

На правах рукописи

**НГУЕН ВАН ДОНГ**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ  
ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КООРДИНАТНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ  
В СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ ВЬЕТНАМ**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

МОСКВА – 2011

Работа выполнена на кафедре астрономии и космической геодезии Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК).

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор  
Краснорылов Игорь Ильич

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
Татевян Сурия Керимовна  
доктор технических наук, профессор  
Шануров Геннадий Анатольевич

Ведущая организация: НИЦ (Топогеодезического и навигационного обеспечения) ФБУ «27 ЦНИИ Минобороны»

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г. в «\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д.212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, Гороховский переулок, дом 4, МИИГАиК, зал заседаний диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Ю.М. Климков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Современные требования к точности координатных определений очень высокие для решения новых задач, например, мониторинга смещений и деформаций сооружений, особенно имеющих большую высоту; изучения перемещений литосферных плит (блоков); кадастра и учета недвижимости; установки и эксплуатации буровых платформ на море; обеспечения безопасности различных видов транспорта (железнодорожное движение (особенно скоростное), воздушные полеты). Требуемые точности координатных определений уже менее одного сантиметра. Однако с течением времени опорная геодезическая сеть постепенно «старееет», теряя свою первоначальную точность из-за влияния геодинамических эффектов. Результаты последних геодинамических исследований показывают, что изменение координат пунктов, находящихся на территории Социалистической Республики Вьетнам (СРВ), составляет около 50 мм/год, а изменение взаимного расположения пунктов, находящихся на севере и юге СРВ, составляет 4... 25 мм/год. Поэтому для повышения точности координатных определений, прежде всего, необходимо решить задачу по выявлению и учету геодинамических факторов.

Одной из важных задач геодинамики является исследование движений и деформаций литосферных блоков. Это исследование позволяет устанавливать структурно-геологические особенности района, получать данные для прогноза землетрясений и определять изменения координат геодезических пунктов из-за движений и деформаций литосферных блоков. Одна из проблем, возникающих при этом, связана с оптимальным проектированием геодинамических сетей, которое бы гарантировало достижение заданной точности при минимальной стоимости выполнения работ. Это делает задачу по исследованию метода оптимального проектирования геодинамических сетей актуальной.

Параллельно с повышением точности опорных геодезических построений требуется совершенствование способов учета эффектов, влияющих на определения координат пунктов. Среди них наиболее значимым является

влияние тропосферы. К настоящему времени для учета влияния тропосферы можно применять модели, позволяющие оценить величину тропосферных задержек (ТЗ): Хопфилд; Саастамойнена; Нейлла; MOPS (Minimum Operational Performance Standards); GCAT (GPS Code Analysis Tool); Университета Нью Брунсвика (УНБ); Блэка. При построении этих моделей особенности условий Вьетнама не были учтены. Поэтому возникает вопрос о том, какая из моделей тропосферы дает наиболее точные ТЗ в соответствии с условиями Вьетнама. При учете влияния тропосферы также можно использовать значения зенитных тропосферных задержек (ЗТЗ), определенных методом точного позиционирования. В связи с этим для повышения точности координатных определений требуется определение наиболее эффективного способа учета влияния тропосферы в климатических условиях Вьетнама.

С учетом вышеизложенного автор полагает, что тема диссертации является актуальной и имеет научное и практическое значение.

**Цель и задачи диссертации.** Целью диссертации явились разработка и исследование методов, приводящих к повышению точности координатных определений в СРВ. В соответствии с этой целью в диссертации решались следующие основные задачи:

- **Анализ современного состояния координатного обеспечения СРВ.**

На основе анализа особенностей координатного обеспечения СРВ сделан вывод о недостатках государственной геодезической сети (ГГС) СРВ и предложены основные направления для повышения точности координатных определений в СРВ.

- **Разработка и исследование методов решения задач геодинамики.**

Разработано программно-алгоритмическое обеспечение метода совместного уравнивания координат и составляющих скоростей движений пунктов с использованием особых матричных преобразований. Разработанная программа апробирована на практике. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение для оптимизации геодинамических сетей по критерию минимальной стоимости выполнения работ, и с его использованием проведена

оптимизация двух геодинимических сетей (Дьенбьен-Лайчау и Сонла) в СРВ. Сформулированы рекомендации по практическому применению выполненных разработок.

- **Анализ способов учета влияния тропосферы.** Рассмотрены модели тропосферы: Хопфилд, Саастамойнена, Нейлла, MOPS, GCAT, УНБ, Блэка. Исследована возможность применения метода точного позиционирования для определения ЗТЗ. Рассмотрена эффективность использования измеренных метеопараметров при учете влияния тропосферы. Исследованы способы учета влияния тропосферы при спутниковых измерениях. Разработаны соответствующие рекомендации.

#### **Научная новизна и результаты работы, выносимые на защиту:**

- Метод совместного уравнивания координат и составляющих скоростей движений пунктов по данным многократных спутниковых наблюдений с использованием особых матричных преобразований, в том числе преобразования матриц к виду векторов. Результаты определения координат и движений пунктов, находящихся вблизи территории Вьетнама.

- Метод оптимизации геодинимических сетей по критерию минимальной стоимости реализации проекта с использованием генетического алгоритма. Результаты оптимизации двух геодинимических сетей Дьенбьен-Лайчау и Сонла на территории СРВ с использованием этого метода.

- Рекомендация наиболее целесообразного способа учета влияния тропосферы при спутниковых измерениях в условиях Вьетнама. Оценка эффективности использования измеренных метеопараметров при учете влияния тропосферы.

**Практическая значимость работы.** Выполненные разработки позволят повысить точность координатных определений в условиях Вьетнама по результатам спутниковых наблюдений. Предлагаемый нами способ преодоления недостатка метода совместного уравнивания координат и составляющих скоростей движений пунктов позволяет реализовать данный метод при большом числе наблюдений, а также повысить скорость вычислений.

Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение позволяет провести оптимизацию геодинамических сетей. Практическое использование составленного программного обеспечения позволит в ряде случаев достичь экономии финансовых и людских ресурсов за счет уменьшения количества подлежащих измерению величин. На основе анализа моделей тропосферы рекомендована оптимальная для условий Вьетнама модель. Предложено использование ЗТЗ, полученных методом точного позиционирования, для учета влияния тропосферы. Выполненное исследование способов учета влияния тропосферы также приведет к повышению точности координатных определений в странах со сходными с СРВ природными условиями.

**Апробация работы.** Основные результаты по теме диссертации докладывались на конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК 2009, 2010 и 2011 гг., на Международной научно-технической конференции «Геодезия, картография и кадастр - XXI век», посвящённой 230-летию основания Московского государственного университета геодезии и картографии (25-27 мая 2009 г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в четырех работах в журнале Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», включенном в перечень ВАК.

**Соответствие диссертации Паспорту научной специальности.** Диссертация соответствует специальности 25.00.32 «Геодезия». Диссертационное исследование выполнено в соответствии с пунктом 3 паспорта специальности ВАК – «Геодезические (глобальные) навигационные спутниковые системы и технологии...»; пунктом 8 – «Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры,...

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращенных слов и списка использованных источников. Основное содержание изложено на 171 странице текста. Работа содержит 40 рисунков и 14 таблиц. Список литературы включает в себя 76 наименований, в том числе 32 на русском языке, 44 на иностранных языках.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности темы диссертации, формулировки цели, задач работы и ожидаемых научных результатов, которые автор предполагает получить при разработке диссертации.

**В первой главе «Анализ современного состояния координатного обеспечения СРВ»** приведены сведения из истории построения координатного обеспечения Вьетнама и его современное состояние. В результате выделены два направления исследования в соответствии с существующими требованиями геодезического обеспечения во Вьетнаме, возникающими при решении научно-практических задач: изучение геодинамических влияний; анализ способов учета влияния тропосферы при спутниковых наблюдениях в условиях СРВ.

