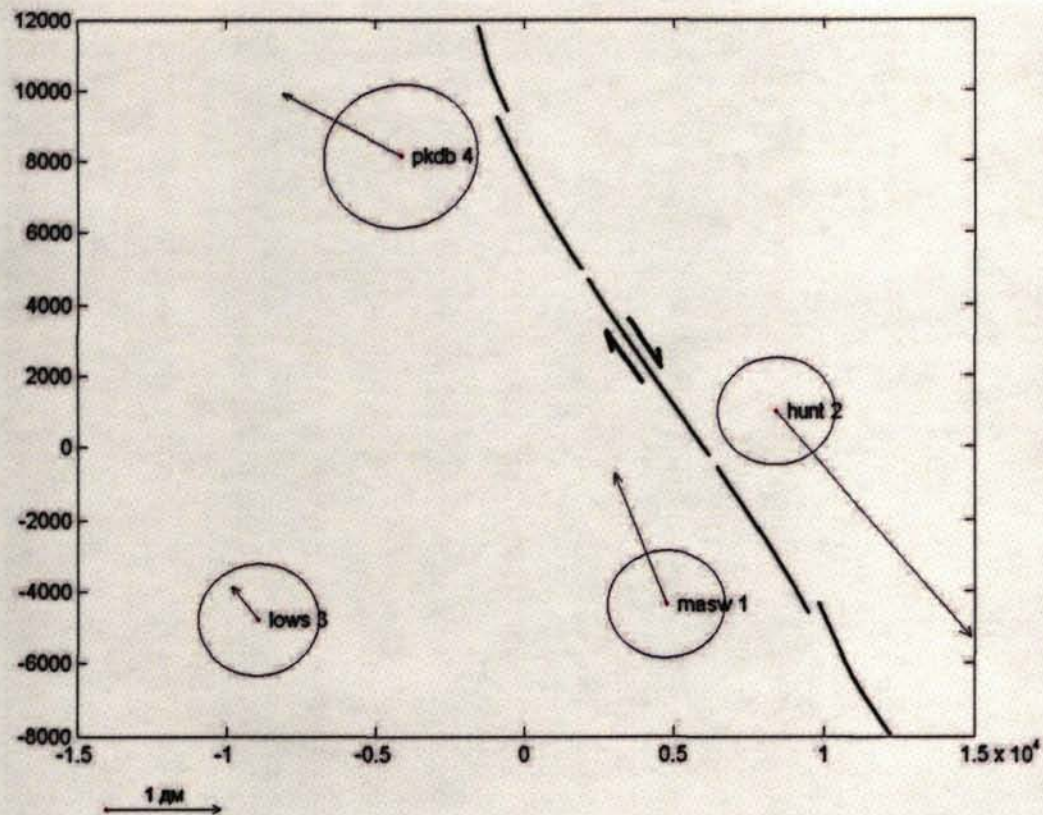


Рис. 2.6. Векторы горизонтальных смещений в результате землетрясения Паркфилд. Жирной линией показано примерное расположение сейсмогенного разрыва разлома Сан-Андреас. Векторы смещений сопровождаются эллипсами ошибок

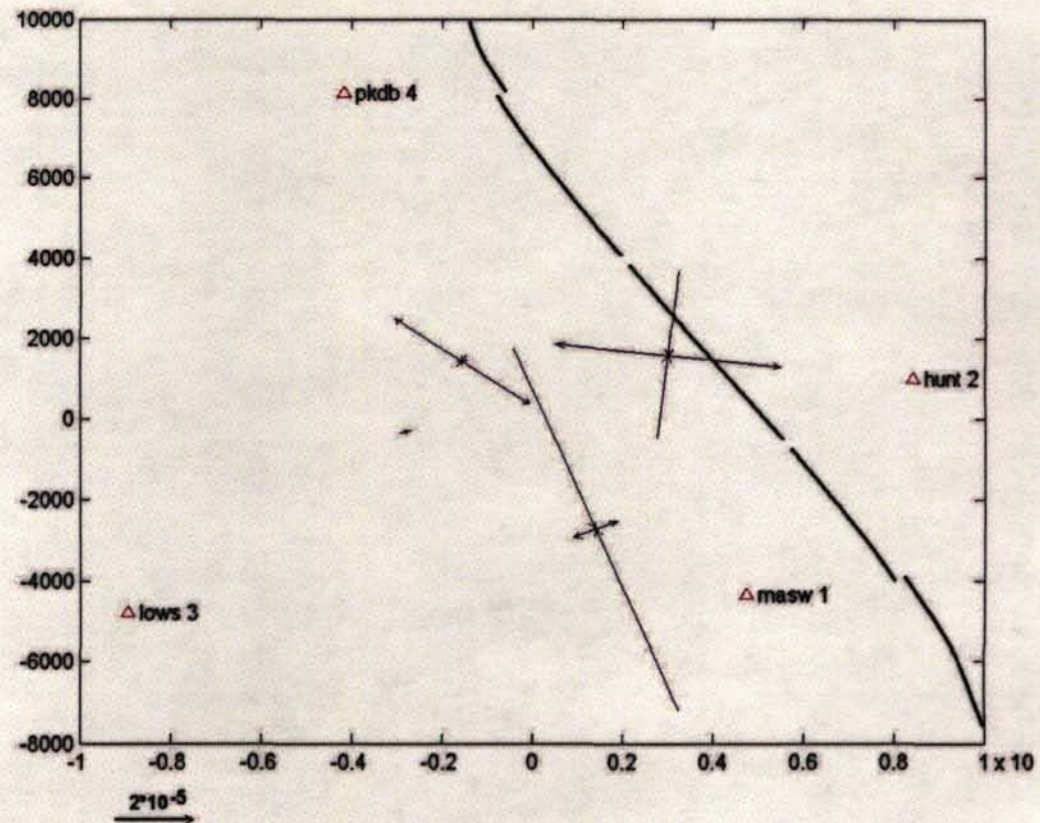


Рис. 2.7. Плановые деформации вблизи очага землетрясения Паркфилд. Жирной линией показано примерное расположение сейсмогенного разрыва разлома Сан-Андреас

Для апробации предлагаемых методик и составленной компьютерной программы вычисления смещений и деформаций земной поверхности были выбраны три контрольных сети, расположенные в разных частях света (рис. 2.9) и рассмотренные ниже. На рис. 2.8 показаны также расположения сильнейших землетрясений, попадающих в интервал анализируемых наблюдений, и одиночные базовые линии Австралии и Индии, продемонстрировавшие реакцию на сильнейшие сейсмические события.

Отбор контрольных геодезических сетей осуществлен в соответствии с следующими требованиями.

- Пункты сетей не должны располагаться друг от друга более, чем на 100 км. Это должно обеспечить более высокую точность определения деформаций, чем при больших длинах базовых линий.

- Пункты должны находиться в составе непрерывно-действующих спутниковых геодезических сетей, что бы иметь возможность определения временных тенденций хода деформационных характеристик.

- Сети должны находиться, как в сеймотектонических районах, так и на стабильных платформах, что бы иметь возможность сопоставления полученных результатов в связи с глобальными тенденциями геодинамической активности.

В соответствии с указанными условиями удалось сформировать три контрольных сети.

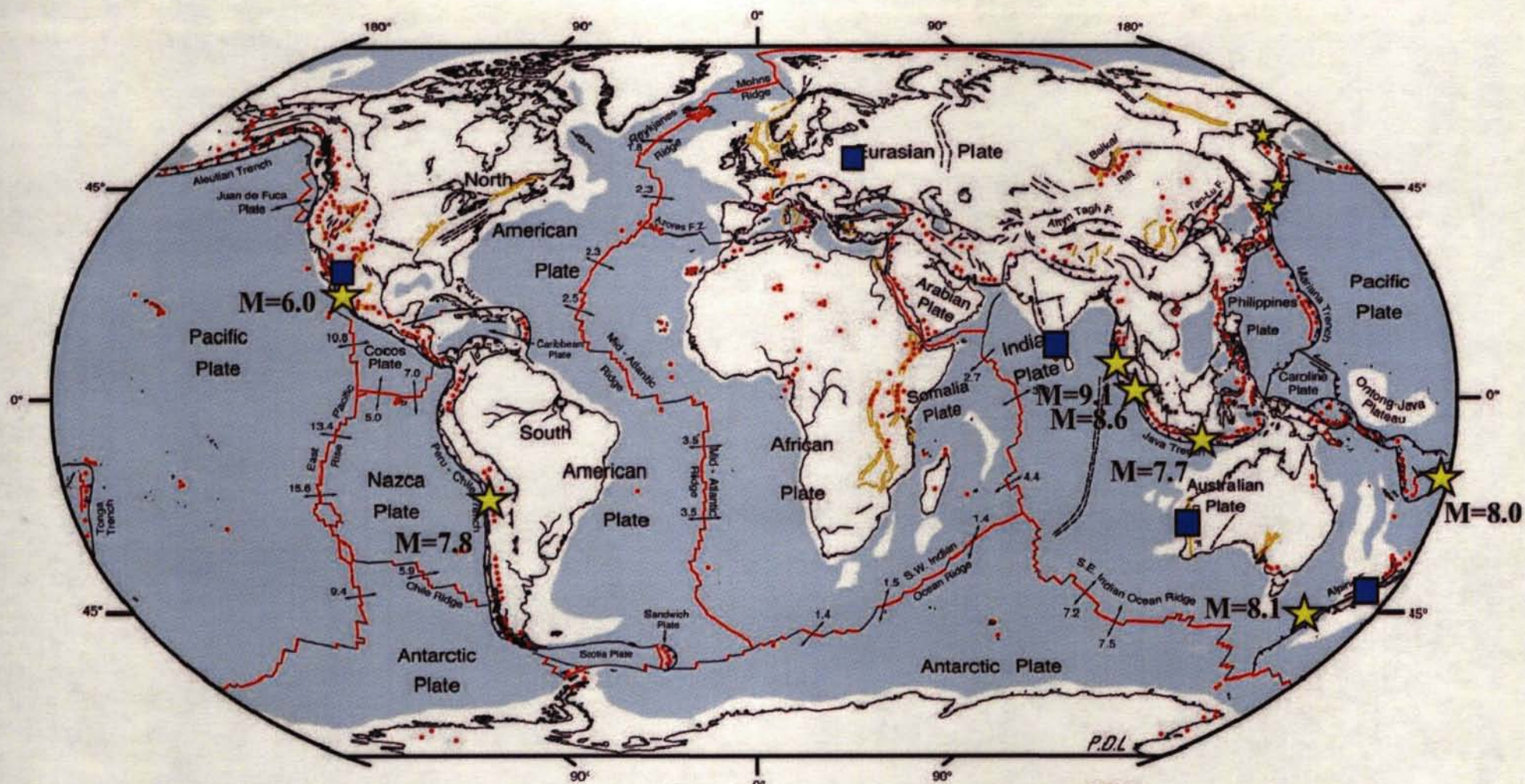
Первая из них, расположена в известной сеймотектонической зоне Калифорнии и перекрывает разлом Сан-Андреас, а также эпицентральную зону умеренного землетрясения Паркфилд [69] с магнитудой $M=6.0$. Это обеспечило возможность оценки как предшествующих землетрясению, так и следующих после него смещений и деформаций. Выбор этой сети особенно интересен в связи с современными представлениями о ходе изменений деформаций в будущих эпицентральных зонах [33]. Например, М.Т. Прилепин отмечает, что «Как отдельные линии, так и сети линий, если они расположены достаточно близко к эпицентру готовящегося землетрясения (первые десятки километров), “чувствуют” приближение события, по крайней мере, за несколько суток

(землетрясение Чалфант, 1986 г., $M=6.4$), а иногда всего лишь за доли часа (Холлистер, 1960 г., $M=5.0$), что отражает различие механизмов подготовки разных землетрясений».

Вторая сеть является частью сети постоянно-действующих пунктов Новой Зеландии. Эта сеть расположена в непосредственной близости от сейсмогенерирующих глубоководных желобов, в системе которых произошло одно из сильнейших землетрясений нашего столетия с магнитудой $M=8.1$, на трое суток ранее Суматранского мега-землетрясения с $M=9.1$. При этом следует отметить, что оба эти землетрясения приурочены к границе одной и той же Индо-Австралийской глобальной тектонической плиты и, возможно, имеют взаимную генетическую связь.

Третья сеть специально отобрана в сейсмически спокойных условиях. Она сформирована четырьмя пунктами Фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) России, расположенными в Московском регионе. Этот вариант предусмотрен для осуществления попытки оценки возможности определения деформационных характеристик в связи с сильнейшими, но удаленными от контрольной сети сейсмическими событиями.

Сильнейшие землетрясения 2004-2007 гг. с магнитудами $M>7.5$, представлены в табл. 2.1 (также сюда включено Паркфилдское землетрясение с $M=6.0$, но расположенное в непосредственной близости от анализируемой контрольной сети в Калифорнии в районе разлома Сан-Андреас*).



- ★ Эпицентры сильнейших землетрясений
- M=9.1 Магнитуды сильнейших землетрясений
- Контрольные геодезические сети

Рис. 2.8. Расположение контрольных сетей на тектонической карте

Сильнейшие землетрясения мира

Дата	Регион	Землетрясение			
		Магнитуда <i>M</i>	Глубина <i>h</i> , км	Энергия <i>E</i> , эрг	
				по Гутенбергу	по Рихтеру
28.09.2004	Калифорния*	6,0	7,9	2,73E+20	2,48E+21
11.11.2004	Индонезия	7,5	10,0	6,31E+22	2,00E+24
23.12.2004	Новая Зеландия	8,1	10,0	5,19E+23	2,40E+25
26.12.2004	Суматра	9,1	30,0	1,59E+25	1,36E+28
28.03.2005	Индонезия	8,6	30,0	2,92E+24	1,71E+27
13.06.2005	Чили	7,8	117,2	1,82E+23	9,50E+26
09.09.2005	Новая Гвинея	7,6	91,3	8,99E+22	2,52E+26
27.01.2006	Banda Sea	7,6	397,0	8,99E+22	4,76E+27
20.04.2006	Корякия	7,6	22,0	8,99E+22	1,46E+25
17.07.2006	Индонезия	7,7	34,0	1,28E+23	5,28E+25
15.11.2006	Курилы	8,3	30,3	1,04E+24	5,05E+26
13.01.2007	Курилы	8,1	10,0	5,19E+23	2,40E+25

2.4.2. Деформации на разломе Сан-Андреас

Разлом Сан-Андреас в Южной Калифорнии – трансформная граница Тихоокеанской и Северо-Американской плит, которая на протяжении 1300 км прослеживается в континентальной коре как правосторонний сдвиг [45, 71, 78], согласно геофизическим данным, пересекающий и смещающий литосферу. Криповое движение по разлому Сан-Андреас продолжается со скоростью около 5 см/год.

В районе разлома расположена сеть постоянно действующих станций SCIGN (Southern California Integrated GPS Network), состоящая из около 250 пунктов (рис. 2.9) и используемая для изучения движений земной коры в районе активного взаимодействия тектонических плит [55, 67, 68, 83].



Рис. 2.9. Сеть SCIGN (по данным архива SOPAC)

Для анализа деформаций на разломе Сан-Андреас (Калифорния, США) из архива SOPAC по Интернет были получены суточные файлы спутниковых измерений на пунктах MASW, HUNT, PKDB и LOWS международной службы IGS, образующие геодезический четырехугольник (рис. 2.10).

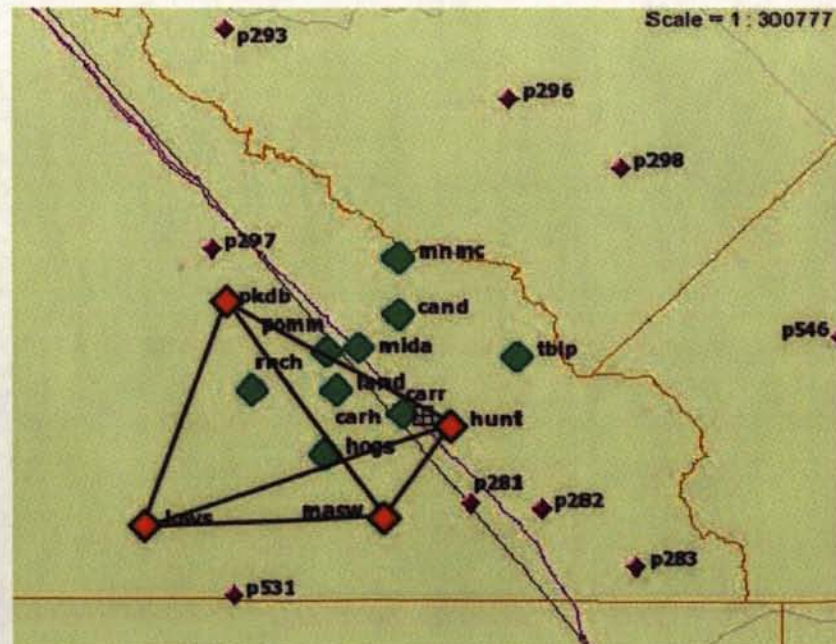


Рис. 2.10. Геодезическая сеть на разломе Сан-Андреас (карта из архива SOPAC)

Для выбранных пунктов была сформирована база измерительной информации, содержащая файлы спутниковых измерений для каждых десятых суток 2004-2006 годов.

Согласно порядку работы с составленной компьютерной программой DEFO4, описанной в 2.4.1. на основе базы измерительной информации были подготовлены исходные данные (m-файлы) для всех циклов измерений и исполнительный файл. За «нулевой» момент принят цикл 10 января 2004 года, за последний - цикл 16 декабря 2006 года.

В результате вычислений, программа вывела на печать параметры векторов смещений для каждого из пунктов сети, параметры деформаций земной поверхности, отнесенные к центрам треугольников сети, а также оценки точности и эффективности определения искомых характеристик.

По вычисленным значениям построены графики их изменений во времени (рис. 2.11–2.18). Значения средних квадратических ошибок единицы веса, полученных из уравнивания, показаны на рис. 2.11. Напомним, что за единицу веса принята одна из трех пространственных компонент вектора смещений геодезического пункта. Для данной сети ее оценки устойчиво группируются вблизи 3 мм, за исключением одного случая, когда значение составило 47 мм. Этот факт требует объяснения и будет проанализирован отдельно в связи с результатами обработки других сетей.

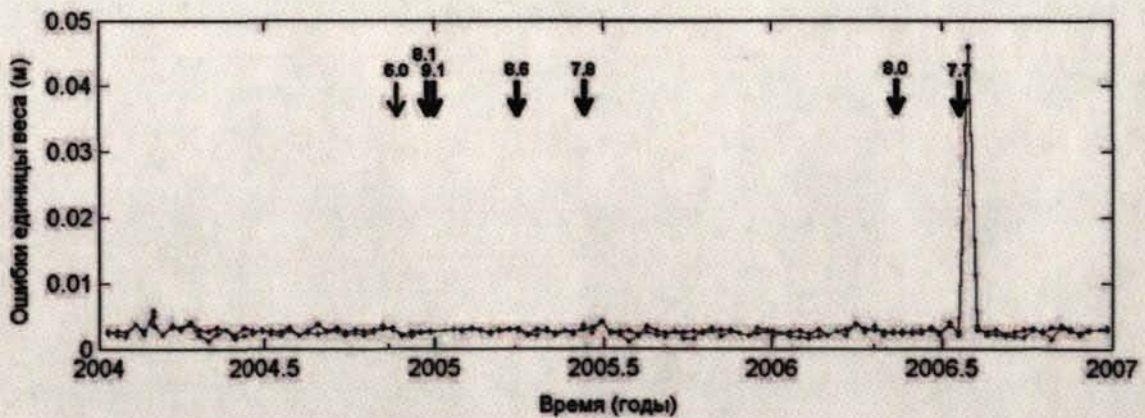


Рис. 2.11. Сравнение результатов оценки точности определения векторов смещений (моменты сильнейших землетрясений мира и ближайшего к сети землетрясения Паркфилд показаны стрелками с указанием магнитуд)

Полученные ошибки единицы веса свидетельствуют о высокой точности определения векторов смещений земной поверхности. Ошибки единицы веса, полученные по предлагаемой методике, и из уравнивания отдельных циклов измерений отличаются друг от друга незначительно. На что указывает практическое совпадение графиков этих характеристик.

Проверка эффективности определения движений и деформаций осуществлена с использованием дисперсионного критерия (2.7). Для всего ряда определений векторов смещений получены значения F , изменяющиеся в диапазоне от 7.7 до 517659.3. Явно выражается различие дисперсионных отношений в интервалах наблюдений до и после Паркфилдского землетрясения. Так до землетрясения отношения изменяются в интервале 7.7 – 150, а после землетрясения их значения достигают величин 10^4 - 10^5 . Естественно, что после сейсмического «вспарывания» разлома Сан-Андреас смещения достигали первых дециметров, а точность их определения составляла менее сантиметра. Это и продемонстрировали значения отношений дисперсий. В этом факте нет ничего необычного, так как ко- и постсейсмические движения земной поверхности всегда определялись более надежно, чем предшествующие землетрясению. В период до землетрясения Паркфилд дисперсионные отношения могут считаться статистически значимыми при доверительной вероятности не менее 0.95. Это демонстрирует достаточно высокую надежность разработанной методики.

Интересным моментом оценки точности наблюдений в Калифорнийской сети является особенность, связанная с получением максимальной ошибки единицы веса $\mu = 45$ мм практически на следующие сутки после одного из сильнейших (второго по магнитуде, составляющей $M=7.7$) землетрясений 2006 года в Индонезии (Южная Ява). Но, в тоже время, сильнейшие Суматранские землетрясения 2004 и 2005 годов в изменениях ошибок единицы веса не проявились, как это происходило в других рядах наблюдений в Московской и Новозеландской сетях.

Результаты определения векторов смещений представлены на рисунках 2.12-2.14. Можно видеть, что максимальным изменениям подвержены горизонтальные

смещения пунктов masw, hunt, pkdb, расположенных в непосредственной близости от сейсмогенного разрыва.

