

УДК 551.24:528.37/38

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-1-16-27

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ОКРЕСТНОСТЯХ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ВУЛКАНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОВТОРНОГО ВЫСОКОТОЧНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

Инна Евгеньевна Дорогова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии, тел. (383)343-29-11, e-mail: inna_dorogova@mail.ru

Наталья Николаевна Кобелева

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии, тел. (913)938-15-06, e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

Рассмотрены результаты моделирования зависимости вертикальных движений земной коры точек профиля нивелирования от их удаленности от вершины вулкана. Тема вулканизма на территории России более актуальна для Камчатского региона, в котором расположено более 60 действующих вулканов. Целью исследования является моделирование движений земной коры в окрестностях действующего вулкана по результатам повторного высокоточного нивелирования. Вертикальные движения земной поверхности вблизи вулкана Ключевской наблюдались с помощью нивелирования второго класса по трем профилям: двум радиальным, один из которых уходит на северо-восток, а второй – на юго-восток от вершины вулкана, и одному поперечному. Программное обеспечение MathCAD использовалось для построения моделей двух видов по результатам многолетних геодезических измерений. В результате выполненных исследований осуществлен поиск вида функциональной зависимости значений вертикальных смещений пунктов по мере их удаленности от вулкана. Рекомендован оптимальный диапазон расстояний для применения предложенных моделей. Приведены разности между значениями вертикальных смещений земной коры, полученными путем моделирования с помощью линейной и логарифмической зависимостей.

Ключевые слова: движения земной коры, вертикальные смещения пунктов, повторные геодезические измерения, моделирование, функциональные зависимости, высокоточное нивелирование, действующий вулкан, геодинамические процессы.

Введение

Движения и деформации земной коры вызывают смещения пространственного положения точек или блоков земной поверхности. Результаты повторных геодезических измерений дают возможность оценить геодинамические процессы, в том числе вулканического характера, которые фиксируются и количественно определяются с помощью геодезических измерений [1–12].

На территории России большинство вулканических гор расположены на востоке страны – на полуострове Камчатка и Курильских островах. Эта территория относится к так называемому «огненному кольцу», в пределах которого сконцентрировано более 2/3 действующих вулканов планеты [13–20]. В связи

с этим тема вулканизма более актуальна для Камчатского региона. Крупнейшая группа вулканов, представленная на рис. 1, расположена на полуострове Камчатка, на стыке Курило-Камчатского и Алеутского вулканических поясов и занимает 6,5 тыс. км².



Рис. 1. Крупнейшая группа вулканов в России:

1 – Ключевской; 2 – Камень; 3 – Дальняя Плоская сопка (Ушковский); 4 – Ближняя Плоская сопка (Крестовский); 5 – Острый Толбачик; 6 – Плоский Толбачик; 7 – Безымянный; 8 – Острая Зими́на; 9 – Овальная Зими́на; 10 – Большая Удина; 11 – Малая Удина; 12 – Средний; 13 – Горный Зуб

В группе 13 вулканов, в том числе четырех действующих: Безымянный, Дальний Плоский, Ключевской и Плоский Толбачик. Ключевской вулкан считается не только главным в данной группе, но и самым высоким действующим вулканом Европы и Азии [20].

Исходные данные

Вертикальные движения земной поверхности вблизи вулкана Ключевской, наблюдались с помощью нивелирования второго класса по нескольким профилям, результаты измерений представлены в работе [19].

Измерения выполнялись по трем профилям: двум радиальным, один из которых уходит на северо-восток, а второй – на юго-восток от вершины вулкана, и одному поперечному. Схема высокоточных нивелирных профилей на данной территории представлена на рис. 2 [19], основой для дальнейшего исследования послужили результаты измерений вдоль участков профилей, выделенных цветом.

Измерения превышений по первому радиальному профилю были выполнены в период с 1979 по 2014 г. Ряд измерений вдоль второго радиального профиля впервые выполнили в 1985 г., когда вулкан Ключевской был неактивным, дальнейшие измерения превышений по данному профилю возобновились только в 1990 г. Ряд наблюдений, выполненных по поперечному профилю, выполнялся с 1982 по 1990 гг.