**Во второй главе «Разработка и исследование методов решения задач геодинамики»** представлено совершенствование теоретических основ методов изучения геодинамических явлений и оптимизации геодинамических сетей.

**1. Совершенствование теоретических основ методов изучения геодинамических влияний.** Проведено исследование геодинамического метода, при реализации которого совместно уравниваются координаты пунктов наблюдения ИСЗ и составляющие скоростей их движения. Традиционный же метод состоит в уравнивании координат пунктов на каждую эпоху, после чего вычисляются скорости их движения. Преимущество предлагаемого метода по сравнению с традиционным методом состоит в том, что он позволит включить в уравнивание наблюдения на определяемых пунктах в эпохи, когда наблюдения на опорных пунктах не производились. Следовательно, в уравнивание можно включить максимальное число измерений, хотя бы они относились к разным эпохам и выполнены по разным программам. Сущность наших предложений по вопросу уравнивания геодинамической сети сводится к следующему. Уравнение, отражающее изменение координат во времени имеет вид

$$\begin{cases} X_i(t) = X_i^0 + \dot{X}_i \Delta t, \\ Y_i(t) = Y_i^0 + \dot{Y}_i \Delta t, \\ Z_i(t) = Z_i^0 + \dot{Z}_i \Delta t, \end{cases} \quad (1)$$

где  $(X_i^0 \ Y_i^0 \ Z_i^0)^T$ ,  $(\dot{X}_i \ \dot{Y}_i \ \dot{Z}_i)^T$  – координаты и составляющие скорости движения пункта  $i$  в начальную эпоху  $t_0$ ;  $\Delta t = t - t_0$  – время, отсчитываемое от начальной эпохи. Выражение компонентов векторов базовых линий между пунктами  $i$  и  $j$  в эпоху  $t$  имеет вид

$$\begin{cases} \Delta X_{ij}(t) = X_j(t) - X_i(t), \\ \Delta Y_{ij}(t) = Y_j(t) - Y_i(t), \\ \Delta Z_{ij}(t) = Z_j(t) - Z_i(t). \end{cases} \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2), получим

$$\begin{cases} \Delta X_{ij}(t) = X_j^0 + \dot{X}_j \Delta t - X_i^0 - \dot{X}_i \Delta t, \\ \Delta Y_{ij}(t) = Y_j^0 + \dot{Y}_j \Delta t - Y_i^0 - \dot{Y}_i \Delta t, \\ \Delta Z_{ij}(t) = Z_j^0 + \dot{Z}_j \Delta t - Z_i^0 - \dot{Z}_i \Delta t. \end{cases} \quad (3)$$

На основе выражении (3), приведем уравнение поправок в виде

$$AX + L = V, \quad P_L, \quad (4)$$

где  $A$  – матрица коэффициентов. Ее фрагмент для одной линии имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -\Delta t & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -\Delta t & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -\Delta t & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$X$  – неизвестные, поправки к координатам пунктов и составляющим скоростей их движения

$$X = (\Delta X_i^0 \ \Delta Y_i^0 \ \Delta Z_i^0 \ \Delta \dot{X}_i \ \Delta \dot{Y}_i \ \Delta \dot{Z}_i \ \Delta X_j^0 \ \Delta Y_j^0 \ \Delta Z_j^0 \ \Delta \dot{X}_j \ \Delta \dot{Y}_j \ \Delta \dot{Z}_j)^T; \quad (6)$$

$L$  – вектор свободных членов

$$L = \begin{pmatrix} \Delta X_{ij}^0(t) - \Delta X_{ij}(t) \\ \Delta Y_{ij}^0(t) - \Delta Y_{ij}(t) \\ \Delta Z_{ij}^0(t) - \Delta Z_{ij}(t) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где  $\Delta X_{ij}^0(t)$ ,  $\Delta Y_{ij}^0(t)$ ,  $\Delta Z_{ij}^0(t)$  – вычисленные (счислимы) компоненты вектора базовых линий на эпоху  $t$ ;  $\Delta X_{ij}(t)$ ,  $\Delta Y_{ij}(t)$ ,  $\Delta Z_{ij}(t)$  – «измеренные» компоненты вектора базовых линий на эпоху  $t$ ;  $V$  – вектор поправок к измеренным величинам;  $P_L$  – матрица весов уравнений поправок. Решая уравнение поправок (4) методом наименьших квадратов, получаем координаты и составляющие скорости движения пунктов.



К недостатку предлагаемого метода можно отнести существенное увеличение размерности матриц, требующихся для его реализации. Для преодоления этого недостатка мы предлагаем использовать особые матричные преобразования. Поскольку у матрицы коэффициентов уравнения поправок  $A$  и матрицы весов уравнений поправок  $P_L$  существует большое число нулевых элементов, для уменьшения объема вычислительных операций нами предлагается преобразование матриц к виду векторов. Составляем один вектор для сохранения значений ненулевых элементов и два вектора для индекса (номер строки и столбца) соответствующих элементов. Необходимое время для совместного уравнивания координат и составляющих скоростей движений пунктов при разном количестве измеренных величин с использованием преобразования матриц к виду векторов и без его использования изображено на рис. 1. Расчеты выполнены на персональном компьютере с характеристиками: процессор Intel Core2 Duo T6600 2,2 ГГц; объем памяти 4096 Мб; операционная система Windows 7 Домашняя расширенная.

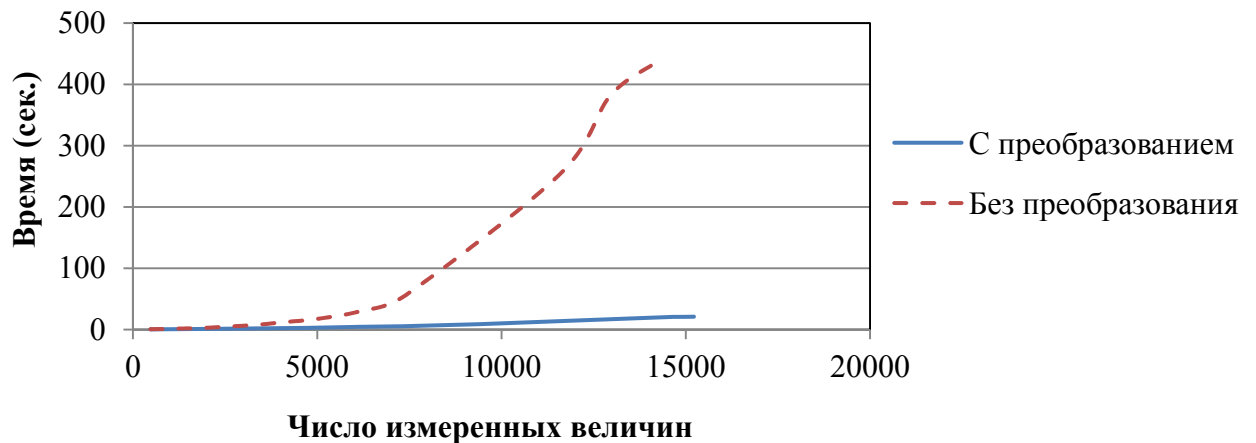


Рис. 1. Необходимое время для совместного уравнивания координат и составляющих скоростей движений пунктов при разном количестве измеренных величин

Для оценки эффективности предлагаемого метода нами проведены расчеты по результатам реальных спутниковых наблюдений. Поскольку нам были недоступны результаты наблюдений на территории Вьетнама, оценка производилась по результатам наблюдений на станциях, находящихся вблизи территории СРВ. Определенные обычным и предлагаемым методом составляющие скорости движения станций отражены на рис. 2.