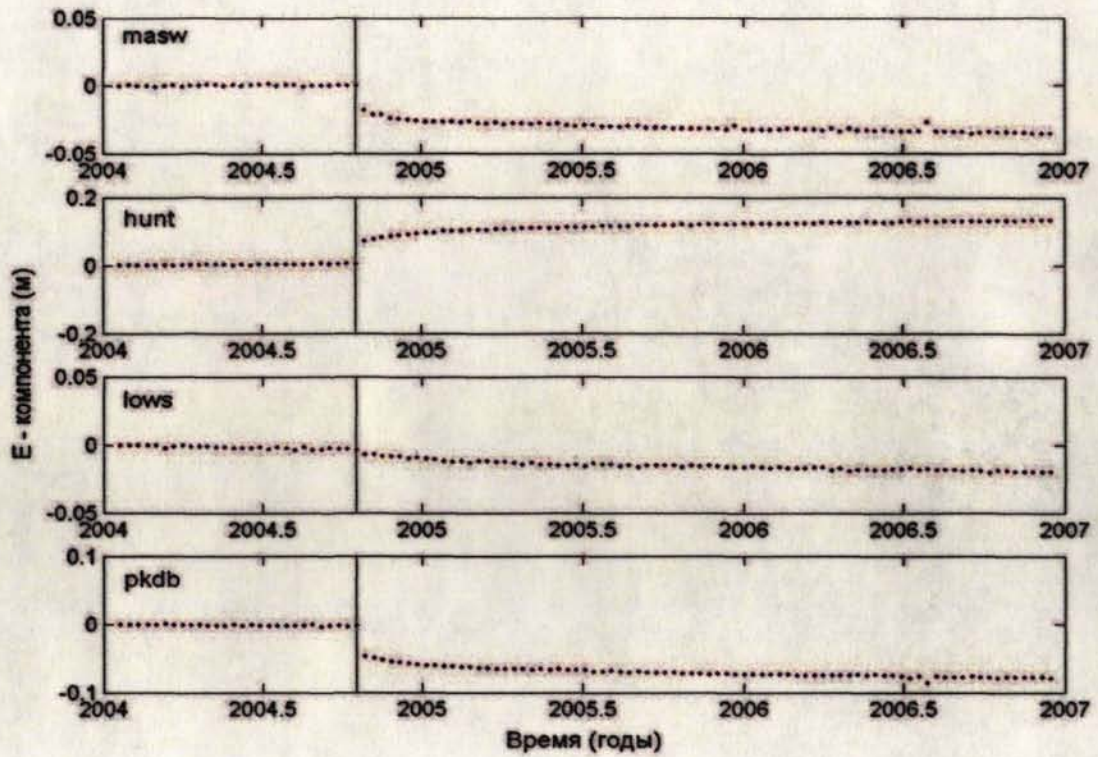


Рис. 2.12. Изменение компоненты E для пунктов геодезического четырехугольника Калифорнийской сети

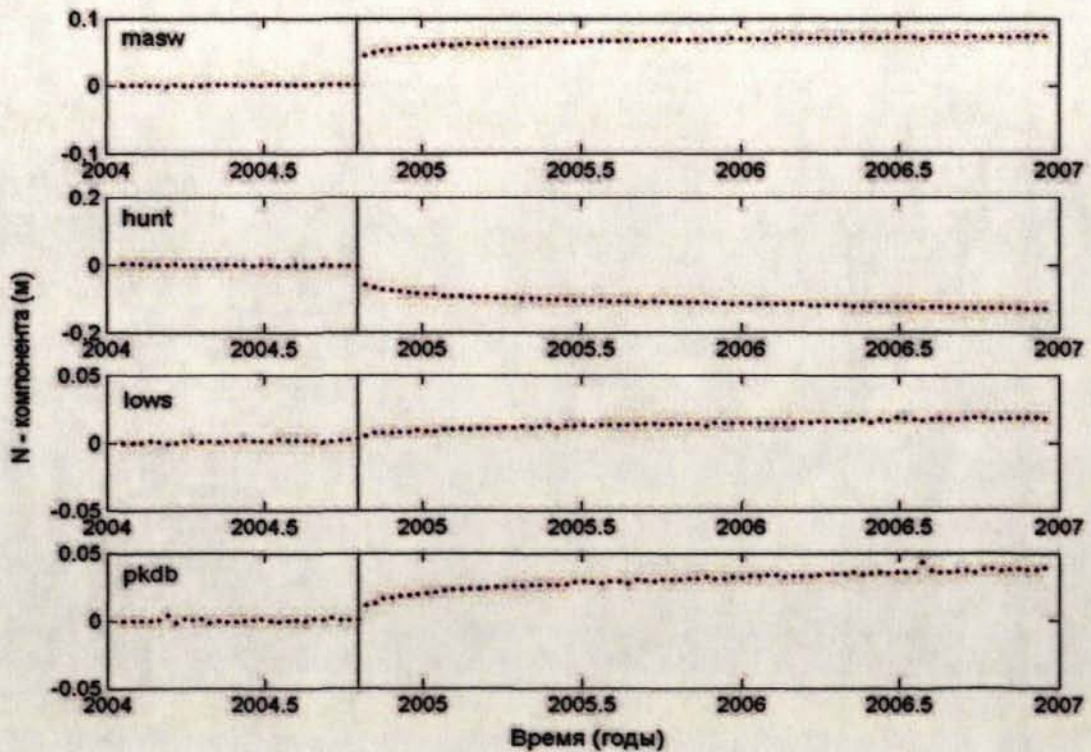


Рис. 2.13. Изменение компоненты N для пунктов геодезического четырехугольника Калифорнийской сети

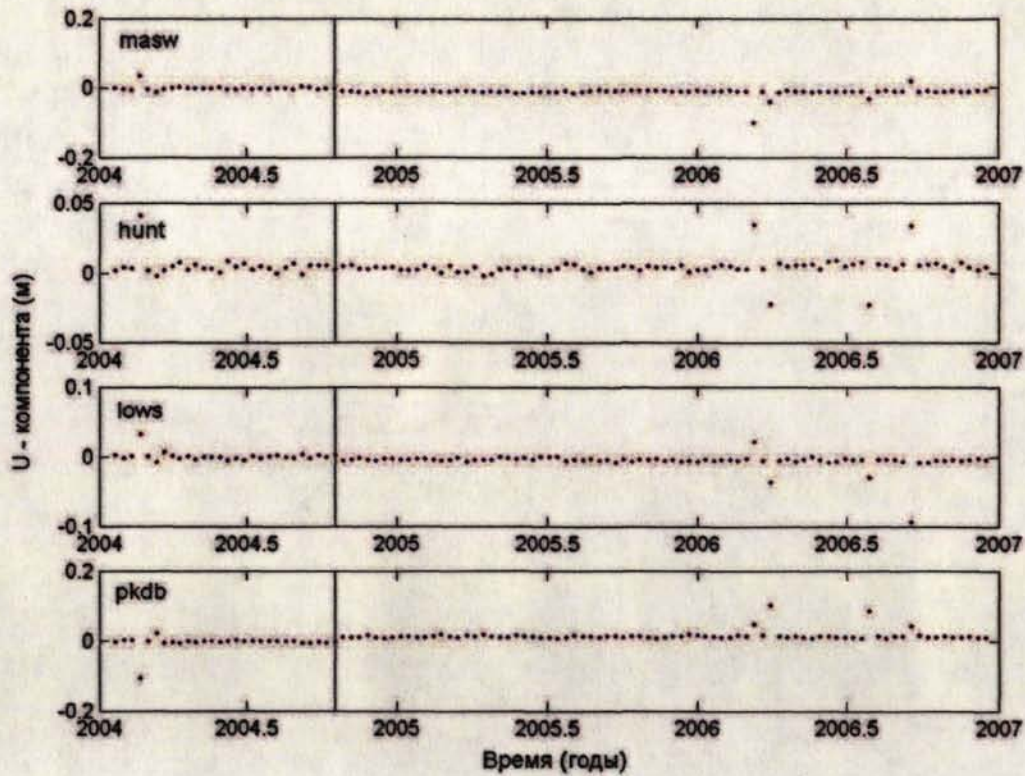


Рис. 2.14. Изменение компоненты U для пунктов геодезического четырехугольника Калифорнийской сети

На представленных в диссертации графиках изменений векторов смещений и деформаций вертикальные отрезки при каждой точке представляют доверительный интервал $\pm 2m$. Они не показаны только в тех случаях, когда их было невозможно выразить в едином с основными характеристиками масштабе из-за их малости по отношению к ним. Это относится к характеристикам, связанным с Паркфилдским землетрясением, момент которого показан на рисунках вертикальной линией. Выявленный тип смещения по разлому – горизонтальный сдвиг соответствует поведению разлома Сан-Андреас за историческое время.

Графическое представление горизонтальных деформаций в контрольной сети осуществлено на рисунках 2.15-2.18. Характеристики деформаций разделены на два временных интервала: до и после Паркфилдского землетрясения. В противном случае разномасштабность деформаций до и после землетрясения и их резкий скачок во время землетрясения не обеспечит наглядность анализа.

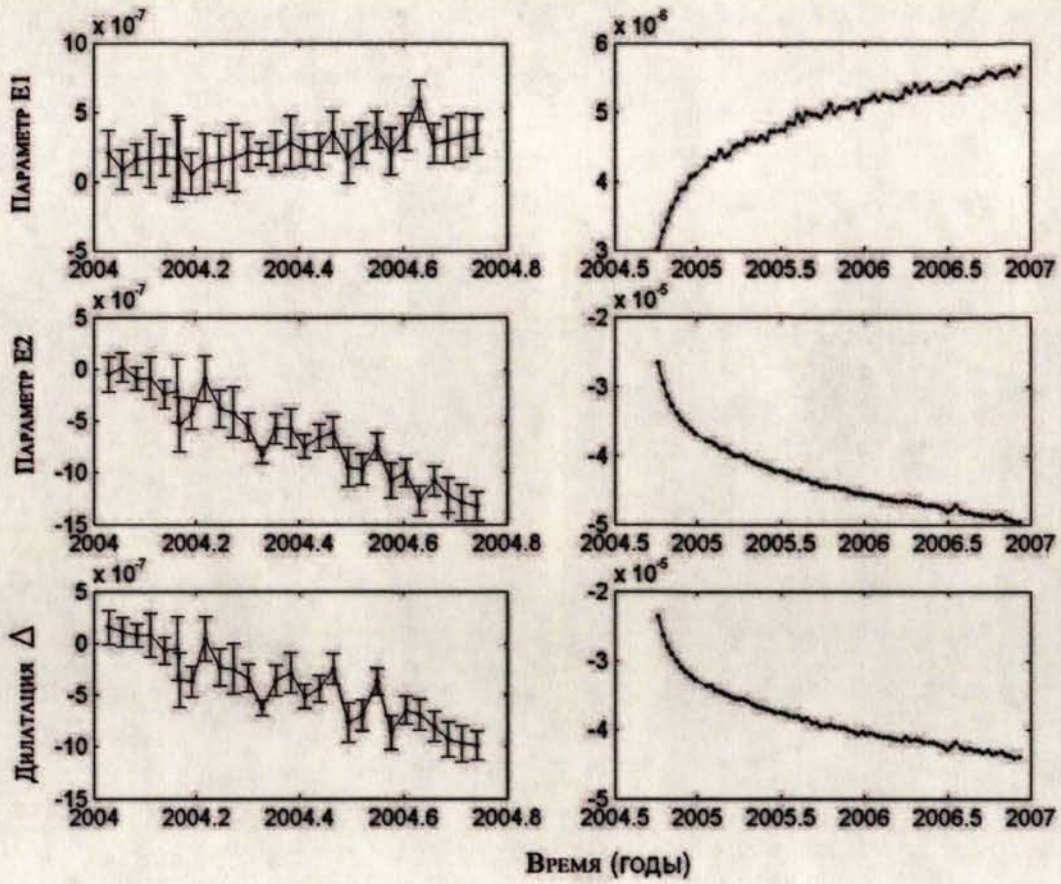


Рис. 2.15. Изменение параметров деформаций для треугольника masw-lows-hunt

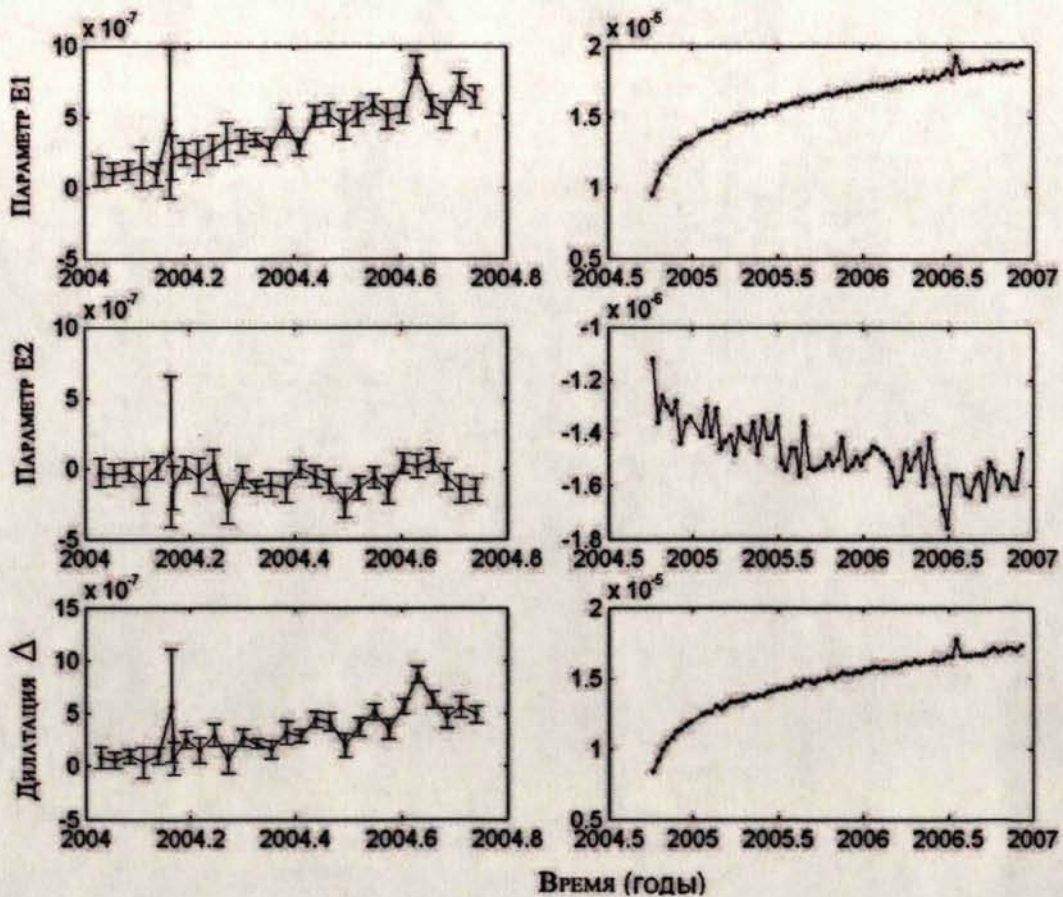


Рис. 2.16. Изменение параметров деформаций для треугольника hunt-lows-pkdb

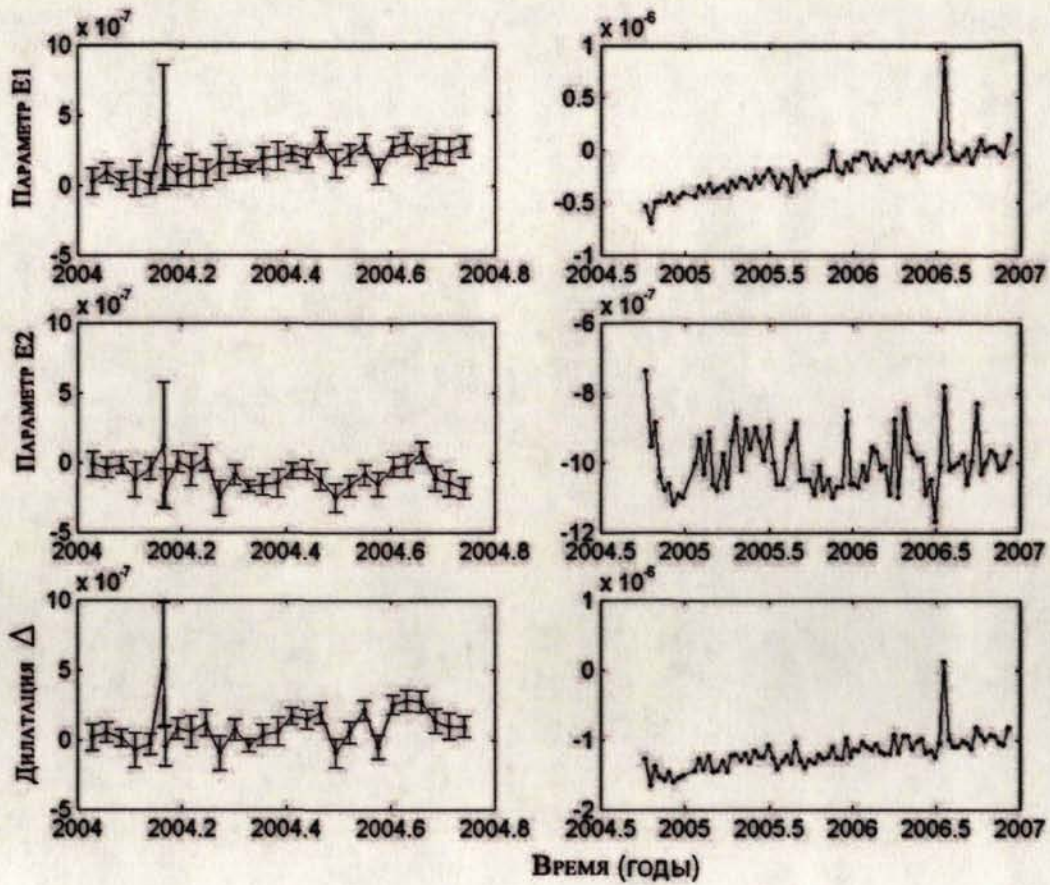


Рис. 2.17. Изменение параметров деформаций для треугольника masw-lows-pkdb

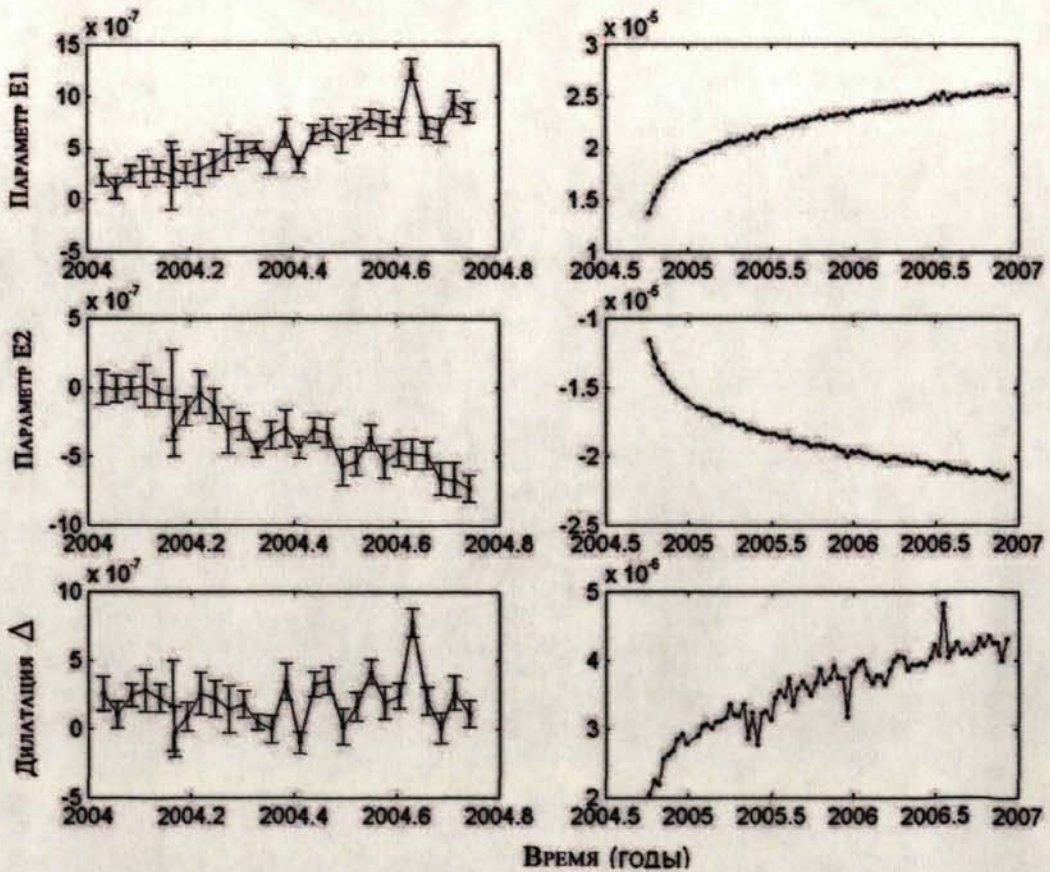


Рис. 2.18. Изменение параметров деформаций для треугольника masw-pkdb-hunt

Отметим, что характер изменения пространственных также как и горизонтальных деформаций за 8 месяцев до землетрясения не продемонстрировал явно выраженных предвестников сейсмического события.

2.4.3. Деформации, связанные с Новозеландским землетрясением

Для анализа деформаций в районе Новозеландского землетрясения была использована контрольная геодезическая сеть (рис. 2.19) состоящая из пунктов IGS: MAST, PAEK, WGTN и PARW, для которых из архива SOPAC были получены суточные файлы спутниковых измерений.



Рис.2.19. Геодезическая сеть в районе Новозеландского землетрясения

В результате вычислений в программе были получены вектора смещений для пунктов контрольной сети, а также параметры деформаций земной поверхности, отнесенные к центрам треугольников сети (рис. 2.20-2.27).

Оценим эффективность определения смещений геодезических пунктов, используя критерий (2.7). Соответствующие значения F получены в интервале от 4.6 до 485.3. Но, следует отметить, что если исключить из полученного ряда

только одно значение $F=4.6$, то соответствующий диапазон составит 44.1 – 485.3. Таким образом, можно уверенно утверждать, что все полученные оценки векторов смещений значительно превышают соответствующие случайные ошибки, за исключением суток 2004.986. Для этого момента значение $F=4.6$, и свидетельствует о том, что в данном случае ошибки не существенно отличаются от искомых характеристик движений земной поверхности. Для данного момента ошибка единицы веса из уравнивания также резко отличается от остальных значений. Она равна 22 мм, в то время как остальные значения изменяются в пределах 2-6 мм.

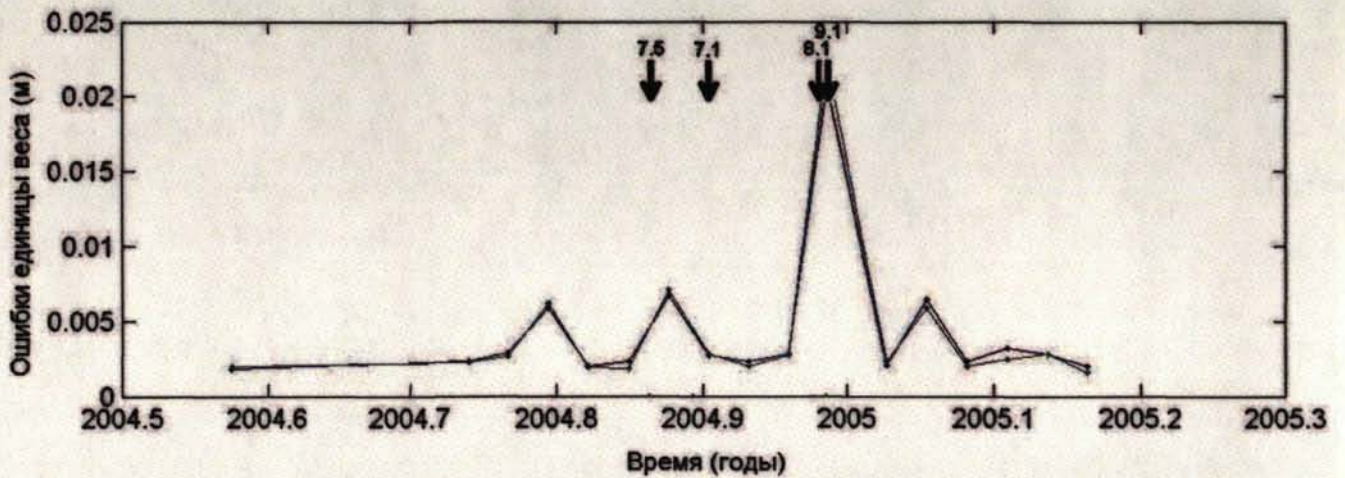


Рис. 2.20. Сравнение результатов оценки точности определения векторов смещений (моменты сильнейших землетрясений мира и ближайшего к сети землетрясения на Южном о-ве Новой Зеландии с $M=7.1$ показаны стрелками с указанием магнитуд)

Что бы найти объяснение данному факту был построен график изменения ошибок единицы веса, на котором были отмечены сильнейшие землетрясения, происходящие в интервале времени определения смещений земной поверхности. На рис. 2.20 можно видеть, что скачек в значениях произошел сразу на следующие сутки после сильнейшего землетрясения в районе о-ва Суматра 26 декабря 2004 г., а также сильнейшего землетрясения в районе о-ва Маккуари с $M=8.1$ 23 декабря 2004 года. Можно предположить, что эта аномалия является

следствием достижения деформационных волн, возбужденных этими землетрясениями (или одним из них), территории Новой Зеландии. Возможность существования таких волн обсуждалась во второй половине прошедшего столетия на международных конференциях по современным движениям земной коры [19].

Отметим, что средние квадратические ошибки единицы веса, за исключением одного цикла, близки к 4 мм (2-6 мм). Это свидетельствует о высокой точности определения смещений земной поверхности.