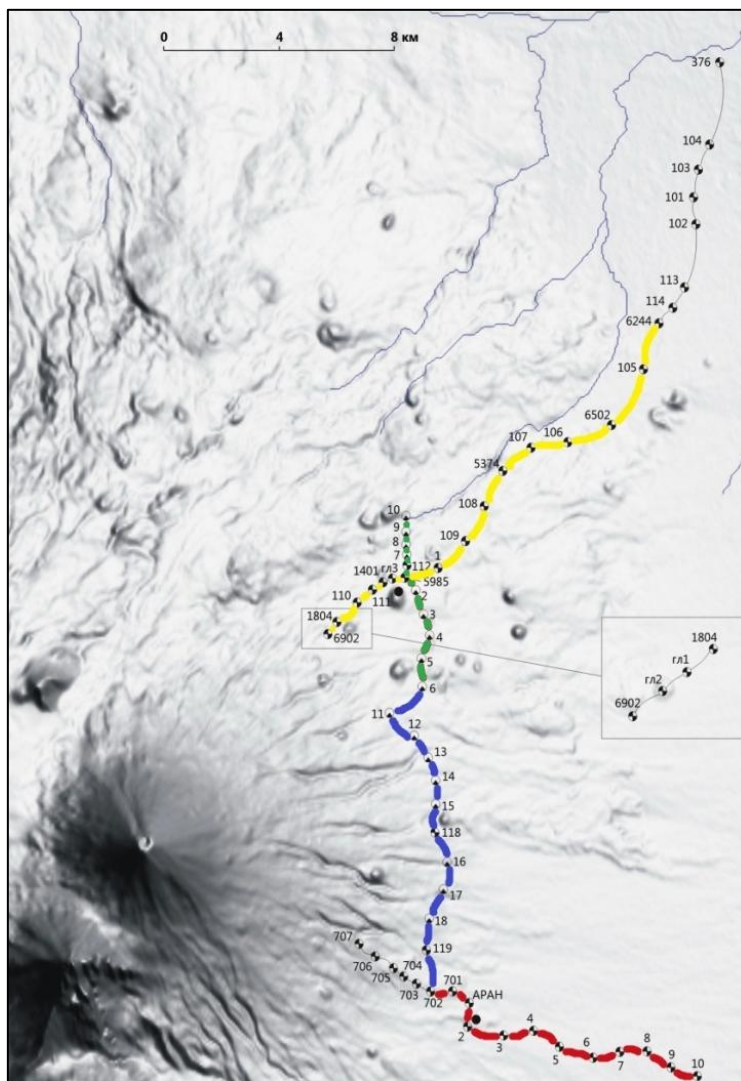


Рис. 2. Схема высокоточных нивелирных профилей на Ключевском ГДП

Из всего ряда наблюдений, полученных по первому радиальному профилю нивелирования, только несколько выполнялись на всех пунктах. Результаты измерений по большинству циклов приводятся только для участка профиля от рп. 6902 до рп. 6244 (см. рис. 2). В целом необходимо отметить, что для первого радиального профиля характерно поднятие земной поверхности, с увеличением смещений по мере приближения к вершине вулкана. По второму радиальному

профилю наблюдается относительное проседание земной поверхности, величина которого возрастает по мере приближения к вулкану. Измерения по поперечному профилю выполнялись наименее регулярно [19].

Моделирование

На рис. 3 представлены графики вертикальных смещений пунктов первого радиального профиля, результаты которых получены в течение 25 лет. По горизонтальной оси отложены расстояния от вершины вулкана до пункта, по вертикальной – величина смещения.