Рис. 2. Движения станций, находящихся вблизи территории Вьетнама

Выполненные расчеты свидетельствуют, что при применении метода совместного уравнивания координат и составляющих скоростей движений пунктов в данной работе была получена точность в 2 ÷ 3 раза выше по сравнению с обычно применяемым методом.

## 2. Оптимизация геодинамических GPS/ГЛОНАСС сетей.

Рассматривался вопрос об оптимизации существующих сетей по критерию минимальной затраты для реализации сети. Целью оптимизации, прежде всего, является оптимизация весов измерений. Это приводит к многокритериальной задаче

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi = \left( \sum_{i=1}^l c_i p_i \right)^{-1} \rightarrow \max, \\ p_{i,\min} \leq p_i \leq p_{i,\max}, \quad i = 1..l, \\ \sigma_i \leq \sigma_{i,\max}, \quad i = 1..r, \end{array} \right. \quad (8)$$

где  $\Phi$  – целевая функция;  $c_i$  – коэффициенты относительной выгодности, которые определяются по формуле

$$c_i = \frac{\text{затраты на } i\text{-ое измерение}}{\text{затраты на } 1\text{-ое измерение}}; \quad (9)$$

$p_i$  – оптимизируемые параметры (веса измерений);  $p_{i,\min}$ ,  $p_{i,\max}$  – минимально и максимально достижимое значение весов измерений базовых линий;  $\sigma_i$ ,  $\sigma_{i,\max}$  – средние квадратические ошибки деформационных параметров и их предельное значение;  $l$  – число наблюдений;  $r$  – число деформационных параметров.

В случае, когда наблюдения на всех пунктах существующих сетей не позволят получать требуемую точность определения деформационных параметров, сеть должна улучшаться включением в ее состав дополнительных пунктов. Нашей задачей является отбор наиболее информативных дополнительных пунктов до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность хотя бы одного из определяемых параметров, по критериям

$$\begin{cases} \phi_j = \frac{1}{C_j} \sum_{i=1}^r \left( \frac{\sigma_i^2 - \sigma_{i,вк.}^2}{\sigma_i^2} \right) \rightarrow \max, \\ x_{j,мин} \leq x_j \leq x_{j,макс}, \\ y_{j,мин} \leq y_j \leq y_{j,макс}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $C_j$  – стоимость измерения  $j$ -го пункта;  $\sigma_i, \sigma_{i,вк.}$  – средние квадратические ошибки деформационных параметров до и после включения пункта с номером  $j$ ;  $x_j, y_j, x_{j,мин}, y_{j,мин}, x_{j,макс}, y_{j,макс}$  – координаты пункта и их предел.

При оптимизации проектируемой сети использован генетический алгоритм. В процессе проектирования необходимо определить, к какому литосферному блоку принадлежат возможные положения дополнительных пунктов. Поскольку количество возможных положений может составлять несколько тысяч и более, ручной ввод этих данных оказывается невозможным. Для решения этой проблемы мы предлагаем моделирование разлома математическим методом.

Нами было разработано программно-алгоритмическое обеспечение для оптимального проектирования геодинамических сетей. С его использованием мы провели оптимизацию двух геодинамических сетей во Вьетнаме: Дьенбьен-Лайчау и Сонла. При оптимизации было принято: средняя квадратическая ошибка единицы веса  $\sigma_0 = 1$ ; коэффициенты выгоды всех измерений при оптимизации с точки зрения весов измерений  $c_i = 1, \forall i$ ; стоимость измерения пункта одинакова при улучшении сети, т. е.  $C_1 = C_2 = \dots = C_n$ , где  $n$  – число пунктов проектируемой сети; точность определения плановых компонент

$$\sigma_{\Delta x_i} = \sigma_{\Delta y_i} = \sigma_i = a + bL_i = (3 + 0,1L_i) \text{ мм}; \quad (11)$$

максимальные и минимальные веса

$$p_{\Delta X_i}^{\min} = p_{\Delta Y_i}^{\min} = p_i^{\min} = 0, \quad p_{\Delta X_i}^{\max} = p_{\Delta Y_i}^{\max} = p_i^0 = \frac{1}{\sigma_i^2}. \quad (12)$$

**Геодинамическая сеть Дьенбьен-Лайчау** построена для исследования деформаций земной коры, вблизи разлома Дьенбьен-Лайчау и состоит из 7 пунктов (рис. 3). Рассмотрим задачу оптимизации, в которой модель деформации имеет вид

$$\begin{cases} u_I = 0, & v_I = 0, \\ u_{II} = a_0, & v_{II} = b_0. \end{cases} \quad (13)$$

где  $u_i, v_i$  – составляющие движений пунктов, находящихся на блоке  $i$ ;  $a_0, b_0$  – параметры, выражающие движения блока II относительно блока I.

Нами проведены расчеты оптимизации геодинамической сети с точки зрения весов измерений для четырех ограничений точности деформационных параметров, показанных в таблице 1. В таблице приведена оптимальная доля максимальных весов измерений базовых линий. Если базовая линия не приведена в таблице или оптимальная доля не указана, измерения компонент такой базовой линии не требуются.

Таблица 1. Результаты оптимизации весов измерений геодинамической сети Дьенбьен-Лайчау

| Базовые линии | Предел ошибок деформационных параметров $\sigma_{a_0}^{\max} = \sigma_{b_0}^{\max} =$ |            |            |            |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|
|               | 3,0 мм/год                                                                            | 2,5 мм/год | 2,0 мм/год | 1,5 мм/год |
| NGA1-DON1     | 0,90                                                                                  | 0,84       | 0,96       | 1          |
| HAM1-LEM1     | 0,84                                                                                  | 0,86       | 0,88       | 1          |
| DON1-HAM1     |                                                                                       | 0,90       | 0,93       | 1          |
| TAU2-TAT1     |                                                                                       |            | 0,98       | 1          |
| TAU1-TAT1     |                                                                                       |            | 0,63       | 1          |
| LEM1-TAU1     |                                                                                       |            |            | 1          |
| LEM1-TAU2     |                                                                                       |            |            | 1          |
| NGA1-LEM1     |                                                                                       |            |            | 1          |
| DON1-TAU2     |                                                                                       |            |            | 0,99       |
| DON1-TAU1     |                                                                                       |            |            | 0,88       |

Для исследования деформаций внутри литосферных блоков в модель, имеющую вид (13), добавлены три деформационных параметра. Модель деформаций района Дьенбьен-Лайчау имеет вид

$$\begin{cases} u_I = \varepsilon_x x_I + \varepsilon_{xy} y_I, & v_I = \varepsilon_{xy} x_I + \varepsilon_y y_I, \\ u_{II} = a_0 + \varepsilon_x x_{II} + \varepsilon_{xy} y_{II}, & v_{II} = b_0 + \varepsilon_{xy} x_{II} + \varepsilon_y y_{II}, \end{cases} \quad (14)$$

где  $u_i, v_i$  и  $x_i, y_i$  – составляющие движений и координаты пунктов, находящихся

на блоке  $i$ ;  $a_0$ ,  $b_0$  – параметры, выражающие движения блока II относительно блока I;  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_{xy}$  – параметры, выражающие деформации внутри блоков. Проведенные расчеты показывают, что в этом случае построенная геодинимическая сеть обеспечивает определение деформационных параметров  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_{xy}$  с точностью 1,7 мм/год, 5,4 мм/год,  $2,8 \cdot 10^{-8}$  год $^{-1}$ ,  $31,5 \cdot 10^{-8}$  год $^{-1}$ ,  $5,8 \cdot 10^{-8}$  год $^{-1}$  соответственно. Для определения деформационных параметров с более высокой точностью требуется включение в состав сети дополнительных пунктов. Пусть допустимая область изображена на рис. 3. С использованием разработанного программно-алгоритмического обеспечения, мы определили положения восьми наиболее информативных дополнительных пунктов POI1, POI2, ..., POI8 (рис. 3). Ошибки деформационных параметров, полученные при включении в сеть дополнительных пунктов, показаны в таблице 2.