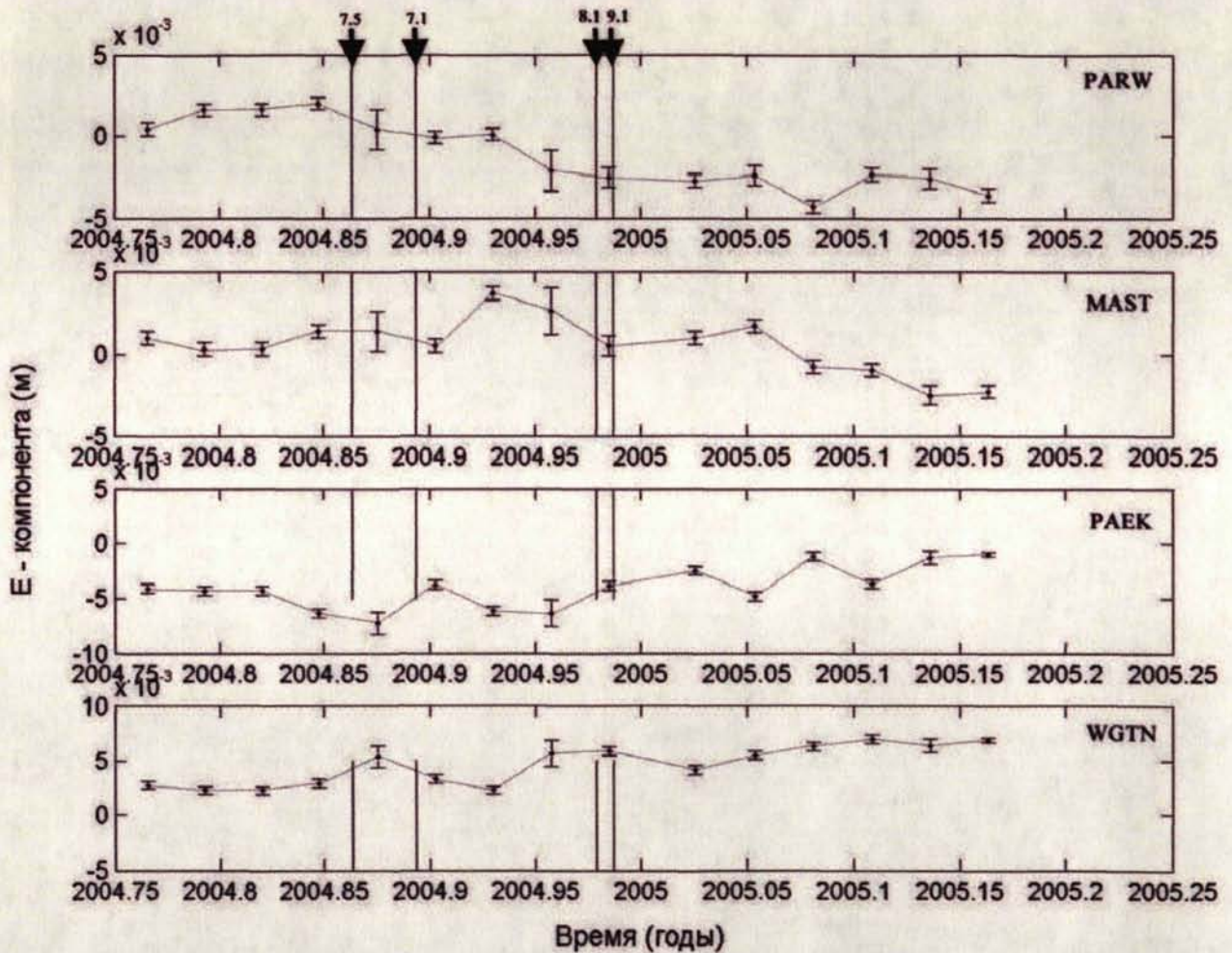


Рис. 2.21. Изменение компоненты E для пунктов четырехугольника

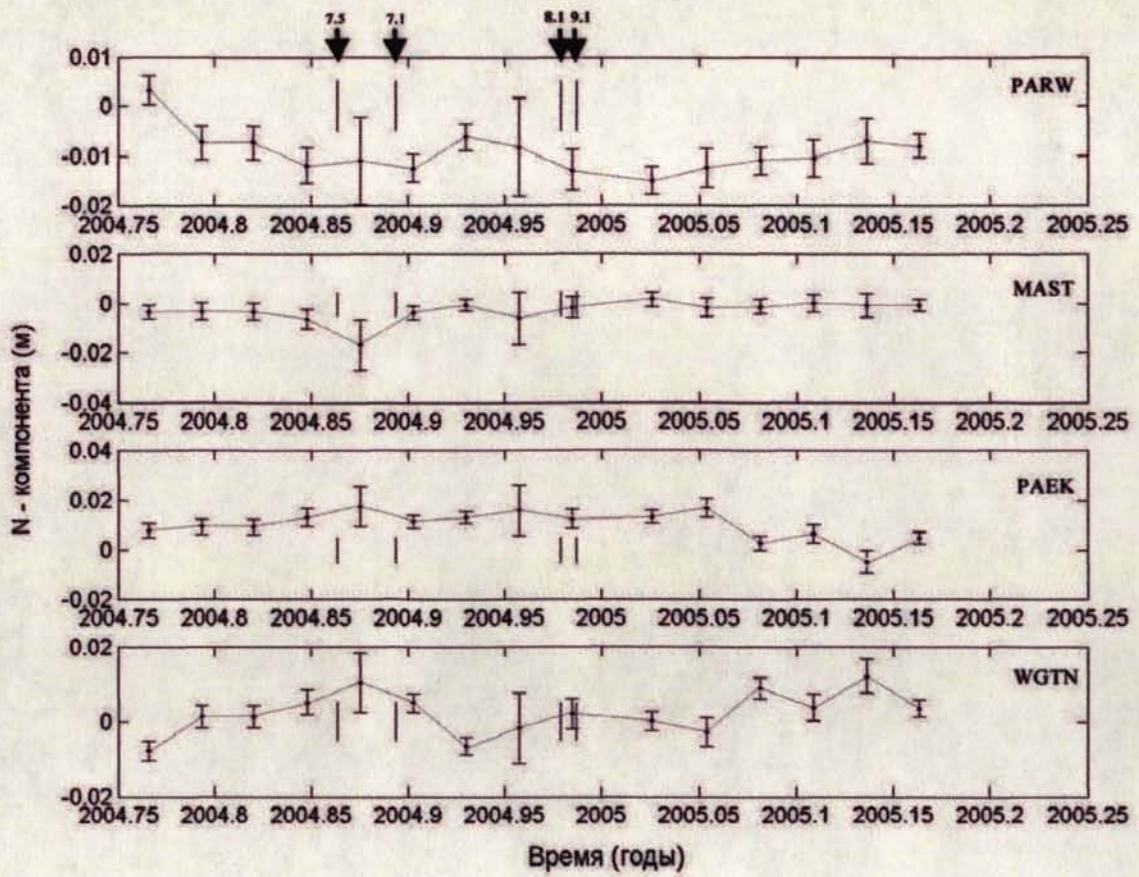


Рис. 2.22. Изменение компоненты N для пунктов четырехугольника

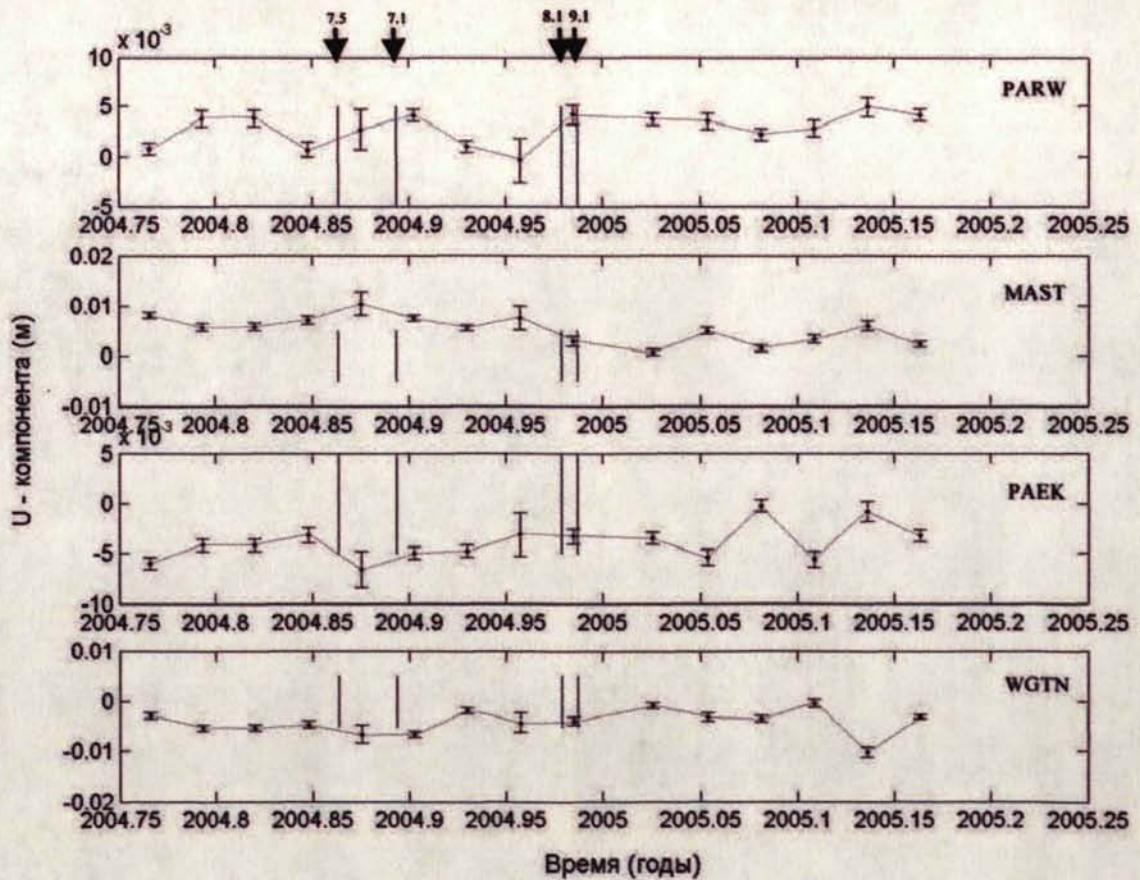


Рис. 2.23. Изменение компоненты U для пунктов четырехугольника

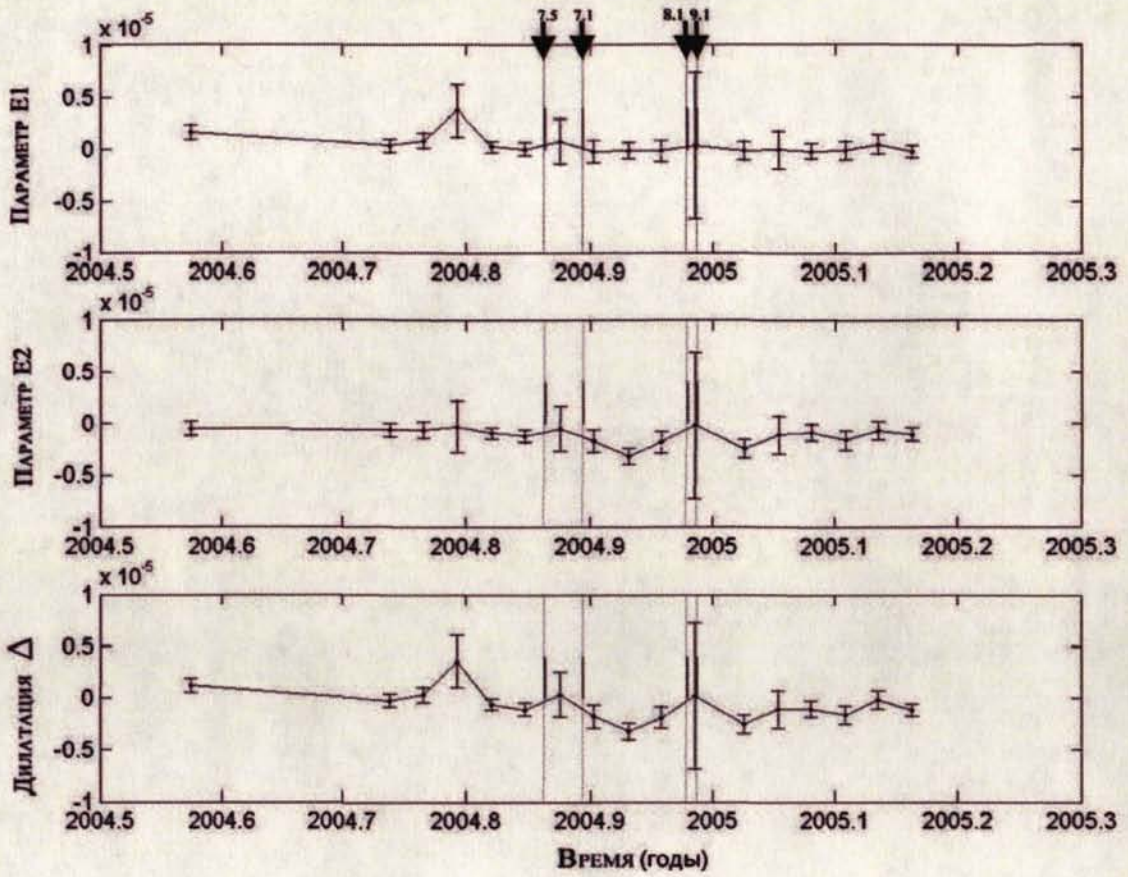


Рис. 2.24. Изменение параметров деформаций для треугольника ragw-raek-mast

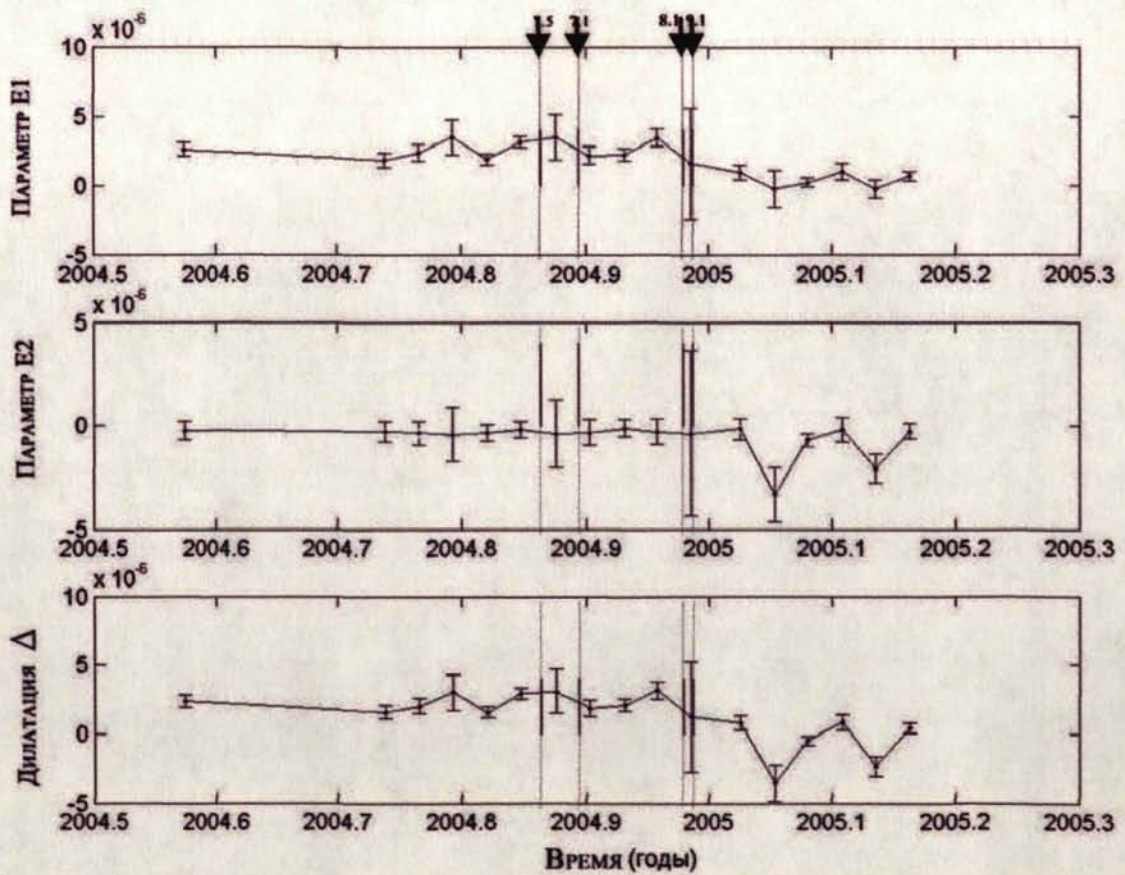


Рис. 2.25. Изменение параметров деформаций для треугольника mast-raek-wgtn

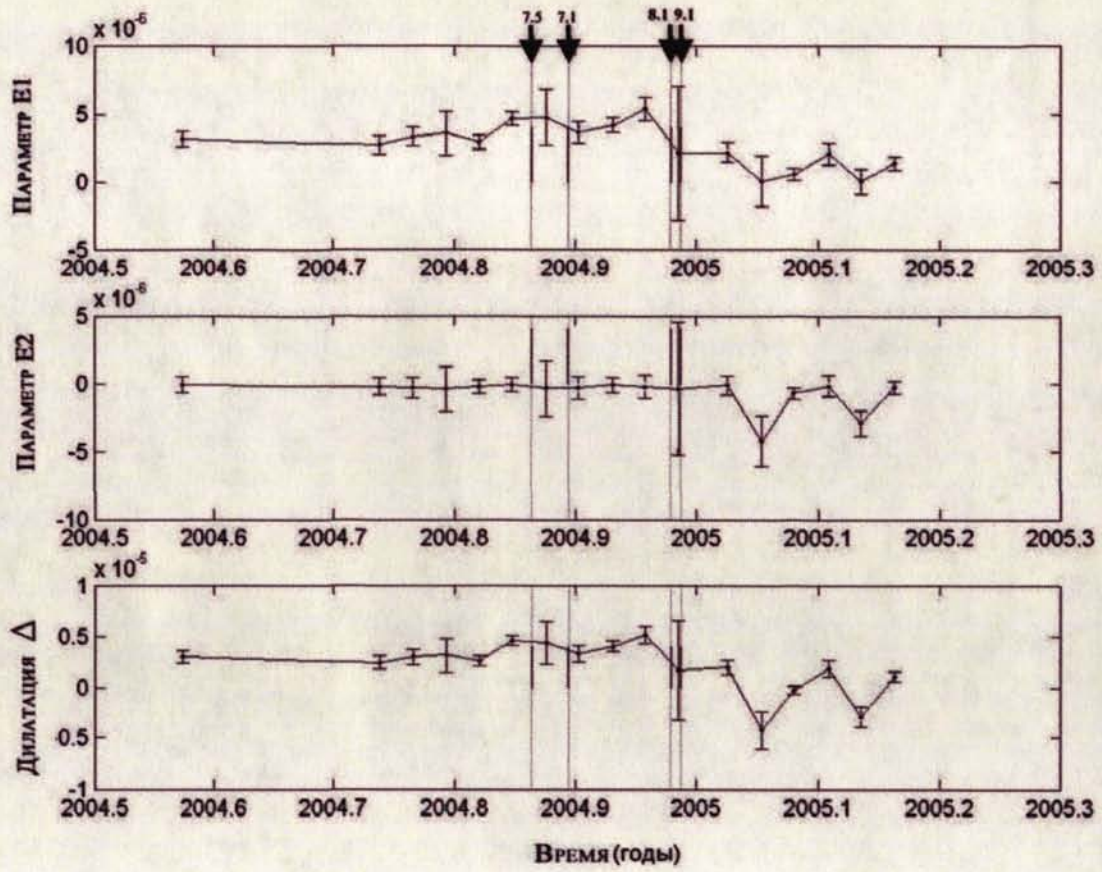


Рис. 2.26. Изменение параметров деформаций для треугольника parw-raek-wgtn

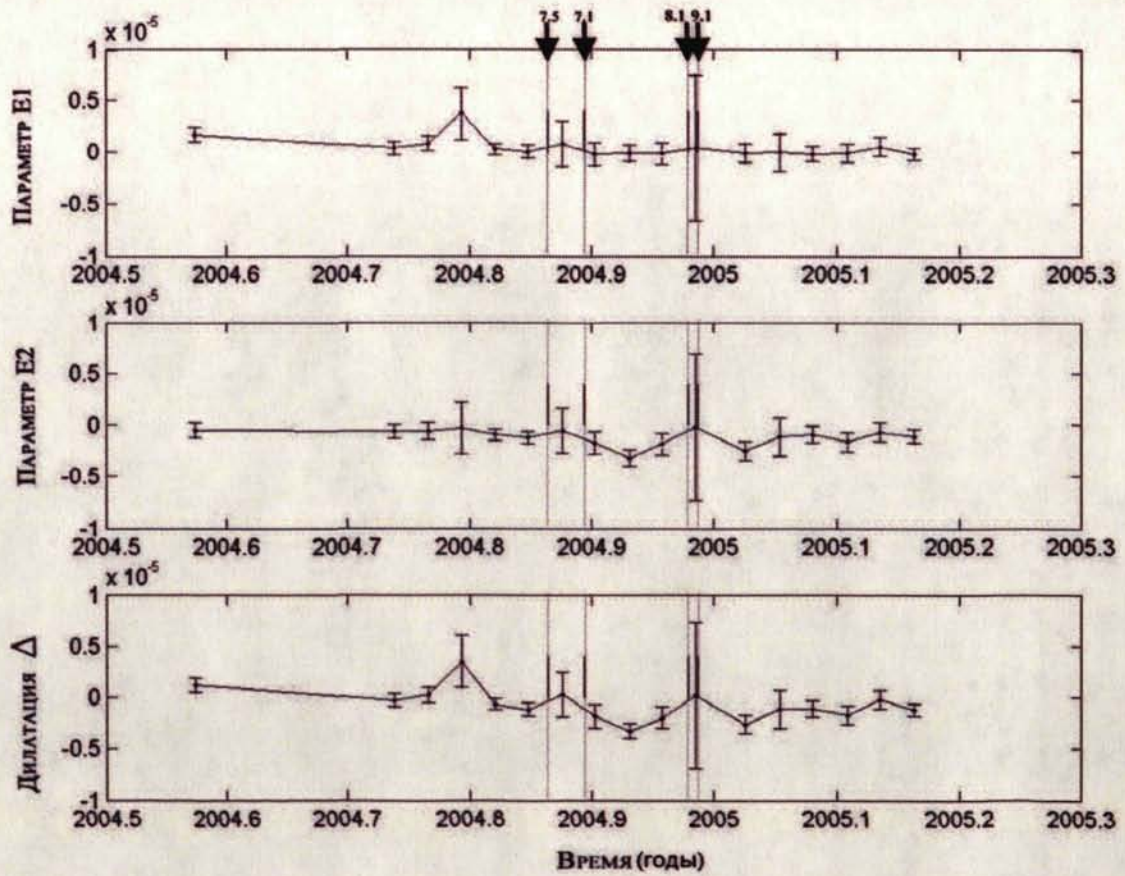


Рис. 2.27. Изменение параметров деформаций для треугольника parw-wgtn-mast

2.4.4. Тектонические деформации Московского региона

Для анализа деформаций в Московском регионе из архива SOPAC через Интернет были получены суточные файлы спутниковых измерений на пунктах Менделеево (MDVJ), Звенигород (ZVE2), Обнинск (MOBN) международной службы IGS, а также на Московском пункте ФАГС, расположенном на крыше здания ЦНИИГАиК (CNG1). Выбранные пункты образуют геодезический четырехугольник, представленный на неотектонической карте (рис. 2.28). Карта составлена и генерализована начальником группы Геоцентра «Москва» Е.В.Алексеевой при участии диссертанта по данным Ю.Т.Кузьменко [22].