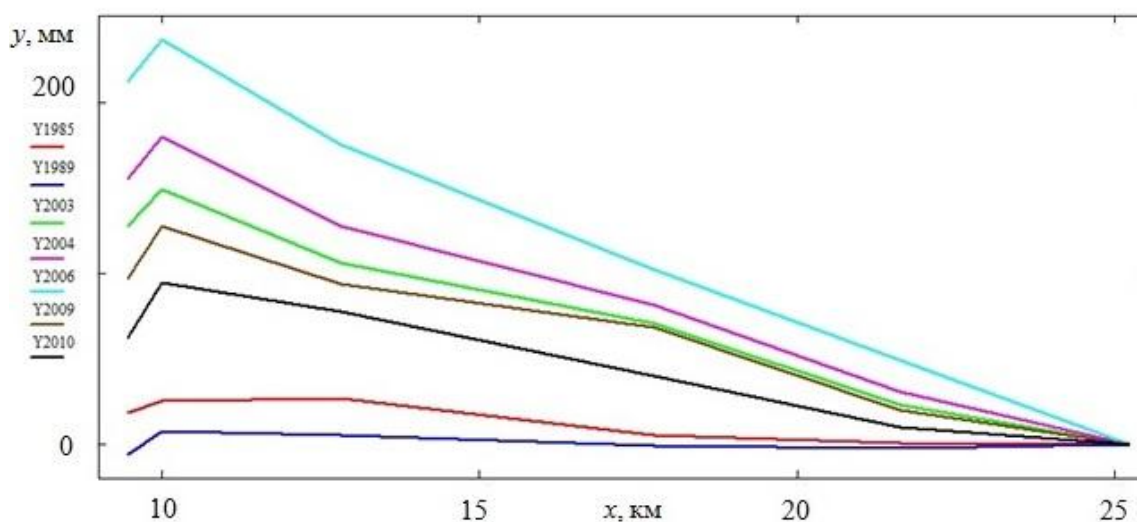


Рис. 3. Графики вертикальных смещений пунктов первого радиального профиля за разные годы

На графиках четко прослеживается определенная закономерность изменения смещений земной коры по удаленности от вершины вулкана до пункта, которая может быть описана в виде функциональной зависимости.

На наш взгляд, наиболее подходящими функциональными зависимостями являются гиперболическая и логарифмическая:

$$y = \frac{a}{x} + b; \tag{1}$$

$$y = a \cdot \ln(x) + b, \tag{2}$$

где x – расстояние от вершины вулкана до пункта, км;

y – значение смещения пункта, мм.

Возможности математического программного обеспечения MathCAD использовались для построения графиков вертикальных движений реперов и чис-

ленных расчетов коэффициентов моделей, построенных по гиперболической и логарифмической зависимостям.

На рис. 4 представлены графики вертикальных смещений пунктов по первому радиальному профилю. Сплошной линией обозначены результаты изменения реперов, построенные по геодезическим измерениям. Прерывистой линией с частым пунктиром обозначены вычисления по первой функциональной зависимости, линией с менее частым пунктиром – вычисления по второй функциональной зависимости.

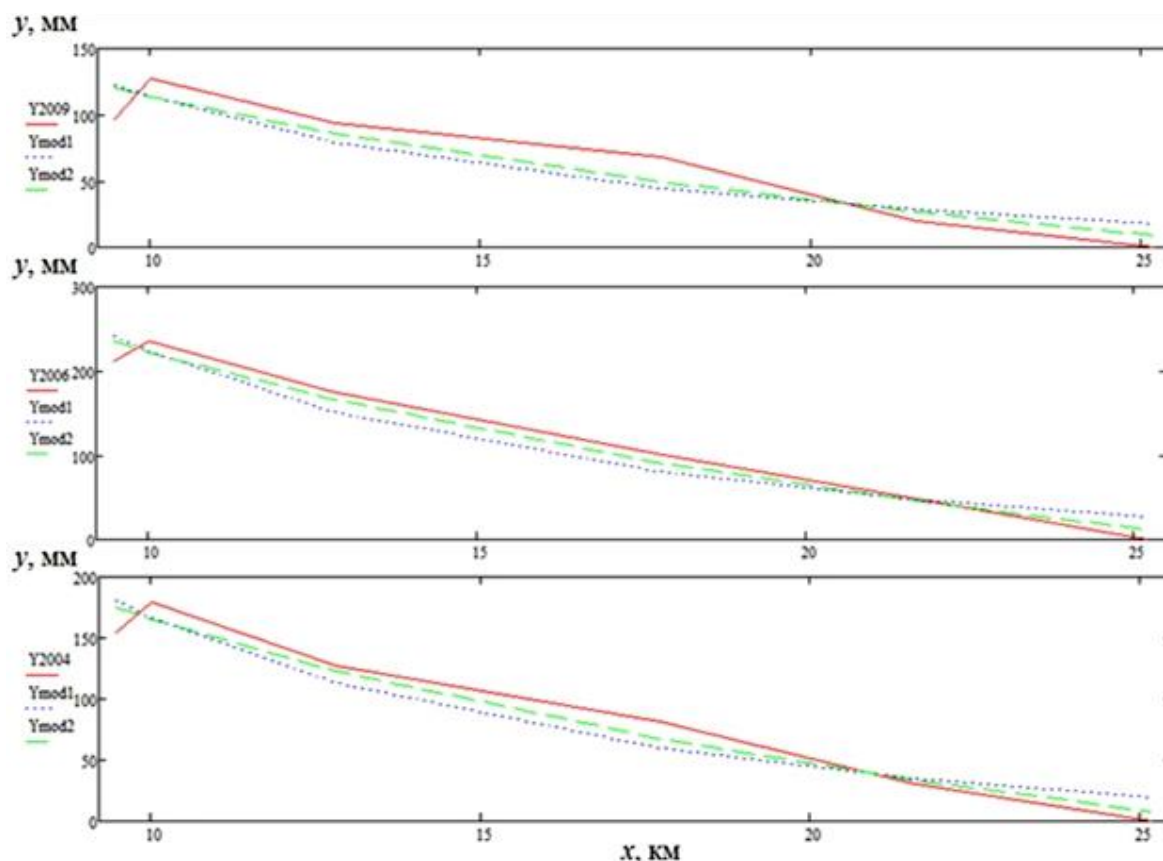


Рис. 4. Примеры графиков вертикальных смещений пунктов по первому радиальному профилю