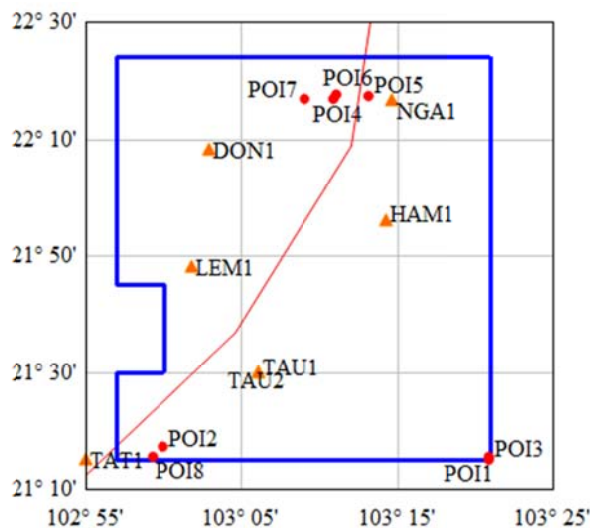


Рис. 3. Наиболее информативные дополнительные пункты геодинимической сети Дьенбьен-Лайчау

Обозначения  
 — Разлом  
 — Граница допустимой области  
 ▲ Существующие пункты  
 ● Дополнительные пункты

Таблица 2. Априорные ошибки деформационных параметров при включении в состав сети Дьенбьен-Лайчау дополнительных пунктов

| Число вк. допол. пунктов | $\sigma_{a0}$ | $\sigma_{b0}$ | $\sigma_{\varepsilon x}$ | $\sigma_{\varepsilon y}$ | $\sigma_{\varepsilon_{xy}}$ | Число вк. допол. пунктов | $\sigma_{a0}$ | $\sigma_{b0}$ | $\sigma_{\varepsilon x}$ | $\sigma_{\varepsilon y}$ | $\sigma_{\varepsilon_{xy}}$ |
|--------------------------|---------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
|                          | мм/год        |               | $10^{-8}$ год $^{-1}$    |                          |                             |                          | мм/год        |               | $10^{-8}$ год $^{-1}$    |                          |                             |
| 1                        | 1,4           | 2,2           | 2,3                      | 8,6                      | 2,3                         | 5                        | 0,9           | 1,1           | 1,5                      | 4,4                      | 1,4                         |
| 2                        | 1,2           | 1,6           | 2,1                      | 6,5                      | 2,1                         | 6                        | 0,8           | 0,9           | 1,4                      | 4,2                      | 1,3                         |
| 3                        | 1,2           | 1,5           | 1,9                      | 4,9                      | 1,8                         | 7                        | 0,7           | 0,8           | 1,3                      | 4,0                      | 1,2                         |
| 4                        | 1,0           | 1,2           | 1,7                      | 4,6                      | 1,6                         | 8                        | 0,7           | 0,8           | 1,2                      | 3,6                      | 1,2                         |

**Геодинимическая сеть Сонла** создана для мониторинга деформаций земной коры из-за действий разломов Сонла и Черной реки и состоит из 7 пунктов (рис. 4). Рассмотрим задачу оптимизации, в которой модель деформаций имеет вид:

$$\begin{cases} u_I = a_0 + \varepsilon_x x_I + \varepsilon_{xy} y_I, & v_I = b_0 + \varepsilon_{xy} x_I + \varepsilon_y y_I, \\ u_{II} = \varepsilon_x x_{II} + \varepsilon_{xy} y_{II}, & v_{II} = \varepsilon_{xy} x_{II} + \varepsilon_y y_{II}, \\ u_{III} = c_0 + \varepsilon_x x_{III} + \varepsilon_{xy} y_{III}, & v_{III} = d_0 + \varepsilon_{xy} x_{III} + \varepsilon_y y_{III}, \end{cases} \quad (15)$$

где  $u_i, v_i$  и  $x_i, y_i$  – составляющие движений и координаты пунктов, находящихся на блоке  $i$ ;  $a_0, b_0, c_0, d_0$  – параметры, выражающие движения блоков I и III относительно блока II;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$  – параметры, выражающие деформации внутри блоков. Была проведена оптимизация для 9 вариантов пределов ошибок деформационных параметров с принятием  $\sigma_{a0}^{мак} = \sigma_{b0}^{мак} = \sigma_{c0}^{мак} = \sigma_{d0}^{мак} = \sigma_a^{мак}$  и  $\sigma_{\varepsilon x}^{мак} = \sigma_{\varepsilon y}^{мак} = \sigma_{\varepsilon xy}^{мак} = \sigma_{\varepsilon}^{мак}$ . В таблице 3 представлена оптимальная доля максимальных весов измерений базовых линий в зависимости от пределов ошибок деформационных параметров. Если базовая линия не приведена в таблице или оптимальная доля не указана, измерения компонент такой базовой линии не требуются.

Таблица 3. Результаты оптимизации весов измерений геодинамической сети Сонла

| $\sigma_a^{мак}$ , мм/год                            | 3,5       | 3,5  | 3,5  | 3,0  | 3,0  | 3,0  | 2,7  | 2,7  | 2,7  |      |
|------------------------------------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\sigma_{\varepsilon}^{мак}$ , $10^{-7}$ год $^{-1}$ | 2,00      | 1,50 | 1,25 | 2,00 | 1,50 | 1,25 | 2,00 | 1,50 | 1,25 |      |
| Базовые линии                                        | LOT1-NAD2 | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |      |
|                                                      | MON1-NOI1 | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |      |
|                                                      | NAD2-NAH1 | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |      |
|                                                      | NOI1-NAH1 | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |      |
|                                                      | TPU1-LOT1 | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |      |
|                                                      | TPU1-QTA2 | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |      |
|                                                      | MON1-NAD2 | 0,99 | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |      |
|                                                      | MON1-TPU1 | 0,63 | 0,72 | 0,99 | 0,92 | 0,92 | 0,99 | 1    | 1    | 0,97 |
|                                                      | QTA2-NAD2 |      | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |
|                                                      | TPU1-NAH1 |      | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |
|                                                      | MON1-LOT1 |      |      | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |
|                                                      | NOI1-NAD2 |      |      | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |
|                                                      | LOT1-NAH1 |      |      | 1    |      |      | 1    | 1    | 1    | 1    |
|                                                      | LOT1-NOI1 |      |      | 1    |      |      | 1    | 1    | 1    | 1    |
|                                                      | MON1-NAH1 |      |      | 1    |      |      | 1    | 1    | 1    | 1    |
|                                                      | MON1-QTA2 |      |      | 1    |      |      | 1    | 1    | 1    | 1    |
|                                                      | NOI1-QTA2 |      |      | 1    |      |      | 1    | 1    | 1    | 1    |
|                                                      | TPU1-NOI1 |      |      | 1    |      |      | 1    | 1    | 1    | 1    |
|                                                      | QTA2-NAH1 |      |      |      |      |      |      | 1    | 1    | 1    |
|                                                      | TPU1-NAD2 |      |      | 1    |      |      | 1    |      |      | 1    |

Расчет, проведенный нами, свидетельствует, что наблюдения на всех пунктах сети дает точность определения деформационных параметров  $a_0, b_0, c_0, d_0$  на уровне 2,7 мм/год, а параметров  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$   $1,23 \cdot 10^{-7}$  год $^{-1}$ . Для получения

более высокой точности необходимо перепроектировать сеть с добавлением новых пунктов. Пусть дополнительные пункты должны находиться в допустимой области, которая изображена на рис. 4. С использованием разработанного программно-алгоритмического обеспечения мы определили положения восьми наиболее информативных дополнительных пунктов POI1, POI2, ..., POI8 (рис. 4). Ошибки деформационных параметров, полученные при включении в сеть дополнительных пунктов, показаны в таблице 4.

