

В. А. Петручок¹✉

Факторы, влияющие на точность определения деформаций земной коры на техногенных геодинамических полигонах

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vladenbob@yandex.ru

Аннотация. Выполнен обзор факторов, влияющих на точность определения деформаций земной коры на геодинамических полигонах. На математической модели геодинамического полигона проверены гипотезы о влиянии ряда факторов на результаты математической обработки измерений. Оценка влияния фактора на определение скоростей движений земной коры производилась по изменению значения суммы квадратов разностей модельных смещений и смещений, полученных при уравнивании. В результате исследования выявлено влияние фактора геометрии сети, влияние остальных факторов не удалось подтвердить на выбранной модели. Отсутствие влияния на данной модели не позволяет исключать данные факторы из списка потенциально возможных и требует дополнительных исследований. Актуальной задачей является также проверка гипотезы о том, что влияние на результат могут оказывать определенные комбинации факторов. Анализ факторов, влияющих на точность определения деформаций, поможет дать адекватную оценку смещений земной поверхности, а также разработать рекомендации для проектирования и обработки измерений на геодинамических полигонах.

Ключевые слова: уравнивание геодезических измерений, геодинамический полигон, конфигурация сети, деформация земной поверхности

V. A. Petruchok¹✉

Factors affecting the accuracy of determining crustal deformations at man-made geodynamic polygons

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vladenbob@yandex.ru

Abstract. An overview of the factors influencing the accuracy of determining the deformations of the Earth's crust at geodynamic polygons is performed. Hypotheses about the influence of a number of factors on the results of mathematical processing of measurements have been tested on the mathematical model of a geodynamic polygon. The influence of the factor on the determination of the speeds of movements of the Earth's crust was estimated by changing the value of the sum of the squares of the differences in model displacements and displacements obtained by separate and joint equalization. As a result of the study, the influence of the network geometry factor was revealed, the influence of other factors could not be confirmed on the selected model. The lack of influence on this model does not allow us to exclude these factors from the list of potential possible ones and requires additional research. An urgent task is also to test the hypothesis that certain combinations of factors can influence the result. An analysis of the factors affecting the accuracy of determining deformations will help to provide an adequate assessment of the displacements of the Earth's surface, as well as develop recommendations for the design and processing of measurements of geodynamic polygons.

Keywords: equalization of geodetic measurements, geodynamic polygon, network configuration, deformation of the Earth's surface

Введение

Существующие подходы к проектированию геодинимических сетей и математической обработке измерений, выполненных на пунктах геодинимических полигонов, нередко игнорируют ряд факторов, влияющих на точность определения деформаций земной коры. Например, влияние геометрии сети и характера распределения смещений земной коры. В связи с этим возникает вопрос о поиске универсального подхода к проектированию и математической обработке повторных геодезических измерений на пунктах геодинимических полигонов для наиболее точной оценки смещений и деформаций земной коры.

В настоящем исследовании произведен анализ факторов, влияющих на точность определения геодинимических параметров, а также рассмотрен пример математической модели геодинимического полигона, на котором оценено влияние факторов конфигурации сети и характера распределения деформации, а также вариативности расчета приближённых координат пунктов на результат уравнивания.

Анализ влияния факторов на результат уравнивания повторных геодезических измерений производился путем сравнения суммы квадратов разностей модельных смещений и смещений, полученных в результате уравнивания сети.

Факторы, влияющие на точность определения смещений и деформаций земной коры

Точность выявления деформаций земной коры в рамках геодинимических исследований определяется совокупностью взаимосвязанных факторов, действующих на всех этапах работы – от проектирования сети до интерпретации данных. Несмотря на детальную проработку вопросов, связанных с инструментальными погрешностями и методиками полевых измерений, значительная часть неопределенностей возникает на этапах математической обработки и моделирования, что требует отдельного анализа.

На этапе проектирования ключевым аспектом становится формирование геодезической сети, способной отслеживать ожидаемые деформационные процессы. Конфигурация расположения пунктов, их плотность и распределение в пространстве должны соответствовать геодинимической модели изучаемого региона. Оптимальное проектирование, учитывающее прогнозируемые деформации и физические свойства среды, позволяет добиться такого соответствия. Исследованием конфигурации и оптимального проектирования геодинимических сетей занимались М. Д. Герасименко, Н. В. Шестаков, К. И. Маркович, П. А. Докукин, В. И. Кафтан [1–3].