Анализируя полученные графики, можно сделать вывод, что вторая модель лучше согласуется с результатами измерений [21].

Поскольку пункты, расположенные на значительном удалении от вулкана (более 27 км), практически не испытывают смещений, для уменьшения погрешностей моделирования введено ограничение на значения расстояний, для которых рекомендуется применять модели.

Оптимальный диапазон расстояний для применения моделей принят от 11 до 27 км от вершины вулкана. Данные, относящиеся к пунктам, не попадающим в заданный интервал, были исключены из исходных значений, после чего вновь определялись коэффициенты функциональных зависимостей двух типов. Ре-

зультаты вновь полученных значений коэффициентов, вычисленные для нескольких лет, приведены в табл. 1. Наибольшие коэффициенты соответствуют годам максимальных смещений, наименьшие – годам, когда смещения имели минимальные значения.

Таблица 1

Коэффициенты моделей

Год	Для всей территории				Для ограниченной территории			
	Модель 1		Модель 2		Модель 1		Модель 2	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
2010	1322,486	-36,477	-82,167	279,479	1784,241	-57,691	-103,426	346,203
2009	1763,848	-40,641	-110,303	382,793	2281,569	-64,427	-134,043	457,303
2006	3750,101	-103,792	-230,252	784,34	4360,372	-131,830	-254,004	858,886
2004	2843,391	-81,008	-174,584	592,396	3330,889	-103,405	-193,843	652,843
2003	2329,987	-65,793	-143,530	487,358	2793,347	-87,082	-162,754	547,690
1989	31,500	-1,399	-2,494	7,653	205,361	-9,387	-11,463	35,802
1985	398,181	-13,896	-24,098	79,408	501,698	-18,652	-28,408	92,936

Выполнено сравнение смоделированных и наблюдаемых смещений земной коры. В табл. 2 приведены примеры полученных значений расхождений для нескольких лет и нескольких пунктов первого профиля.

Таблица 2

Оценка отклонений моделей от наблюдаемых смещений земной коры

Пункт	Для всей территории						Для ограниченной территории					
	Отклонение модели 1 от данных измерений, мм			Отклонение модели 2 от данных измерений, мм			Отклонение модели 1 от данных измерений, мм			Отклонение модели 2 от данных измерений, мм		
	2009	2006	2004	2009	2006	2004	2009	2006	2004	2009	2006	2004
Рп.1804	-13,1	-10,9	-10,5	-12,8	-12,7	-11,4	8,5	14,6	9,9	3,9	4,6	2,2
Рп.5985	-15,8	-28,8	-18,7	-8,7	-14,2	-7,6	-5,1	-16,1	-8,6	1,5	-4,0	0,7
Рп.5374	-21,3	-18,5	-20,5	-16,5	-7,6	-12,4	-19,2	-16,0	-18,5	-13,1	-4,2	-9,5
Рп.6502	3,9	1,6	7,8	2,6	0,5	6,9	1,3	-1,5	5,3	1,3	-0,9	5,8
Рп.6244	20,4	25,9	17,4	11,7	9,8	5,1	14,5	19,1	11,9	6,4	4,5	0,8

Результаты оценки отклонений моделей от наблюдаемых смещений земной коры были использованы при построении карты, приведенной на рис. 5.

Наибольшие значения расхождений между смоделированными смещениями земной коры и смещениями, полученными по результатам измерений, наблюдаются в восточной части участка. Это объясняется отсутствием на данной территории реперов нивелирования, для сравнения с модельными значениями смещения земной коры на данной территории были получены с помощью линейной интерполяции.