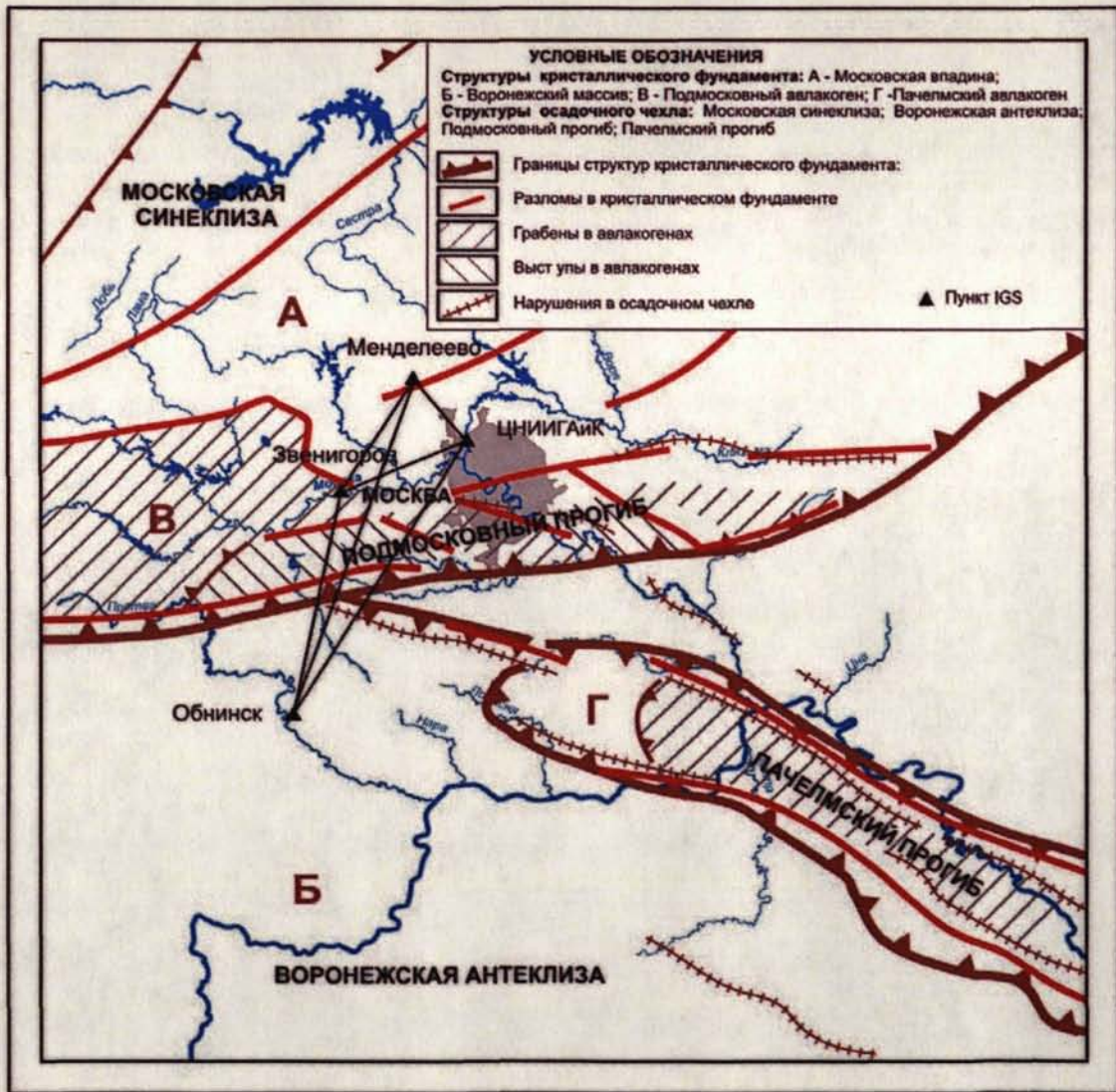


Рис. 2.28. Контрольная геодезическая сеть в Московском регионе

Территория рассматриваемого участка расположена в пределах Восточно-Европейской платформы, которая является одним из крупнейших относительно устойчивых участков земной коры. В строении Восточно-Европейской платформы выделяется древний складчатый кристаллический фундамент и спокойно залегающий на нём осадочный чехол. В строении фундамента участвуют смятые в складки сильно метаморфизованные осадочные и магматические породы. Выделяются площади, в пределах которых эти породы имеют очень древний архейский возраст, старше 2500 млн. лет. В составе осадочного чехла участвуют отложения от верхнего протерозоя (рифей) до антропогена. Осадочные толщи чехла местами нарушены пологими изгибами, куполообразными (своды) и удлинёнными (валы) поднятиями, а также сбросами.

Кроме того, рассматриваемый участок расположен в зоне сочленения структур кристаллического фундамента: Московской впадины и Воронежского выступа, а также разделяющих их Подмосковным и Пачелмским авлакогенами. Строение Подмосковного и Пачелмского авлакогенов имеет сложный характер. Геофизическими методами в пределах авлакогенов, по их краям выделяются продольные дислакации (разломы). В осадочном чехле структуры фундамента наследуют: Московская синеклиза, Воронежская антеклиза, Подмосковный прогиб и Пачелмский прогиб.

С помощью составленной компьютерной программы DEFO4 были вычислены векторы смещений пунктов контрольной сети и параметры деформаций земной поверхности.

По вычисленным значениям построены графики их изменения во времени (рис. 2.29 – 2.36).

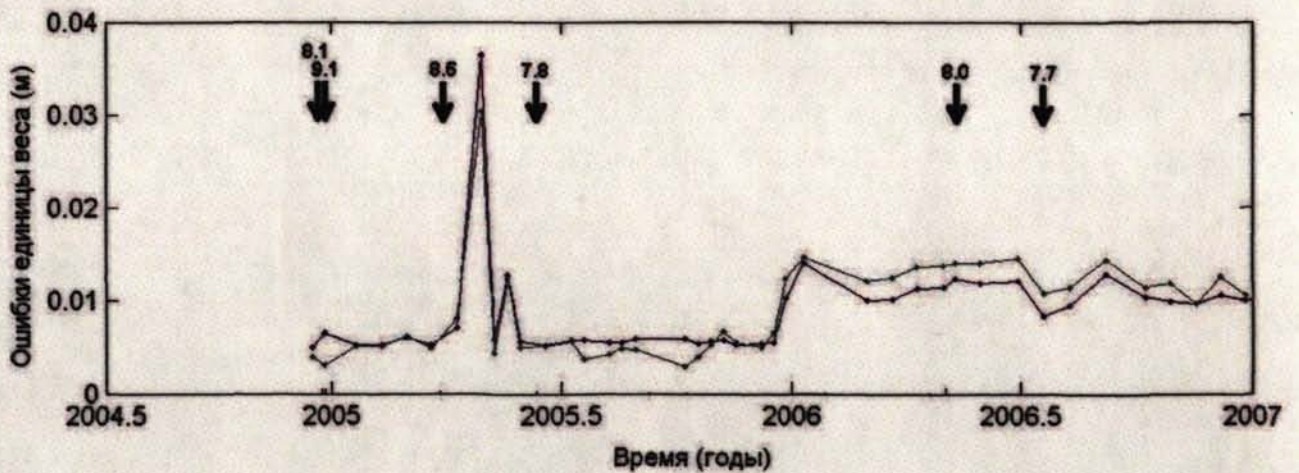


Рис. 2.29. Сравнение результатов оценки точности определения векторов смещений (моменты сильнейших землетрясений мира показаны стрелками с указанием магнитуд)

Проверка эффективности определения смещений показала, что соответствующие значения критерия F (2.7) изменяются в пределах от 7 до 260. Это означает, что не все значения превышают 1%-ный доверительный предел $F_{1\%}=8.47$. Но, в то же время, полученные значения превышают 5%-ный доверительный предел $F_{5\%}=3.9$. Это свидетельствует о том, что анализ смещений земной поверхности менее эффективен, чем в случаях Калифорнийской и Новозеландской сетей. Но, все же, с доверительной вероятностью 0.95 гипотеза о равенстве дисперсий отвергается, и определяемые характеристики могут отражать реальные движения земной поверхности. Отметим, что лишь 15 из 39 значений не превышают 1%-го доверительного предела. Они, главным образом относятся к измерениям 2006 года. Средние квадратические ошибки единицы веса для этого периода составляют 10-15 мм, тогда как большинство ошибок единицы веса для 2004-2005 годов находятся на уровне 5 мм, за исключением даты 2005.329, т.е. на следующие сутки после сильнейшего землетрясения 2005 года с $M=8.3$ в районе о-ва Суматра. На данный момент ошибка единицы веса превысила 3 см. Эта ситуация сходна с результатами обработки Новозеландской и Калифорнийской сетей, и подтверждает предположение о медленном перемещении деформационных волн от эпицентра до Московского региона. Но в то же время,

первое Суматранское мега-землетрясение декабря 2004 года с $M=9.0$ не проявилось в изменениях ошибки единицы веса. Эти факты требуют более детальных исследований причин различия полученных результатов. Одним из важных моментов в решении данного вопроса является сложность выявления ранних постсейсмических деформаций по среднесуточным результатам GPS наблюдений [70].

В целом меньшую эффективность регистрации движений и деформаций можно объяснить большими длинами базовых линий Московской сети по сравнению с Калифорнийской и Новозеландской. В то же время на 5%-ном уровне значимости регистрация движения и деформаций осуществима и таким образом, Московская региональная геодеформационная сеть (фрагмент ФАГС России) может быть использована в мониторинге опасных геодинамических явлений.

Тенденция понижения точности искомым смещений и деформаций в Калифорнийской, Ново-Зеландской и Московской сетей объясняется увеличением длин базовых линий этих сетей. Так в Калифорнии длины базовых линий изменяются от 5 до 20 км, в Новой Зеландии – 26-68 км и в Московском регионе – 16-109 км.

Характер изменения смещений пунктов и деформаций внутри треугольников показаны на рис. 2.30-2.36.

Характер изменения горизонтальных смещений во времени не демонстрирует особенностей, явно связанных с сильнейшими землетрясениями. В то же время вертикальные смещения показывают интересный характер изменений, в связи с третьим сильнейшим землетрясением в Индонезийском регионе с магнитудой $M=8.6$. Через первые дни после землетрясения пункты *mdwj*, *sng1* и *mobn* опустились по отношению к пункту *zve2* в среднем на 8 см. Это особенно отчетливо проявляется в изменениях вертикальных смещений пункта *zve2*. Средние квадратические ошибки вертикальных смещений в данном случае более чем втрое меньше соответствующих смещений. Тектоническая структура региона свидетельствует о том, что пункт Звенигород расположен на территории

Подмосковного авлакогена, пункты Менделеево и ЦНИИГАиК располагаются в Московской впадине, а пункт Обнинск – на Воронежском массиве.

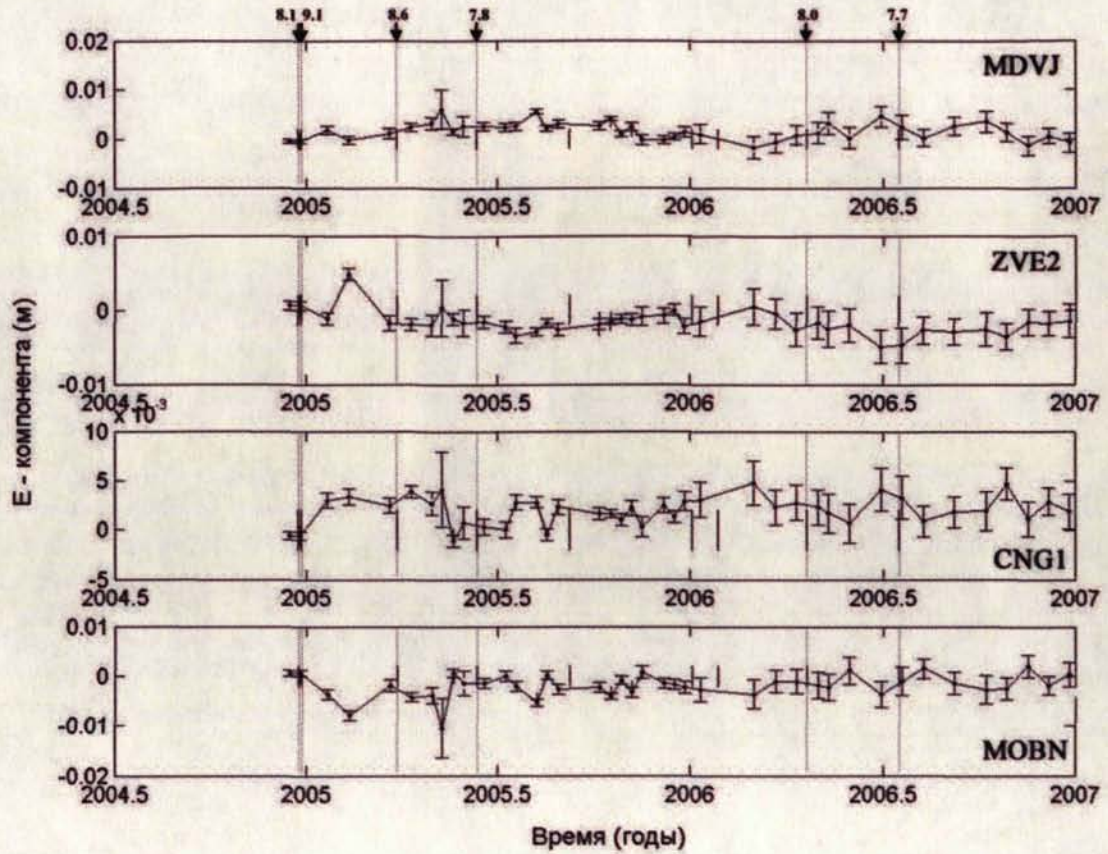


Рис. 2.30. Изменение компоненты E для пунктов четырехугольника

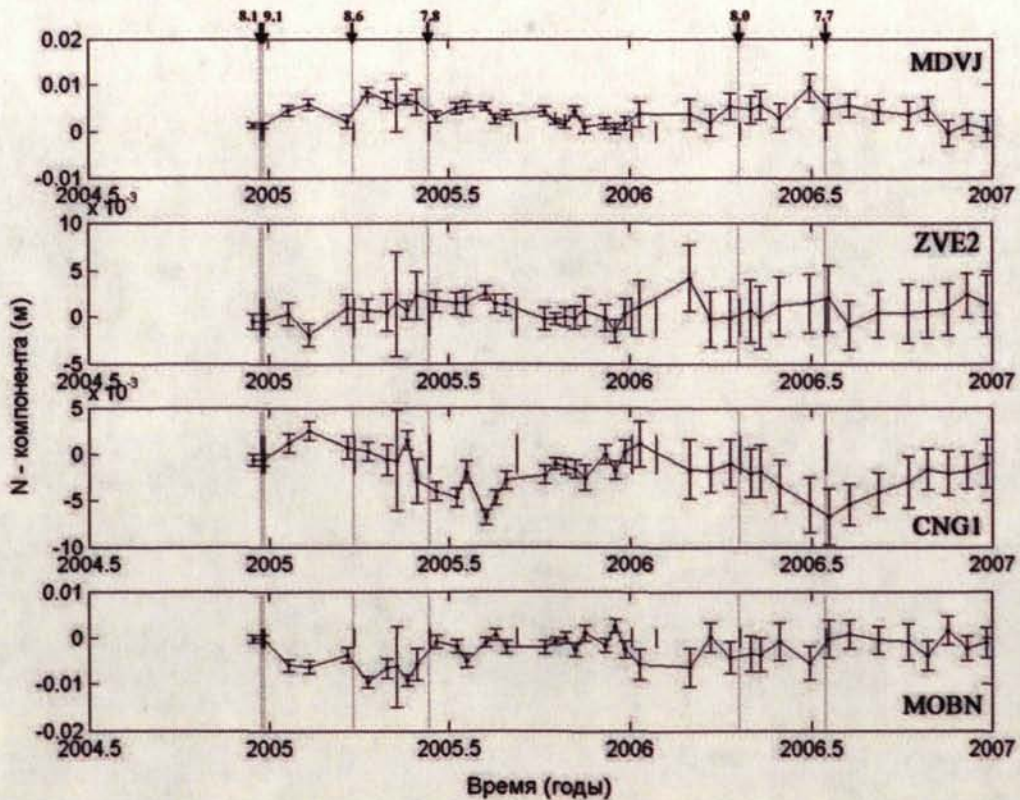


Рис. 2.31. Изменение компоненты N для пунктов четырехугольника

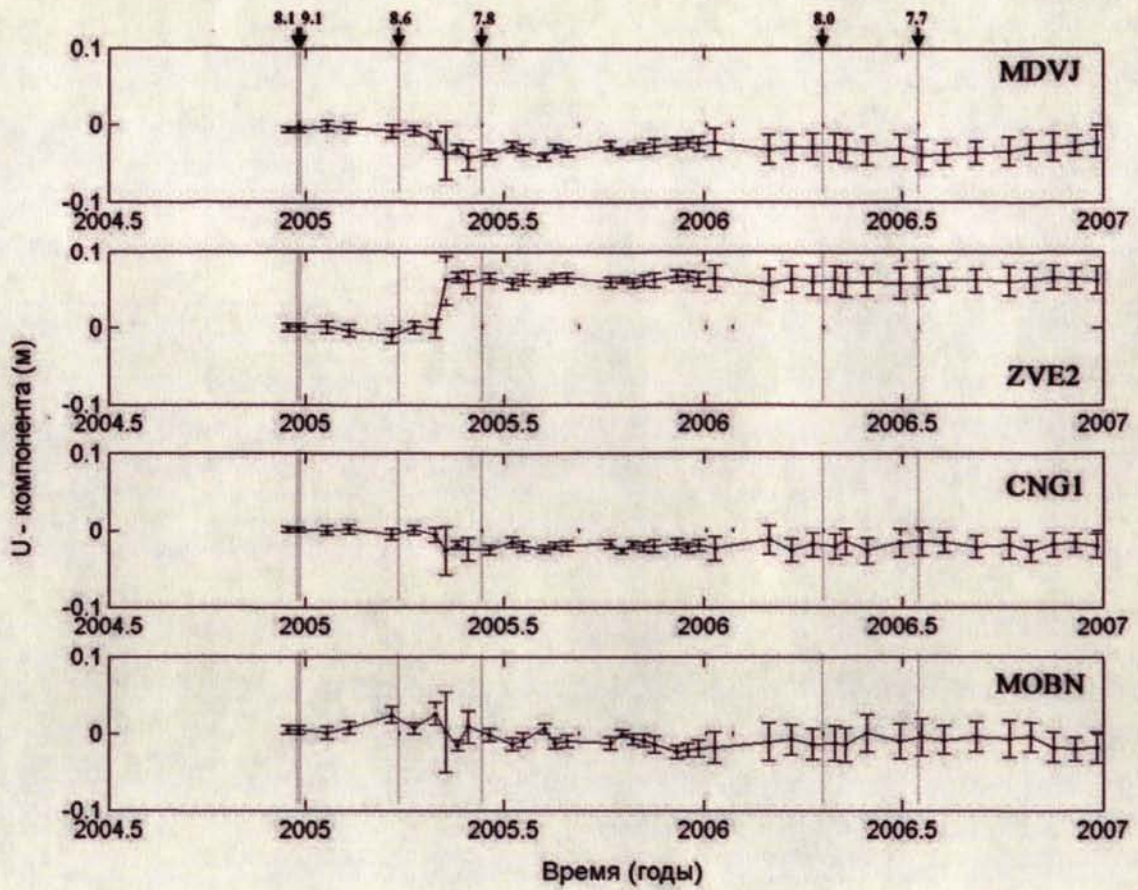


Рис. 2.32. Изменение компоненты U для пунктов четырехугольника

Пункты сети располагаются на различных тектонических элементах, которые могут испытывать разнонаправленные вертикальные движения в связи с сильнейшими сейсмическими событиями.

