

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕТЕЙ ЛОКАЛЬНОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО ГНСС МОНИТОРИНГА В СЕЙСМООПАСНЫХ РАЙОНАХ

© 2021 г. В. И. Кафтан^а, *, В. Н. Татаринов^а

^аГеофизический центр РАН, ул. Молодежная, 3, Москва, 119269 Россия

*e-mail: v.kaftan@gcras.ru

Поступила в редакцию 16.04.2021 г.

После доработки 12.06.2021 г.

Принята к публикации 26.08.2021 г.

Проанализирован опыт применения глобальных, региональных и локальных координатных систем отсчета. Показано, что применение локальных систем отсчета координат станций ГНСС и их изменений во времени повышает точность и достоверность оценки пре-, ко- и пост-сейсмических движений и деформаций земной поверхности за счет участия в обработке наиболее коротких базовых линий. Использование локальной системы отсчета также упрощает процедуру обработки данных. Выполнен тестовый расчет влияния конфигурации сети ГНСС наблюдений на их точность. Эксперимент на большом объеме измерительной информации показал, что вариант обработки с вдвое меньшим числом избыточных измерений в 1.5 раза более точен за счет исключения длинных базовых линий. Оценка эффективности определения пространственных смещений по критерию Фишера подтвердила, что в сокращенной сети (исключены длинные линии) дисперсия искомым характеристикам статистически значимо превышает дисперсию ошибок измерений.

Ключевые слова: деформационный мониторинг, ГНСС, координатные системы, локальные сети

DOI: 10.31857/S0203030621060043

ВВЕДЕНИЕ

Роль глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) при оценке и прогнозе сейсмической опасности постоянно увеличивается. Повторные, многократные и непрерывные ГНСС измерения, в отличие от традиционных геодезических, позволили оперативно получать оценки изменений пространственного положения пунктов на земной поверхности с высочайшей точностью, временной регулярностью и частотой опроса. Имеется целый ряд успешных примеров использования данных ГНСС мониторинга для оценки и интерпретации косейсмических и постсейсмических процессов и прогноза сейсмической опасности в различных регионах земного шара [Кафтан, 2017, 2021; Кафтан и др., 2021]. Основой получения данных о деформациях являются геодезические сети наблюдений. По своему масштабу они делятся на три иерархических уровня: глобальные, региональные и локальные. У каждого из уровней есть как общие, так и специальные задачи. В первом случае главным изучаемым процессом является движение глобальных тектонических плит, во втором – перемещения пунктов в зонах динамического влияния региональных разломов, в третьем – исследуются

локальные геодинамические процессы. Общей для всех уровней сетей задачей является определение точных значений пространственных координат ГНСС пунктов.

В зависимости от особенностей каждого из уровней, выбираются соответствующие стратегии полевых наблюдений, обработки, анализа и интерпретации данных, имеющие существенные различия. От выбора конкретной стратегии зависит точность и достоверность получаемых результатов, а также и экономическая эффективность выполняемых работ.

Известный успех наблюдений за СДЗК на глобальном уровне с базовыми линиями (векторами приращений координат между пунктами ГНСС) до тысячи и более километров сформировал убеждение в универсальности глобального подхода для любых задач геодинамики. Методику обработки и интерпретации ГНСС наблюдений стали массово переносить с глобального уровня на локальный. Однако на локальном уровне исследуются динамические свойства объектов совершенно другого масштаба, энергии, скорости и временной последовательности [Кузьмин, 2019]. В этом случае резкие флуктуации движений являются не статистической ошибкой (или фоном),

как традиционно считается, а параметром, характеризующим важное свойство геосреды — ее реакцию на внешнее поле напряжений и динамическую устойчивость. Их выявление требует специальных подходов к обработке и интерпретации данных, а также оптимизации конфигурации локальных сетей ГНСС наблюдений.

В этой связи, целью настоящего исследования является анализ возможностей наблюдательных сетей локального деформационного мониторинга средствами ГНСС.

СТРАТЕГИИ ОБРАБОТКИ ГНСС НАБЛЮДЕНИЙ

На сегодняшний день есть два основных подхода к обработке ГНСС наблюдений, используемых для высокоточных координатных определений. Это метод разностных ГНСС определений DD (*Double Differenced*) и метод высокоточного определения местоположения PPP (*Precise Point Positioning*). Первый принято именовать относительным, так как он обеспечивает получение точных взаимных положений (приращений координат) ГНСС пунктов. Второй именуют абсолютным, так как он позволяет определять координаты (местоположение) индивидуального ГНСС пункта по отношению к точным значениям координат (эфемеридам) спутников ГНСС, а взаимное положение пунктов в этом случае является вторичным продуктом.

Оба подхода позволяют получать субсантиметровую точность искомым приращений координат и собственно координат. Следует отметить, что мы здесь не рассматриваем другие известные варианты ГНСС определений, такие как кинематика в реальном времени (*Real Time Kinematic — RTK*), или дифференциальные кодовые определения, так как они не обеспечивают достаточной точности, требуемой в геодинатике, а предназначены для решения массовых задач топографии, навигации, землеустройства, кадастра, проектирования, строительства и других работ, не требующих высокой точности определения положения.