Особую роль играет выбор исходных пунктов, которые служат основой для определения смещений. Если опорные точки расположены в зонах скрытой тектонической активности или подвержены локальным подвижкам, это вносит систематические искажения в расчеты. Исследования по выбору исходных пунктов проведены И. Е. Дороговой и Г. А. Шароглазовой [4, 5]. В патенте С. В. Шевчука [6] разработана методика определения размеров геодинимического полигона, с

условием размещения опорных пунктов в каждом из крыльев разлома за пределами их геодинамического влияния. Кроме того, даже при идеальной конфигурации сети на уравнивание геодезических измерений оказывает влияние инструментальная погрешность измерений, обусловленная техническими характеристиками оборудования и внешними условиями. Исследования о возможностях использования спутниковых приёмников на геодинамических полигонах проводили В. И. Кафтан и Н. В. Шестаков [7, 8]. Также в работе Ю. В. Вершининой [9] предложено структурное построение и закрепление геодезических сетей повторных геодезических измерений. Доказано, что интерпретация результатов повторных геодезических измерений невозможна без решения проблемы влияния на пункты экзогенных факторов, в частности иерархично-блоковой структуры земной коры [10].

В данной работе были рассмотрены факторы, оказывающие влияние на этапе математической обработки результатов геодезических измерений: такие как влияние выбора методики обработки, вариативность получения приближенных координат пунктов, однородность распределения смещений пунктов геодинамических полигонов, а также влияние геометрии сети на результат уравнивания. Исследования по математической обработке результатов измерений на геодезических сетях проводили также С. В. Гришко, Э. Р. Мирмахмудов, В. А. Падве, Н. С. Косарев [11–13].

Анализ результатов уравнивания повторных геодезических измерений на геодинамическом полигоне и выявление факторов, повлиявших на них

Для исследования была составлена математическая модель геодинамического полигона из 10 пунктов. Протяженность полигона составляет 20,5 км в направлениях север-юг и запад-восток, площадь геодинамического полигона равна 264 км².

Для первого эксперимента была выбрана конфигурация сети с треугольниками, близким к равносторонним (рис. 1, а). Для второго эксперимента была изменена конфигурация сети, в котором треугольники в сети приняли максимально вытянутую форму (рис. 1, б).

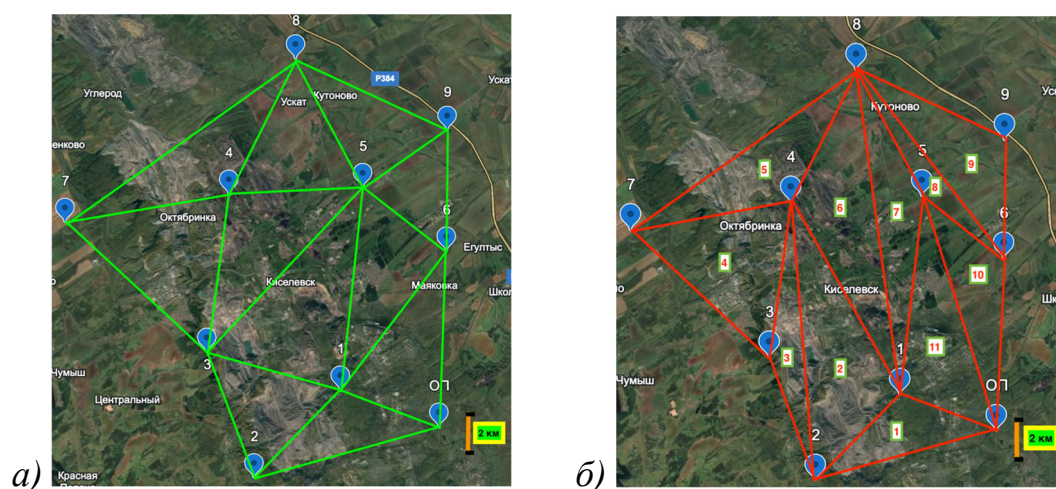


Рис. 1. Конфигурация сети: а) с наиболее «правильными» треугольными элементами; б) с вытянутыми треугольными элементами

Модельные смещения земной коры для проведения первого и второго эксперимента были назначены под условием однородности деформации (однонаправленности векторов смещений). Данные смещения продемонстрированы в табл. 1.

Таблица 1

Модельные смещения

Пункт	X, м	Y, м	Z, м
ОП	-	-	-
1	0,009	-0,012	0,007
2	0,010	-0,009	0,006
3	0,011	-0,014	0,008
4	0,009	-0,013	0,011
5	0,012	-0,011	0,013
6	0,008	-0,008	0,010
7	0,007	-0,009	0,009
8	0,009	-0,010	0,008
9	0,012	-0,007	0,012

В результате сумма квадратов разностей модельных смещений и смещений, полученных в уравнивании для первого эксперимента (рис. 1, а), составила 0,00279 м². Во втором эксперименте, где была изменена конфигурация сети (рис. 1, б), сумма квадратов разностей модельных смещений и вычисленных смещений составила 0,003006 м².