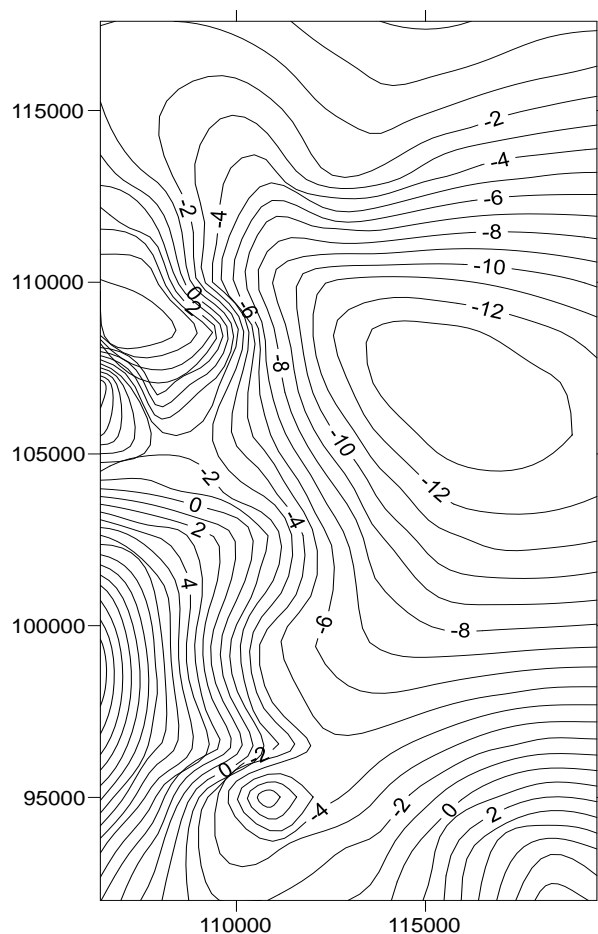


Рис. 5. Расхождения между значениями, полученными с помощью логарифмической зависимости, и результатами измерений

Результаты количественного сравнения моделей приведены в табл. 3, где Δ_1 , Δ_2 – суммы квадратов отклонений вертикальных смещений пунктов, полученных из геодезических измерений и путем вычисления по модели 1 и модели 2, соответственно.

Модели второго типа в целом оказались примерно в два раза точнее моделей первого типа. После ограничения территории было повторно произведено количественное сравнение моделей, построенных по первой и второй функциональным зависимостям, результаты которого приведены в табл. 3. Модели второго типа вновь оказались точнее моделей первого типа.

После построения моделей по ограниченной территории были определены значения отклонений смещений, смоделированных по новым моделям, от наблюдаемых значений. Сравнив приведенные значения с теми, что вычислялись до ограничения территории, можно говорить об улучшении сходимости модельных значений с наблюдаемыми смещениями.

Кроме того, было выполнено сравнение результатов моделирования по выбранной функциональной зависимости с результатами моделирования с помощью линейной зависимости, получены карты распределения смещений зем-

ной коры, построенные с помощью линейной и логарифмической зависимости для территории вокруг первого радиального профиля нивелирования (рис. 6).

Таблица 3

Сравнение моделей двух типов

Год измерения	Для всей территории		Для ограниченной территории	
	Δ_1	Δ_2	Δ_1	Δ_2
2010	1176,731	817,967	138,371	27,048
2009	1985,624	1218,911	680,308	232,627
2006	2907,443	1063,160	1093,719	75,906
2004	1840,644	779,699	683,278	130,577
2003	1669,306	846,660	623,715	200,007
1989	162,963	160,804	15,756	20,036
1985	64,042	57,165	11,856	24,652