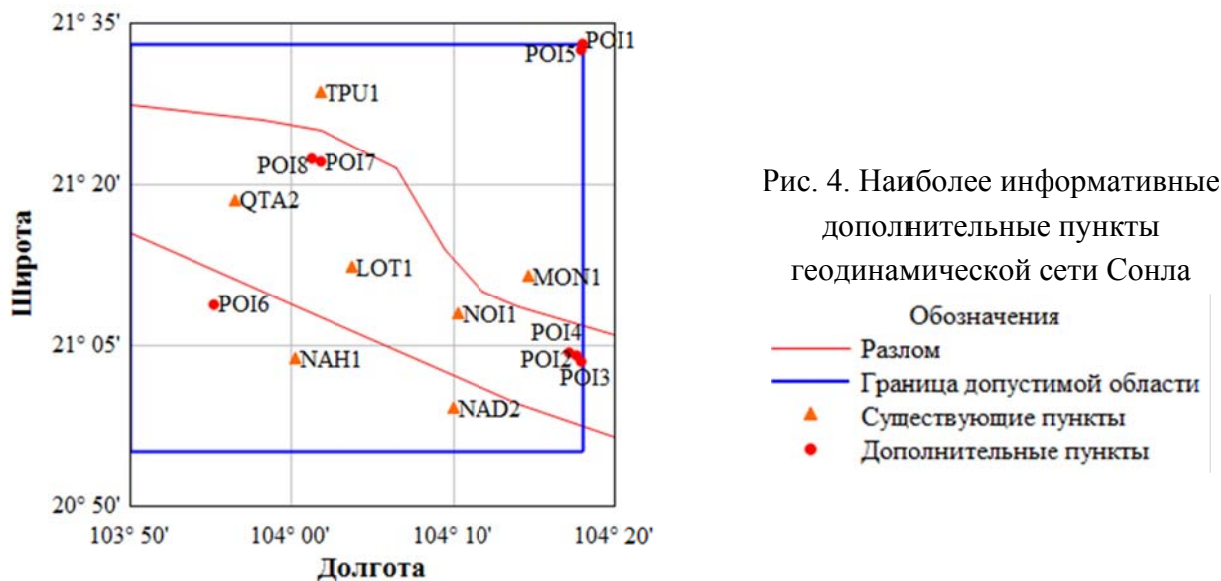


Таблица 4. Априорные ошибки деформационных параметров при включении в состав сети Сонла дополнительных пунктов

| Число вк. допол. пунктов | $\sigma_{a0}$ , мм/год | $\sigma_{b0}$ , мм/год | $\sigma_{c0}$ , мм/год | $\sigma_{d0}$ , мм/год | $\sigma_{\varepsilon x}$ , $10^{-8}$ год $^{-1}$ | $\sigma_{\varepsilon y}$ , $10^{-8}$ год $^{-1}$ | $\sigma_{\varepsilon xy}$ , $10^{-8}$ год $^{-1}$ |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1                        | 1,3                    | 1,4                    | 1,2                    | 1,2                    | 3,4                                              | 4,9                                              | 2,8                                               |
| 2                        | 1,1                    | 1,2                    | 1,1                    | 1,2                    | 3,0                                              | 4,4                                              | 2,5                                               |
| 3                        | 0,9                    | 0,9                    | 1,0                    | 1,0                    | 2,7                                              | 3,6                                              | 2,2                                               |
| 4                        | 0,8                    | 0,8                    | 0,9                    | 0,9                    | 2,6                                              | 3,3                                              | 2,1                                               |
| 5                        | 0,8                    | 0,8                    | 0,9                    | 0,9                    | 2,2                                              | 3,0                                              | 1,8                                               |
| 6                        | 0,7                    | 0,7                    | 0,8                    | 0,8                    | 2,1                                              | 2,7                                              | 1,7                                               |
| 7                        | 0,7                    | 0,7                    | 0,7                    | 0,7                    | 2,0                                              | 2,5                                              | 1,6                                               |
| 8                        | 0,6                    | 0,6                    | 0,7                    | 0,7                    | 1,8                                              | 2,3                                              | 1,5                                               |

Таким образом, разработанный алгоритм оптимизации с точки зрения весов измерений позволит в ряде случаев достичь существенной экономии финансовых и людских ресурсов за счет уменьшения количества измеренных величин, а разработанный алгоритм улучшения сетей позволит определить деформационные параметры с требуемой точностью при включении в состав сетей минимального количества дополнительных пунктов.

В третьей главе «О влиянии тропосферы при создании спутниковых построений в СРВ» выполнено исследование способов учета влияния тропосферы при спутниковых измерениях в условиях Вьетнама и сформулированы соответствующие рекомендации.

**1. Определение ЗТЗ методом точного позиционирования и анализ моделей тропосферы.** Приведем уравнения наблюдений спутника  $k$  на пункте  $i$  при наблюдениях двухчастотными приемниками с использованием данных Международной ГНСС службы (МГС)

$$\begin{cases} P_{3,i}^k = \rho_i^k + M_{c,i}^k D_{c,i}^z + M_{вл,i}^k D_{вл,i}^z + cdt_i, \\ \Phi_{3,i}^k = \rho_i^k + M_{c,i}^k D_{c,i}^z + M_{вл,i}^k D_{вл,i}^z + cdt_i + \lambda_3 N_{3,i}^k, \end{cases} \quad (16)$$

где  $P_{3,i}^k, \Phi_{3,i}^k$  – псевдодальность и фаза комбинационной волны  $L_3$ , выраженные в единицах расстояния;  $\rho_i^k$  – геометрическое расстояние пункта  $i$  до спутника  $k$ ;  $c$  – скорость света в вакууме;  $dt_i$  – ошибки часов приемника;  $\lambda_3$  – длина комбинационной волны  $L_3$ ;  $N_{3,i}^k$  – число неоднозначности волны  $L_3$ ;  $D_{c,i}^z, D_{вл,i}^z$  – сухая и влажная компоненты ЗТЗ;  $M_{c,i}^k, M_{вл,i}^k$  – функции отображения. Линеаризуя выражения (16), получим уравнения поправок. Решая уравнения поправок методом наименьших квадратов, получим параметры тропосферы, ошибки часов приемника, и положения пункта.

Определяя ЗТЗ на пунктах, для оценки эффективности моделей тропосферы нами введён показатель остатка  $\alpha$ , выраженный в процентах

$$\alpha = \frac{|\Delta D_T^z|}{D_T^z} \times 100, \quad (17)$$

где  $\Delta D_T^z, D_T^z$  – остаточная и уточненная величины ЗТЗ, полученные из обработки результатов наблюдений методом точного позиционирования.

С использованием метода точного позиционирования, мы определили ЗТЗ по результатам измерений на двадцати станциях, в том числе три станции, находящиеся на территории Вьетнама; двенадцать станций – в сходных с Вьетнамом условиях; пять станций в США в условиях, отличающихся от Вьетнама. ЗТЗ на станциях определены с использованием модельных



метеопараметров. Для четырех станций DARW, TCMS, TNML, и TWTF, на которых производились метеорологические измерения, расчеты выполнены еще с использованием измеренных метеоданных по моделям Блэка, Хопфилд, УНБ и Саастамойнена, вычислительные алгоритмы которых явно зависят от метеопараметров. Мы получили ЗТЗ с точностью на уровне 6 мм, и определили значения показателей остатка  $\alpha$ , которые приведены в таблицах 5-6.

