На правах рукописи

Мельников Андрей Юрьевич

# Разработка методики анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных определений

25.00.32 – Геодезия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
**Кафтан Владимир Иванович**

Официальные оппоненты: **Певнев Анатолий Кузьмич**
доктор технических наук,
ФГБУН Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Лаборатория физики колебаний пробных масс, г.н.с.

**Горшков Виктор Леонидович**
кандидат физ.-мат. наук,
ФГБУН Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (ГАО РАН), Отдел позиционной астрономии, Сектор геодинамики, заведующий

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук» (ИГД УрО РАН)

Защита состоится « 26 » сентября 2019 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 при федеральном государственном общеобразовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), расположенном по адресу: 105064, г. Москва, Гороховский пер., д. 4, Зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК) и на сайте: http://www.miigaik.ru/science/councils/dissertation/

Автореферат разослан «___»_____20__ года

Ученый секретарь
диссертационного совета Вшивкова Ольга Владимировна

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования. Степень ее разработанности.

На сегодняшний день одним из наиболее эффективных средств геодезического контроля и анализа деформационных процессов в сейсмоактивных регионах являются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС). Важнейшим преимуществом ГНСС является возможность непрерывного отслеживания изменений, происходящих на земной поверхности из-за тектонических и техногенных воздействий. Сегодня постоянно действующими станциями ГНСС открытого доступа покрыта значительная часть территории суши. Работают несколько десятков тысяч стационарных пунктов, результаты измерений которых распространяются по сети Интернет [Blewitt, G., W. C. Hammond, and C. Kreemer (2018), Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science, Eos, 99, https://doi.org/10.1029/2018EO104623]. Так как многие из этих станций накопили большой объем измерений с суточной дискретностью на протяжении десятилетий, появляется возможность отследить деформационные процессы в районах произошедших сильных коровых тектонических землетрясений задолго до их возникновения. Такие исследования очень редки, и обычно ограничиваются анализом нерегулярных повторных измерений, или определением векторов смещений геодезических пунктов, пренебрегая анализом деформаций. При этом предпочтение отдается относительному методу определения приращений координат векторов базовых линий в режиме «статика» по двойным фазовым разностям, как наиболее точному из существующих методов. Но данный метод имеет недостаток – невысокую скорость обработки, быстро увеличивающуюся по мере увеличения количества пунктов в контрольной сети. Этого недостатка лишен относительно новый метод Precise Point Positioning (PPP), называемый в данной работе методом высокоточных координатных определений. Малое число неизвестных в решении делает данный метод более удобным и быстрым в обработке по сравнению с разностным (относительным) методом. В то же время заявляемая высокая точность метода пока еще вызывает сомнения, так как он лишен свойства компенсации ошибок, в отличие от относительного метода. Остается нерешенным вопрос сопоставимости точности статического варианта PPP и «статики» по двойным фазовым разностям. Указанные обстоятельства побуждают к

проведению анализа точности метода PPP и оценки возможности его применения для геодинамических задач геодезии. Одним из принципов выполнения геодезических измерений в геодинамических целях, сформулированных А. А. Изотовым, является обеспечение наивысшей точности, которую могут достигать имеющиеся средства и методы [Геодезические методы изучения деформаций земной коры на геодинамических полигонах (Методическое руководство). М.: ЦНИИГАиК. 1985]. Ведущие компании-производители ГНСС аппаратуры гарантируют достижение средних квадратических ошибок (СКО) определения взаимного положения в режиме «статика» 3-5 мм для плановой и 5-10 мм для высотной компонент. По мере увеличения расстояния между пунктами ошибки увеличиваются с коэффициентами 0.5 ppm и 1 ppm, соответственно.

При условии достижения указанной точности методом PPP, необходима разработка методики и программного обеспечения использования его результатов для анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах с использованием открытых архивов временных рядов координат, каталогов землетрясений и пространственной информации о разломной тектонике.

Российскими исследователями разработана и применяется методика пространственно-временного анализа деформаций [Кафтан В.И., Красноперов Р. И., Юровский П. П., Графическое представление результатов определения движений и деформаций земной поверхности средствами глобальных навигационных спутниковых систем. Геодезия и картография. 2010. № 11. С. 2–7], требующая обработки первичных измерительных данных, полученных относительным методом. За рубежом разработано программное обеспечение Grid Strain [Teza G., Pesci A., Galgaro A., Grid_strain and grid_strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments, Computers & Geosciences, Volume 34, Issue 9, September 2008, Pages 1142-1153, https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.006], использующее временные ряды координат, задаваемые пользователем. Деформации земной поверхности являются отражением глубинного сейсмического процесса, пространственно локализованного активными тектоническими разломами. Это определяет необходимость совместного одновременного анализа деформаций и сейсмической активности с учетом разломной тектоники района наблюдений. Указанные методики и программные средства выявления деформаций земной поверхности по

повторным геодезическим измерениям не ориентированы на использование открытых архивов данных о сейсмичности (каталогов землетрясений) и цифровых данных о региональной разломной тектонике. Эти обстоятельства требуют учета указанной негеодезической информации при разработке новой методики, тем самым обеспечивая повышение эффективности ожидаемых результатов за счет комплексности и взаимной интеграции данных геодезии, сейсмологии и геотектоники. Создание такой методики позволит получить новую информацию о подготовке и разрядке сильных сейсмических событий.

**Целью диссертационной работы является** разработка методики анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных определений, обеспечивающей повышение эффективности оценки сейсмической опасности для данных регионов, а также разработка геодезических подходов к оценке сейсмической опасности.

**Задачи диссертационной работы:**

- теоретическое и экспериментальное обоснование возможности применения метода высокоточных координатных определений для обеспечения геодинамического мониторинга деформаций земной поверхности по результатам суточных ГНСС наблюдений;

- разработка методики анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах по результатам совместной обработки временных рядов координат, полученных методом высокоточных координатных определений по данным суточных ГНСС наблюдений, и данных о разломной тектонике и сейсмическом режиме исследуемой территории;

- разработка подхода к организации геодезического мониторинга деформаций земной поверхности и развития сейсмического цикла, регламентирующего размеры контрольной ГНСС сети, начальную эпоху наблюдений и критический уровень накопленных деформаций земной поверхности.

**Теоретическая значимость:**

Выполненный анализ точностных возможностей метода высокоточных координатных определений расширяет область его применения в геодезии. Результаты использования разработанной методики способствуют повышению общетеоретического уровня современных исследований напряженно-

деформированного состояния земной поверхности геодезическими методами и послужат основой для формулирования новых научно-аргументированных гипотез о причинно-следственных связях деформационного и сейсмического процессов. В разработанной методике предложено комплексное использование геодезической информации, данных о разломной тектонике и сейсмическом режиме исследуемой территории как способ повышения эффективности геодезического мониторинга напряженно-деформированного состояния земной поверхности.

**Практическая значимость** работы заключается в возможности использования разработанной методики в комплексе мероприятий по выявлению сейсмической опасности и предупреждению сейсмических катастроф; построении кинематических визуализаций изменения во времени напряженно-деформированного состояния земной поверхности с целью оценки риска возникновения землетрясений по уровню регистрируемых деформаций. Представленная методика применяется в исследованиях Лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН по геомеханическому моделированию очагов сильных землетрясений.

**Научная новизна**:

- выполненная оценка точности метода высокоточных координатных определений по результатам обработки суточных ГНСС наблюдений обосновывает возможность его применения для выявления деформаций земной поверхности в сейсмоактивных районах;

- разработанная методика анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах базируется на комплексном использовании размещенных в открытых архивах результатов спутниковых измерений, полученных методом высокоточных координатных определений, данных о разломной тектонике и сейсмическом режиме исследуемой территории.

**Методология и методы исследования.**

В ходе исследований проведены изучение и анализ большого числа литературных источников как отечественных, так и зарубежных авторов, материалы которых использовались как при теоретическом обосновании полученных результатов, так и в практических расчетах.