Сравнение точности определений положений и взаимных положений методами PPP и DD [Мельников, 2018], для варианта локальной деформационной сети, показало примерную равнозначность обоих методов. Но при этом следует иметь в виду, что для первой стратегии использовались точные продукты Международной службы ГНСС (*International GNSS Service — IGS*), в то время как для второй использовались только измеренные разности фаз несущей и точная продукция IGS не требовалась. Это обстоятельство дает существенное преимущество разностному DD методу для получения точных взаимных положений на две недели ранее, чем точных координат в

случае PPP-стратегии. На этом основании мы будем рассматривать разностный метод, как более предпочтительный для локального ГНСС-мониторинга.

КООРДИНАТНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА И ОТСЧЕТНЫЕ ОСНОВЫ

Получение временных рядов координат средствами ГНСС осуществляется в различных координатных системах отчета. Под системой отчета подразумевают совокупность предписаний, соглашений и моделей, необходимых для задания в конкретный момент времени триады осей пространственной системы координат.

Отсчетная основа представляет собой реализацию системы отсчета, представленную наблюдательной сетью различных измерительных средств и координатами ее пунктов.

Глобальные системы отсчета

Координатные системы отсчета условно подразделяются на глобальные, региональные и локальные. Главное различие между ними заключается в правилах фиксации начала и осей пространственной системы координат, а также пространственной ориентировки последних в теле Земли.

Со времени наступления спутниковой эры стали создаваться глобальные системы отсчета, необходимые для освоения ближнего космического пространства. Появление первых глобальных систем координат, связанных с Землей, связывается с именами известных геодезистов Л.П. Пеллинена [Кашин, 1999] и У. Каулы [Kaula, 1966]. Одними из первых полноценных глобальных систем отсчета, используемых для всеобщего применения, являются World Geodetic System 1984 (WGS84) и Параметры Земли 1990 г. (ПЗ-90). Эти системы отсчета включают в себя пространственные прямоугольные системы координат, правила фиксации и ориентировки осей этих систем координат в теле Земли, глобальные модели гравитационного поля и фигуры Земли.

Самой совершенной и общей является Международная земная система отсчета (*International Terrestrial Reference System*), создаваемая Международной службой вращения Земли и систем отсчета — MCB3 (*International Earth Rotation and Reference System Service — IERS*) [https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html]. Она установлена в кооперации Международного астрономического союза (МАС) и Международного союза геодезии и геофизики (МГГС). Реализация этой системы отсчета осуществляется под эгидой Международной ассоциации геодезии с участием нескольких служб космических наблюдений: Международная служба DORIS, Международная служба ГНСС, Международная служба лазерной локации

спутников, Международная служба интерферометрии со сверхдлинной базой. Эти службы осуществляют измерения, входящие в состав глобальной геодезической сети и используемые для определения координат и скоростей движений ее пунктов, образуя Международную земную отсчетную основу (International Terrestrial Reference Frame – ITRF). При этом Международная служба ГНСС поддерживает свою часть объединенной ITRF, как самостоятельную отсчетную основу, образованную непрерывно-действующими станциями ГНСС. Эта основа используется службой для выработки точных эфемерид спутников глобальных радионавигационных систем.

Для точной фиксации начала и ориентирования осей пространственной системы координат в теле Земли, а также для кинематической реализации глобальной системы отсчета применяются модели глобальных физических процессов, таких как земные приливы, океаническая нагрузка, атмосферная нагрузка, положение среднего условного полюса, полюсный прилив, нагрузка океанического полюсного прилива. При этом также моделируются локальные эффекты: влияние температуры и давления на положение пункта, вариации и положение фазового центра ГНСС антенны. Кинематические реализации глобальных координатных систем отсчета представляют собой соответствующие геодезические сети с каталогами координат пунктов на соответствующую начальную эпоху и компонент векторов скоростей перемещений этих пунктов.

Сегодня ориентировка координатных осей и фиксация начала координат упомянутых систем отсчета WGS84, ПЗ-90 и ITRS в теле Земли согласованы между собой с высокой точностью на уровне первых сантиметров. При этом национальные системы отсчета глобального распространения WGS84 и ПЗ-90 сегодня имеют ориентировку и фиксацию в теле Земли, согласованную с ITRF, как с опорной и признанной наиболее точной и стабильной.

Региональные системы отсчета

В качестве примеров региональных координатных систем отсчета и их реализаций рассмотрим наиболее крупные из них, такие как Европейская, Российская и Северо-Американская.

Европейская региональная система отсчета European Terrestrial Reference System была установлена в 1989 г. Европейской подкомиссией Международной ассоциации геодезии (EUREF) [http://www.euref.eu/euref_egrs.html].

На сегодняшний день она опирается на наиболее точную глобальную систему отсчета ITRS. Однако в системе ITRS тектоника плит заставляет координаты европейских станций медленно

изменяться примерно на 2.5 см/год. Поэтому в 1990 г. на симпозиуме во Флоренции EUREF установила Европейскую земную систему отсчета ETRS89 таким образом, чтобы она, опираясь на ITRS, была бы жестко привязана к стабильной части Европы, так что связи между европейскими станциями оставались фиксированными [Altamimi, 2018].