Таблица 5. Показатель остатка  $\alpha$  (%) при использовании метеопараметров, определяющихся по модели Международной стандартной атмосферы ISA

| №  | Станция (страна)            | Модель тропосферы |      |       |      |        |     |       |
|----|-----------------------------|-------------------|------|-------|------|--------|-----|-------|
|    |                             | Блэка             | GCAT | Хопф. | MOPS | Нейлла | УНБ | Саас. |
| 1  | BLVI (Вьетнам) <sup>1</sup> | 6                 | 6    | 6     | 2    | 6      | 9   | 6     |
| 2  | CODA (Вьетнам)              | 6                 | 7    | 7     | 1    | 7      | 10  | 7     |
| 3  | DANA (Вьетнам)              | 8                 | 8    | 8     | 2    | 9      | 11  | 9     |
| 4  | BAKO (Индонезия)            | 9                 | 9    | 10    | 3    | 10     | 12  | 10    |
| 5  | CUSV (Таиланд)              | 9                 | 9    | 9     | 2    | 9      | 12  | 9     |
| 6  | DARW (Австралия)            | 7                 | 7    | 8     | 2    | 8      | 11  | 8     |
| 7  | HAV2 (Индия)                | 7                 | 8    | 8     | 1    | 8      | 11  | 8     |
| 8  | HUTB (Индия)                | 7                 | 8    | 8     | 1    | 8      | 11  | 8     |
| 9  | KUNM (Китай)                | 10                | 5    | 10    | 5    | 6      | 11  | 10    |
| 10 | NTUS (Сингапур)             | 8                 | 8    | 9     | 2    | 9      | 12  | 9     |
| 11 | PIMO (Филиппины)            | 10                | 10   | 10    | 3    | 10     | 13  | 10    |
| 12 | SAMP (Индонезия)            | 8                 | 9    | 9     | 2    | 9      | 12  | 9     |
| 13 | TCMS (Тайвань)              | 7                 | 7    | 7     | 1    | 8      | 11  | 8     |
| 14 | TNML (Тайвань)              | 7                 | 7    | 8     | 1    | 8      | 11  | 8     |
| 15 | TWTF (Тайвань)              | 7                 | 7    | 8     | 1    | 7      | 11  | 8     |
| 16 | P167 (США)                  | 2                 | 1    | 2     | 3    | 1      | 4   | 3     |
| 17 | P168 (США)                  | 2                 | 1    | 2     | 3    | 1      | 4   | 3     |
| 18 | P169 (США)                  | 2                 | 1    | 2     | 3    | 1      | 4   | 3     |
| 19 | P170 (США)                  | 2                 | 1    | 2     | 3    | 1      | 4   | 3     |
| 20 | P326 (США)                  | 2                 | 1    | 3     | 2    | 1      | 4   | 3     |

<sup>1</sup> - наблюдения на станциях BLVI, CODA, DANA производились в период с 22 по 24 марта 2009 г., а наблюдения на остальных станциях в период с 04 по 10 июля 2010 г.

Таблица 6. Показатель остатка  $\alpha$  (%) при использовании измеренных метеопараметров в период с 04 по 10 июля 2010 года

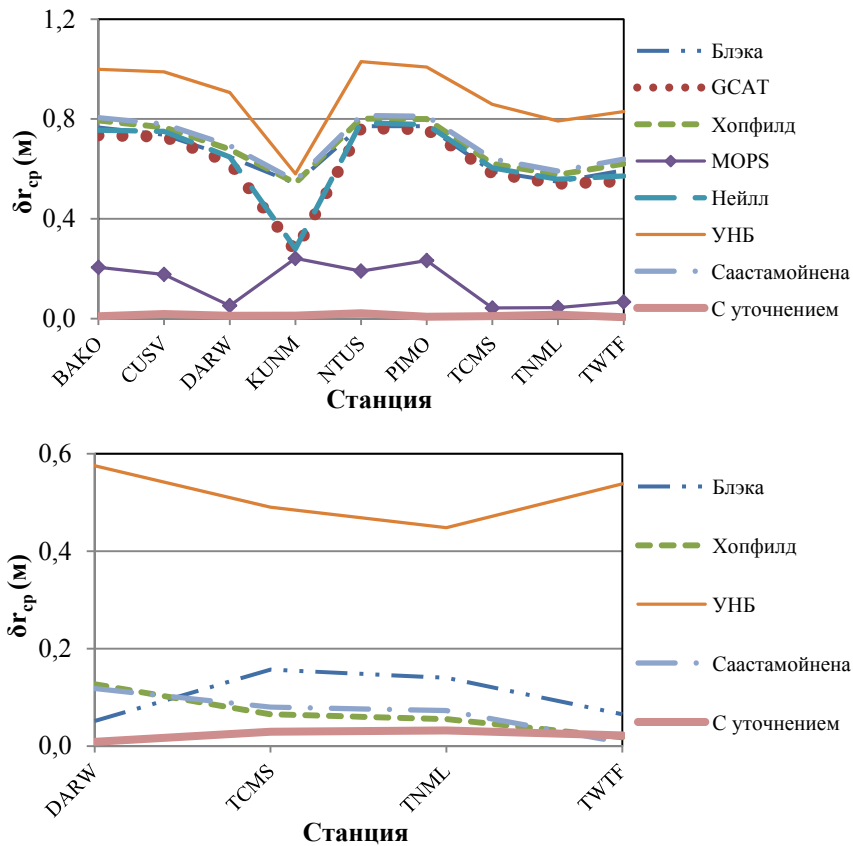
| № | Станция (страна) | Модель тропосферы |         |     |               |
|---|------------------|-------------------|---------|-----|---------------|
|   |                  | Блэка             | Хопфилд | УНБ | Саастамойнена |
| 1 | DARW (Австралия) | 1                 | 2       | 7   | 2             |
| 2 | TCMS (Тайвань)   | 2                 | 1       | 6   | 1             |
| 3 | TNML (Тайвань)   | 2                 | 1       | 6   | 1             |
| 4 | TWTF (Тайвань)   | 1                 | 1       | 7   | 1             |

Наше исследование подтверждает, что для учета влияния тропосферы в условиях Вьетнама при использовании модельных метеопараметров модель

MOPS оказывается наиболее эффективной. Она позволяет учитывать в среднем 98% влияния тропосферы, а с использованием оставшихся моделей учтено в среднем 91% влияния тропосферы. Если производились метеорологические измерения, использование моделей Блэка, Хопфилд и Саастамойнена будет эффективным. При этом в среднем учитывается 99% влияния тропосферы. Также видно, что применение моделей тропосферы в условиях США, особенности территории которых учитывались при построении моделей, эффективнее чем в условиях Вьетнама.

**2. О точности определения координат пунктов в абсолютном методе в зависимости от способа учета тропосферных задержек.** Нами определены координаты станций МГС, находящейся в сходных с СРВ условиях, по результатам спутниковых наблюдений 08 июля 2010 г. Расчеты проведены для случаев: использование моделей тропосферы для учета влияния тропосферы; без учета тропосферы; с уточнением тропосферы в процессе обработки. В качестве метеопараметров использованы метеопараметры, определяющиеся по модели Международной стандартной атмосферы. Также проведены расчеты в случае использования измеренных метеопараметров с использованием модели тропосферы Блэка, Хопфилд, УНБ и Саастамойнена для учета тропосферы. Для оценивания эффективности модели тропосферы в абсолютном методе приняты расхождения положений станций  $\delta r$ , полученных нами и МГС. Значения расхождений положений в зависимости от способов учета влияния тропосферы приведены на рис. 5.

Из проведенных расчетов можно сделать следующие выводы. В абсолютном методе, при отсутствии измеренных метеопараметров учет влияния тропосферы по модели MOPS позволяет определить координаты с точностью лучше, чем при учете влияния тропосферы по остальным моделям. При присутствии измеренных метеопараметров, модели Блэка, Хопфилд, Саастамойнена наиболее эффективны для учета влияния тропосферы. При учете влияния тропосферы моделями использование измеренных метеопараметров повысит точность координатных определений в  $2 \div 10$  раз.