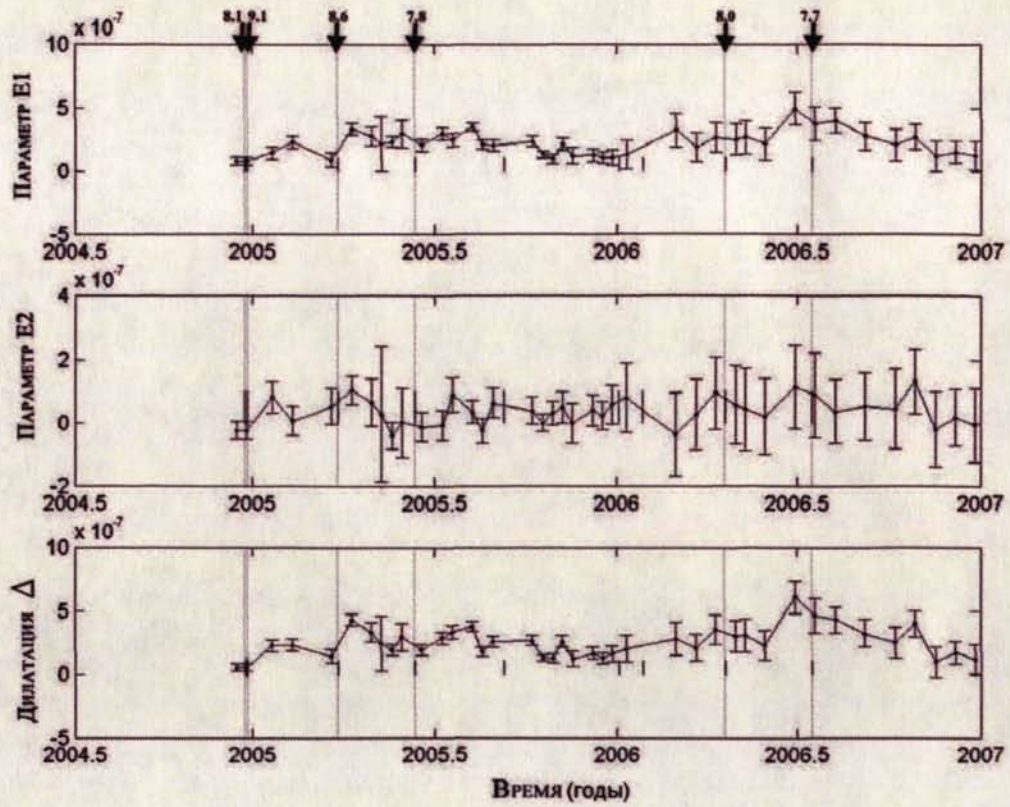


Рис. 2.33. Изменение параметров деформаций для треугольника mdvj-cng1-zve2

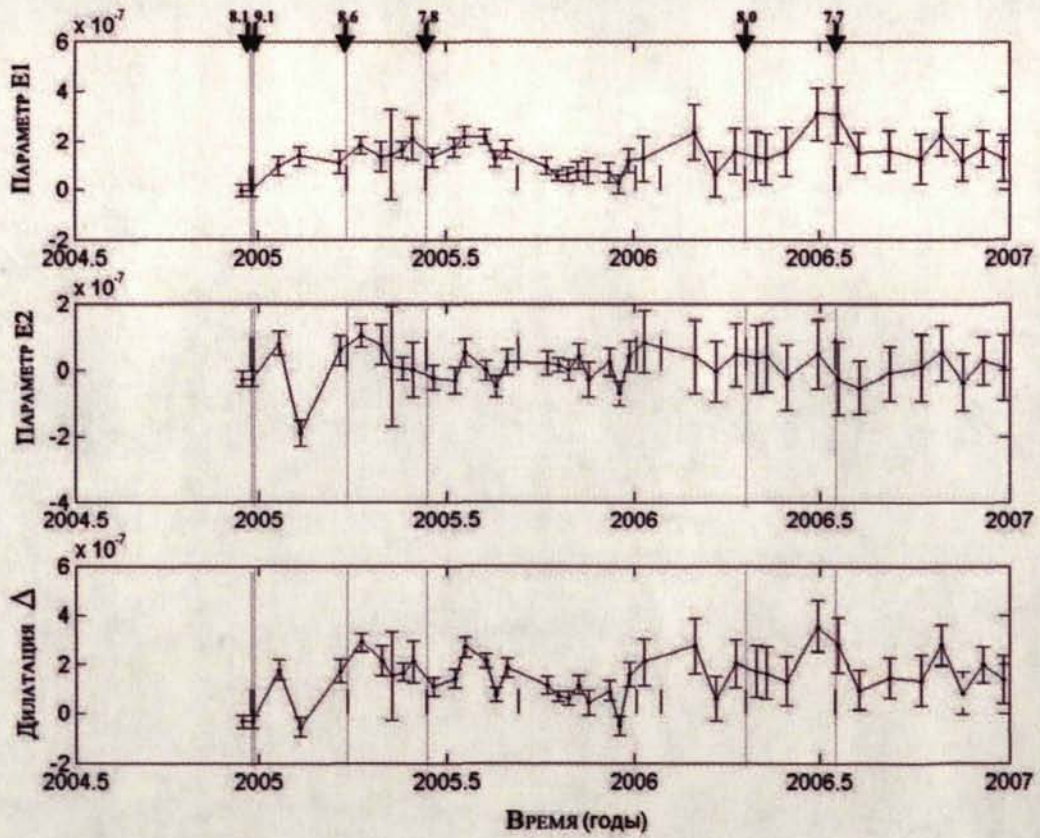


Рис. 2.34. Изменение параметров деформаций для треугольника zve2-cng1-mobj

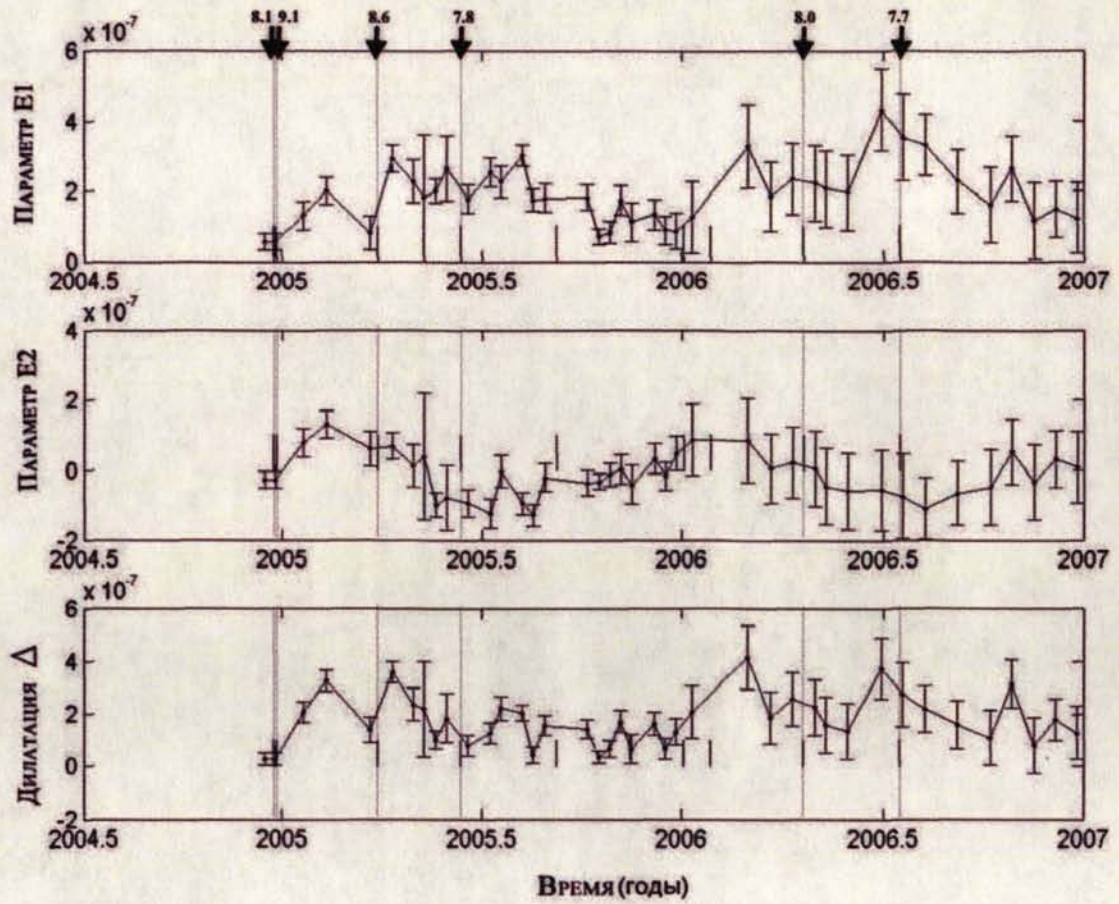


Рис. 2.35. Изменение параметров деформаций для треугольника mdvj-cng1-mobn

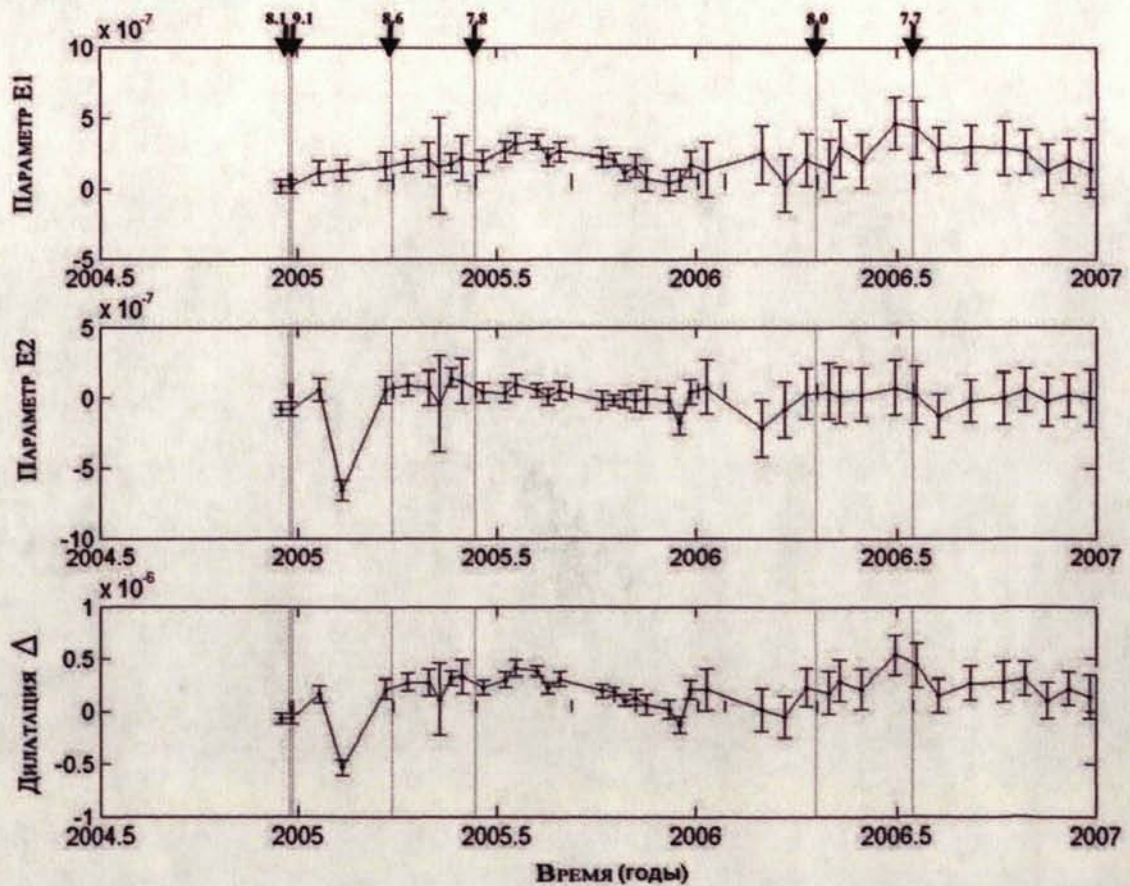


Рис. 2.36. Изменение параметров деформаций для треугольника mdvj-mobn-zve2

2.5. Выводы по главе 2

Исследования и разработки в рамках тематики данной главы диссертации позволили сделать следующие основные выводы и предложения.

- Разработаны методики, алгоритм и программа деформационного анализа результатов СРНС измерений – векторов базовых линий и их ковариационных матриц, предварительно получаемых с использованием стандартных программных пакетов, что является важным расширением возможностей применения спутниковых геодезических измерений в геодинамических исследованиях.

- Работоспособность и эффективность методик и программы проверены на фактическом измерительном материале для разных территорий Земли. Показано, что точность определения компонент смещений изменяется в пределах 3 – 15 мм (за исключением трех аномальных случаев) для сетей с длинами базовых линий от 16 до 109 км.

- Методика уравнивания разностей СРНС измерений не продемонстрировала такого же эффекта, как у классических измерений и показала практически одинаковую точность, как и у отдельной статической обработки циклов измерений. Но, тем не менее, принятый подход более удобен в реализации и не требует уравнивания собственно координат в единой геоцентрической или государственной системе, что является более сложной и громоздкой задачей. Как следует из частной беседы с профессором МИИГАиК С.В. Лебедевым, проводящим исследования по повышению точности определения вертикальных движений по спутниковым измерениям, для более коротких (чем суточные) сеансов наблюдений более высокая точность достигается именно при обработке разностей повторных измерений. Это подтверждает мнение о правильности избранного подхода.

- Дисперсионные отношения уровня деформаций к уровню ошибок показали, что методика обеспечивает надежное определение векторов смещений и деформаций земной поверхности. Полученные оценки дисперсионных критериев

превышают 5%-ный доверительный интервал в подавляющем большинстве случаев в сотни и тысячи раз.

- Исследование деформаций в Новой Зеландии в связи с сильнейшими землетрясениями 2004 года показало последующие аномальные характеристики движений и деформаций.

- Анализ многократных измерений в СРНС сети Московского региона продемонстрировал реальную возможность ее использования для изучения характера деформирования данной территории. Получены статистические обоснования гипотезы о связи наблюдаемых движений и деформаций с сильнейшими землетрясениями последних лет.

- Общая оценка полученных результатов позволяет предложить более широкое применение коротких базовых линий и геодезических четырехугольников непрерывных СРНС измерений для контроля движений и деформаций в контрольных сетях геодинимических полигонов Роскартографии.

3. ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ СПУТНИКОВЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

3.1. Анализ особенностей регистрации смещений в связи с землетрясением

Паркфилд

Обработка GPS измерений в сети, перекрывающей сейсмогенный разлом Сан-Андреас, позволила получить новую интересную информацию о характере смещений в связи со значительным землетрясением и, в частности, оценить взаимное скольжение (крип) бортов «вскрытого» участка разлома. Моделирование смещений и деформаций на разломе представлено, например, в работах [59, 71, 78].

Сеть GPS, перекрывающая сейсмогенный разлом Сан-Андреас и использованная в анализе, построена специально для контроля этого разлома в его запертой части. Специалисты геофизических организаций США использовали данную сеть для прогноза сильных землетрясений в данном районе. Несмотря на ожидание землетрясения в данном районе геодезических деформационных предвестников выявлено не было. Результаты обработки измерений в специально отобранном геодезическом четырехугольнике по составленной программе DEFO4 показали некоторые интересные особенности, которые можно рассматривать, как деформационные предвестники. Рассматривая векторы смещений (рис. 2.13 – 2.15) пунктов данной сети до землетрясения необычных тенденций не обнаруживается. Тем не менее, в числе ранее известных предвестников имеются случаи определенного «поведения» деформаций земной поверхности. В работе [34] к наиболее убедительным прогностическим эффектам относятся явления переориентации осей главных деформаций в районе очага будущего землетрясения. За несколько месяцев (360-470 суток) до умеренных землетрясений в Гармском районе дважды наблюдались периоды нарастания упорядоченности (поляризации) ориентировки осей деформаций и их переориентация примерно на 90^0 за первые месяцы (110-130 суток) до

наступления сейсмических событий с магнитудами 5.4 и 6.1. Такой двухэтапный характер поведения осей деформаций обнаружен советскими геофизиками в 1963-1966 гг. с использованием определений деформаций по механизмам в очагах слабых землетрясений данного района, т.е. фоновой сейсмичности. Разработанная в процессе подготовки диссертации методика позволяет проверить характер изменения деформаций земной поверхности в связи с землетрясением Паркфилд. Для этой цели изменения осей главных деформаций представлены на графиках (рис. 3.1)

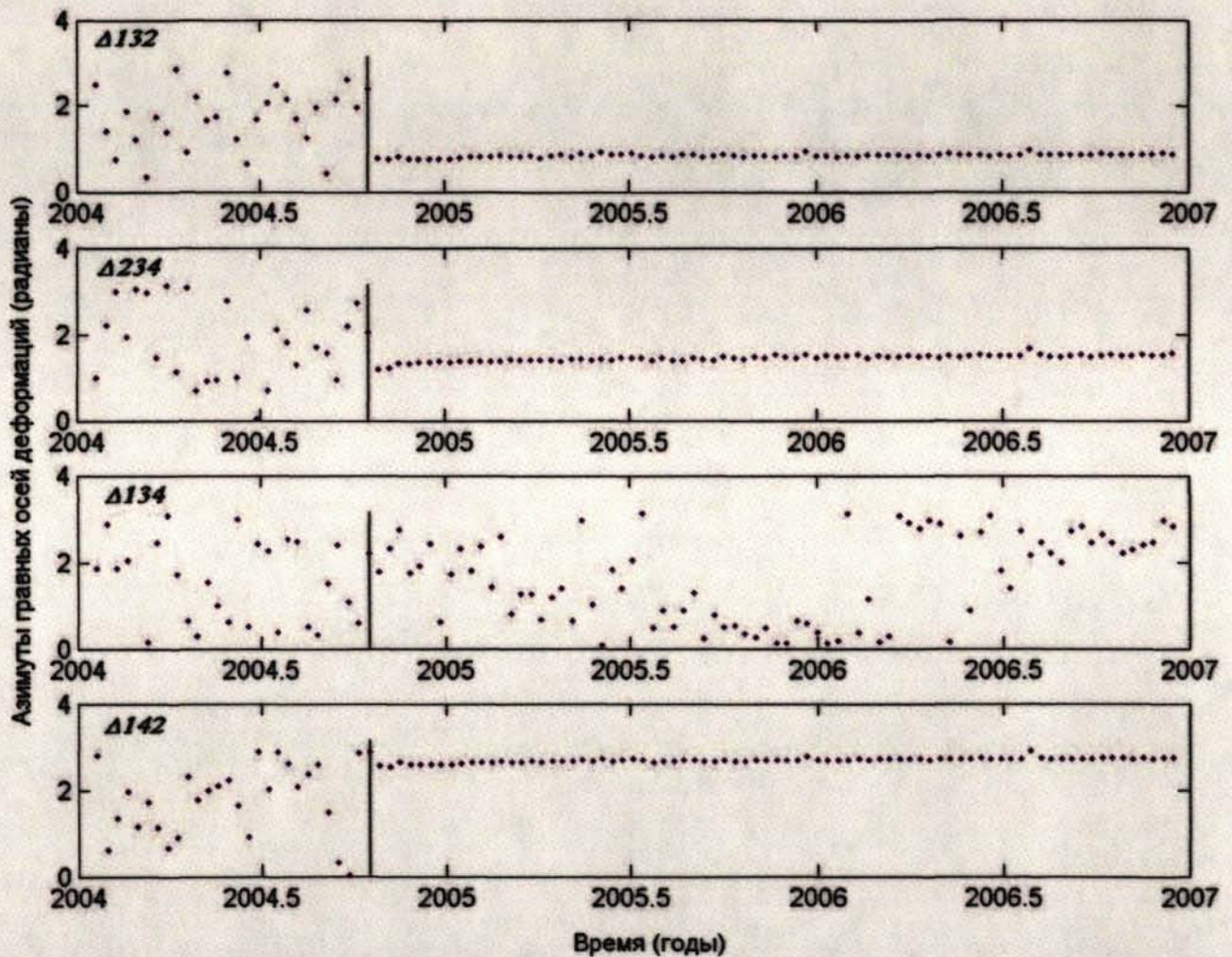


Рис. 3.1 Ориентировка осей главных деформаций в треугольниках геодезической сети в районе землетрясения Паркфилд. Момент землетрясения отмечен вертикальной линией

Как видно из графиков (рис. 3.1) поведение осей деформаций до землетрясения выглядит достаточно хаотично, и явная упорядоченность

возникает лишь после сейсмического события. Она становится почти постоянной и определяется крипом «вспоротого» сейсмогенного разлома.

Тем не менее, визуальный анализ в данном случае может быть недостаточно показательным, так как он зависит от трудности отнесения азимута к тому или иному квадранту, если, например, азимуты различаются друг от друга на величину, близкую к π . Поэтому целесообразно изучить распределение азимутов по секторам путем, например, построения соответствующих гистограмм. Такие гистограммы представлены на рис. 3.2.

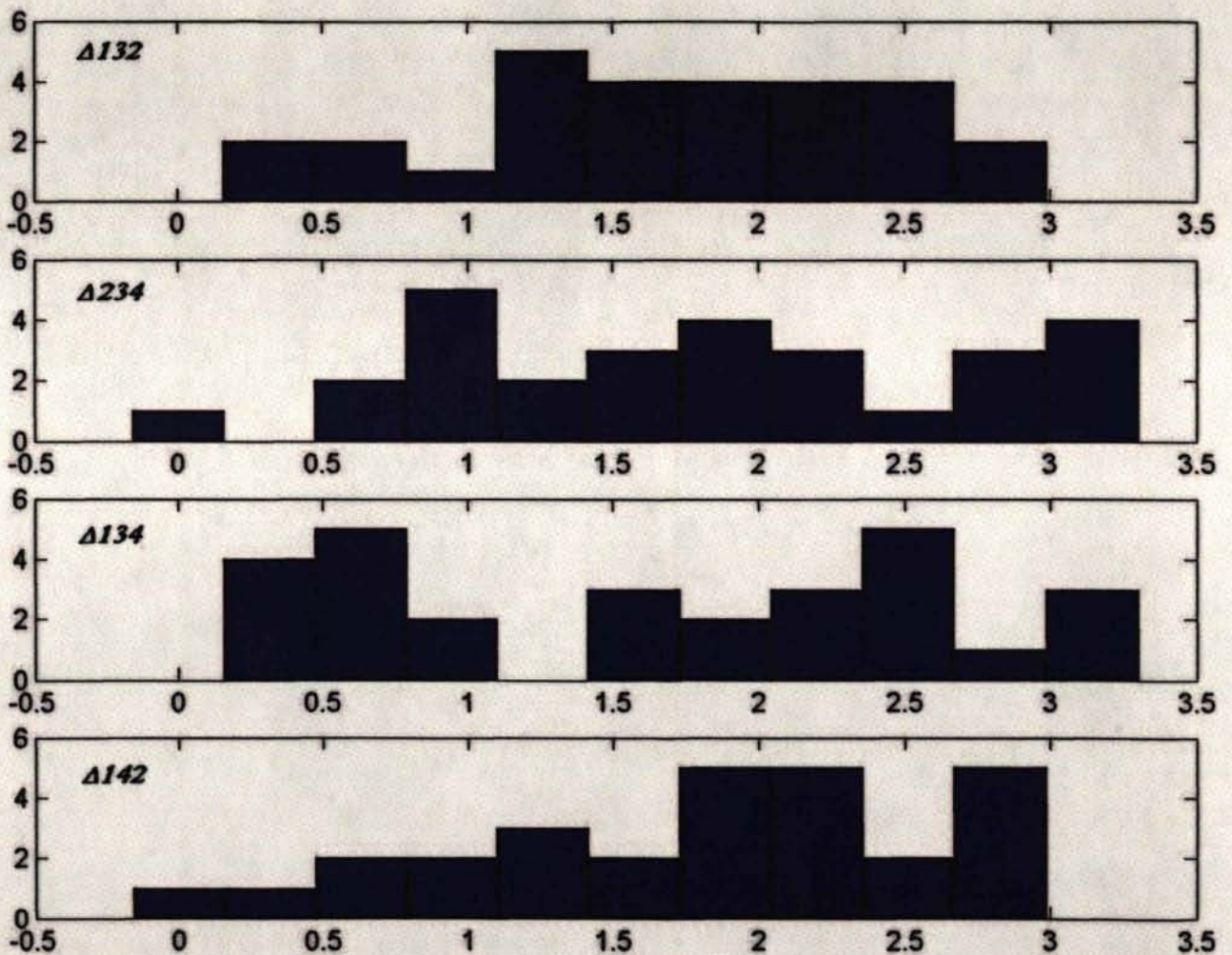


Рис. 3.2. Характер распределения азимутов осей растяжения-сжатия перед землетрясением Паркфилд. По горизонтальной оси – азимуты от 0 до π , по вертикальной – число попаданий в интервал.

Двухвершинность распределения может указать на возможность переориентировки осей деформаций. Наиболее явно такая двухвершинность выражена в треугольнике 134, который не перекрывает сейсмогенный разлом. Экстремумы относятся к 0.7 и 2.5 радиан. Тогда их разность, равная 1.8 радиан близка к $\pi/2$, что может говорить о возможной переориентации осей деформаций в данном треугольнике. В остальных треугольниках, за исключением треугольника 132, наблюдается многовершинность распределения, которую также можно интерпретировать как переориентировку осей растяжения-сжатия, но достаточно однозначной картины не наблюдается. В тоже время, полученный результат не отвергает возможность существования предвестника, связанного с переориентировкой осей деформаций требует более детального анализа.

Вычисление характеристик эффективности определения векторов смещений из обработке по предлагаемой методике (Глава 2) показало интересный результат, свидетельствующий о возможности наличия предвестника землетрясения нового типа.

Рассмотрим график изменений дисперсионных отношений (2.7), полученных из обработки Калифорнийской сети GPS (рис. 3.3).

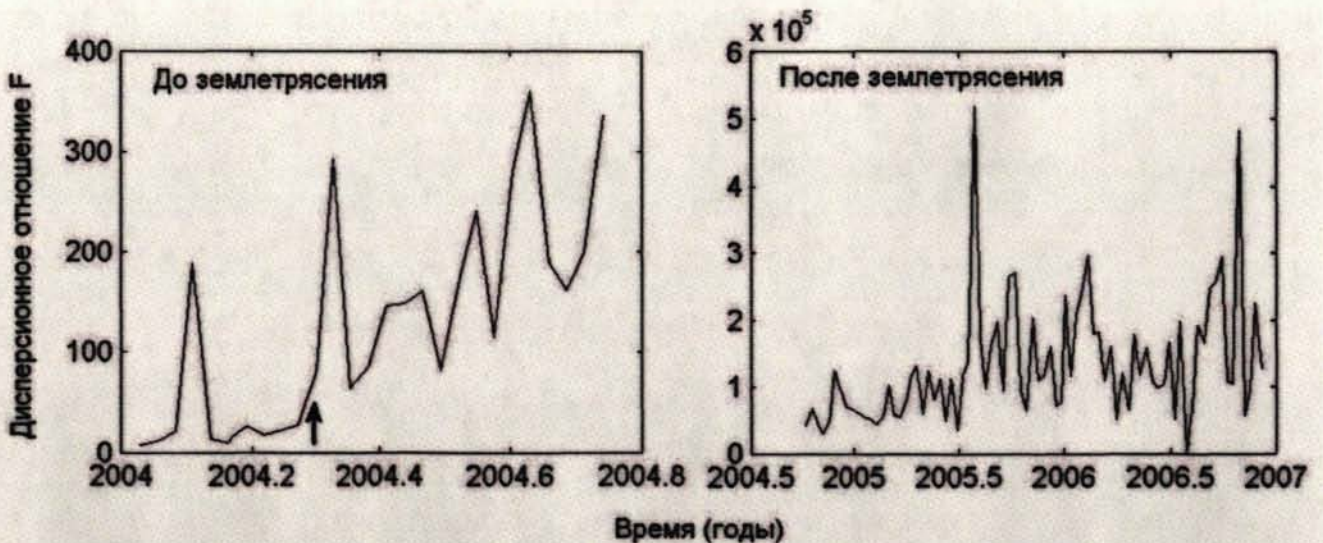


Рис. 3.3. Изменения дисперсионных отношений F до (слева) и после (справа) Паркфилдского землетрясения. Стрелкой отмечен момент начала нарастания интенсивности деформаций по отношению к ошибкам их определения.

Изменения дисперсионных отношений F явно показывают их значительное различие для периодов до и после землетрясения. Это не является чем-то необычным, так как после землетрясения вскрывается разлом, который определяет очень уверенную регистрацию смещений. В качестве современного примера можно привести землетрясение в Индии 2001 года [57]. При этом дисперсионное отношение достигает величин 10^5 . В то же время интересным фактом является характер нарастания эффективности регистрации смещений в течение нескольких месяцев до землетрясения. Дисперсионные отношения изменяются от 7.7 до 350. Можно обозначить время начала уверенного роста дисперсионного отношения за период около 4-х месяцев до землетрясения. Этот момент на рис. 3.3 показан стрелкой. До наступления данного момента дисперсионные отношения были около 10 единиц и лишь в одном случае достигали величины 190. За примерно два с половиной месяца до события их значения существенно увеличились и изменялись уже от 100 до 350 единиц. Этот результат демонстрирует нарастание интенсивности и возможной упорядоченности деформаций за несколько месяцев до землетрясения, что может являться новым прогностическим признаком и представляет интерес для продолжения аналогичных исследований.

Другой важной особенностью результатов наблюдений в районе Паркфилд является регистрация последующего после землетрясения скольжения бортов разлома. С целью определения скорости крипа были построены графики изменений плановых компонент смещений (рис. 3.4).