Государственная геодезическая система координат Российской Федерации ГСК-2011 – это реализация геоцентрической координатной системы отчета. По принципам фиксации в теле Земли ГСК-2011 идентична Международной земной системе отсчета (ITRS), созданной в соответствии с рекомендациями МСВЗ (IERS). Она имеет кинематический каталог координат и скоростей перемещений геодезических пунктов [Kaftan et al., 2019].

Рассмотрим пример оценки сдвиговой жесткости литосферы по данным определения горизонтальных движений земной поверхности средствами ГНСС [Furst et al., 2018]. На рис. 1 представлено распределение векторов движений земной поверхности по данным GPS в разломной зоне Сан-Андреас на западе США, где области медленных движений (например, Сьерра-Невада) сопрягаются с областями высоких скоростей к западу от зоны Сан-Андреас. Векторы скоростей представлены в Северо-Американской отсчетной основе. Такое представление характеризует одностороннее движение всей обширной территории и при этом не способствует визуализации взаимно противоположных зеркально асимметричных движений областей земной коры по обе стороны от границы Северо-Американской и Тихоокеанской тектонических плит. Визуально характер движений, выраженных в региональной системе отсчета, представлен как однонаправленный на северо-запад. Не очевиден правосторонний сдвиг по системе разломов на границе тектонических плит, наиболее выраженный в косейсмических движениях и менее – в накоплении упругих деформаций при подготовке сильнейших сейсмических событий.

Локальные системы отсчета

Рассмотрев современные глобальные и региональные координатные системы отсчета, мы можем резюмировать, что они созданы для решения конкретных задач и для удобства изучения определенного объекта. Глобальные системы отсчета, в первую очередь, обеспечивают решение таких задач, как изучение изменений формы и размеров Земли в целом, движения глобальных тектонических плит по подстилающему вязкому субстрату и др. Некоторые реализации международной системы отсчета ITRS непосредственно использовали геологическую модель движения тектонических плит NUVEL-1 [Argus, Gordon, 1991], для