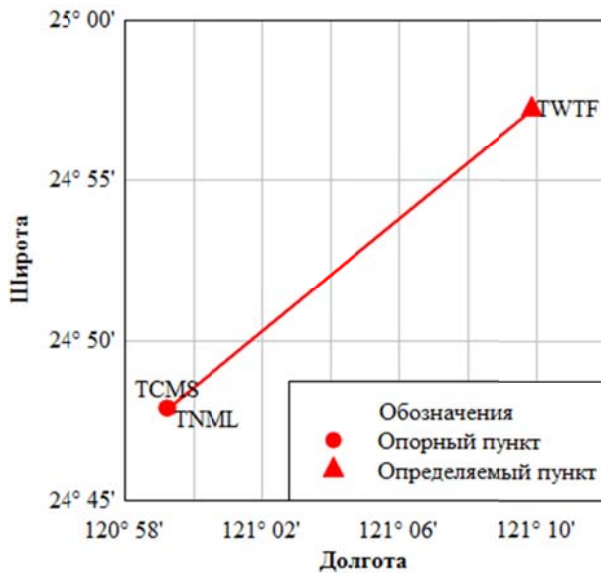
а) Рис. 5. Расхождения вычисленных положений с решением МГС в зависимости от способов учета влияния тропосферы  
 а) при использовании модельных метеопараметров  
 б) при использовании измеренных метеопараметров

Для получения более точных результатов определения координат при обработке необходимо вводить ЗТЗ как неизвестные и уточнять их. При этом в данной работе расхождения положений станции  $\delta r$ , полученные нами и МГС, составляют  $\approx 3$  см. Такие расхождения также получены в обоих случаях (присутствия и отсутствия измеренных метеопараметров).

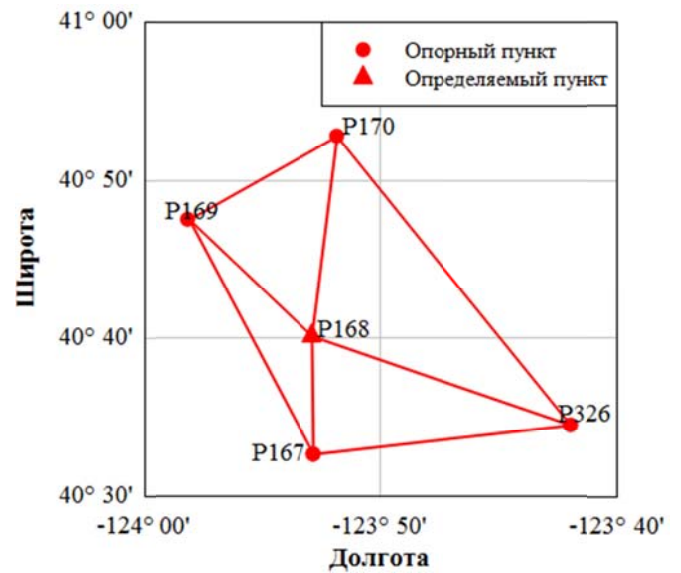
**3. Учет влияния тропосферы при относительных наблюдениях.** Нами определены координаты пунктов двух сетей (рис. 6) по результатам спутниковых наблюдений 04 июля 2010 г., с использованием моделей тропосферы без измеренных метеопараметров и значений ЗТЗ, определенных методом точного позиционирования для учета влияния тропосферы. Расчеты также проведены без учета влияния тропосферы. В таблицах 7 - 8 приведены средние квадратические ошибки (СКО) определения координат в зависимости от способов учета влияния тропосферы и СКО в положении, которые определяются по формуле

$$m_r = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}, \quad (18)$$

где  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $m_z$  – ошибки в координатах. Здесь пункт TWTF сети в Тайване и пункт p168 сети в США приняты за опорные пункты.



а) Сеть в Тайване



б) Сеть в США

Рис. 6. Исследуемые спутниковые построения

Таблица 7. Ошибки определения координат пунктов в сети Тайваня при использовании разных способов учета влияния тропосферы, мм

| Способ учета влияния тропосферы | Пункты |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                 | TCMS   |       |       |       | TNML  |       |       |       |
|                                 | $m_x$  | $m_y$ | $m_z$ | $m_r$ | $m_x$ | $m_y$ | $m_z$ | $m_r$ |
| Блэка                           | 8,1    | 7,0   | 3,1   | 10,8  | 8,0   | 6,8   | 3,0   | 10,6  |
| GCAT                            | 1,4    | 1,2   | 0,5   | 1,9   | 1,3   | 1,1   | 0,5   | 1,9   |
| Хопфилд                         | 8,1    | 7,0   | 3,1   | 10,8  | 8,0   | 6,8   | 3,0   | 10,7  |
| MOPS                            | 4,0    | 3,5   | 1,5   | 5,5   | 4,0   | 3,4   | 1,5   | 5,4   |
| Нейлла                          | 1,4    | 1,2   | 0,5   | 1,9   | 1,4   | 1,2   | 0,5   | 1,9   |
| УНБ                             | 4,1    | 3,6   | 1,6   | 5,6   | 4,1   | 3,5   | 1,5   | 5,5   |
| Саастамойнена                   | 8,2    | 7,1   | 3,2   | 11,0  | 8,1   | 6,9   | 3,0   | 10,8  |
| Без учета                       | 13,7   | 11,7  | 5,2   | 18,2  | 13,5  | 11,5  | 5,1   | 17,9  |
| ЗТЗРРР                          | 1,2    | 1,1   | 0,5   | 1,8   | 1,2   | 1,1   | 0,5   | 1,8   |

Таблица 8. Ошибки определения координат пунктов в сети США при использовании разных способов учета влияния тропосферы, мм

| Способ учета влияния троп. | Пункты |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            | p167   |       |       |       | p169  |       |       |       | p170  |       |       |       | P326  |       |       |       |
|                            | $m_x$  | $m_y$ | $m_z$ | $m_r$ | $m_x$ | $m_y$ | $m_z$ | $m_r$ | $m_x$ | $m_y$ | $m_z$ | $m_r$ | $m_x$ | $m_y$ | $m_z$ | $m_r$ |
| Блэка                      | 7,9    | 6,2   | 4,1   | 10,9  | 10,2  | 8,0   | 6,1   | 14,4  | 8,8   | 7,0   | 5,2   | 12,3  | 8,3   | 7,1   | 4,8   | 11,9  |
| GCAT                       | 2,0    | 1,6   | 1,1   | 2,8   | 2,6   | 2,0   | 1,6   | 3,7   | 2,2   | 1,8   | 1,3   | 3,1   | 2,1   | 1,8   | 1,2   | 3,0   |
| Хопф.                      | 7,9    | 6,2   | 4,1   | 10,8  | 10,2  | 8,0   | 6,1   | 14,3  | 8,8   | 6,9   | 5,2   | 12,3  | 8,3   | 7,1   | 4,8   | 11,9  |
| MOPS                       | 1,5    | 1,2   | 0,8   | 2,0   | 1,9   | 1,5   | 1,2   | 2,7   | 1,7   | 1,3   | 1,0   | 2,3   | 1,6   | 1,3   | 0,9   | 2,2   |
| Нейлла                     | 2,0    | 1,6   | 1,1   | 2,8   | 2,6   | 2,1   | 1,6   | 3,7   | 2,3   | 1,8   | 1,3   | 3,2   | 2,1   | 1,8   | 1,2   | 3,1   |
| УНБ                        | 1,6    | 1,2   | 0,8   | 2,1   | 2,0   | 1,6   | 1,2   | 2,8   | 1,7   | 1,4   | 1,0   | 2,4   | 1,6   | 1,4   | 0,9   | 2,3   |
| Саас.                      | 7,9    | 6,2   | 4,1   | 10,8  | 10,2  | 8,0   | 6,1   | 14,3  | 8,8   | 7,0   | 5,2   | 12,3  | 8,3   | 7,1   | 4,8   | 11,9  |
| Без учета                  | 5,9    | 4,6   | 3,1   | 8,1   | 7,6   | 6,0   | 4,6   | 10,7  | 6,5   | 5,2   | 3,9   | 9,2   | 6,2   | 5,3   | 3,6   | 8,9   |
| ЗТЗРРР                     | 1,0    | 0,8   | 0,5   | 1,4   | 1,3   | 1,0   | 0,8   | 1,8   | 1,1   | 0,9   | 0,7   | 1,6   | 1,1   | 0,9   | 0,6   | 1,5   |