Представленная оценка точности метода высокоточных координатных определений, разработанная методика анализа деформационного процесса, ее верификация, а также обоснование возможности оценки уровня сейсмической опасности опираются на методы математического моделирования, обработку результатов измерений по методу наименьших квадратов, методы матричного анализа и математической статистики.

**Положения и результаты, выносимые на защиту:**

- доказана на основании собственных исследований и опубликованных данных возможность применения метода высокоточных координатных определений для мониторинга напряженно-деформированного состояния земной поверхности в сейсмически активных районах;

- разработана и апробирована методика анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах по результатам совместной обработки временных рядов координат, полученных методом высокоточных координатных определений по данным суточных ГНСС наблюдений, и данных о разломной тектонике и сейсмическом режиме исследуемой территории;

- оценены критические значения деформаций земной поверхности для землетрясений различной мощности на основании собственных исследований и опубликованных данных;

- обоснован подход к организации геодезического мониторинга деформаций земной поверхности и развития сейсмического цикла, регламентирующий размеры контрольной ГНСС сети, начальную эпоху наблюдений и критический уровень накопленных деформаций земной поверхности.

**Достоверность результатов** научных и практических результатов проведенных исследований подтверждается четкостью постановки задач, корректностью использования математических моделей и методов, строгостью математического аппарата, контрольными расчетами на реальных данных, согласованностью теоретических положений с практическими результатами исследований.

**Апробация результатов**

Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на: VII Международной научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновационные

процессы в АПК» (г. Москва, Российский университет дружбы народов, апрель 2016 г.); International Conference “Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies” (г. Сочи, июль 2016 г.); Четвертой тектонофизической конференций в ИФЗ РАН “Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле” (г. Москва, Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН, октябрь 2016 г.); Семинаре в университетском центре космических исследований и технологии (УЦКИТ) Физического факультета Софийского университета «Св. Климента Охридского» (Болгария), для преподавателей, научных сотрудников и студентов университета (г. София, ноябрь 2016 г.); VIII международной Школе-семинаре «Спутниковые методы и системы исследования Земли» (г. Таруса, Представительство «Интеркосмос», ИКИ РАН, апрель 2017 г.); IX Международной научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновационные процессы в АПК» (г. Москва, Российский университет дружбы народов, апрель 2017 г.); World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium - WMESS 2017 (г. Прага, сентябрь 2017 г.); Пятой молодежной тектонофозической школе-семинаре (г. Москва, Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН, октябрь 2017 г.).

**Содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, представлена степень разработанности проблемы, сформулированы цели и задачи, а так же теоретическая и практическая значимость. Обоснована научная новизна и достоверность полученных результатов. Представлены методология исследования и положения, выносимые на защиту.

**ГЛАВА 1. «Анализ возможностей определения координат геодезических пунктов методом Precise Point Positioning (PPP)»**

В первых параграфах главы представлено описание метода высокоточных координатных определений (PPP), включающее общие сведения о методе PPP, основных источниках ошибок и факторах, оказывающих влияние на точность определения пространственного положения пунктов ГНСС по результатам PPP определений. Главной задачей данной главы является подтверждение возможности применения результатов PPP определений для выявления напряженно-деформированного состояния земной поверхности. Для этого осуществлен аналитический обзор опубликованных оценок точности метода PPP

по результатам суточных наблюдений. Были изучены публикации по данной тематике, в которых выполнена оценка точности, как по внутренней сходимости, так и по отклонениям от более точных измерений (внешней сходимости). Соответствующие обобщенные оценки составили для СКО разностей «истинных» и измеренных значений по локальным эталонам - 10 мм и 14 мм для плановой и высотной компоненты соответственно, СКО положения точки по результатам оценки внутренней сходимости составили 5 мм и 8 мм для плановой и высотной компоненты соответственно.

В последних параграфах главы представлена оценка точности результатов суточных PPP определений. В основу оценки положено сравнение результатов обработки суточных фазовых ГНСС наблюдений методом PPP с результатами обработки тех же наблюдений относительным методом.

Для реализации оценки была выбрана сеть из 13 постоянно действующих пунктов ГНСС в районе землетрясения Паркфилд (28 сентября 2004 г, M 6.0), сеть составлена по алгоритму триангуляции Делоне и включает 30 базовых линий.

Определения координат пунктов сети методом PPP были осуществлены Геодезической лабораторией Невады (Nevada Geodetic Laboratory) [http://geodesy.unr.edu/] с использованием программного обеспечения (ПО) GIPSY/OASIS-II Ver. 6.1.1. Геоцентрические координаты пунктов в системе IGS08 и их СКО были скопированы из архива временных рядов координат пунктов указанной сети за период с 01.01.2002 (DOY 001.2002) по 27.12.2006 (DOY 361.2006) [http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/RapidStationList].

Для оценки точности была составлена программа на алгоритмическом языке высокого уровня MATLAB R2012b. Приращения геоцентрических координат по вторым фазовым разностям и их СКО по внутренней сходимости были получены ранее Р.И. Красноперовым путем обработки файлов суточных измерений, скопированных из архива SOPAC [http://sopac.ucsd.edu/].

Из координат пунктов сети, полученных с сайта Геодезической лаборатории Невады, для проведения сравнения с методом относительных наблюдений, были получены разности координат (приращения) соответствующих линий. Для каждой базовой линии сети были использованы по 364 приращения координат, полученных по вторым разностям фаз двухчастотных измерений и их аналоги - 364 вычисленных разности координат PPP определений. Полный объем выборки

составил 10920 разностей дважды определенных приращений координат. Разности преобразовывались в единую для всей сети локальную топоцентрическую систему координат с началом в центре сети.

Оценка точности осуществлялась с учетом весов, полученных по априорным СКО трех измерений (две координаты, полученные методом PPP, и приращение, полученное относительным методом).

Вычислялись веса измерений, входящих в состав разности, $P_i = 1/m_i^2$. Ошибки единицы веса $\mu = ([P_\Delta \Delta^2]/3n)^{1/2}$. СКО каждого $i$-го измерения $m_i = \mu/P_i^{1/2}$. Такие оценки делались для каждой базовой линии, и в итоге получали их обобщенные оценки для всей выборки. Результаты представлены в таблице 1 в строке «Апостериорные» оценки. Установлено, что априорные СКО, полученные при определении векторов базовых линий относительным методом, зависят от расстояний между пунктами. При сопоставлении полученных оценок точности установлено, что апостериорные оценки СКО разностей координат из результатов PPP определений вдвое меньше соответствующих СКО относительных определений, что может говорить о завышении априорной точности PPP определений и, вытекающей отсюда, некорректности учета весов. Поэтому была осуществлена оценка точности, исходя из предположения, что вклад ошибок обработки относительных наблюдений в общую разность пренебрегаем, результаты представлены в таблице 1.

На основании полученных результатов сделан вывод о субсантиметровой точности метода PPP для суточных решений (таблица 1). Таким образом, метод высокоточных координатных определений может быть применен в геодинамических исследованиях, в частности для выявления и анализа деформаций земной поверхности.

Таблица 1. Сопоставление оценок точности PPP и относительных определений

| СКО | Координаты PPP, мм | | Разности координат PPP, мм | | Приращения координат относит. метод, мм | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | North, East | Up | North, East | Up | North, East | Up |
| Априорные | 2.1 | 1.6 | 2.9 | 2.2 | 3.8 | 2.9 |
| Апостериорные | 1.5 | 1.9 | 2.1 | 2.7 | 4.7 | 6.0 |
| При ничтожном вкладе относительного метода | 2.9 | 7.5 | 4.0 | 10.5 | - | - |

## ГЛАВА 2. Методика и результаты определения деформаций земной поверхности по данным обработки суточных ГНСС наблюдений методом PPP

В данной главе рассматривается алгоритмическая часть разработки методики анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных определений, а так же апробация данной методики на примере землетрясения Напа.