Вычисление суммы квадратов разностей смещений для всех пунктов продемонстрировано в табл. 2

Таблица 2

Сумма квадратов разностей для 1 эксперимента

Пункт	X, м	Y, м	Z, м
1	0,000084	0,000172	0,000080
2	0,000136	0,000092	0,000051
3	0,000146	0,000208	0,000087
4	0,000092	0,000132	0,000115
5	0,000172	0,000079	0,000172
6	0,000066	0,000052	0,000139
7	0,000089	0,000068	0,000105
8	0,000035	0,000083	0,000019
9	0,000065	0,000075	0,000175
Сумма, м	0,000886	0,000961	0,000943
Сумма, м		0,002790	

Для третьего эксперимента использовалась конфигурация полигона с вытянутыми треугольниками и изменёнными модельными смещениями земной коры.

Пункты полигона были разделены на две группы, имеющие разный характер движения, для симуляции двух блоков земной коры. Измененные модельные смещения земной коры отражены в табл. 3.

Таблица 3

Измененные модельные смещения

Пункт	X , м	Y , м	Z , м
ОП	-	-	-
1	0,009	-0,012	0,007
2	0,010	-0,009	0,006
3	0,011	-0,014	0,008
4	-0,009	0,013	-0,011
5	-0,012	0,011	-0,013
6	-0,008	0,008	-0,010
7	-0,007	0,009	-0,009
8	-0,009	0,010	-0,008
9	-0,012	0,007	-0,012

В результате уравнивания сумма квадратов разностей смещений с измененными модельными смещениями составила 0,002719 м².

Для четвертого эксперимента использовался полигон с вытянутой формой треугольников и модельными смещениями из табл. 1. В данном опыте оценивалось влияние на результат уравнивания выбора пути определения приближенных координат пунктов. В предыдущих экспериментах на модельном полигоне приближенные значения координат пунктов вычислялись кратчайшим путем по отношению к опорному пункту (рис. 2, а). В данном эксперименте приближенные координаты определяли последовательно, то есть для каждого последующего пункта добавлялась линия для их определения (рис. 2, б). В результате сумма квадратов разностей была идентична второму эксперименту, равна 0,003006 м².

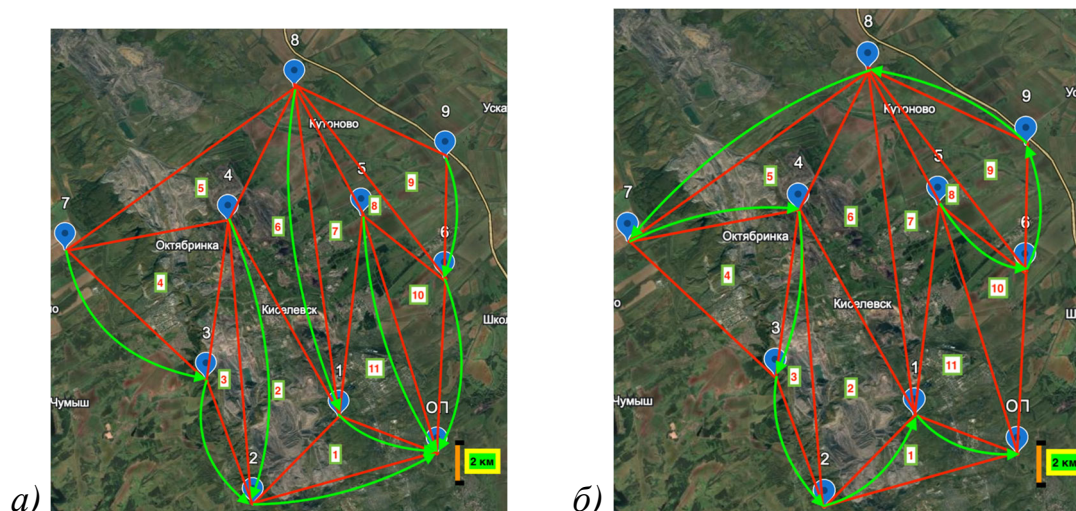


Рис. 2. Пути определения приближенных координат: а) кратчайшим путем к опорному; б) последовательное вычисление от опорного пункта

Итоговое сравнение результатов всех выполненных экспериментов представлено в табл. 4.