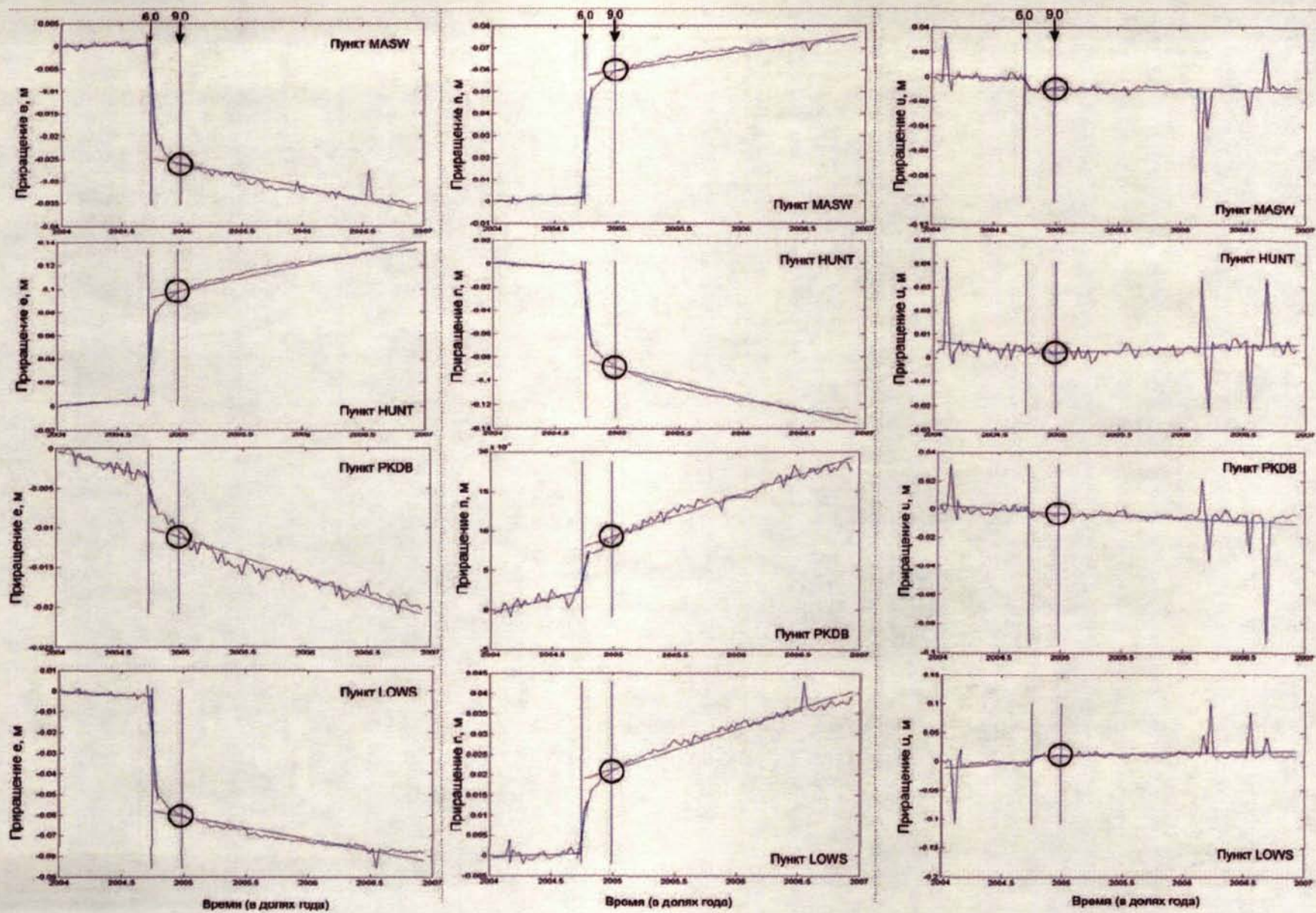


Рис. 3.4. Крип приращений e , n и u для пунктов Калифорнийской сети. Кружком обведены моменты начала стабилизации крипа, совпадающие с моментом Суматранского землетрясения

Скорости изменения векторов смещений определялись путем аппроксимации рядов полученных характеристик линейной функцией с использованием специальной функции-подпрограммы POLYFIT среды Matlab 6.5. Значения скоростей смещений трех пунктов hunt, masw и pkdb, расположенных на бортах разлома Сан-Андреас были использованы для определения скорости взаимного смещения этих бортов, т.е. крипа. Для этого были получены средние скорости смещений пунктов masw и pkdb, из которых вычитались скорости движения пункта hunt. В результате скорость крипа бортов составила 44 мм/год. Следует отметить, что прежние характеристики крипа в других частях разлома Сан-Андреас изменялись в пределах 1-5 см/год. Любопытным фактом является особенность изменения крипа в первые месяцы после момента землетрясения. Крип постепенно замедлялся (см. рис. 3.4) и стабилизировался (стал практически линейным) только в момент сильнейшего Суматранского землетрясения, произошедшего в другом регионе Земли на удалении в тысячах км от данного района. На это указывает практическое совпадение времени Суматранского землетрясения с точкой пересечения линейного тренда с графиком фактических изменений смещений. На рис. 3.4 эти области обведены кружком. Трудно предположить причину этого факта, но, тем не менее, он, на наш взгляд, представляет интерес для изучения сейсмичности Земли в глобальном масштабе.

Полученные из обработки Калифорнийской сети результаты определения смещений и деформаций позволили получить количественные оценки важных геодинамических характеристик, связанных как с подготовкой, так и с разрядкой напряжений в связи со значительным землетрясением Паркфилд. Эти результаты представляют определенный интерес для более ясного понимания сейсмических процессов и разработки методов прогноза землетрясений.

3.2. Анализ предвестников Суматранских мега-землетрясений 2004 года

В данном разделе диссертационной работы предпринята попытка выявления геодезических предвестников сильнейших землетрясений текущего столетия.

26 декабря 2004 года в 00:58:49 (UTC) разрушительное землетрясение произошло на дне океана в районе о. Суматры. Оно было вызвано разрядкой напряжений в зоне столкновения Австралийской и Индийской глобальных тектонических плит с Евразийской плитой (рис. 3.5) и стало причиной катастрофического цунами.

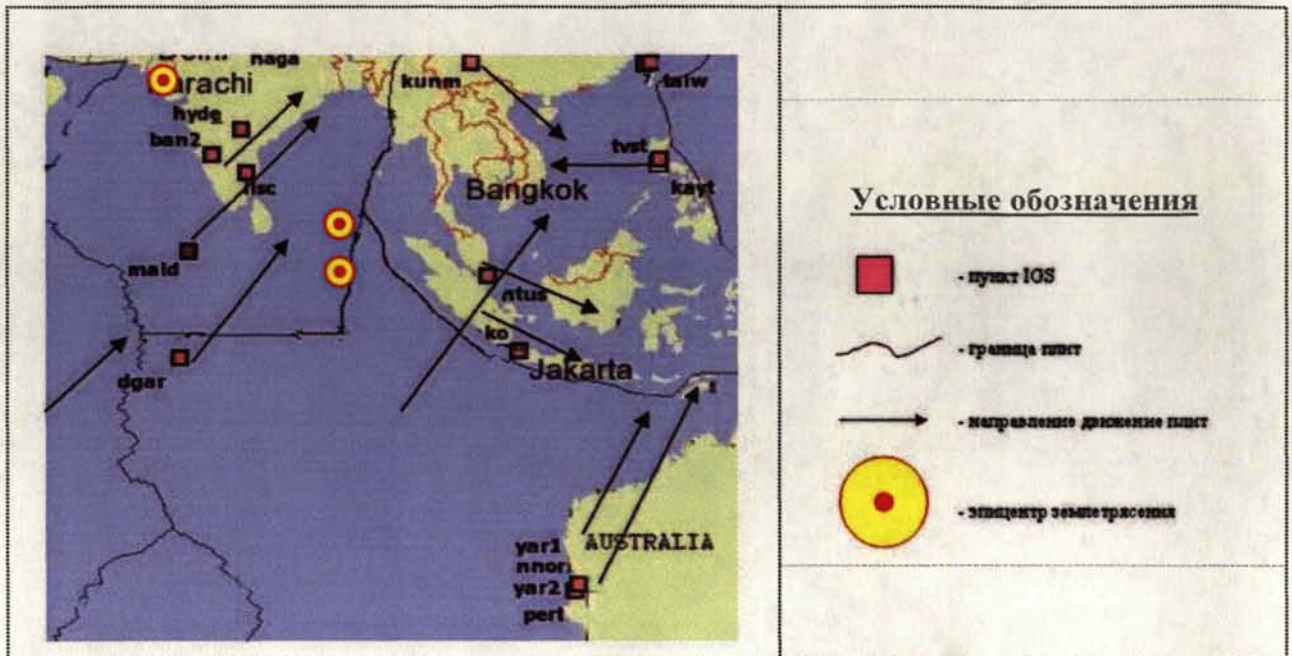


Рис. 3.5. Расположение пунктов IGS относительно эпицентров Суматранского землетрясения

Это четвертое наиболее мощное землетрясение в мире с 1900 и сильнейшее за последние 40 лет после Аляскинского землетрясения 1964 года.

Магнитуда землетрясения составила $M=9.0$; Координаты эпицентра: 3.244 N, 95.825 E; Глубина 10 км; Горизонтальная ошибка местоположения эпицентра +/-5.6 км.

Насчитывается около 4500 человек, погибших в Индонезии; 13000 человек в Шри-Ланке, 3500 в Индии, 866 в Таиланде, 52 на Мальдивах, 44 в Малайзии, 30 в Мьянмаре, 8 в Сомали и 2 в Бангладеш. Цунами присутствовало на побережьях острова Кокос, Кении и Сейшельских островов, перешло в Тихий океан, было зарегистрировано по западному побережью юга и севера Америки. Землетрясение

ощущали в Бангладеш, Индии, на Мальдивах, Майанмаре, Сингапуре, Шри-Ланке и Таиланде.

Огромная энергия этого землетрясения навела на мысль о возможности регистрации его предвестников по геодезическим данным, например, с использованием известной схемы Мещерякова (см. главу 1).

Попытаемся предварительно оценить область возможной регистрации предвестников Суматранского землетрясения. В работе [38] приведено эмпирическое соотношение:

$$\log r = 0,51M - 2,27, \quad (3.1)$$

где r – радиус зоны, в которой наблюдаются аномальные β -движения.

По данной формуле для Суматранского землетрясения 26 декабря 2004 года с $M=9.0$ радиус зоны регистрации предвестников получен равным около 220 км.

Однако более поздними исследованиями [8] показано, что зона аномалий деформаций коры перед землетрясением всегда больше, чем глубина фокуса этого землетрясения, а также может существенно превышать известные эмпирические оценки. К тому же, сейсмические волны регистрируются GPS измерениями на расстояниях в тысячи километров от эпицентра [21, 48, 56, 58, 70, 73], а беспрецедентная энергия сейсмического события, возможно, еще более увеличивает зону проявления предвестников. В этой связи отметим, что при выводе эмпирических формул радиуса проявления предвестников столь сильные землетрясения не использовались.

На этих основаниях был осуществлен выбор непрерывно действующих пунктов GPS измерений, расположенных в Индии и Австралии. Лишь в этих достаточно удаленных от землетрясения местах удалось отыскать короткие базовые линии постоянно действующих СРНС наблюдений.

Из архива SOPAC (см. главу 1), через Интернет, для поиска деформационных предвестников и их последующего анализа были получены результаты спутниковых измерений на пунктах международной службы IGS,

удаленных на 2-3 тысячи км от эпицентра: Iisc (iisc) и Bangalore (ban2) – Индия; New Norsia (nnor) и Perth (pert) – Австралия на период с 9 апреля 2004 года по 10 января 2005 года. В программном пакете обработки спутниковых измерений GPSurvey между этими пунктами были вычислены пространственные векторы базовых линий (их топоцентрические координаты dN, dE и dH). По результатам вычислений были получены графики изменения каждой компоненты по времени (рис. 3.6 – 3.7), на которые были нанесены моменты сильных землетрясений и их магнитуды ($M=6,0$ и более).

На графиках стрелками показаны моменты землетрясений, и их магнитуды, приведены средние квадратические отклонения СКО от построенных линейных трендов (красная линия – величина СКО).

Первичный визуальный анализ единых графиков позволил выявить общую для всех зону значимого изменения однородного хода деформаций между 270 и 280 сутками 2004 года, т.е. около трех месяцев до главного сейсмического толчка. Для количественного анализа каждый из общих графиков был разбит на две части (два периода): до и после визуально опознаваемого изменения хода деформаций (около 6 октября 2004 года).

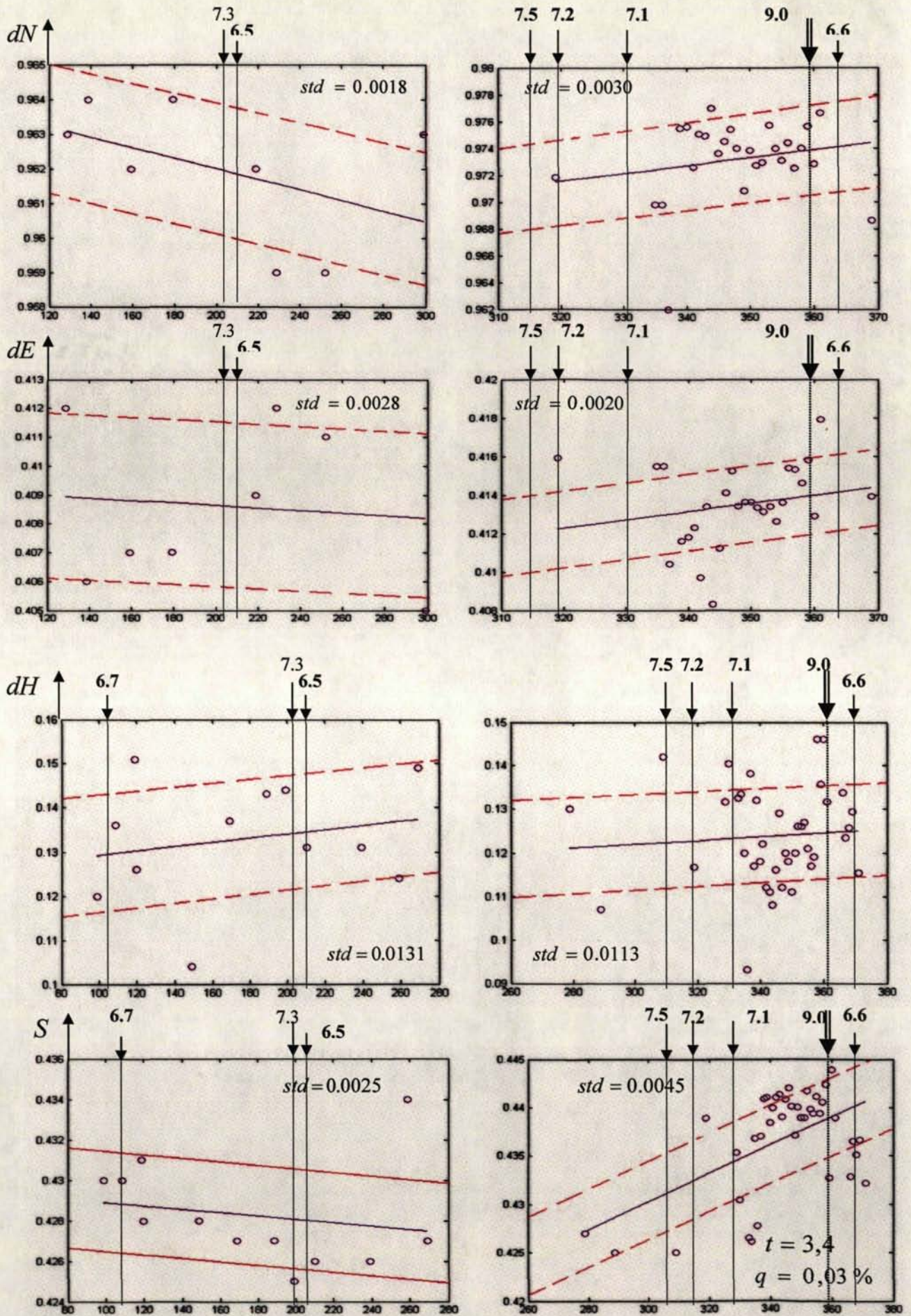


Рис. 3.6. Изменение компонент базовой линии (Австралия) по времени

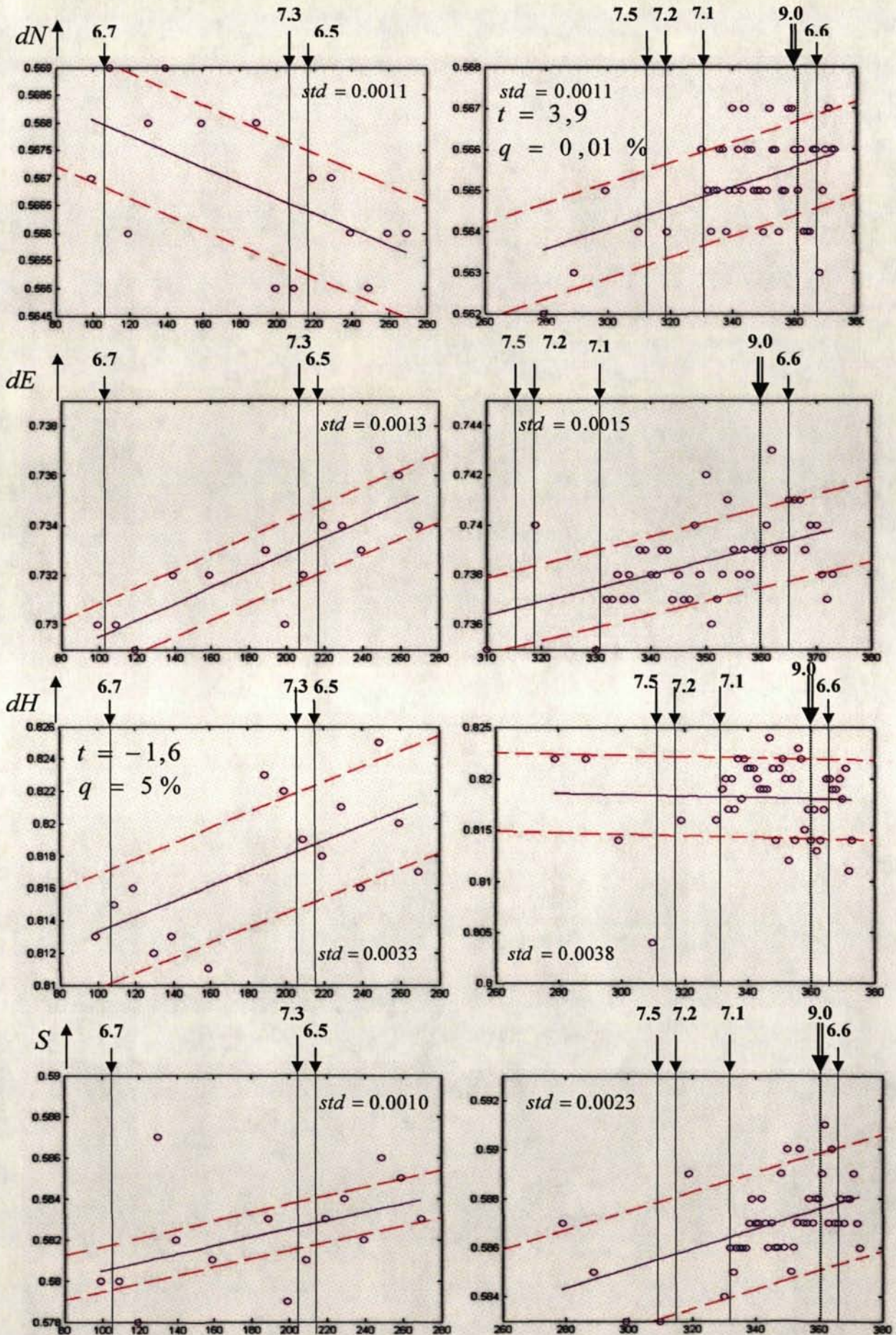


Рис. 3.7. Изменение компонент базовой линии (Индия) по времени

Анализ графиков позволил определить величину скоростей изменений соответствующих компонент и их ошибки (табл.3.1).

Таблица 3.1.

Значения скоростей и их ошибки

Расположение	Параметры, м	Периоды	Скорости (м в год)	Ошибки (м в год)
Австралия	dN	1	-0,0046	0,0033
		2	0,0214	0,0203
	dE	1	0,0064	0,0038
		2	0,0156	0,0140
	dH	1	0,0174	0,0237
		2	0,0094	0,0327
	S	1	-0,0031	0,0045
		2	0,0533	0,0158
Индия	dN	1	-0,0052	0,0022
		2	0,0091	0,0029
	dE	1	0,0122	0,0040
		2	0,0198	0,0063
	dH	1	0,0172	0,0069
		2	-0,0025	0,0096
	S	1	0,0075	0,0042
		2	0,0147	0,0042

По этим данным получена статистическая оценка критерия Стьюдента (3.2):

$$t = \frac{V_2 - V_1}{\sqrt{m_2^2 + m_1^2}}, \quad (3.2)$$

где V_1 – скорость первого периода, V_2 – скорость второго периода, а m_1 и m_2 – их ошибки.

Результаты вычислений приведены в табл. 3.2.

Результаты вычисления критерия Стьюдента

Линия	Параметр	t	$q, \%$	
<u>Австралия</u> PERT-NORR	dN	1.2621	0,03	
	dE	0.6350		
	dH	-0.1978		
	S	3.4285		
<u>Индия</u> BAN2-IISC	dN	3.8680	0.01	
	dE	1.0264		
	dH	-1.6544		5.00
	S	1.2174		

По каждому значению t из таблиц нормального распределения выбирается $q = (1 - P)100\%$. На рис. 3.6 – 3.7 приведены вычисленные t и q , для наиболее статистически значимых изменений.

Таким образом, нами получены оценки скоростей изменений компонент векторов базовых линий и осуществлена проверка гипотезы об их равенстве друг другу. В трех случаях установлено, что гипотеза о равенстве не может быть принята, т.е. изменения скоростей не могут быть объяснены случайными ошибками. Это особенно ярко проявилось для N компоненты индийской и S компоненты австралийской базовых линий.

Так как главную роль в механизме этого землетрясения играет, вероятно, Австралийская плита – ее скорость перемещения на север оценивается более 5 см в год, вероятный предвестник для соответствующей базовой линии может иметь следующее объяснение. За 3 – 9 месяцев отрезок PERT-NORR, ориентированный субмеридионально испытывал слабое сжатие со скоростью 3 мм в год, сменившееся растяжением до 5 см в год, что соответствует фазе β известной схемы Мещерякова

Для индийского отрезка, ориентированного по широте, аналогичная характеристика выявлена для N компоненты, что может свидетельствовать о

развороте короткой базовой линии, как жесткого участка во время активизации предсейсмических деформаций.

Данные табл. 3.2. показывают, что вероятность случайных ошибок невелика – до 5%, что говорит о статистической значимости обнаружения геодезических предвестников.

После включения в вычисления новых результатов спутниковых измерений, был получен график изменения компоненты S австралийской линии за полтора года (рис.3.4), на котором прослеживаются элементы схемы Мещерякова.

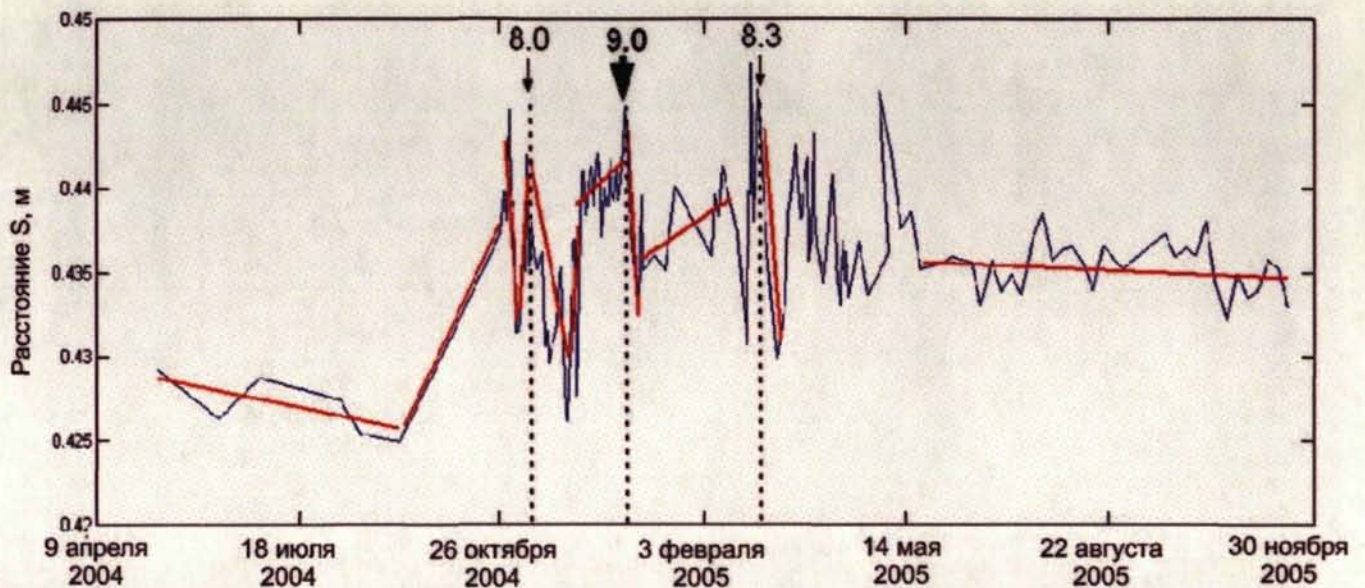


Рис. 3.8. Проявление предвестников Ю.А.Мещерякова для Новозеландского ($M=8.0$) и Суматранских ($M=9.0$ и 8.3) землетрясений на примере изменения расстояния S Австралийской линии (стрелками показаны моменты землетрясений с их магнитудами)

Обращает на себя внимание положительный аномальный короткопериодический экстремум в конце апреля 2005 года, явно не связанный с проявлением сейсмической активности.