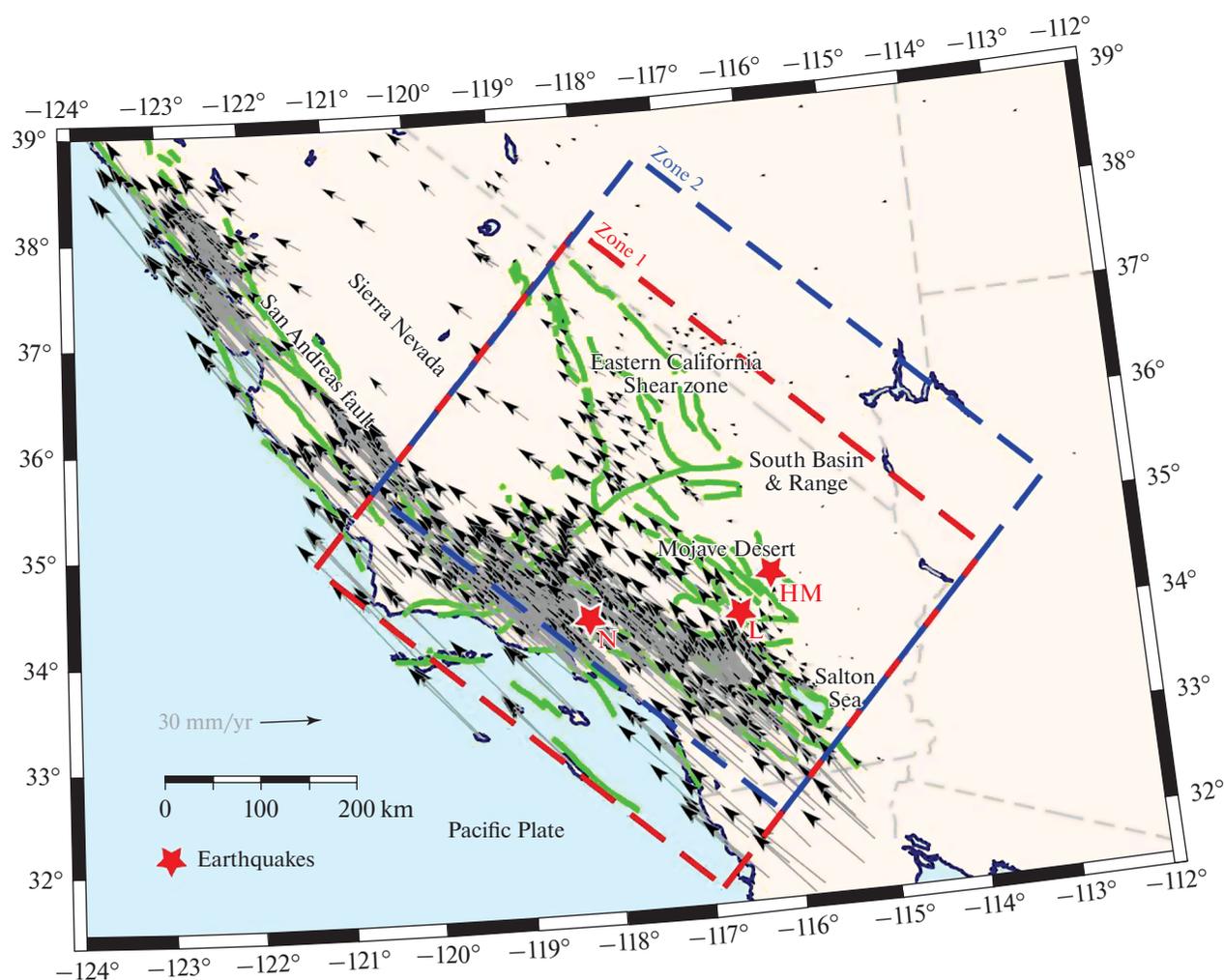


Рис. 1. Распределение геодезических измерений в Северо-Американской отсчетной основе. Черные стрелки показывают поле скорости в системе координат Северной Америки. Область анализа показана прямоугольником. Красные звезды указывают на место землетрясений в Ландерсе (L), в Нортридже (N) и на шахте Гектор (HM) [Furst et al., 2018].

фиксации и ориентировки векторов движений пунктов глобальной сети.

Применение глобальных и региональных систем отсчета неудобно и нерационально для изучения целого ряда локальных геодинамических процессов, таких как взаимное скольжение бортов сейсмогенерирующих разломов, движения и деформации земной поверхности в районах вулканической активности, на подрабатываемых территориях месторождений полезных ископаемых, в местах захоронения радиоактивных отходов и др. В этих случаях контрольные наблюдательные сети, реализующие локальную систему отсчета, покрывают территории значительно меньшей площади, чем глобальные и региональные. Зачастую фоновые движения тектонических плит, на которых расположены локальные сети, затушевывают те движения, которые сопровождают соответствующий локальный процесс. Ти-

пичный пример продемонстрирован на рис. 1, где в представленных скоростях смещений не очевидны сдвиговые правосторонние движения по простиранию сейсмогенерирующих разломов. При этом полученная картина не обеспечивает визуализацию локальных геодинамических эффектов, например таких, как присутствие шероховатостей в области скольжения бортов сейсмогенерирующих разломов, где должно наблюдаться отсутствие противонаправленных движений.

Локальная система отсчета не требует сложных процедур ее установления, связанных с упомянутыми глобальными геофизическими и астрономическими процессами ввиду малых геометрических размеров. Более того, такой учет при обработке отяготит искомые результаты дополнительными неточностями современных геофизических моделей.

Применение локальных систем отсчета осуществляется в технологиях геодезического мониторинга средствами ГНСС на локальных полигонах [Кафтан, Устинов, 2015; Кафтан и др., 2017, 2019]. При этом отсутствует необходимость опоры на точные глобальные и региональные реализации систем отсчета. Достаточно использовать “грубые” орбитальные реализации, например, WGS84 и ПЗ-90. Доступные широкополосные эфемериды спутников указанных радионавигационных систем определяются с точностью порядка метров. Это позволяет получать высокоточные векторы приращений координат смежных ГНСС станций, удаленных друг от друга до первых десятков километров. Остается зафиксировать начало координатных осей и их ориентировку, что обеспечивается уравниванием сети векторов приращений как свободной, без опоры на пункты глобальных и региональных реализаций. Как и все другие системы отсчета, локальная является условной. Она действует только на период проведения исследований. Эти обстоятельства существенно упрощают процедуры математической обработки и способствуют получению более высокой точности характеристик СДЗК и деформаций.

Такие системы отсчета принято называть “внутренними” системами координат. Теория получения таких “внутренних” координат описана, например, в работах [Grafarend, Schaffrin, 1974; Welsch, 1979]. Этот подход реализуется нами в разработанной методике уравнивания разностей повторных измерений, с целью анализа движений и деформаций земной поверхности [Кафтан и др., 2019].

В то же время наблюдения на локальных сетях имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при их планировании. При создании локальных сетей ввиду ряда причин (зеленность, отсутствие дорог, рельеф и др.) обеспечить оптимальную конфигурацию сети не всегда удается. В этой связи ниже рассматривается оценка влияния конфигурации сети на точность определения движений и деформаций

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ЛОКАЛЬНОЙ ГНСС СЕТИ НА ТОЧНОСТЬ АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИЙ

Напомним, что при построении геодезических сетей с использованием электронно-оптических средств измерений оптимальная форма треугольника сети должна быть близка к равносторонней. Это установлено геодезическими исследованиями еще при построении государственных сетей триангуляции. Для сетей ГНСС, когда речь идет об определении координат пункта, это требование уже не критично. В этой ситуации появляется возможность при обработке использовать макси-

мальное число измеренных связей (векторов базовых линий) между пунктами ГНСС сети. На первый взгляд, такой вариант обработки может обеспечить достижение наивысшей точности определения координат за счет увеличения числа избыточных измерений. Но определенным препятствием является такой известный факт, как снижение точности определения вектора базовой линии по мере увеличения его длины. Этот эффект всегда оговаривается в документации к ГНСС аппаратуре. Экспериментально по данным измерений в локальной деформационной сети влияние этого эффекта продемонстрировано в работе [Мельников, 2018]. Вопрос включения длинных линий в обработку требует исследования, так как длинные базовые линии, связывающие станции, расположенные на противоположных границах наблюдательной сети, могут не принести пользы из-за их меньшей точности по отношению к коротким векторам, связывающим соседние станции.