Для вычисления деформаций земной поверхности применялся алгоритм, представленный в работе [Wu J.C., Tang H.W., Chen Y.Q., Li Y.X. The current strain distribution in the North China Basin of eastern China by least-squares collocation, https://doi.org/10.1016/j.jog.2006.01.003].

Для этого из пунктов ГНСС на изучаемой территории формируется сеть конечных элементов – треугольников по алгоритму триангуляции Делоне. Смещения каждой точки в каждом треугольнике между начальным и исследуемым циклом наблюдений вычисляются по формулам (1)

$$u_{i,j,k} = X^{\mathrm{T}}_{i,j,k} - X^{0}_{i,j,k}; \quad v_{i,j,k} = Y^{\mathrm{T}}_{i,j,k} - Y^{0}_{i,j,k} \tag{1}$$

Деформации конечного элемента исследуемой геодезической сети могут быть представлены в виде двухмерного тензора деформаций (2),

$$T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix} \tag{2}$$

компоненты которого $\varepsilon_{xx}$, $\varepsilon_{yy}$, $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx}$ и $\omega$ определяются как

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right); \omega = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}\right). \tag{3}$$

Таким образом, составив из значений смещений точек в треугольнике вектор $d$, а из компонент тензора деформации вектор $x$ (4), можно записать в матричном виде формулу расчета компонент тензора деформации (5), где $A$ – матрица конфигурации (6), в которой $\Delta X_{ij}$, $\Delta Y_{ij}$, $\Delta X_{ik}$ и $\Delta Y_{ik}$ – приращения координат соответствующих сторон треугольника.

$$d = \begin{bmatrix} u_j - u_i \\ v_j - v_i \\ u_k - u_i \\ v_k - v_i \end{bmatrix}; x = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} \\ \omega \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$Ax = d \;\Rightarrow\; x = A^{-1}d \tag{5}$$

$$A = \begin{bmatrix} \Delta X_{ij} & 0 & \Delta Y_{ij} & \Delta Y_{ij} \\ 0 & \Delta Y_{ij} & \Delta X_{ij} & -\Delta X_{ij} \\ \Delta X_{ik} & 0 & \Delta Y_{ik} & \Delta Y_{ik} \\ 0 & \Delta Y_{ik} & \Delta X_{ik} & -\Delta X_{ik} \end{bmatrix} \tag{6}$$

По вычисленным значениям вектора $x$ рассчитываются деформация дилатации – изменение площади треугольника ($\Delta$) и деформация полного сдвига ($\gamma$) (7),

$$\Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}\ ;\ \gamma = \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (7)$$

где $$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \quad . \quad (8)$$

Следующий параграф посвящен разработке методики анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных определений, включающей сбор и подготовку исходных данных, алгоритм компьютерной программы. Описаны приемы устранения выбросов и разрывов в используемых временных рядах координат.

В качестве исходных данных для определения деформаций земной поверхности используются временные ряды топоцентрических координат (*E, N, U*) в системе координат IGS08, полученных с использованием программного обеспечения (ПО) GIPSY/OASIS-II Ver. 6.1.1 и представленных к открытому пользованию Геодезической лабораторией Невады (Nevada Geodetic Laboratory) [http://geodesy.unr.edu/index.php].

По различным причинам ряды координат, в ряде случаев, содержат «грубые выбросы», выражающиеся в значительном отклонении некоторых результатов наблюдений от общей линии тренда, и «разрывы», выражающиеся в отсутствии результатов наблюдений, как для отдельных суток, так и для интервалов времени, как правило, не превышающих 1 - 2 недель. Для выявления грубых выбросов и разрывов была составлена специальная подпрограмма анализа графиков изменений координат. Грубыми выбросами считались быстрые отклонения координат от линии тренда на расстояние порядка нескольких см, впоследствии возвращающиеся в норму. Их исключали ручным способом, анализируя график временного ряда. Заполнение разрывов в рядах координат осуществляется интерполированием кубическим сплайном Эрмита.

Помимо рядов координат, в методике используются данные о сейсмических событиях (каталоги землетрясений) в исследуемом регионе за интересующий период из открытых ресурсов Геологической службы США (USGS) [https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/], а так же информация по разломной тектонике исследуемого района [http://usgs.maps.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=df1603b2bdd54615b6aa7c8d2b3f96ab].

Блок-схема алгоритма определения деформаций земной поверхности в сейсмоактивных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных

определений в связи с сейсмичностью и разломной тектоникой представлена на рис. 1. Алгоритм реализован в виде программы с использованием пакета MATLAB R2012b.

Экспериментальная апробация методики осуществлялась с использованием данных координатных определений в районе землетрясения Напа (24.08.2014, M6), для этого из архива Геодезической лаборатории Невады были получены ряды координат для 34 пунктов ГНСС сети CRTN на период с 2006 по 2017 годы, из пунктов по алгоритму триангуляции Делоне была сформирована сеть (рис. 2). Для каждого треугольника сети в каждом цикле наблюдений были вычислены значения деформаций дилатации и полного сдвига, которые были проинтерполированы на всю территорию покрытия сети. В результате были получены карты полей деформации (рис. 3), при помощи которых можно исследовать эволюцию деформационного процесса на заданной территории.

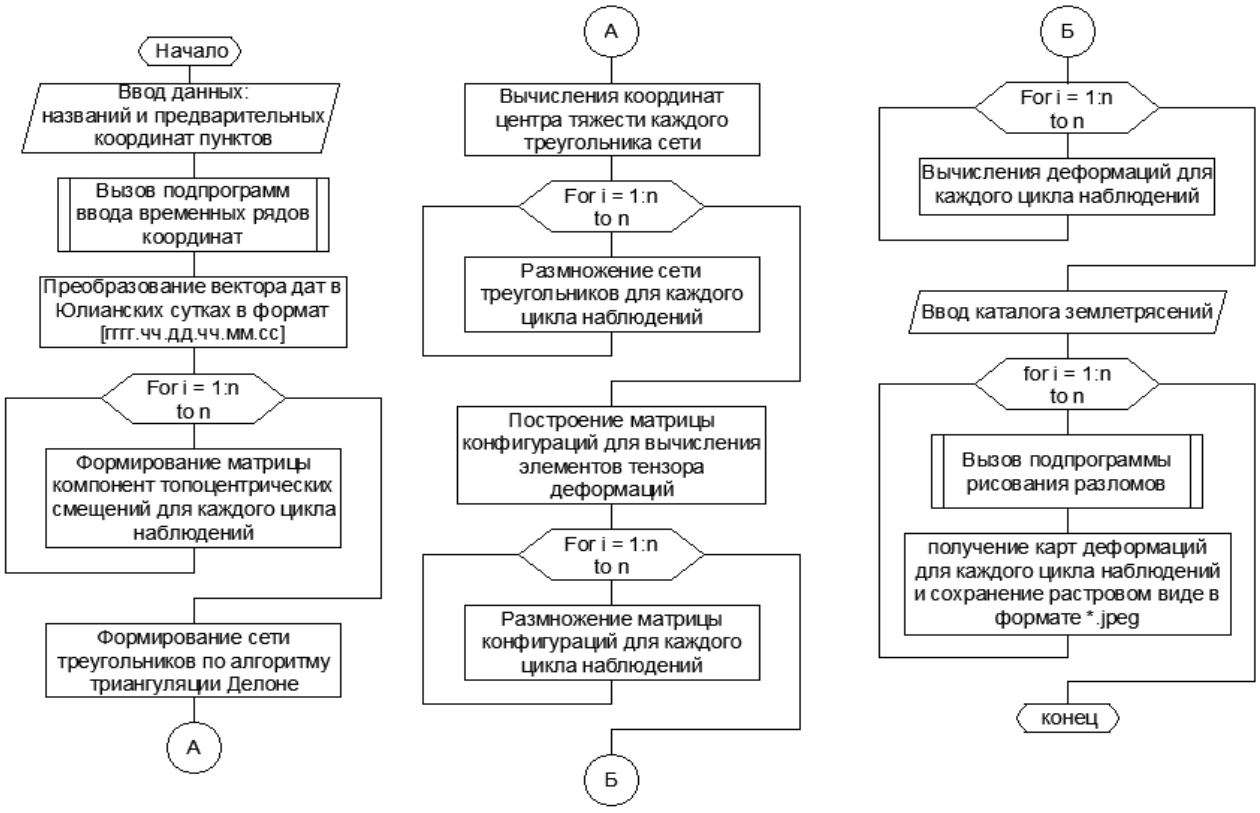


Рис. 1 Блок-схема программы вычисления деформаций земной поверхности по результатам обработки суточных ГНСС наблюдений методом PPP