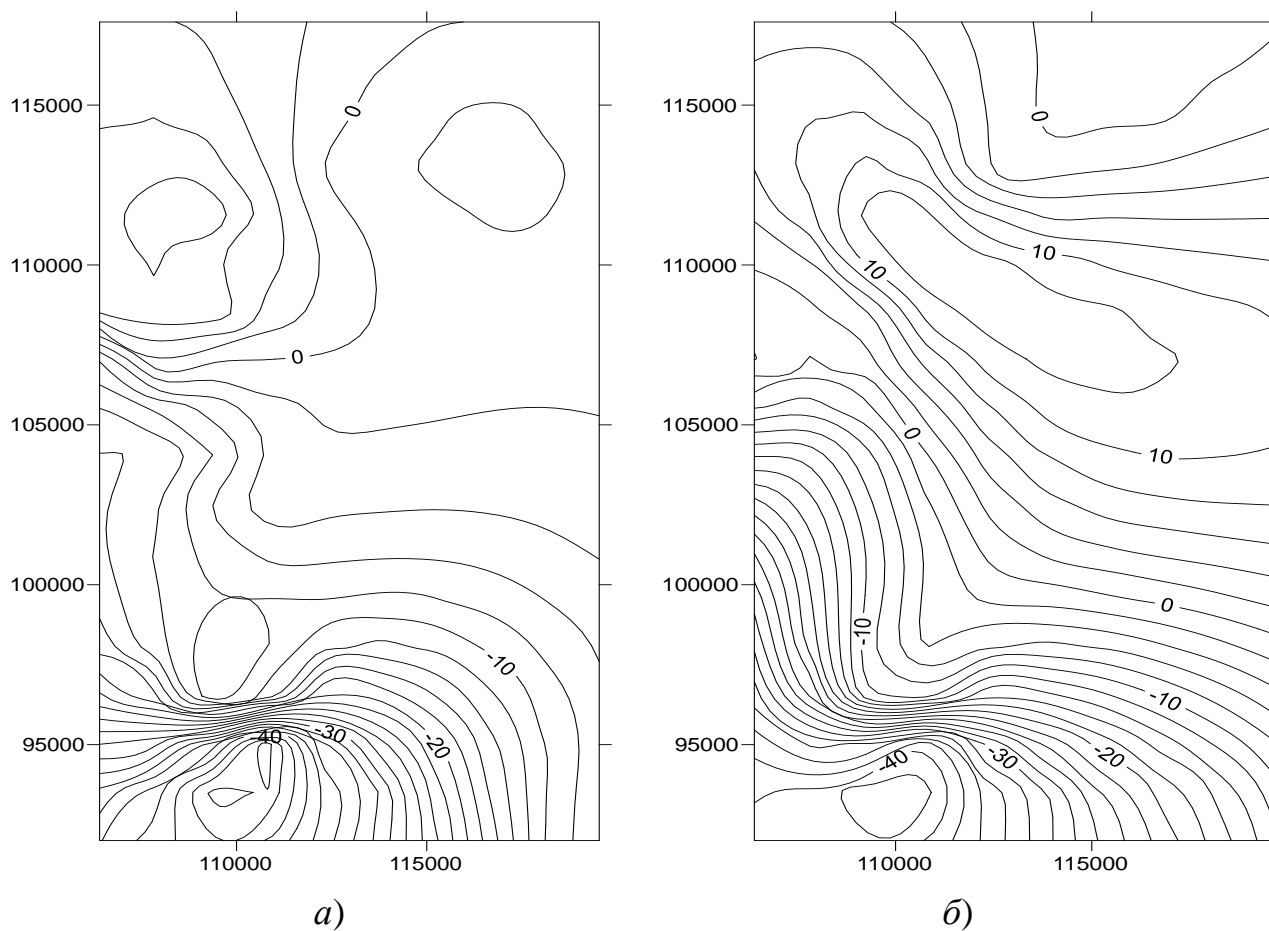


Рис. 6. Карта смещений земной коры:

а) построенная с помощью линейной зависимости; б) построенная с помощью логарифмической зависимости

Можно визуально отметить схожесть карт смещений земной коры, построенных с помощью линейной и логарифмической зависимости, однако присутствуют и существенные различия: первая карта содержит обособленные участки перепадов значений смещений, в то время как вторая является более сглаженной.

Заключение

Таким образом, в результате выполненных исследований осуществлен поиск вида функциональной зависимости значений вертикальных смещений пунктов по мере их удаленности от вулкана. По двум видам функциональных зависимостей построены модели для каждого профиля на каждый цикл измерений; выполнены сравнение и оценка полученных моделей, в результате которых предпочтение было отдано моделям, построенным по второму типу функциональной зависимости; введено ограничение на значения расстояний, для которых рекомендуется применять предложенные модели (11–27 км от вершины вулкана).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дорогова И. Е. Изучение деформаций земной коры по результатам геодезических данных с использованием метода конечных элементов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 190–193.
2. Дорогова И. Е. Интерпретация наблюдений за движениями земной коры на техногенном полигоне // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 191–195.
3. Мазуров Б. Т. Геодинамические системы (кинематические и деформационные модели блоковых движений) // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 3 (35). – С. 5–12.
4. Мазуров Б. Т., Панкрушин В. К., Середович В. А. Математическое моделирование и идентификация напряженно-деформированного состояния геодинамических систем в аспекте прогноза природных и техногенных катастроф // Вестник СГГА. – 2004. – Вып. 9. – С. 30–35.
5. Кобелева Н. Н., Дорогова И. Е. Изучение горизонтальных и вертикальных движений земной коры по результатам GPS-наблюдений и нивелирования I класса // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 186–189.
6. Колмогоров В. Г., Дударев В. И. Состояние проблемы комплексного изучения современной геодинамики Сибири в конце двадцатого столетия // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 4 (28). – С. 3–12.
7. Колмогоров В. Г. Теоретические основы изучения современных деформаций земной поверхности // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр.: сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 2. – С. 3–7.
8. Колмогоров В. Г. К вопросу о возможности изучения деформационного состояния земной поверхности по результатам повторного высокоточного нивелирования // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 1 (17). – С. 9–14.
9. Кафтан В. И., Докукин П. А. Определение смещений и деформаций по данным спутниковых геодезических измерений // Геодезия и картография. – 2007. – № 9. – С. 18–22.