Аналогичная ситуация имела место и в прошлом, например, на Алма-Атинском и на других геодинимических полигонах (см. Главу 1). Это можно объяснить тем, что имеются иные факторы, обуславливающие эти изменения, например, грубые ошибки измерений. Тем не менее, такое обстоятельство не

может являться препятствием продолжению исследований предвестников сильных землетрясений по результатам геодезических измерений. В настоящее время этот аномальный «выброс» и в среднем значительно более высокий уровень деформации в постсейсмический период по сравнению с ходом деформаций за месяцы до землетрясения можно объяснить продолжением сейсмотектонической активизации региона. Так в 17 сентября 2007 г. в районе Суматры произошло новое сильное и разрушительное землетрясение ($M > 8$).

3.3. Проверка гипотезы о физическом механизме наблюдаемых деформаций

Виду того, что контроль точности измерений одиночных базовых линий не столь эффективен, как в сетях СРНС наблюдений, сделаем попытку проверки реальности наблюдаемых деформаций, т.е. соответствию их временных изменений известным геотектоническим гипотезам.

Сегодня в среде ученых и специалистов по наукам о Земле еще сохраняются неоднозначные суждения о причинно-следственных взаимосвязях горизонтальных и вертикальных движений и деформаций земной поверхности. Сомнения в этом вопросе относятся к содержанию «великих геологических споров» о превосходстве вертикальных тектонических движений над горизонтальными и наоборот. Возможность больших горизонтальных перемещений материковых плит была обоснована в первой половине прошлого столетия Альфредом Вегенером [7]. Какое-то время именно эта гипотеза считалась доминирующей в глобальной тектонике и признавалась первичность горизонтальных движений. В тоже время не оспаривается существование вертикально направленных сил, вызывающих обширные поднятия целых регионов [66], и значительных погружений за счет гравитационного уплотнения земной коры. Сегодня современные геодезические измерительные средства глобального масштаба – сети постоянно действующих пунктов ГЛОНАСС/GPS наблюдений представляют ценнейший измерительный материал для проверки и

уточнения современных геотектонических и геофизических представлений не только в глобальном, но и в локальном масштабах.

Полученный в процессе диссертационной работы эмпирический материал, а именно многократные определения векторов базовых линий в наземных сетях СРНС, позволяет выполнить экспериментальную проверку вопроса о первичности тех или иных компонент наблюдаемых деформаций. Для этой цели можно использовать, например, базовую линию между пунктами сети GPS Австралии (PERT и NNOR), используемую в анализе предвестников Суматранских мегаземлетрясений, а также линию MOBN-MDVJ из Московской региональной геодеформационной сети.

Полученные временные изменения горизонтальных и вертикальных компонент вектора базовой линии могут быть следствием многих факторов, в том числе, и ошибок наблюдений, например за счет неточностей учета влияния тропосферы и ионосферы. В тоже время характер взаимных изменений превышений и наклонных расстояний позволяет нам предположить их физическую и тектоническую природу. На это указывает оценка корреляции между данными характеристиками.

В общем случае многокилометровые базовые линии СРНС-наблюдений пересекают несколько мелкоблоковых тектонических структур и соответствующих положительных и отрицательных форм рельефа. При сжатии-растяжении вдоль направления базовой линии должно происходить сокращение-удлинение измеряемого наклонного расстояния. За счет этого амплитуда вертикальных изменений форм рельефа должна увеличиваться-уменьшаться, если напряжения упругие. То есть, например, при сжатии положительные формы рельефа возрастут, а отрицательные опустятся, и наоборот.

Для проверки этого предположения можно воспользоваться статистическими оценками взаимной корреляции превышений и соответствующих наклонных расстояний базовых линий.

Для получения количественных оценок взаимосвязи вертикальных и горизонтальных деформаций были выполнены корреляционный и регрессионный

анализы соответствующих временных рядов. Для двух сопоставляемых пар временных рядов (Австралийской и Московской) вычислялись коэффициенты корреляции r и строились модели линейной регрессии $y=a+bx$. Для оценки степени «тесноты» корреляционной связи использовалась формула Романовского [36]

$$\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n}}.$$

Для каждой пары сопоставляемых рядов корреляционный анализ выполнен обычным образом, путем прямого сопоставления двух равночисленных рядов (строки таблицы с порядковыми номерами 1 и 3), и многократно путем сопоставления рядов одномоментных характеристик, удаляемых друг от друга последовательно на 1, 2, ..., 70 суток [60]. При этом в будущее смещались ряды изменений наклонного расстояния. Длина исследуемых рядов не превышает ста значений, поэтому в данном «скользящем» корреляционном анализе использовано 70 среднесуточных характеристик, чтобы каждый коэффициент корреляции был вычислен не менее чем по 29 парам значений. Таким образом, вычислялось 70 оценок коэффициентов корреляции и их стандартов, и из них выбирались минимальные значения. Это позволило установить временной взаимный сдвиг исследуемых процессов, обеспечивающий их наиболее тесную статистическую зависимость.

Таблица 3.3.

Корреляционная и регрессионная зависимости расстояний и превышений между пунктами

№№	Сравниваемые характеристики	Коэффициенты корреляции и их стандартные отклонения $r \pm \sigma_r$	Прямая регрессия		Обратная регрессия		Остаточные стандартные отклонения	
			a	b	a'	b'	M_h	M_s
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Расстояния и превышения базовой линии в Австралии	-0.10±0.12	-	-	-	-	-	-
2	Расстояния и превышения базовой линии в Австралии со смещением на 3 суток	-0.34±0.09	0.450	-0.096	0.658	-1.217	0.004	0.013
3	Расстояния и превышения базовой линии в Москве	-0.18±0.19	-	-	-	-	-	-
4	Расстояния и превышения базовой линии в Москве со смещением на 380 суток	-0.19±0.15	0.002	-0.031	-0.028	-1.162	0.004	0.022

Степень изменения коэффициентов корреляции в скользящем временном окне для каждой из базовых линий продемонстрирована на рисунках 3.9(а) и 3.10(а). Характер линейной зависимости между изменениями расстояний и превышений показан на рисунках 3.9(б) и 3.10(б).

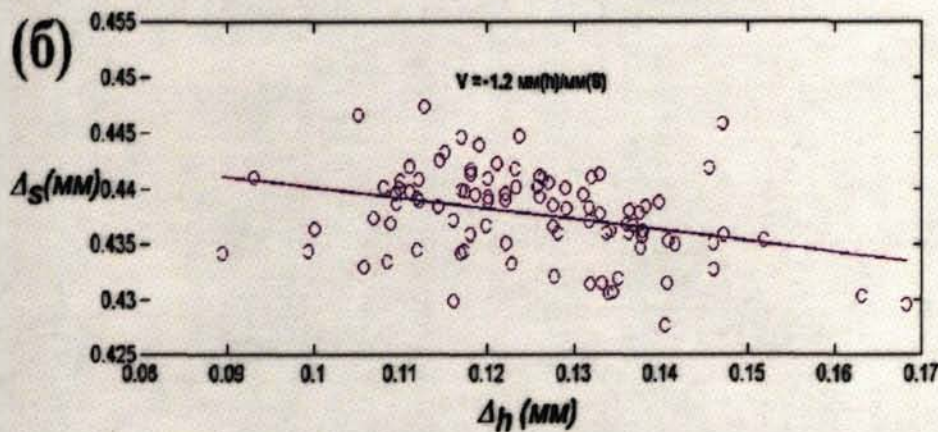
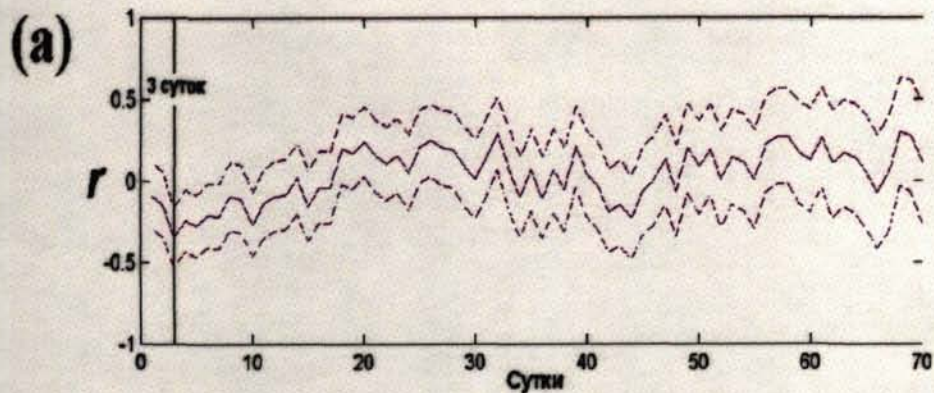


Рис.3.9. Статистическая взаимосвязь временных изменений расстояний и превышений для Австралийской базовой линии. (а) – изменение коэффициентов корреляции в скользящем временном окне. Пунктиром показаны интервалы 1σ . (б) – характер увеличения превышений по мере сокращения расстояний.

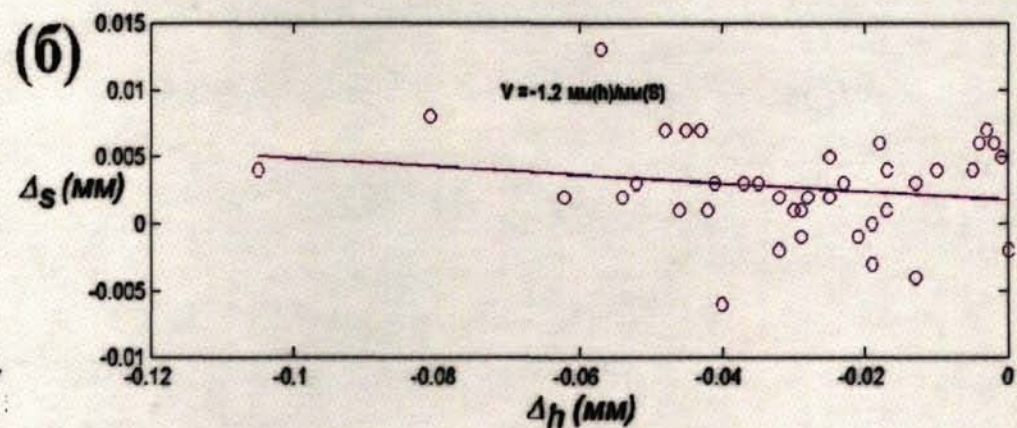
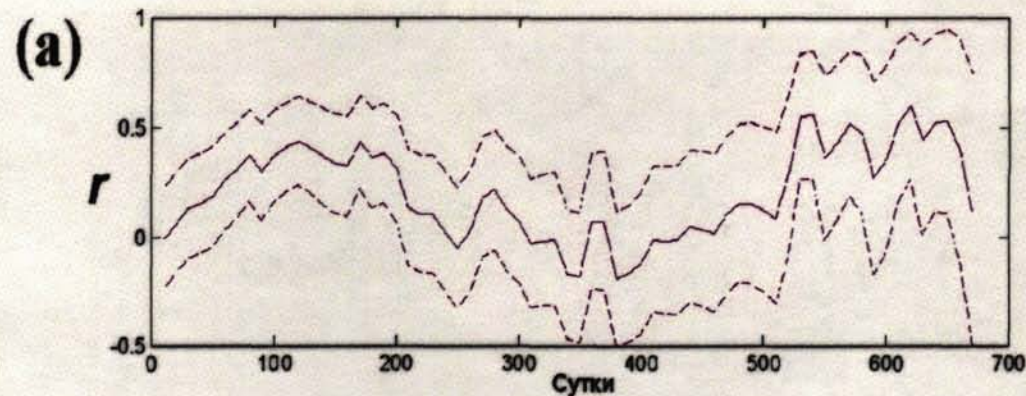


Рис.3.10. Статистическая взаимосвязь временных изменений расстояний и превышений для Московской базовой линии. (а) – изменение коэффициентов корреляции в скользящем временном окне. Пунктиром показаны интервалы 1σ . (б) – характер увеличения превышений по мере сокращения расстояний.

Сопоставление полученных оценок показывает, что учет временных смещений на трое суток приводит к значительному усилению корреляционной зависимости между исследуемыми временными рядами Австралийской базовой линии. Коэффициент корреляции увеличивается более чем в три раза и становится статистически значимым. Для Московской базовой линии смещение, незначительно усиливающее отрицательную корреляцию, составило около одного года (~380 суток). Данный ряд не демонстрирует явной запаздывающей реакции превышений на изменение расстояния (растяжение/сжатие). Это может быть объяснено тем, что его временное разрешение 10 суток, тогда как Австралийский ряд содержит данные с интервалом последовательной регистрации 1 сутки. В то же время, квазипериодическое поведение коэффициента корреляции и его отрицательное значение для Московского ряда не противоречат предположениям о зависимости вертикальных деформаций от горизонтальных и об их реальной физической природе. В этой связи оба ряда коэффициентов корреляции испытывают околопериодические изменения с периодами ~1 месяц и ~1.3 года, для Австралийского и Московского временных рядов, соответственно. Т.е. наблюдаются месячные и годовые периодичности, характерные, например, для приливных деформаций земной поверхности и Чандлеровского колебания оси вращения Земли. Характеристики периодических изменений компонент базовых линий требуют специального и более тщательного анализа.

Примечательным является согласование значений скорости изменения превышений с изменением расстояний. Они в обоих случаях составляют значение -1.2. Т.е. при сокращении базовой линии на 1 мм превышение возрастает на 1.2 мм.

Для предварительной оценки выполнено моделирование по методу В.И.Кафтана [17]. Получены кинематические модели наблюдаемых изменений корреляционной зависимости расстояний и превышений, представленные на рис.3.11. и 3.12. Модели представляют собой сумму линейной и периодической компонент.

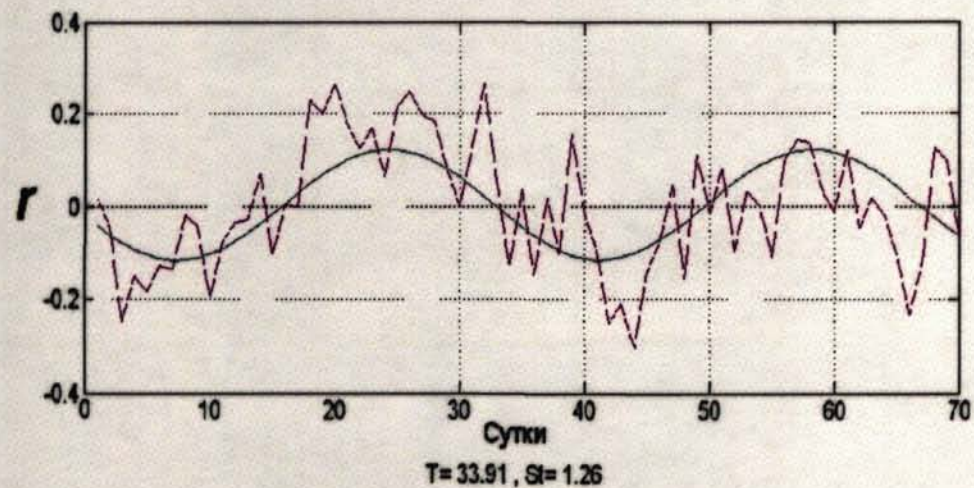
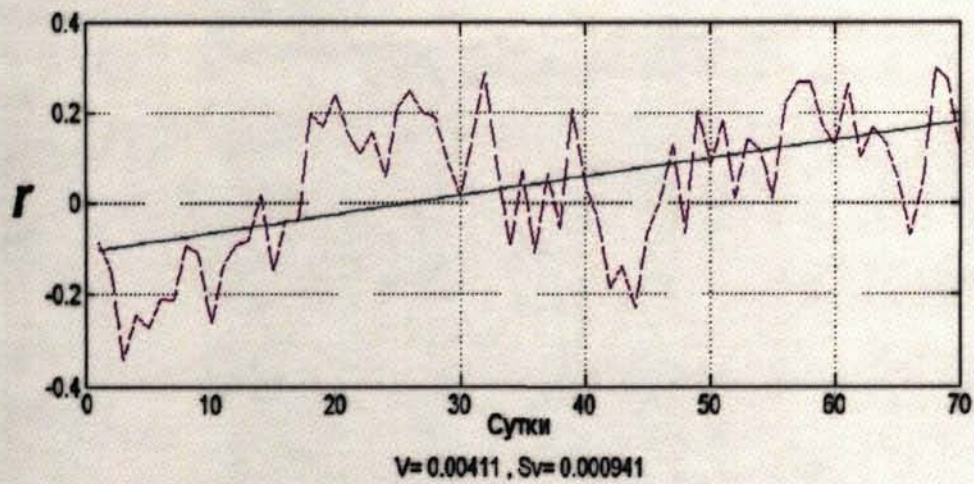


Рис. 3.11. Трендовая и периодическая компоненты модели изменения коэффициента корреляции для Австралийской линии (линейный тренд и околосесячный период).

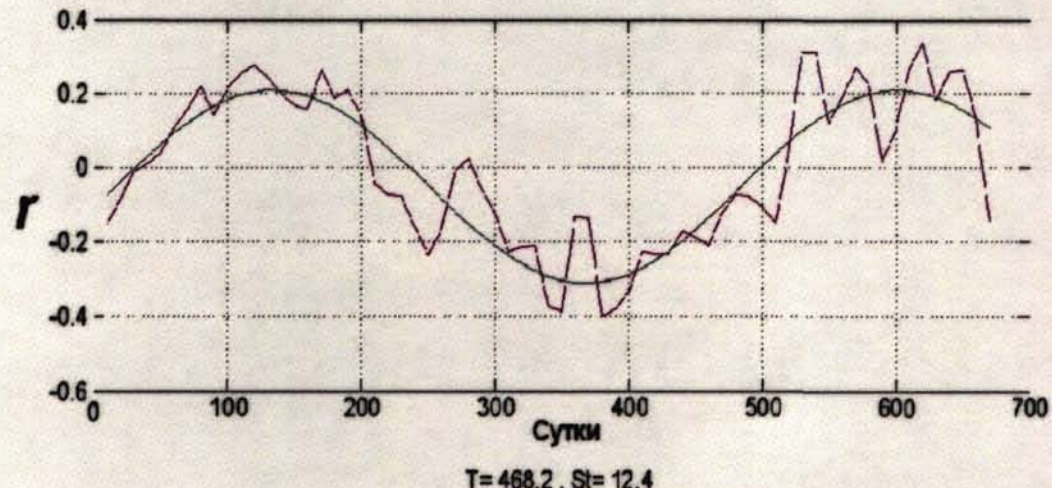
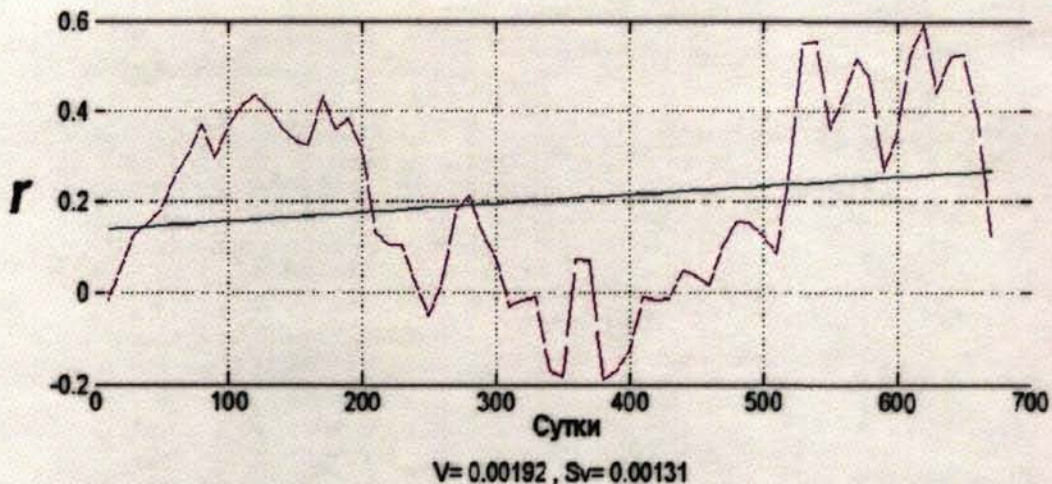


Рис. 3.12. Трендовая и периодическая компоненты модели изменения коэффициента корреляции для Московской линии (линейный тренд и околосесячный период)

Выполненный анализ статистически подтверждает гипотезу о зависимости вертикальных деформаций от горизонтальных растяжений/сжатий. Геометрически данная гипотеза представлена на рис. 3.13, где наглядно продемонстрировано увеличение превышений h при сокращении расстояний S между моментами времени T_1 и T_2 .

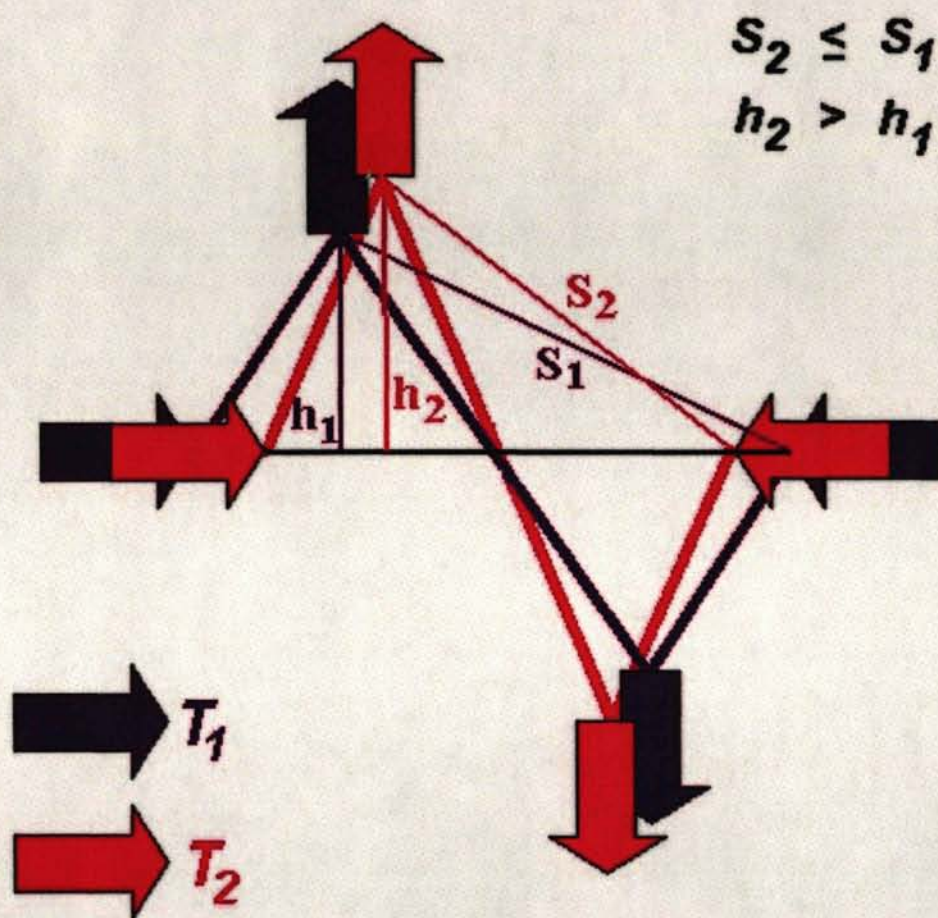


Рис. 3.13. Характер изменения превышений в зависимости от горизонтальных растяжений-сжатий.

Необходимо отметить, что в случае расположения базовой линии на едином консолидированном «жестком» блоке сокращение расстояния за счет сжатия не происходит, но амплитуда превышения возрастает. Это соответствует «шарнирному» механизму движения блока, показанному, например, в работе [61] для случая Спитакского землетрясения 1988 г. На рис. 3.13 такая ситуация

соответствует начальному и конечному прямым отрезкам общей ломаной кривой. Таким образом, в общем случае расстояние будет меньше или равно его предшествующему значению с увеличением превышения. Это несколько ослабляет степень корреляционной зависимости, но не изменяет ее отрицательный знак.