Из полученных результатов следует вывод: в рассматриваемых сетях без учета влияния тропосферы мы получили СКО по каждой координате 1,5 см, СКО в положении пунктов 2 см. При учете влияния тропосферы моделями СКО по каждой координате составляют 3...11 мм в зависимости от применяемой модели, а СКО в положении пунктов – 4...15 мм. При учете влияния тропосферы с использованием ЗТЗ, определенных методом точного позиционирования, СКО по каждой координате достигают 1,5 мм, а СКО в положении пунктов – 2 мм.

**Заключение.** Из анализа современного состояния координатного обеспечения Вьетнама следует, что работы по повышению точности координатных определений должны производиться для обеспечения решения новых задач. В соответствии с существующими требованиями геодезического обеспечения в СРВ, мы рассмотрели основные направления, обеспечивающие повышение точности координатных определений во Вьетнаме: изучения геодинамических процессов, исследование способов учета влияния тропосферы в условиях Вьетнама. Основные результаты и выводы, полученные в настоящей диссертационной работе, сводятся к следующему:

1. Разработан метод совместного уравнивания координат и составляющих скоростей движений пунктов с использованием особых математических преобразований матриц, в том числе с преобразованием матриц к виду векторов. Использование особых преобразований матриц позволяет значительно уменьшить нужное для обработки время (в 3...22 раза).

Реализован в среде Visual C++ алгоритм метода совместного уравнивания координат и составляющих скоростей движений пунктов. Разработанная программа апробирована на сети действующих станциях, находящихся вблизи территории Вьетнама. Полученная точность определения координат и составляющих скоростей движений станций этой сети предлагаемым методом составляет 7...17 мм и 2,0...5,4 мм/год соответственно. Точность горизонтальных составляющих скоростей составляет 1,1...1,7 мм/год, а вертикальной составляющей 4,4...6,6 мм/год. Точность определения положения

станций и скорости предлагаемым методом в 2...3 раза выше, чем при использовании обычного метода. Из этого следует, что предлагаемый метод является эффективным для определения движений станций по результатам спутниковых наблюдений и может применяться для геодинимических исследований.

2. Разработан метод оптимизации геодинимических сетей по критерию минимальной стоимости для реализации проекта с использованием генетического алгоритма, который гарантировал достижение заданной точности определений деформационных параметров при минимальной стоимости.

Реализован алгоритм метода оптимизации геодинимических сетей в среде Visual C++. С использованием разработанного программного обеспечения произведена оптимизация двух геодинимических сетей (Дьенбьен-Лайчау и Сонла) во Вьетнаме. Составлены оптимальные варианты наблюдений, а также предложены варианты улучшения геодинимических сетей включением дополнительных пунктов. Разработанное программное обеспечение может быть внедрено при создании спутниковых сетей для геодинимических исследований.

3. Выполнено исследование определения ЗТЗ методом точного позиционирования. Реализован алгоритм этого метода в среде Visual C++ с использованием библиотеки с открытым кодом. Проведено уточнение ЗТЗ при спутниковых наблюдениях, которые заранее определены с использованием моделей Блэка, Хопфилд, GCAT, MOPS, Нейлла, УНБ и Саастамойнена. В результате получены ЗТЗ в сходных с Вьетнамом условиях с точностью на уровне 3...14 мм, а в среднем 6 мм.

4. Проведена оценка эффективности моделей тропосферы Блэка, Хопфилд, GCAT, MOPS, Нейлла, УНБ и Саастамойнена. Полученные результаты свидетельствуют о том, что для учета влияния тропосферы в сходных с Вьетнамом условиях при использовании модельных метеопараметров модель MOPS оказывается наиболее эффективной. Она позволяет учитывать в среднем 98% влияния тропосферы, причем с

использованием других моделей учтено в среднем 91% влияния тропосферы. Если производить метеорологические измерения в момент наблюдений, использование моделей Блэка, Хопфилд и Саастамойнена будет эффективным. С их использованием учтено 99% влияния тропосферы.

5. Выполнено исследование точности координатных определений абсолютным методом в зависимости от способа учета влияния тропосферы. Из полученных результатов следует, что при определении координат абсолютным методом необходимо вводить влияние тропосферы, как дополнительное неизвестное, и уточнять его в процессе обработки. При этом в настоящей работе расхождения положений пунктов, полученных нами, с решением МГС составляют 3 см при использовании и модельных, и измеренных метеопараметров для учета влияния тропосферы. В случае, когда нет возможности уточнения ЗТЗ, для получения наивысшей точности определения координат при отсутствии измеренных метеопараметров предлагается использование модели тропосферы MOPS, а при присутствии измеренных метеопараметров, следует использовать модели Блэка, Хопфилд или Саастамойнена. При учете влияния тропосферы моделями использование измеренных метеопараметров повысит точность координатных определений в 2...10 раз.

6. Выполнено исследование точности координатных определений относительным методом в зависимости от способа учета влияния тропосферы. Разработана подпрограмма, включение которой в программу обработки результатов спутниковых измерений DDBase позволит учитывать влияние тропосферы на относительные наблюдения путем использования ЗТЗ, полученных методом точного позиционирования. Это позволяет получить наивысшую точность координатных определений. Согласно полученным в работе данным, при расстоянии между пунктами 10...40 км и использовании ЗТЗ, полученных методом точного позиционирования, ошибки в положении пунктов достигают 2 мм. Если в относительном методе не учтено влияние тропосферы, эти ошибки составляют 2 см, а с использованием моделей для

учета влияния тропосферы эти ошибки составляют 4...15 мм в зависимости от применяемой модели.

Согласно имеющимся у нас данным есть основания полагать, что полученные в диссертации результаты будут учтены при модернизации координатного обеспечения СРВ. В частности, будет осуществлена привязка ГГС СРВ к геодинамической сети МГС. Планируется также продолжение нами проведенных в диссертации исследований. Оно будет касаться обеспечения геодинамических исследований во Вьетнаме точной эфемеридной информации спутников GPS/ГЛОНАСС. Основы для проведения такой работы заложены в нашей статье [1].

Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в журнале Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»:

1. Краснорылов И.И., Нгуен Ван Донг, Сорокин Н. А. Исследование возмущенного движения космического аппарата в случае его запуска на орбиту Земли в треугольную точку либрации L4 системы Солнце-Земля // Известия вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». 2009. № 5. С. 69 – 73.

2. Нгуен Ван Донг. Повышение точности Государственной геодезической сети Вьетнама // Известия вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2010. № 3. С. 19 – 21.

3. Нгуен Ван Донг. Определение координат пунктов и их изменений из наблюдений спутников, образующих глобальные навигационные спутниковые системы (на примере одного из районов Юго-Восточной Азии) // Известия вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». 2011. № 4. С. 30 – 35.

4. Нгуен Ван Донг. Анализ моделей тропосферы по результатам спутниковых наблюдений в регионе Юго-Восточной Азии // Известия вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». 2011. № 5. С. 21 – 25.