Таблица 4

Сравнение результатов уравнивания

№	Полигон	Сумма квадратов разностей, м ²
1	Эталонный полигон	0,002790
2	Полигон с измененной конфигурацией	0,003006
3	Полигон с измененным направлением смещений	0,002719
4	Полигон с изменением пути определения приближенных координат	0,003006

Заключение

Таким образом, в исследовании выполнен небольшой эксперимент для выявления факторов, повлиявших на результаты уравнивания модели полигона. Результаты эксперимента продемонстрировали влияние геометрии сети на итог уравнивания. Изменение характера деформации (направлений смещений пунктов) и изменение способа определения приближенных координат пунктов не привели к различиям в результатах уравнивания. Что говорит о том, что эти факторы не повлияли в нашем случае, но не исключает возможности их влияния на результаты на других объектах и при другом сочетании факторов.

В работе [3] отмечено влияние конфигурации сети на среднеквадратические ошибки определения параметров деформации. Этот вопрос также планируется рассмотреть для оценки суммарного влияния конфигурации на этапах уравнивания и последующего определения параметров деформации земной коры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маркович, К. И. Влияние конфигурации конечных элементов на точность определения компонентов деформации / К. И. Маркович // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 37-51. – DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-3-37-51. – EDN LXLEFT.
2. Шестаков, Н. В. К Вопросу об оптимальном проектировании деформационных геодезических GPS-сетей / Н. В. Шестаков, М. Д. Герасименко // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2009. – № 5. – С. 11-17. – EDN VBCAYB.
3. Докукин, П. А. Влияние формы треугольников в геодезической сети на результаты определения деформаций земной поверхности / П. А. Докукин, В. И. Кафтан, Р. И. Красноперов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 5. – С. 6-11. – EDN UYVGXZ.
4. Дорогова, И. Е. Влияние выбора исходных пунктов на результаты уравнивания повторных геодезических измерений / И. Е. Дорогова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 209-213. – EDN TVWXDB.
5. The reference system in determining the parameters of horizontal deformations of the earth's crust on geodynamic polygons / G. A. Sharoglazova, M. D. Gerasimenko, T. Nedashkivska [et al.] //

International Journal of Recent Technology and Engineering. – 2019. – Vol. 8, No. 2S11. – P. 3867-3871. – DOI 10.35940/ijrte.B1513.0982S1119. – EDN UJIYXL.

6. Патент № 2761547 С1 Российская Федерация, МПК E02D 1/02. Способ выбора параметров геодинимического полигона на геодинимически опасных объектах освоения недр : № 2020139743 : заявл. 03.12.2020 : опубл. 09.12.2021 / С. В. Шевчук, А. С. Батугин, С. С. Квятковская ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Газпром ПХГ". – EDN IBXEXE.

7. Оценка точности ГНСС-наблюдений на эталонном базисе как средство проверки измерительной аппаратуры локального геодинимического мониторинга / В. И. Кафтан, В. Н. Татаринов, А. И. Маневич [и др.] // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81, № 7. – С. 37-46. – DOI 10.22389/0016-7126-2020-961-7-37-46. – EDN XKTEIL.

8. Шестаков, Н. В. Учет сезонных вариаций координат GPS/ГЛОНАСС пунктов при определении современных движений земной коры / Н. В. Шестаков, Г. Н. Герасимов, М. Д. Герасименко // Гео-Сибирь. – 2009. – Т. 1, № 2. – С. 287. – EDN PFTZIR.

9. Вершинина, Ю. В. Геодезическое обеспечение мониторинговых наблюдений за деформационными процессами на геодинимических полигонах нефтегазовых месторождений : специальность 25.00.32 "Геодезия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вершинина Юлия Васильевна. – Санкт-Петербург, 2016. – 22 с. – EDN ZQCCQX.

10. Дорогова И.Е. Выявление блоковой структуры области земной коры, испытывающей горизонтальные движения вращательного характера / И.Е. Дорогова // Геодезия и картография. – 2013. – № 5. – С. 36-39.

11. Уравнивание спутниковых сетей. Предварительная оценка точности проектов спутниковых измерений: учебно-метод. пособие / С.В. Гришко. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010 – 20 с.

12. Мирмахмудов, Э. Р. Об анализе точности элементов ковариационной матрицы в GNSS измерениях на геодинимическом полигоне "Таваксай" / Э. Р. Мирмахмудов // Universum: технические науки. – 2022. – № 7-1(100). – С. 10-16. – DOI 10.32743/UniTech.2022.100.7.14096. – EDN CXBWWD.

13. Использование синтезированного варианта алгоритма параметрической версии МНК-оптимизации результатов ГНСС-измерений для их сравнительного анализа / Н. С. Косарев, В. А. Падве, С. А. Сергеев, В. И. Дударев // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 30-45. – EDN YAATHF.

© В. А. Петручок, 2025