3.4. Выводы по Главе 3

Выполненные в рамках данной главы исследования показывают, что

- Регистрация предвестников удаленных сильных землетрясений по наблюдениям коротких базовых линий GPS возможна;
- Анализ фактических измерительных данных в районе Паркфилдского землетрясения 2004 года показал наличие деформационного предвестника за 7 месяцев до сейсмического события. Получены характеристики движений и деформаций сейсмогенного разлома Сан-Андреас до, во время и после землетрясения. Оценен последующий крип вскрывшегося разлома, составляющий около 4 см/год. За месяцы до землетрясения криповые смещения на контролируемом участке разлома практически отсутствовали. Скорость крипа по разным источникам на других участках разлома составляет 1-5 см/год [34; 71].
- За 3 месяца до Суматранского землетрясения наблюдались аномальные изменения пространственных векторов;
- Между изменениями наклонных расстояний и соответствующих превышений существует статистически значимая отрицательная корреляция, не свойственная случаю влияния ошибок измерений
- В результате исследований определена временная задержка в изменениях превышений по отношению к изменениям наклонных расстояний Австралийской базовой линии, равная примерно 3 суткам
- Полученные статистические оценки подтверждают гипотезу о первичности (в данном конкретном случае) горизонтальных деформаций и свидетельствуют об

обусловленности наблюдаемых изменений реальными геодинамическими процессами;

- Непрерывные GPS/ГЛОНАСС-измерения на коротких базовых линиях позволяют получать оперативную информацию о геодинамической активности региона;
- Короткие базовые линии должны являться необходимым элементом комплексной сети современного геодинамического полигона Роскартографии;
- На геодинамическом полигоне следует устанавливать не менее двух постоянно действующих GPS/ГЛОНАСС пунктов, связанных выделенным каналом с центром сбора и анализа данных;
- Полученные результаты обеспечивают важную информацию о механизме подготовки сильнейшего землетрясения и требуют продолжения начатых исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы по теме диссертации автором выполнены исследования и разработаны методики, обеспечивающие усовершенствование существующих подходов к анализу деформаций с использованием современных геодезических методов, получены новые эмпирические характеристики, способствующие более ясному объяснению возможных причин наблюдаемых деформаций земной поверхности.

Изучены и проанализированы современные тенденции геодезических исследований движений и деформаций земной поверхности, а также современные научные представления о геодеоформационных процессах по данным геотектонических и геофизических исследований. Анализ слабых мест современных подходов позволил определить генеральное направление исследований и разработок: совершенствование методов определения движений и деформаций на основе использования интенсивно развивающихся высокоточных и наиболее оперативных СРНС измерений. Основное внимание уделено разработке новых и усовершенствованию существующих методик математической обработки временных разностей спутниковых геодезических измерений в локальных фрагментах сетей постоянно действующих СРНС пунктов в составе ФАГС России, а также международных глобальных геодезических сетей.

В процессе работы над диссертацией изучены, освоены и использованы в исследованиях и разработках

- современные методы матричного анализа, корреляционного и регрессионного анализа, статистической проверки гипотез, наименьших квадратов (расширенного на зависимые измерения), математического моделирования

- современные компьютерные средства обработки и графического представления данных, программное обеспечение обработки спутниковых

геодезических измерений: GPSurvey, Trimble Geomatic Office, Pinnacle, Bernese 4.2, MATLAB 6.5, Microsoft Office и др.

- современные спутниковые измерительные средства фирм производителей геодезической аппаратуры: Trimble Navigation, TPS, JNS, ЭОМЗ Роскартографии и др.

- современные методы спутниковых измерений в геодезических сетях ФАГС, ВГС и СГС-1.

В результате работ по теме диссертации автором получены оригинальные научно-технологические результаты: методики обработки и анализа результатов спутниковых геодезических измерений, их обоснование, оценки точности и эффективности, характеристики движений и деформаций, а также их изменений во времени в различных регионах мира в связи с сильнейшими сейсмическими событиями.

Актуальность результатов исследований и разработок связана с необходимостью повышения безопасности жизнедеятельности и экономического развития общества в условиях возрастания числа природных и техногенных катастроф, а также совершенствования эффективности и точности методов и средств геодезических измерений.

Практическая ценность выполненных исследований и разработок заключается в обеспечении повышения точности и эффективности использования непрерывных спутниковых геодезических измерений, а также в совершенствовании методической основы выполнения геодезических работ на геодинамических полигонах Роскартографии.

Достоверность полученных результатов обеспечивается процедурами контроля вычислений в алгоритме разработанного программного обеспечения по разным формулам, с использованием леммы Гаусса, использованием статистических характеристик точности и эффективности многократных геодезических измерений, а также опубликованием в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых Высшей Аттестационной Комиссией Российской

Федерации, и публичным обсуждением на научных и научно-технических конференциях и семинарах.

К защите представляются следующие результаты работ.

- Методика определения векторов смещений пунктов земной поверхности по данным многократных спутниковых (СРНС) измерений.
- Методика определения деформаций земной поверхности на основе определяемых векторов смещений.
- Алгоритм программы вычисления векторов смещений и деформаций земной поверхности.
- Предложения по применению коротких базовых линий и геодезических четырехугольников СРНС измерений для контроля движений и деформаций.
- Результаты определения деформаций земной поверхности и их изменений во времени в различных регионах Земли.
- Статистическое обоснование физической природы наблюдаемых изменений и гипотезы о первичности горизонтальных деформаций для рассмотренных случаев.
- Статистическое обоснование возможности регистрации предвестников сильных землетрясений по СРНС наблюдениям.

Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в научно-технических журналах и сборниках статей и докладов.

1. Докукин П.А. Оценка возможности регистрации предвестников удаленных землетрясений по GPS измерениям / Проблемы землеустройства и кадастров: Сборник научных статей ежегодной конференции молодых ученых и специалистов Государственного университета по землеустройству / Сост. Сутугина И.М. – М.: ГУЗ, 2005. – с. 105-114.
2. Докукин П.А., Кафтан В.И. Непрерывные GPS/ГЛОНАСС измерения коротких базовых линий с целью выявления предвестников сильных землетрясений // Геодезия и картография. – 2006 – №2. – 7-10 с.

3. Докукин П.А. Определение временного центра пункта высокоточной геодезической сети GPS-измерениями // Землеустройство, кадастр и мониторинг. – 2006 – №2.- с. 104-106
4. Докукин П.А. Некоторые вопросы применения спутниковых геодезических измерений при изучении геологических процессов / Актуальные вопросы землепользования, землеустройства и кадастров: Сборник статей. – М.: МГИУ, 2007. – с. 84-89
5. Батраков Ю.Г., Докукин П.А. Разрешение неоднозначности радиодальномеров и спутниковых приемников // Геодезия и картография. – 2006 - №6. – 19-24 с.
6. Мельников А.Ю., Докукин П.А. Исследование спутниковых приемников фирмы Javad / Актуальные вопросы землепользования, землеустройства и кадастров: Сборник статей. – М.: МГИУ, 2007. – с. 205-211
7. Кафтан В.И., Докукин П.А. Определение смещений и деформаций по данным спутниковых геодезических измерений // Геодезия и картография. – 2007 - №9. – 18-22 с.
8. Докукин П.А., Докукина К.А. Мониторинг современных экзогенных геологических процессов с использованием геологических и геодезических методов на примере территории научно-учебной базы «Горное» (Зарайский район Московской области). Изменяющаяся геологическая среда: пространственные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов: Материалы Международной конференции. Том 1: г. Казань; 13-16 ноября, 2007 г. / Сост. Н.Н.Равилова. – Казань: Изд-во Казанск. Гос. Ун-та, 2007. – 31-35 с.

Опробование результатов выполнено на научных конференциях и семинарах:

1. Сагитовские чтения 31 января – 1 февраля 2005 года, ГАИШ МГУ, Москва, 2005
2. Конференция молодых ученых «Проблемы землеустройства и кадастров», ГУЗ, Москва, 20 апреля 2005

3. Научный семинар геодезического отдела ЦНИИГАиК, Москва, 1 июня 2005 года.
4. Совещание-семинар по проблемам метрологического обеспечения топографо-геодезического и картографического производства Роскартографии, ЦНИИГАиК, Москва, 28 ноября – 1 декабря 2005 года
5. Конференция молодых ученых и специалистов «Всероссийская школа молодых ученых, посвященная современным проблемам землепользования, землеустройства и кадастров», ГУЗ, Москва, 29 ноября 2006 года.
6. Международная геологическая конференция «Изменяющаяся геологическая среда», Казанский государственный университет, Казань, 13-16 ноября 2007 г.
7. Сагитовские чтения 4 – 5 февраля 2008 года, ГАИШ МГУ, Москва

ЛИТЕРАТУРА

1. Аллисон А., Палмер Д. Геология. Наука о вечно меняющейся Земле: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 568 с
2. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Элементы математического моделирования в программных средах MATLAB 5 Scilab.- СПб.: Наука, 2001.- 286 с.
3. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т2. Монография. ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006 – 360 с.
4. Батраков Ю.Г., Докукин П.А. Разрешение неоднозначности радиодальномеров и спутниковых приемников. // Геодезия и картография. – 2006 - №6. – с.19-24
5. Белоусов В.В. Геотектоника, М.: Издательство Московского университета, 1976
6. Бовшин Н.А., Зубинский В.И., Демьянов Г.В., Кафтан В.И., Майоров А.Н. , Шестернев И.Р., Временное руководство по обработке спутниковых наблюдений при построении основных геодезических сетей (проект). ЦНИИГАиК, 2000. – с. 4-41
7. Вегенер А. Происхождение континентов и океанов.- Л.: Наука, 1984.- 285 с.
8. Ву Иилин. Зона аномалий деформаций земной коры перед сильными землетрясениями, Тезисы докладов 7-го международного симпозиума по современным движениям земной коры, АН ЭССР, Таллин, 1986 г. стр. 34-35
9. Геодезические методы изучения деформаций земной коры на геодинамических полигонах (Методическое руководство).- М.: ЦНИИГАиК, 1985.- 113 с.
10. Геологический словарь. В 2 т., М.: «Недра», 1973
11. Докукин П.А. Некоторые вопросы применения спутниковых геодезических измерений при изучении геологических процессов / Актуальные вопросы землепользования, землеустройства и кадастров: Сборник статей. – М.: МГИУ, 2007. – с. 84-89

12. Докукин П.А. Определение временного центра высокоточной геодезической сети GPS-измерениями // Землеустройство, кадастр и мониторинг. – 2006 - №2. – 104-106 с.
13. Докукин П.А. Оценка возможности регистрации предвестников удаленных землетрясений по GPS-измерениям / Проблемы землеустройства и кадастров: Сборник научных статей ежегодной конференции молодых ученых и специалистов Государственного университета по землеустройству / сост. Сутугина И.М. – М.: ГУЗ, 2003. – 105-114 с.
14. Докукин П.А., Кафтан В.И. Непрерывные GPS/ГЛОНАСС измерения коротких базовых линий с целью выявления предвестников сильных землетрясений // Геодезия и картография. – 2006 - №2. – 7-10 с.
15. Есиков Н.П. Современные движения земной поверхности с позиций теории деформации.- Новосибирск, Наука, Сиб. отделение, 1991.- 226 с.
16. Кафтан В.И. Анализ устойчивости геодезических пунктов и определение векторов смещений земной коры // Геодезия и картография.- 1986.- №5.- С. 9-13
17. Кафтан В.И. Временной анализ геопространственных данных: Кинематические модели, Автореферат дисс. на соиск. ученой степени доктора технических наук, МГУПС, Москва, 2003, 48 с.
18. Кафтан В.И., Докукин П.А. Определение смещений и деформаций по данным спутниковых геодезических измерений // Геодезия и картография. – 2007 - №9. – с.18-22
19. Кафтан В.И., Серебрякова Л.И. Геодезические методы решения геодинамических задач (современные движения земной коры), М., ВИНТИ – Геодезия и аэросъемка, 1990. -
20. Короновский Н.В. Общая геология, Издательство Московского университета, 2003
21. Коуба Я. Об особенностях GPS-измерений // Геодезия и картография. – 2004. - №9. – с.27-28.
22. Кузьменко Ю.Т., Гордаспиков В.Н., Гаврюшова Е.А. и др. Тектоника центральной части Русской плиты. Объяснительная записка к структурно-

- тектонической карте центральных районов Русской плиты масштаба 1:1000000. ПГО «Центргеология». М., ВИЭМС, МГП «Геоинформарк», 1991, 120 с.
23. Кучай В.К., Захаров В.К. Геодезическая основа для изучения современной динамики Земли.// Геология и геофизика, № 5, 1984 “Наука”, АН СССР, Сиб. отд., с. 17 - 24
 24. 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, 2004 - http://www.sat.emsd.ru/lib_sbstat/pdf/str113.pdf
 25. Левин В.Е., Прилепин М.Т., Баранова С.М. К проблеме обнаружения деформационных предвестников землетрясений – Геофизический мониторинг Камчатки. Материалы научно-технической конференции, 17-18 января 2006 г., Петропавловск-Камчатский / Отв. ред. В.Н. Чебров, Г.Н. Копылова. Петропавловск-Камчатский: «Геофизическая служба РАН», 2006 - http://www.sat.emsd.ru/konf060117lib/pdf/08_levin%20etal.pdf
 26. Мельников А.Ю., Докукин П.А. Исследования точности измерения расстояний спутниковой геодезической аппаратурой фирмы Javad / Актуальные вопросы землепользования, землеустройства и кадастров: Сборник статей. – М.: МГИУ, 2007. – с. 205-211
 27. Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии / Асада Т., Исибаси К., Матсуда Т. и др. Под ред. Т. Асада. – М: Недра, 1984.- 312 с.
 28. Мещеряков Ю.А. Изучение современных вертикальных движений земной коры и проблема прогноза землетрясений. Сб. «Современные движения земной коры», М, 1968, №3.
 29. Могги К. Предсказание землетрясений.- М.: Мир, 1988.- 383 с.
 30. Муха В.С., Служанова Т.В. Статистические методы обработки данных: Лабораторный практикум. – Мн.: БГУИР, 2004. – 98 с.

31. Остач ОМ. О развитии геодезических работ на геодинамических полигонах // Геодезия и картография.- 1983.- №1.- с. 19
32. Прилепин М.Т. Использование глобальных спутниковых систем для изучения деформаций земной коры.//Динамика континентальной литосферы' Подвижные пояса. Под ред. Н.А.Логачева и В.С.Хромовских. М., Недра, 1994.
33. Прилепин М.Т. Концепция использования глобальных спутниковых систем для прогноза землетрясений // Вестн. ОГГГН РАН: Электр. науч.-инф. журн. 1998. № 1(3). С. 202-213.
34. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений.- М.: Мир, 1979.- 389 с.
35. Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология.- Москва: Издательство иностранной литературы, 1963.- 671 с.
36. Романовский В.И. Применение математической статистики в опытном деле. М.-Л., Гостехиздат, 1947
37. Смирнов Н.В., Белугин Д.А. Теория вероятностей и математическая статистика в приложении к геодезии. – М.: «Недра», 1969, 379 стр.
38. Состояние и перспективы развития геодезических работ в сейсмоопасных районах для целей сейсмологии и сейсмостойкого строительства, М, ОНТИ ЦНИИГАиК, 1976, 29 стр.
39. Стеблов Г.М., Фролов Д.И., Куксенко В.С. Кинематика движения материков Земли // Физика твердого тела, 2005, том 47, вып.6, с.1009-1014
40. Татевян С.К. Использование спутниковых позиционных систем для изучения региональной геотектоники // Кинематика и физика небесных тел – 1999 - №1, ГАО, Киев, Украина,
41. Татевян С.К., Кузин С.П., Ораевская С.П. Использование спутниковых позиционных систем для геодинамических исследований. // Геодезия и картография. – 2004 – № 6. – с. 33-44.
42. Татевян С.К. Роль космической геодезии в изучении современной геодинамики / Тезисы Международной научно-технической конференции "МИИГАиК-220", 1999, М.: МГУГИК, с. 10.

43. Татевян С.К. Роль спутниковых локационных измерений в изучении современной геодинамики. / Сб. Изучение Земли из Космоса, М.: Наука, 1999, №1, стр. 87.
44. Уломов В.И. О роли горизонтальных тектонических движений в сейсмогеодинамике и прогнозе сейсмической опасности // Физика Земли. – 2004. – №9. – с. 14-30
45. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики: Учебник. – М.: КДУ, 2005 – 560 с.
46. Шароглазова Г.А. Применение геодезических методов в геодинамике. Учеб. Пособие. – Новополюк: ПГУ, 2002. – 192 с.
47. Aydan O. Implications of GPS-derived displacement, strain and stress rates on the 2003 Miyagi-Hokubu earthquakes // Bulletin of Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University, 30, 2004, pp. 91-102
48. Bock Y.L., Prawirodirdjo T.I. Melbourne – Detection of arbitrarily large dynamic ground motions with a dense high-rate GPS network, Geophys. Res. Lett., Vol. 31, L06604, 2004
49. Deformation of the North American plate interior from a decade of continuous GPS measurements / E.Calais, J.Y.Han, C.DeMets, J.M.Nocquet // Journal of geophysical research, vol. 111, 2006
50. Erol S., Erol B., Ayan T. A General review of the deformation monitoring techniques and case study: analyzing deformations using GPS/Levelling - <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm7/papers/123.pdf>
51. Even-Tzur G. GPS vector configuration design for monitoring deformation network in the north of Israel // Session IV: Earth crustal deformation, earthquakes, and regional movements - http://rincon.gps.caltech.edu/FIG10sym/pdf/Session%20IV_Paper%204.pdf
52. Fotiou A., Kagiadakis V., Pikridas C., Rossikopoulos D. Geodetically derived displacements and crustal deformation analysis: application in the Volvi area // Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini,

Greece, 2003 - <http://www.fig.net/commission6/santorini/A-TECTONOPHYSICS%20&%20SEISMOLOGY/A3.pdf>

53. Frank F.C. Deduction of earth strain from survey data // Bull. Seismol. Soc. Am.- 1966, Vol.56.- p.35-42
54. Haslinger C., Stangl G. Time Series of GPS Stations in the Near East / Report on the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF) held in Vienna, 1-4 June 2005. Publication No.15, Frankfurt am Main, 2006, p.98-101
55. Hickman S., Zoback M., Ellsworth W. Introduction on special section: Preparing for the San Andreas Fault Observatory at Depth. Geophys. Res. Lett., 31, L12S01, 2004
56. Irwan M., Kimata F., Hirahara, Sagiya T., Yamagiwa A. Measuring ground deformations with 1-Hz GPS data: the 2003 Tokachi-Oki earthquake (preliminary report). Earth Planets Space, 56, 389-393, 2004 - <http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/~irwan/irwaneps/eps3.pdf>
57. Jade S., Mukul M., Parvez I.A., Ananda M.B., Dileep Kumar P., Gaur V.K. Estimates of coseismic displacement and post-seismic deformation using Global Positioning System geodesy for the Bhuj earthquake of 26 January 2001
58. Ji C., Larson K.M., Tan. Y, Hudnut K.W., Choi K. Slip history of the 2003 San Simeon earthquake constrained by combining 1-Hz GPS, strong motion, and teleseismic data, Geophys. Res. Lett., Vol. 31, L17608, 2004
59. Johnson K.M., Burgmann R., Larson K. Frictional Properties on the San Andreas Fault Near Parkfield, California Inferred from Models of Afterslip Following the 2004 Earthquake / Revision submitted to BSSA Special Volume on Parkfield January 26, 2006
60. Kaftan V.I., Krainev M.B.. Estimation of the effect of solar activity on the intensity of galactic cosmic rays.- Geomagnetism and Aeronomy.- 2007.- V.47.-No 2.- p.137-148
61. Kaftan V.I., Ostach O.M. Vertical land deformation in Caucasus region, Earthquake Prediction Research.- 1996.- Vol.5, 235-245

62. Kontny B. Tectonic movements monitoring of Sudetic marginal fault using short GPS baselines, 2001
63. Kogan, M.G., R. Bürgmann, N.F. Vasilenko, C.H. Scholz, R.W. King, A.I. Ivaschenko, D.I. Frolov, G.M. Steblov, C.U. Kim, and S.G. Egorov, The 2000 Mw 6.8 Uglegorsk earthquake and regional plate boundary deformation of Sakhalin from geodetic data, *Geophys. Res. Lett.*, 30(3), 1102, doi 10.1029/2002GL016399, 2003
64. Kouba J. A Guide to using International GPS Service (IGS) products / Geodetic Survey Division Natural Resources Canada, 2002
65. Kouba J., Ray J., Watkins M.M. IGS reference frame realization / IGS Analysis Center Workshop, Darmstadt, Germany, Feb. 9-11, 1998 - <http://gauss.gge.unb.ca/IGS/drafts/posp3.pdf>
66. Lambeck K., Smither C., Ekman M. Tests of glacial rebound models for Fennoscandia based on instrumented sea- and lake-level records.- *Geophysical Journal International*.- 1998.- V.135.- 375-387
67. Langbein J., Bock Y. High-rate real-time GPS network at Parkfield: Utility for detecting fault slip and seismic displacements / *Geophys. Res.*, 31, L15S20, doi:10.1029/2003GL019408, 2004
68. Langbein, J. Evaluation of some software measuring displacement using GPS in real-time: U.S. Geological Survey Open-File Report 2006-1235, 35 p. - <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1235>
69. Langbein, J., Borchardt R., Dreger D., Fletcher J., Hardebeck J., Hellweg M., Ji C., Johnston M., Murray J., Nadeau R., Rymer M., Treiman J. Preliminary report on the 28 September 2004, M= 6.0 Parkfield, California earthquake, *Seismological Research Letters*.- 2005.- 76(1).- p. 10 – 26
70. Larson K. M. Resolving Seismic and Early Postseismic Deformation: The 2003 Tokachi-Oki Earthquake / Department of Aerospace Engineering Sciences University of Colorado Boulder, USA - http://xenon.colorado.edu/larson_eps_2007.pdf

71. Murray, J. R., Segall P. Spatiotemporal evolution of a transient slip event on the San Andreas fault near Parkfield, California, *J. Geophys. Res.*, 110, 2005
72. O'Keefe K., Fortes L.P. Using Permanent GPS Stations to Detect the 2001 Nisqually Earthquake, 2001
73. Ohta Y., Irwan M., Kimata F., Ito T., Tabei T., Agustan, Sugiyanto D., Kusumah M.A., Abidin H.Z., Sagiya T., Hirahara K. Large surface wave of Sumatra earthquake captured by the long baseline kinematic analysis of 1-Hz GPS data, poster presented at EGU 2005 in Vienna
74. On the Use of Space Techniques for Asia-Pacific Regional Crustal Movements Studies, Moscow, GEOS, 2003. – 269 p.
75. Ostach O.M., Pellinen L.P. Some results of crustal deformation studies carried out at geodynamic testing grounds of GUGK / 6-th Int. Symp. Geod. And Phys. Earth, Potsdam, Aug. 22-27, 1988: Abstr., Berlin. - 1989.- P.64
76. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman // *Geophys. J. int.* 157, 2004. – p.381-398.
77. Proceedings of the International Seminar "On the Use of Space Techniques for Asia-Pacific Regional Crustal Movements Studies", APSG-IRKUTSK 2002, Irkutsk, Russia, 5-10, August, 2002, Edited by Suriya Tatevian, Nicolai Sorokin, Svetlana Oraevskaya (in English) c. 36-45.
78. Smith B.R., Sandwell D.T. A model of the earthquake cycle along the San Andreas Fault System for the past 1000 years, *J. Geophys. Res.*, 111, B01405, doi:10.1029/2005JB003703.
79. Sohne W., Schwahn W., Ihde J. Earth surface deformation in Germany following the Sumatra Dec 26, 2004 earthquake using 1 Hz GPS data / Report on the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF) held in Vienna, 1-4 June 2005. Publication No.15, Frankfurt am Main, 2006
80. Surveying with Global Positional System (GPS) / R.W.King, E.G.Masters, C.Rizos, A.Stolz, J.Collins. Ferd. Dummer Verlag, Bonn, 1987, pp. 128.

81. Terada T., Miyabe N. Deformation of the earth crust in Kwansai districts and its relation to the orographic feature.- Bull. Earthquake Res., Inst., Univ.- Tokyo, 1929, Vol. 7.- 223
82. Tsuboi C. Investigation on the deformation of the earth's crust found by precise geodetic means // Jap. J. Astron. Geophys.- 1933, Vol.10.- 93
83. Zhang K., Hu Y., Liu G., Wu F., Deakin R. Deformation monitoring and analysis using Victorian regional CORS data // Journal of Global Positioning Systems (2005) Vol. 4, No. 1-2: 129-138