При развитии глобальных и региональных отсчетных основ экономически развитыми государствами, когда в едином сеансе измерений участвуют сотни, а не редко и тысячи ГНСС станций, число измеренных векторов базовых линий при этом достигает сотен тысяч. Вычисление большого количества таких векторов требует больших вычислительных затрат. Поэтому, например, стратегия обработки ГНСС измерений с использованием пакета Bernese [Bernese, 2015], предназначенного в первую очередь для развития глобальных и региональных геодезических сетей, предусматривает обязательную процедуру предварительной конфигурации ГНСС сети перед этапом вычисления отобранных векторов базовых линий и последующим уравниванием сети.

Тем не менее, в деформационном анализе возникает определенный интерес к использованию максимального числа векторов базовых линий для вычисления горизонтальных деформаций земной поверхности [Zubovich, Mukhamediev, 2010]. К такому решению исследователей побуждает подход [Shen et al., 1996], реализованный, например, в программном пакете [Teza et al., 2008]. В данном подходе завуалировано понятие конечного элемента, так как деформация вычисляется по любому количеству векторов смещений ГНСС пунктов, попадающих в некоторую заранее заданную область, в окрестности узла регулярной сетки. При этом теряется понимание деформируемого объекта (геометрической фигуры), которым в классическом подходе является конечный элемент – треугольник геодезической сети [Tsu-voi, 1933; Frank, 1966]. В этой связи преимуществом классического подхода также является процедура получения наиболее оптимальной конфигурации геодезической сети с использованием триангуляции Делоне [Делоне, 1934]. В работах

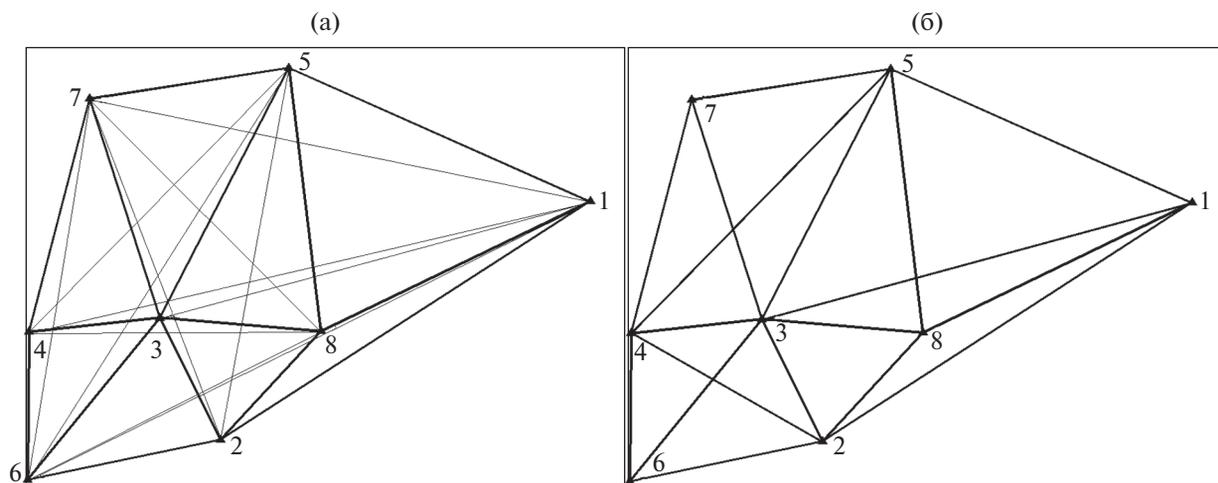


Рис. 2. Конфигурация наблюдательной сети.

а – полная сеть, б – сокращенная оптимизированная сеть. Черные треугольники – ГНСС станции. Черные линии – измененные базовые линии.

[Wu et al., 2003; Докукин и др., 2010] показано, что использование длинных треугольников способствует снижению точности искомым деформационных характеристик. В то же время вопрос об использовании наибольшего числа векторов базовых линий при вычислении векторов смещений ГНСС станций с целью повышения их точности остается нерешенным.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ВЛИЯНИЯ КОНФИГУРАЦИИ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕКТОРОВ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для решения поставленной задачи оценки вклада длинных базовых линий в точность определения смещений была создана специальная тестовая локальная сеть ГНСС наблюдений (рис. 2). Характеристики тестовой сети представлены в табл. 1.

В эксперименте применялась методика обработки локальной деформационной сети, рассмотренная в работе [Кафтан и др., 2019]. Порядок обработки ГНСС измерений заключался в следующем.

На первом этапе по суточным сеансам ГНСС измерений в режиме “статика” методом двойных

фазовых разностей определялись точные значения векторов базовых линий. Из каждого суточного решения формировались два варианта набора векторов: полный и сокращенный (см. рис. 2). Непрерывные измерения на пунктах сети выполнялись в течение 196 сут.