В следующем разделе работы результаты использования разработанной методики интерпретируются совместно с использованием методики [Кафтан и др., 2010], дополненной данными о сейсмической активности, с целью выявления общих закономерностей подготовки крупных и сильных землетрясений. Для

выявления деформационных аномалий - предвестников сейсмических событий были привлечены наблюдения в районах сильных землетрясений, произошедших на границе Северо-Американской и Тихоокеанской тектонических плит. Первое и более раннее землетрясение Parkfield (28 Сентября 2004, Mw=6.0), второе El Mayor Cucapah (4 Апреля 2010, Mw=7.2) и третье South Napa (24 Августа 2014, Mw=6.0).

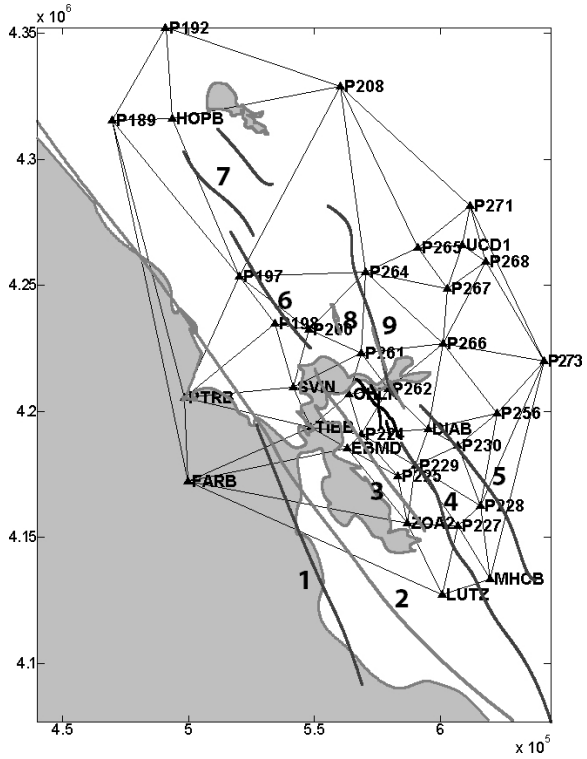


Рис.2 Схема сети пунктов ГНСС

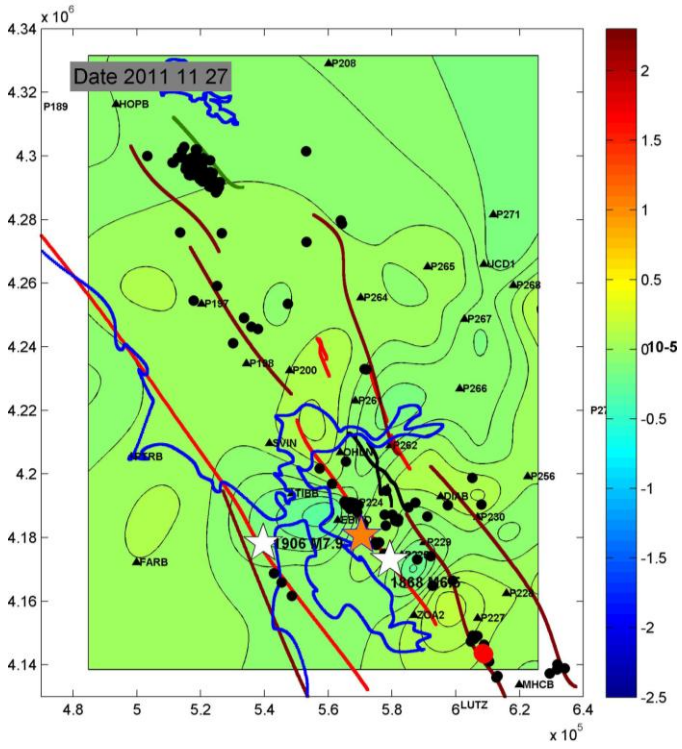


Рис.3 Карта поля деформации земной поверхности

Для каждого района был выбран ряд постоянно действующих станций ГНСС, удовлетворяющих условиям эксперимента. Для землетрясения Parkfield были выбраны 13 постоянно действующих базовых станций сети Plate Boundary Observatory, для землетрясения El Mayor Cucapah была составлена сеть из 44 постоянно действующих базовых станций, входящих в состав The California Real Time Network (CRTN), для землетрясения South Napa была использована сеть, представленная на рис. 2.

Для всех станций сетей вблизи землетрясений Parkfield и El Mayor Cucapah был осуществлен сбор первичных данных суточных GPS измерений с шагом в 5 суток (за период с 2002 по 2006 годы) и 10 суток (за период с 2006 по 2016 годы)

из открытого архива Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) [http://sopac.ucsd.edu/] и произведена обработка в программе Topcon Tools.

При изучении землетрясения Parkfield основное внимание было направлено на изучение изменения дилатации. В районе землетрясения Parkfield было обнаружено развитие областей дилатации растяжения, что показано на трех первых кадрах второй строки рис. 4. Однако при исследовании деформации дилатации при землетрясениях Napa и El Major Cucapah явно выраженных деформационных неоднородностей обнаружено не было.

Особенно убедительно об отсутствии такого явления свидетельствует случай землетрясения Napa, эпицентр которого располагается непосредственно в центре наблюдательной сети. Эти результаты побудили приступить к изучению поведения сдвиговой деформационной компоненты. Результаты определения полного сдвига в районах трех изучаемых событий представлены на рис.5, 7, 9.

Для рис. 4-9 градиент от зеленого к синему отображает сжатия, от желтого к красному – растяжения, красная звезда – эпицентр главного толчка, красные окружности – умеренные землетрясения 4.9<M<6, черные окружности – слабые землетрясения 4<M<4.9, интервал между изолиниями соответствует шагу деформации $1x10^{-5}$.

Можно видеть, что сдвиговые деформации начинают активно проявляться за годы до главных сейсмических событий во всех трех случаях. Они возникают не в непосредственной близости от будущих эпицентров, а на удалениях, достигающих нескольких десятков километров от них. Это особенно выражено в случае землетрясения Napa (Рис. 9).

Полученные результаты позволяют констатировать активизацию деформационного процесса перед крупными и сильными землетрясениями региона, но не дают убедительной информации о месте и времени возникновения очередного землетрясения, даже на вероятностном уровне. Эти обстоятельства инициировали исследование современных возможностей геодезического метода в области предсказания землетрясений.

Использование вновь созданной и существующей [Кафтан и др., 2010] методик позволило осуществить их взаимное сопоставление. Показано, что новая методика более производительна за счет использования готовых временных рядов PPP определений и не требует трудоемкой обработки относительных ГНСС

измерений. Это позволяет сократить время обработки на интервалы от нескольких суток до нескольких недель, что зависит от количества пунктов контрольной сети и продолжительности непрерывных наблюдений.

Расчеты по вновь разработанной методике занимают до нескольких часов, при размерах сети до 50 пунктов и продолжительности наблюдений до 11-ти лет. Новая методика, в отличие от прежних, обеспечивает устранение грубых выбросов и разрывов во временных рядах PPP определений в едином решении.