10. Luongo G. Del Gaudio C. Obrizzo F. Ricco C. Vertical ground movements at Mt. Etna by precise leveling // Boll. GNV-CNR. – 1989. – Vol. 1. – P. 345–361.
11. Bonforte A., Puglisi G. Magma uprising and flank dynamics on the Mt Etna volcano, studied by GPS data (1994-95) [Electronic resource] // J. geophys. Res. – 2003. – Vol. 108, No. B3. – Mode of access: <https://doi.org/10.1029/2002JB001845>.
12. Bayesian inversion of 1994–1998 vertical displacements at Mt Etna: evidence for magma intrusion / Obrizzo F., Pingue F., Troise C., De Natale G. // Geophysical Journal International. – 2004. – Vol. 157, Issue 2. – P. 935–946.
13. Магуськин М. А., Магуськин В. М. Вертикальные смещения земной поверхности в южной зоне Толбачинских шлаковых конусов после окончания большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. и их возможные причины (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. – 2017. – № 5. – С. 62–74.
14. Селиверстов Н. И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг / Ред. Е. И. Гордеев ; ИВиС ДВО РАН. – Петропавловск-Камчатский : Изд-во КамГУ им. В. Беринга, 2009. – С. 179–191.
15. Жаринов Н. А., Демянчук Ю. В. Извержение вершинного кратера вулкана Ключевской (Камчатка) в феврале-июле 2007 г. // Вулканология и сейсмология. – 2009. – № 3. – С. 38–49.
16. Мазуров Б. Т. Аппроксимация гравитационного влияния локального рельефа с использованием некоторых аналитических моделей и метода конечных элементов // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 5–15.
17. Мазуров Б. Т. Моделирование и идентификация геодинамического объекта в вулканической области по комплексным нивелирным и гравиметрическим наблюдениям // Вестник СГГА. – 2006. – № 11. – С. 84–94.
18. Мазуров Б. Т. Совместная математическая обработка и интерпретация нивелирных и гравиметрических наблюдений за вертикальными движениями земной поверхности и изменениями гравитационного поля в районе действующего вулкана // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 4. – С. 11–21.
19. Движения земной поверхности в зоне трещинных извержений на протяженном южном склоне вулкана Плоский Толбачик и в окрестностях вулкана Ключевской (Камчатка) / М. А. Магуськин, Ю. В. Демянчук, Н. Н. Титков, К. М. Магуськин // Вулканизм и связанные с ним процессы. Ежегод. науч. конф. 2015. – Петропавловск-Камчатский : ИВиС ДВО РАН, 2015. – С. 176–198.
20. Федотов С. А., Жаринов Н. А., Гонтовая Л. И. Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 1. – С. 3–35.
21. Дорогова И. Е., Саркисян А. С., Изучение и моделирование вертикальных движений земной коры в районе действующего вулкана // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 123–130.

Получено 14.11.2019

© И. Е. Дорогова, Н. Н. Кобелева, 2020

STUDY AND MODELLING OF EARTH CRUST MOVEMENTS IN THE SURROUNDINGS OF ACTIVE VOLCANO USING THE RESULTS OF REPEATED HIGH-PRECISION LEVELING

Inna E. Dorogova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (383)343-29-11, e-mail: inna_dorogova@mail.ru

Natalia N. Kobeleva

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (913)938-15-06, e-mail: n.n.kobeleva@mail

The results of modeling the dependence of the vertical movements of the Earth's crust of the leveling profile points on their remoteness from the top of the volcano are considered. The topic of volcanism in Russia is more relevant for the Kamchatka region, which has more than 60 active volcanoes. The aim of the study is to simulate the movements of the earth's crust in the vicinity of an active volcano based on the results of repeated high-precision leveling. Vertical movements of the Earth's surface, near the Klyuchevskoy volcano, were observed by second class leveling in three profiles: two radial, one of which goes to the northeast, and the second to the southeast from the top of the volcano, and one transverse. MathCAD software was used to build two types of models based on the results of long-term geodetic measurements. As a result of the study, a search was made for the type of functional dependence of the values of the vertical displacements of the points as they are removed from the volcano. The recommended range of distances for the application of the proposed models. Differences between the vertical displacements of the Earth's crust obtained by modeling using linear and logarithmic dependencies are presented.