На втором этапе выполнялось уравнивание $i - 1$ разностей пространственных 3D векторов базовых линий, полученных вычитанием из векторов текущей эпохи измерений i векторов начальной эпохи. Особенностью обработки являлось то, что сеть уравнивалась как свободная от ошибок исходных данных без внешних опорных пунктов с использованием главной псевдообратной матрицы нормальных уравнений по методу получения локальной “внутренней” системы отсчета [Graffarend, Schaffrin, 1974; Welsch, 1979]. Такое ограничение при обработке глобальных ГНСС сетей в международной практике именуется по net rotation/translation, иными словами – искомые векторы смещений пунктов не претерпевают общего систематического перемещения и вращения. Таким образом, из векторов смещений исключается тренд глобальных перемещений тектонической плиты, на которой расположена локальная деформационная сеть.

Таблица 1. Характеристики вариантов наблюдательной сети

| Характеристики сетей | Длины базовых линий, м | | | Число линий | Число избыточных измерений | Средняя квадратическая ошибка (СКО) единицы веса μ , мм |
|-------------------------|------------------------|------|---------|-------------|----------------------------|---|
| | min | max | средняя | | | |
| Полная (вариант 1) | 326 | 2118 | 981 | 28 | 60 | 1.10 |
| Сокращенная (вариант 2) | 326 | 1587 | 782 | 18 | 30 | 0.75 |

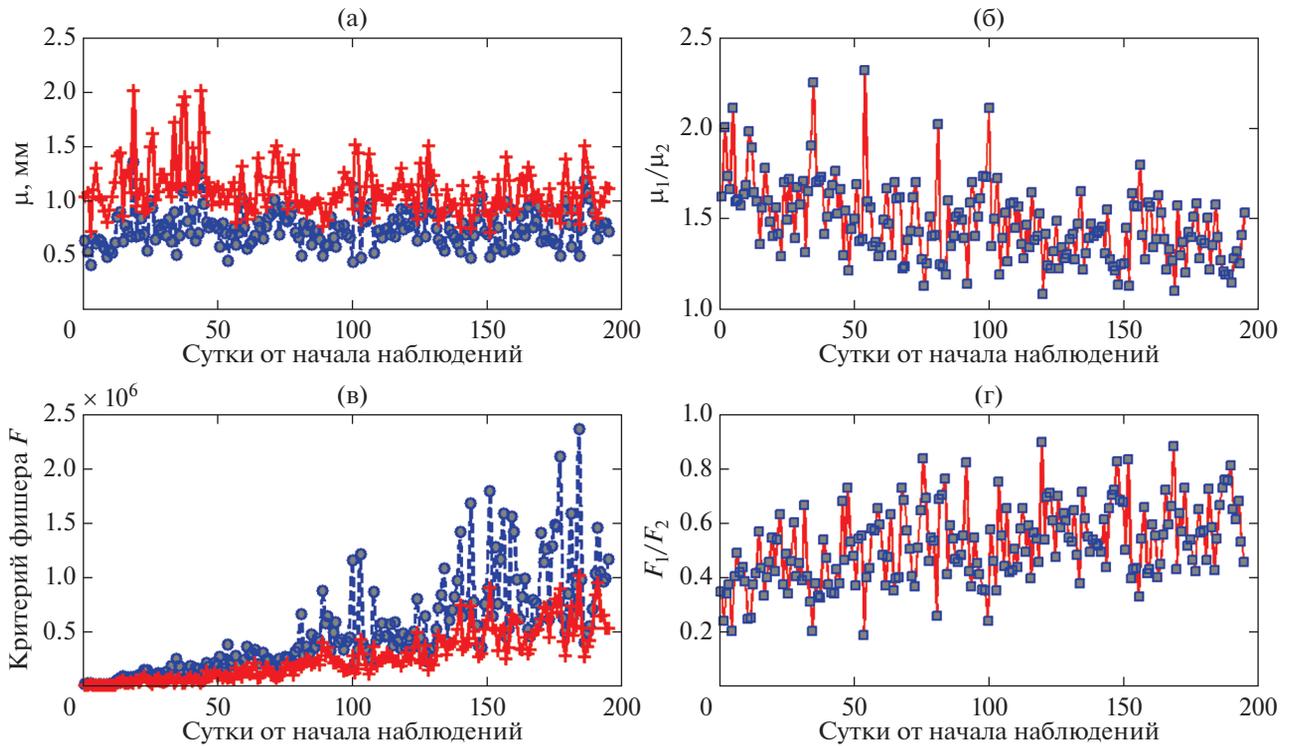


Рис. 3. Результаты сравнения оценок точности обработки локальной сети в полном и сокращенном вариантах. а – сравнение стандартных ошибок единицы веса полной (красный цвет) и сокращенной (синий цвет) сетей; б – отношение стандартной ошибки единицы веса μ_1 к μ_2 ; в – значения статистик Фишера полной сети (красный цвет) и сокращенной (синий цвет); г – отношения статистик Фишера F_1 к F_2 .

В результате уравнивания по методу наименьших квадратов полной (вариант 1) и сокращенной (вариант 2) сети были получены векторы смещений от начальной эпохи до текущей dx . Были вычислены оценки дисперсии разности наблюдений с единичным весом μ^2 . Средние значения стандартов единицы веса μ для каждого из вариантов представлены в последнем столбце табл. 1.