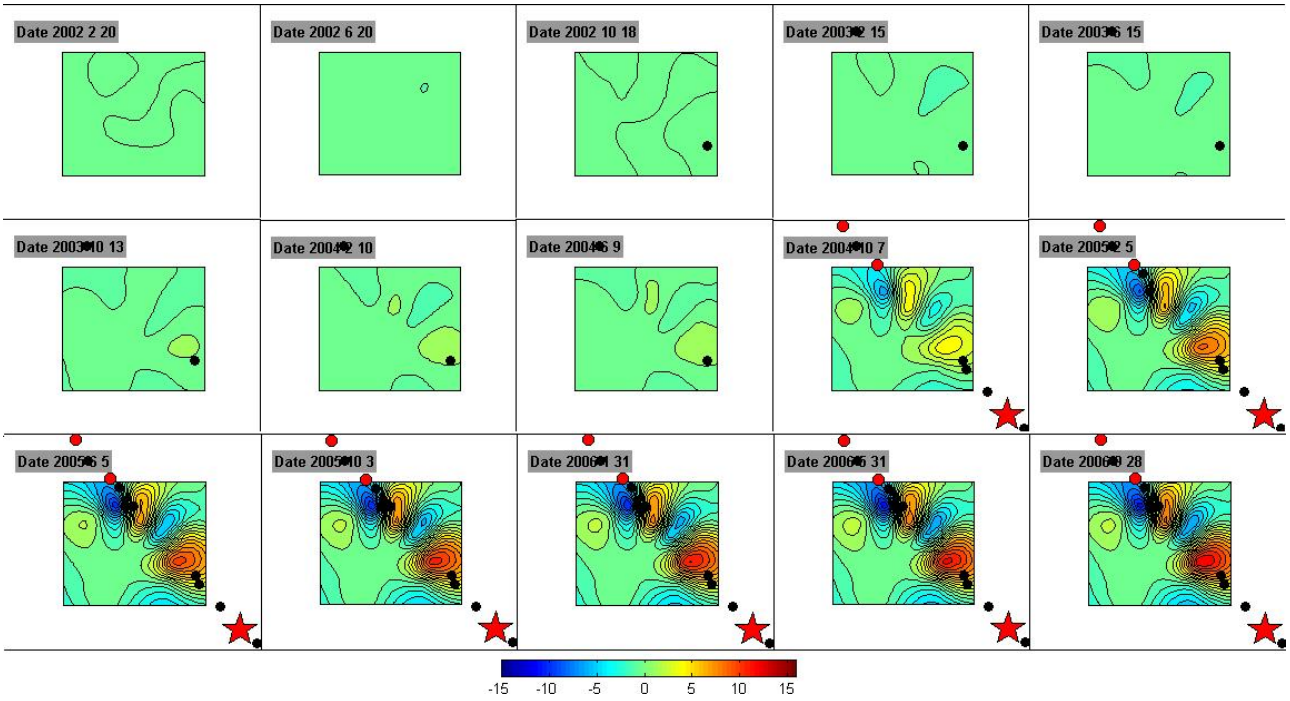


Рис. 4 Плановые деформации дилатации в районе землетрясения Parkfield

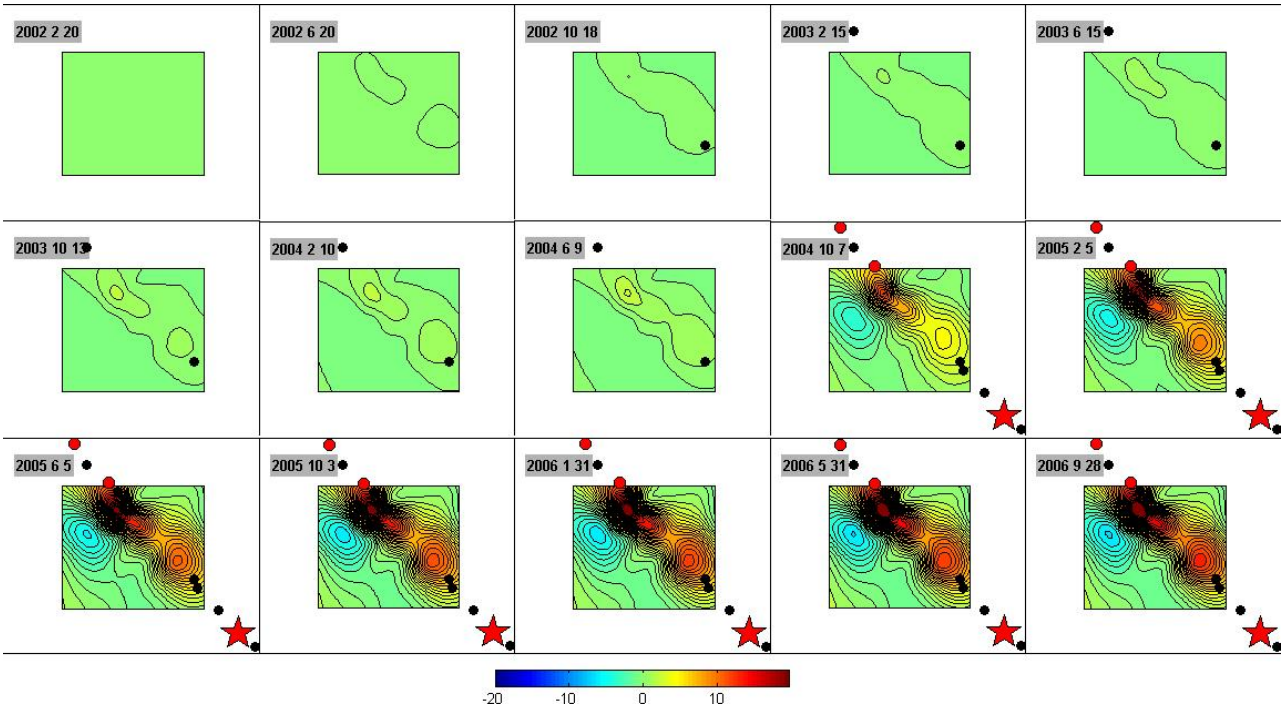


Рис.5 Плановые деформации полного сдвига в районе землетрясения Parkfield

Методика обеспечивает комплексный анализ деформаций, сейсмичности и разломной тектоники. Она вырабатывает видео-файлы кинематической визуализации изучаемых процессов, свободно распространяемые в научной среде. Эти операции  отсутствуют у методик [Кафтан и др., 2010; Teza et al., 2008].

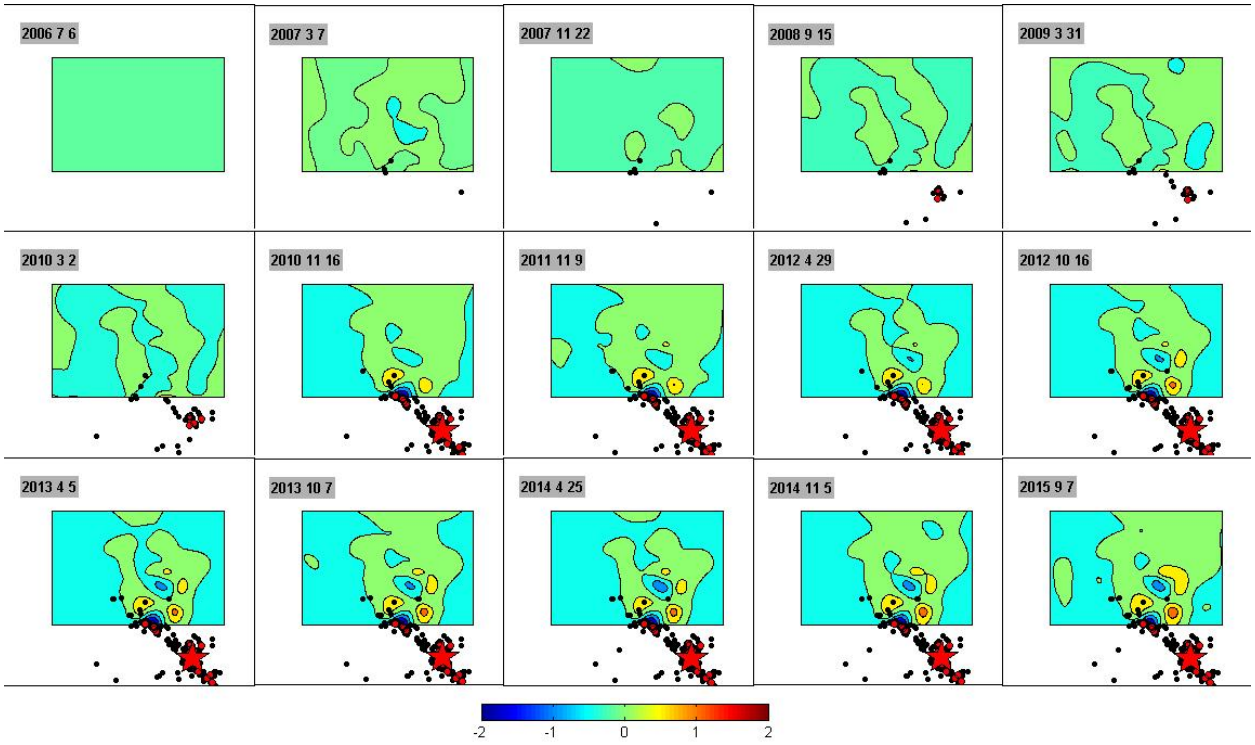


Рис. 6 Плановые деформации дилатации в районе землетрясения El Mayor Cucapah

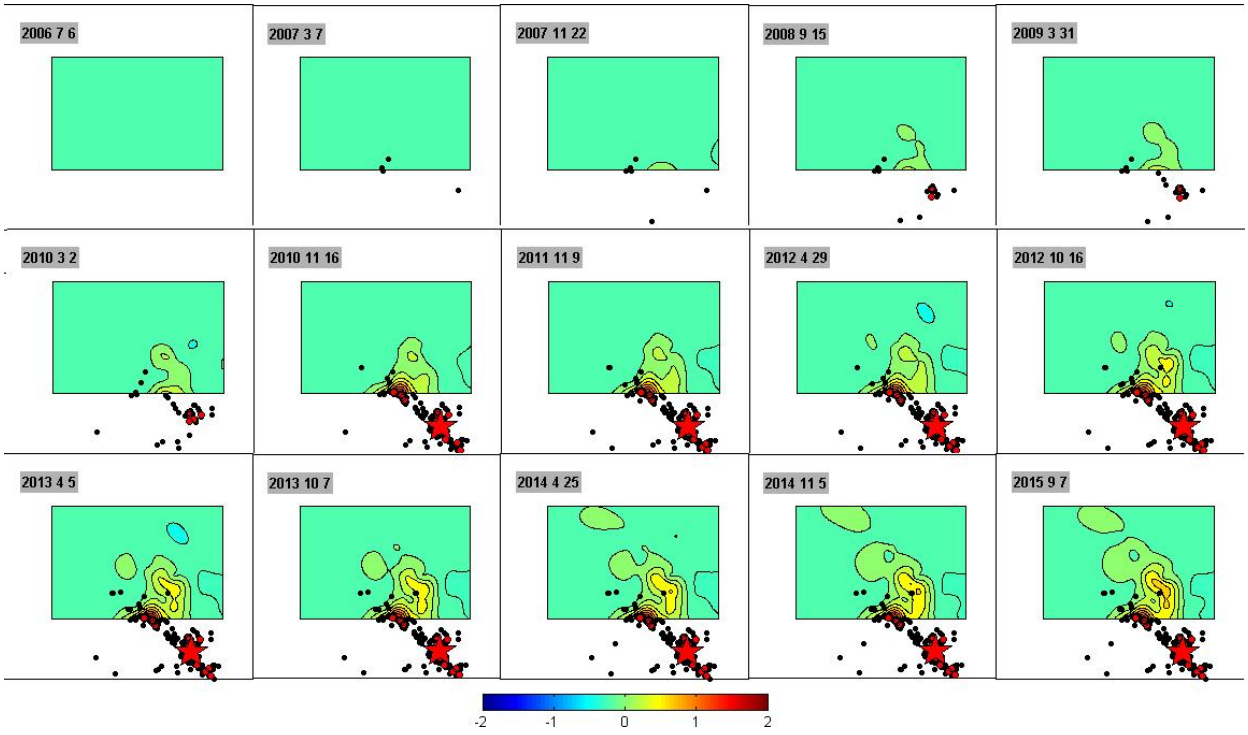


Рис.7 Плановые деформации полного сдвига в районе землетрясения El Mayor Cucapah

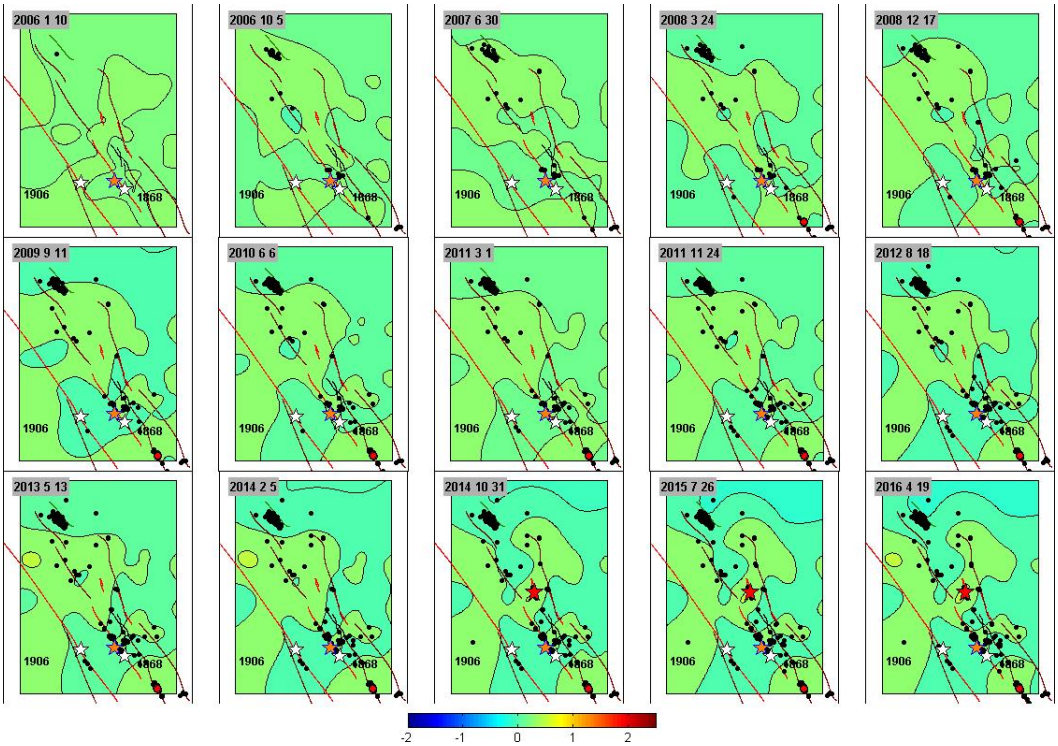


Рис. 8 Плановые деформации дилатации в районе землетрясения South Napa

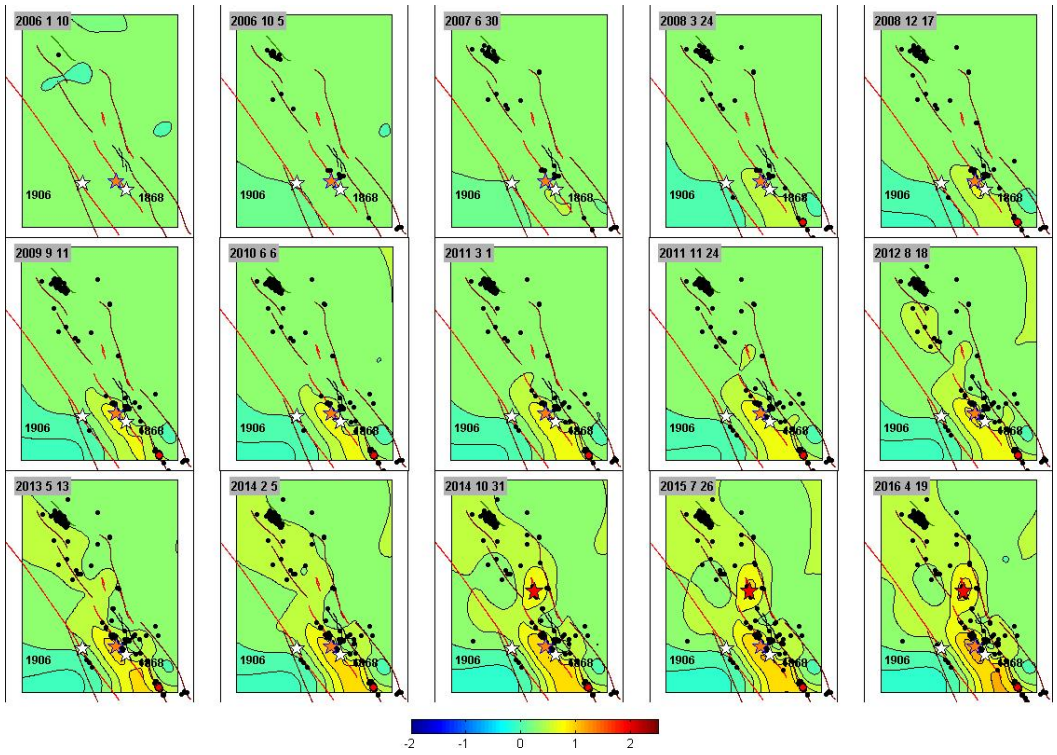


Рис.9 Плановые деформации полного сдвига в районе землетрясения South Napa

## ГЛАВА 3. Использование результатов анализа деформационного процесса для предсказания времени и места возникновения землетрясения

Разработанная методика позволила выявить деформационные аномалии (предвестники) перед сильным землетрясением с использованием спутниковых высокоточных координатных определений. Но регистрация таких аномалий не

несет достаточно определенной информации о месте, времени и силе будущего землетрясения. В этой связи требуется искать ответы на вопросы: в каком месте, как долго и какой уровень деформаций нужно отслеживать, что бы более уверенно судить об уровне сейсмической опасности.

Главными научными обобщениями, способствующими решению задачи геодезического вклада в проблему предсказания землетрясений, являются модель упругой отдачи Рейда (из которой, в частности, следует, что упругие деформации земной поверхности в районе очага будущего землетрясения могут проявляться на земной поверхности, и отслеживать их можно при помощи повторных геодезических наблюдений) и модель деформационных предвестников землетрясения Мещерякова. Эти модели связывают характер поведения земной поверхности с сейсмическим циклом. Указанные модели не теряют своих сторонников до сих пор. Модель упругой отдачи поддерживается в том числе и российскими учеными, например А.К. Певневым.

Модель деформационного сейсмического цикла, предложенная Мещеряковым Ю.А., подтверждается результатами анализа данных многократного нивелирования на линии Шеки-Кюрдамир, расположенной на южных склонах Большого Кавказа, результатами ГНСС наблюдений в районе землетрясения Аквила (2009 г., M=6.3). Аномальные деформации земной поверхности так же обнаружены на территории Китая перед сильнейшим землетрясением Тохоку (2011 г., M=9.1), Япония, т.е. на значительном удалении от эпицентра.

Главной проблемой при выявлении деформационных признаков подготовки сильных землетрясений с привлечением теории упругой отдачи и модели сейсмического цикла Мещерякова остается фиксирование момента начала сейсмического цикла, т.е. перехода от фазы релаксации к межсейсмической фазе. Проведен анализ публикаций, в которых изучаются определенные эмпирическим путем продолжительности сейсмических циклов для различных участков земной поверхности, так как в настоящий момент имеется мало результатов геодезических наблюдений, охватывающих полный цикл землетрясений. По результатам анализа можно сделать вывод, что продолжительность сейсмического цикла для умеренных и крупных землетрясений с магнитудой 5-7 измеряется от десятков до первых сотен лет, для сильных и мега- землетрясений с