Сравнению были подвергнуты обобщенные оценки точности изменения горизонтальных смещений и эффективности их определения на уровне ошибок измерений.

Средние квадратические ошибки единицы веса измерения получали по формуле

$$\mu^2 = \frac{v^T Q_l^+ v}{n - m},$$

где v – поправки в измеренные разности компонент векторов базовых линий, Q_l – обратная весовая матрица измерений, n – общее число измерений, m – число избыточных измерений.

Эффективность определения деформаций оценивали с помощью дисперсионного отношения

$$F = \frac{dx^T N dx}{v^T P v},$$

где dx – вектор определяемых смещений пунктов ГНСС, N – матрица коэффициентов нормальных уравнений, P – весовая матрица.

Результаты сравнения двух вариантов обработки (рис. 3а) показывают, что все стандартные ошибки единицы веса для полной сети всегда превышают соответствующие оценки для сокращенной сети. Значения μ_1 превышают значения μ_2 от 1.1 до 2.3 раз (см. рис. 3б). Значения критерия Фишера в случае полной сети всегда ниже таковых для сокращенной сети (см. рис. 3в, г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ опыта использования координатных систем отсчета для геофизических задач, а также результаты эксперимента на тестовой локальной деформационной сети позволяют сделать следующие заключения.

Для целого круга задач наук о Земле, включая оценку и прогноз сейсмической опасности, применение локальных систем отсчета координат станций ГНСС и их изменений во времени представляет определенные преимущества. Такой подход представляется более простым и эффективным в отношении повышения точности определения движений и деформаций земной поверхности,

за счет участия в обработке наиболее коротких базовых линий, точность определения которых наиболее высока. Особенности локального мониторинга позволяют осуществлять обработку ГНСС и деформационный анализ без использования более сложных научных программных комплексов (Bernese, GAMIT/GLOBK, GIPSY-OASIS), ориентированных главным образом на обработку глобальных сетей, и применять для этой цели наиболее распространенные программные пакеты коммерческих фирм-производителей ГНСС аппаратуры.

Специальный эксперимент на большом объеме измерительной информации показал, что вопреки “законам” уравнивания измерений, вариант с вдвое меньшим числом избыточных измерений за счет исключения длинных линий, позволил получить почти в полтора раза более высокую точность определения пространственных смещений. Оценка эффективности определения пространственных смещений по критерию Фишера показала, что в сокращенной сети дисперсия искомым характеристикам наиболее статистически значимо превышает дисперсию ошибок измерений. Таким образом, проведенный анализ координатных систем отсчета, состава локальных ГНСС сетей наблюдений и тестовые расчеты показали, что использование специальных методических приемов обработки данных позволяет существенно повысить точность определения пре-, ко- и пост-сейсмических движений и деформаций земной поверхности в эпицентральных зонах сильных землетрясений и на этой основе разрабатывать новые подходы к прогнозу их местоположения.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Делоне Б.Н. О пустой сфере // Изв. АН СССР. ОМОН. 1934. № 4. С. 793–800.

Докукин П.А., Кафтан В.И., Красноперов Р.И. Влияния формы треугольников геодезической сети на результаты определения деформаций земной поверхности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2010. № 5. С. 6–11.

Кафтан В.И., Гвишиани А.Д., Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на Нижне-Канском геодинимическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 83–94. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94>

Кафтан В.И., Кафтан И., Гёк Е. Исследование движений и деформаций земной коры в Восточной Турции в связи с землетрясением Ван (23.10.2011 г., $M_w = 7.2$) с

использованием данных GPS наблюдений // Физика Земли. 2021. № 3. С. 30–44. <https://doi.org/10.31857/S000233721030078>

Кафтан В.И., Сидоров В.А., Устинов А.В. Сравнительный анализ точности локального мониторинга движений и деформаций земной поверхности с использованием глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС // Вулканология и сейсмология. 2017. № 3. С. 50–58. <https://doi.org/10.7868/S020303061703004X>

Кафтан В.И., Устинов А.В. Повышение точности локального геодинимического мониторинга средствами глобальных навигационных спутниковых систем // Горный журн. 2015. № 10. С. 32–37. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.10.06>

Кафтан В.И. Анализ движений и деформаций земной поверхности по тринадцатилетним GPS наблюдениям до и во время землетрясений Риджквест (июль 2019, США, Калифорния) // Вулканология и сейсмология. 2021. № 2. С. 29–38. <https://doi.org/10.31857/S0203030621010041>

Кашин Л.А. Построение классической астрономо-геодезической сети России и СССР (1816–1991 гг.): научно-технический и исторический обзор. М.: Картгеоцентр–Геодезиздат, 1999. 192 с.

Кузьмин Ю.О. Современная геодинимика: от движений земной коры до мониторинга ответственных объектов // Физика Земли. 2019. № 1. С. 78–103. <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019178-103>

Мельников А.Ю. Анализ точности метода precise point positioning для оценки возможности его применения в геодинимических исследованиях // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. Т. 62. № 6. С. 605–615. <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2018-62-6-605-615>

Побединский Г.Г., Кафтан В.И. Системы координат глобальные, континентальные, региональные, национальные: состояние, проблемы, перспективы // Науки о Земле. 2020. № 3. С. 4–59.