магнитудой более 7 – от сотен до тысяч лет. Таким образом, средняя продолжительность сейсмического цикла для умеренных и крупных землетрясений позволяет надеяться на его полный контроль средствами ГНСС в недалеком будущем, так как многие сейсмически опасные районы покрыты сетями постоянно действующих пунктов ГНСС, функционирование которых в ряде случаев продолжается уже около 30 лет

В соответствии с гипотезой упругой отдачи, для построения шкалы уровня сейсмической опасности по наблюдениям за деформациями земной поверхности, нужно знать величины критических сейсмоопасных деформаций. Для этого, помимо трех рассмотренных ранее землетрясений, были изучены наиболее крупные сейсмические события район активного разлома Сан-Андреас на протяжении XX века, начиная с самого крупного землетрясения, произошедшего в 1906 году в Сан-Франциско (M 8.3). По данным отчетов о повторных геодезических наблюдениях на пунктах высокоточных линейно-угловых сетей, проведенных до и после крупных землетрясений, и опубликованных научных статей, были определены величины максимальных плановых смещений геодезических пунктов. При этом учитывалось их наиболее близкое расположение по отношению к эпицентру. Для контроля полученной тенденции изменения максимальных смещений в зависимости от магнитуды были использованы данные Ризниченко.

По полученным данным был построен график (Рис. 10) зависимости деформации земной поверхности от магнитуды землетрясения, дополненный деформациями, посчитанными на основе данных Ризниченко.

График позволяет оценить опасный уровень деформации для магнитуды ожидаемого землетрясения. Так, для $6<M\leq7$, нижний критический уровень составит $0.2x10^{-5}$, а для $7<M\leq8$, составит $(15\text{-}33)x10^{-5}$.

Помимо проблемы фиксации начального цикла наблюдений за деформациями, существенным препятствием является недостаточная пространственная локализация территории, в пределах которой, можно применять модель сейсмического цикла с целью ожидания очередного события. Размер области подготовки очередного сильного тектонического землетрясения, как области проявления его возможных деформационных предвестников, можно предложить рассчитывать по формуле (12) [Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin

V.I., Estimation of the Size of Earthquake Preparation Zones, Pageoph, Vol. 117 (1979) Birkhäuse Verlag, Basel, pp. 1025-1044], где ε – уровень деформации земной поверхности, принятый в качестве критического (в данном исследовании – $10^{-5}$).

$$\rho_{\varepsilon} = \frac{10^{0,433 \cdot M - 2.73}}{\sqrt[3]{\varepsilon}} \qquad (12)$$

Область ожидания возможного крупного сейсмического события в регионе Сан-Франциско представлена на рис. 11.

Проведенные исследования позволяют предложить следующие рекомендации по организации ГНСС наблюдений, а также других видов геодезических наблюдений и их комбинаций с целью выявления мест и уровня опасности возникновения сильных землетрясений. Определение деформаций земной поверхности с суточным временным разрешением следует организовывать в области радиусом примерно равным длине сейсмического разрыва сильнейшего землетрясения сейсмоопасного региона.

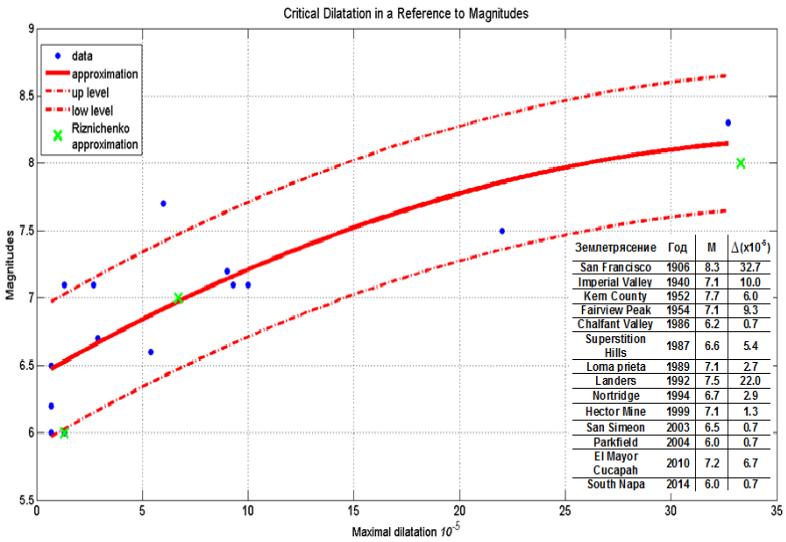


Рис. 10 График зависимости деформации земной поверхности от магнитуды землетрясения. Синие точки – данные таблицы 2. Зеленые крестики – по данным Ризниченко. Плавные линии: жирная – аппроксимация полиномом 2-го порядка; пунктирные – доверительные границы 1σ.

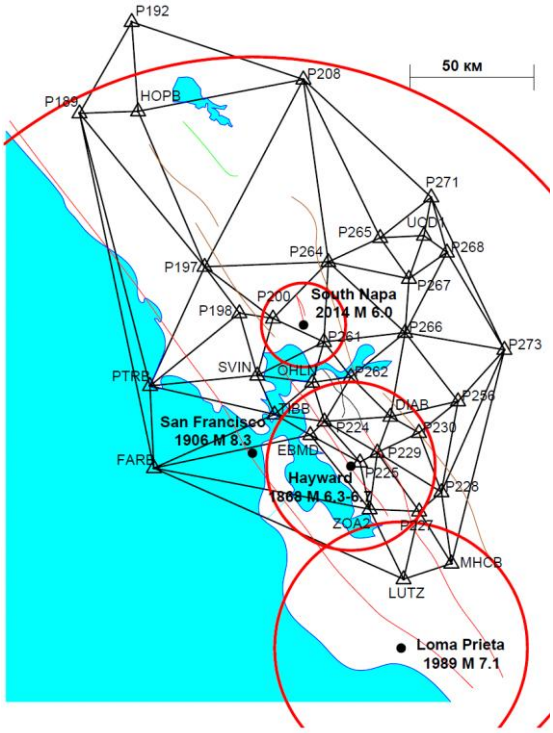


Рис. 11. Сеть ГНСС мониторинга деформаций в регионе залива Сан-Франциско. Красные окружности – области проявления предвестников.

Начальную эпоху следует совмещать с моментом возникновения позднейшего землетрясения в этой области. Для поиска очага (места) будущего

сейсмического события следует выявлять области всестороннего сжатия, скорость и величину этого сжатия, оценивая уровень опасности (Рис. 11) по величине регистрируемой деформации.

## Заключение

**Итогом** выполнения диссертационной работы является разработка методики анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных определений. В отличие от аналогов методика более производительна, более информативна за счет комплексности данных, обеспечивает контроль непрерывности и отбраковку грубых выбросов в наблюдениях, позволяет создавать визуализации исследуемых процессов. В результате выполненных исследований **получены следующие результаты:**

Обоснована возможность применения метода PPP для изучения и анализа напряженно-деформированного состояния земной поверхности по результатам обработки суточных ГНСС PPP определений. Исследование точности метода PPP показало достижимость уровня СКО 3 мм в плане и 8 мм по высоте.

Разработана и апробирована методика анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных определений, в совокупности с данными каталогов землетрясений и разломной тектоники. Выявлены деформационные аномалии в районе ожидания катастрофического землетрясения, достигающие уровня $10^{-5}$.

Предложены рекомендации по организации и осуществлению анализа непрерывных ГНСС наблюдений в сейсмоактивных районах с использованием разработанной методики. Рекомендации реализованы и внедрены в геофизические исследования напряженно-деформированного состояния в связи с землетрясением Напа.

На основании решенных задач можно сделать следующие **выводы**:

- метод высокоточных координатных определений PPP при условии обработки результатов суточных наблюдений может быть использован для выявления и анализа деформаций земной поверхности;

- разработанная методика анализа деформационного процесса по данным спутниковых высокоточных координатных определений может быть применена в сейсмически активных районах, при условии развертывания сетей постоянно

действующих пунктов ГНСС наблюдений и их функционирования в течение продолжительного времени;

- реализация разработанной методики в совокупности с ранее известным подходом, основанном на применении относительных ГНСС наблюдений, позволила обнаружить новые деформационные предвестники в связи с подготовкой разрушительных землетрясений;

**Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**.

Представленные предложения по исследованию деформации земной поверхности геодезическими методами требуют дальнейшего уточнения путем добавления результатов изучения других землетрясений и могут стать частью общей комплексной методологии выявления возможных будущих сейсмических угроз.

Разработанная методика рекомендована и уже применяется в исследованиях Лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН при геомеханическом моделировании очагов сильных землетрясений.

Дальнейшим развитием предлагаемой методики анализа деформационного процесса по данным спутниковых высокоточных координатных определений является ее полная автоматизация и разработка веб-ориентированного приложения, обеспечивающие ежесуточную оценку и анализ деформационных процессов в сейсмоопасных районах по данным ГНСС измерений. Дальнейшая комплексная интерпретация полученных результатов позволит глубже понять процессы подготовки и разрядки сильных сейсмических событий. Важным направлением развития темы диссертационной работы является включение предложенной методики в единый комплекс геодезических и геофизических исследований в области изучения механизмов землетрясений и разработки методов и технологий их предсказания.

**Публикации по теме диссертации**

1. **Мельников А. Ю.**, Голиков В. Д. Анализ изменения положения пунктов геодезической сети в связи с землетрясением «Brawley Swarm Earthquake M5.3, 26.08.2012» по данным GPS-наблюдений // Геодезия и картография. – 2017. – Т. 78. – № 11. – С. 22–28. DOI: 10.22389/0016-7126-2017-929-11-22-28 **(ВАК)**

2. **Мельников А.Ю**., Анализ точности метода precise point positioning для оценки возможности его применения в геодинамических исследованиях // Изв.

вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2018. Т. 62. № 6., С. 605-615. DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-6-605-615. **(ВАК)**

3. Кафтан В.И., **Мельников А.Ю.**, Выявление деформационных аномалий по данным ГНСС наблюдений в связи с подготовкой и разрядкой сильных землетрясений // Физика Земли. 2018. № 1. С. 26-36., DOI: 10.7868/S0002333718010027 **(ВАК, WoS, Scopus)**

4. Морозов В.Н., Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Колесников И.Ю., Маневич А.И., **Мельников А.Ю.**, Численное моделирование напряженно-деформационного состояния и результаты GPS-миниторинга эпицентральной зоны землетрясения 24 августа 2014 (г. Напа, шт. Калифорния, США) // Геотектоника, 2018, №4, с. 90-102 **(ВАК, WoS, Scopus)**

5. Kaftan V., **Melnikov A.** (2016), Deformation precursors of large earthquakes derived from long term GNSS observation data, Russ. J. Earth Sci., 16, ES3001, doi:10.2205/2016ES000568 **(ВАК, WoS, Scopus)**

6. Kaftan, V. and **Melnikov, A.** Local Deformation Precursors of Large Earthquakes Derived from GNSS Observation Data. IOP Conference Series Earth and Environmental Science.- 2017.- Vol.95.- No 3:032030 DOI 10.1088/1755-1315/95/3/032030 **(WoS / Scopus)**

7. Докукин П.А., **Мельников А.Ю.**, Байрамов А.Н. Анализ стабильности базовой станции RAMA спутниковой геодезической сети Раменского Района Московской области. Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2014. № 10 (118). С. 65-70. **(ВАК)**

Подписано в печать _____. Гарнитура Таймс
Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 1 Тираж ___ экз.
Заказ No _____.
Отпечатано в _____
Адрес:_____