Alamimi Z. EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems. Version June 28, 2018, Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), France. 2018. P. 11. http://www.epncb.oma.be/_documentation/guidelines/

Alamimi Z., Angerman D., Argus D.F., Blewitt G., Boucher C., Chao B., Drewes H., Eanes R., Feissel M., Ferland R., Herring T.A., Holt B. The Terrestrial Reference frame and the Dynamic Earth // EOS Transactions, American Geophysical Union. 2001. V. 82. № 25. P. 273–284.

Altamimi Z., Rebischung P., Metivier L., Collilieux X. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2016. V. 121. P. 6109–6131. <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>

Argus D.F., Gordon R.G. No-Net-Rotation Model of Current Plate Velocities Incorporating Plate Motion Model NUVEL-1 // Geophys. Res. Lett. V. 18. № 11. P. 2039–2042.

Barthelmes F. Global Models / Ed. E. Grafarend // Encyclopedia of Geodesy. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Cham: Springer, 2018. P. 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0_43-2

- Bernese GNSS Software Version 5.2 / Eds R. Dach, S. Lutz, P. Walser, P. Fridez. Publisher: Astronomical Institute, University of Bern, 2021. <http://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU52.pdf>, <https://doi.org/10.7892/boris.72297>
- Frank F.C. Deduction of earth strain from survey data // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1966. V. 56. P. 35–42.
- Furst S., Peyret M., Chéry J., Mohammadi B. Lithosphere rigidity by adjoint-based inversion of interseismic GPS data, application to the Western United States // *Tectonophysics*. 2017. V. 746. P. 364–383. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.03.015>
- Grafarend E., Schaffrin B. Unbiased free net adjustment // *Survey Review*. 1974. V. 22(171). P. 200–218. <https://doi.org/10.1179/sre.1974.22.171.200>
- Kaula W. Theory of Satellite Geodesy: Applications of Satellites to Geodesy // Special series of brief books covering selected topics in the Pure and applied sciences. Blaisdell Pub. Co., 1966.
- Kaftan V.I., Kaftan I., Gök E. Crustal Movements and Deformations in Eastern Turkey in Connection with the Van Earthquake (October 23, 2011, $M_w = 7.2$): Study from GPS Data // *Izvestia, Physics of the Solid Earth*. 2021. V. 57. № 3. P. 30–44. <https://doi.org/10.1134/S1069351321030071>
- Kaftan V., Malkin Z., Pasynok S., Pobedinsky G., Popadiev V. Reference Frames / Eds V.P. Savinykh, V.I. Kaftan // National Report for the IAG of the IUGG 2015–2018, Geoinf. Res. Papers. 2019. V. 7. № 1. BS7003. (Moscow: GCRAS Publ., 2019. 99 p.) <https://doi.org/10.2205/2019IUGG-RU-IAG>
- Moritz H. Geodetic reference system 1980 // *Bulletin Ge'ode'sique*. 1980. V. 54. P. 395–405.
- Shen Z.-K., Jackson D.D., Ge B.X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101(B12). P. 27957–27980. <https://doi.org/10.1029/96JB02544>
- Teza G., Pesci A., Galgaro A. Grid strain and grid_strain3: Soft-ware packages for strain field computation in 2D and 3D environments // *Comput. Geosci*. 2008. V. 34. Iss. 9. P. 1142–1153. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.006>
- Tsuboi C. Investigation on the deformation of the earth's crust found by precise geodetic means // *Jap. J. Astron. Geoph.* 1933. V. 10. P. 93–248.
- Welsch W. A review of the adjustment of free networks // *Survey Review*. 1979. V. 25(194). P. 167–180. <https://doi.org/10.1179/sre.1979.25.194.167>
- Wu J., Tang C., Chen Y. Effect of triangle shape factor on precision of crustal deformation calculated // *J. Geodesy and Geodynamics*. 2003. V. 23(3). P. 26–30. (in Chinese).
- Zubovich A.V., Mukhamediev Sh.A. A method of superimposed triangulations for calculation of velocity gradient of horizontal movements: application to the Central Asian GPS network // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2010. V. 1. № 2. P. 169–185.

Analysis of the Possibilities of Using Local Deformation GNSS Monitoring Networks in Seismic Areas

V. I. Kaftan^{1, *} and V. N. Tatarinov¹

¹*Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Molodezhnaya str., 3, Moscow, 119296 Russia*

**e-mail: v.kaftan@gcras.ru*

The experience of using global, regional and local coordinate reference systems is analyzed. It is shown that the use of local reference systems of coordinates of GNSS stations and their changes in time increases the accuracy and reliability of the assessment of pre-, co- and post-seismic movements and deformations of the earth's surface due to shortest baselines participation. The use of a local frame of reference also simplifies data processing. A test calculation of the influence of the network configuration of GNSS observations on their accuracy has been performed. An experiment on a large amount of measurement information showed that the processing option with half the number of redundant measurements is 1.5 times more accurate due to the elimination of long baselines. Evaluation of the efficiency of determining spatial displacements according to Fisher's criterion confirmed that in a shortened network (long lines are excluded) the variance of the desired characteristics is statistically significantly higher than the variance of measurement errors.

Keywords: deformation monitoring, GNSS, coordinate systems, local networks