Key words: Earth's crust movements, vertical displacements of points, repeated geodetic measurements, modeling, functional relationships, high-precision leveling, active volcano, geodynamic processes.

REFERENCES

1. Dorogova, I. E. (2013). Application methods of cluster analysis for re-search Earth's crust parts block structure. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 190–193). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
2. Dorogova, I. E. (2011). Interpretation of the earth's crust movements observations on the technogenic test area. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2011: T. 1, ch. 1 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2011: Vol. 1, Part 1]* (pp. 191–195). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
3. Mazurov, B. T. (2016). Geodynamic systems (kinematic and deformation models of block movements). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(35), 5–12 [in Russian].
4. Mazurov, B. T., Pankrushin, V. K., & Seredovich, V. A. (2004). Mathematical modeling and identification of the stressed and deformed state of geodynamic systems in the aspect of forecasting natural and anthropogenic disasters. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 9, 30–35 [in Russian].
5. Kobeleva, N. N., & Dorogova, I. E. (2013). Investigation of Earth's crust horizontal and vertical movements by GPS-observations and first-order leveling. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 186–189). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
6. Kolmogorov, V. G., & Dudarev, V. I. (2014). State of the problem of complex studying of modern geodynamics of siberia in the late twentieth century. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 4(28), 3–12 [in Russian].
7. Kolmogorov, V. G. (2010). Theoretical basis for the earth's surface current deformations research. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2010: T. 1, ch. 2 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2010: Vol. 1, Part 2]* (pp. 3–7). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
8. Kolmogorov, V. G. (2012). To the issue of the possibility of ground surface strain state study based on repetitive high-precision leveling measurements. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 1(17), 9–14 [in Russian].

9. Kaftan, V. I., & Dokukin, P. A. (2007). Dislocation and deformation definition on the satellite geodetic measurements data. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 9, 18–22 [in Russian].
10. Luongo, G., Del Gaudio, C., Obrizzo, F., & Ricco, C. (1989). Vertical ground movements at Mt. Etna by precise leveling. *Boll. GNV-CNR*, 1, 345–361.
11. Bonforte, A. & Puglisi, G. (2003). Magma uprising and flank dynamics on the Mt Etna volcano, studied by GPS data (1994–95). *J. geophys. Res.*, 108(B3). Retrieved from <https://doi.org/10.1029/2002JB001845>.
12. Obrizzo, F., Pingue, F., Troise, C., & De Natale, G. (2004). Bayesian inversion of 1994–1998 vertical displacements at Mt Etna: evidence for magma intrusion. *Geophysical Journal International*, 157(2), 935–946.
13. Maguskin, M. A., & Maguskin, V. M. (2017). Vertical displacements of the earth's surface in the southern zone of the Tolbachinsky slag cones after the end of the large fissure Tolbachinsky eruption 1975–1976 and their possible causes (Kamchatka). *Vulkanologiya i seismologiya [Volcanology and Seismology]*, 5, 62–74 [in Russian].
14. Seliverstov, N. I. (2009). *Geodinamika zony sochleneniya Kurilo-Kamchatskoy i Aleutskoy ostrovnykh dug [Geodynamics of the junction zone of the Kuril-Kamchatka and Aleutian island arcs]* (pp. 179–191). E. I. Gordeev (Ed.). Petropavlovsk-Kamchatsky: KamGU named after W. Bering Publ. [in Russian].
15. Zharinov, N. A., & Demyanchuk, Yu. V. (2009). Eruption of the peak crater of Klyuchevskoy volcano (Kamchatka) in February–July 2007. *Vulkanologiya i seismologiya [Volcanology and Seismology]*, 3, 38–49 [in Russian].
16. Mazurov, B. T. (2015). Approximation gravitational influence local relief using some analytical models and finite element method. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(31), 5–15 [in Russian].
17. Mazurov, B. T. (2006). Modeling and identification of a geodynamic object in the volcanic region according to complex leveling and gravimetric observations. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 11, 84–94 [in Russian].
18. Mazurov, B. T. (2007). Joint mathematical processing and interpretation leveling and gravimetric observations of vertical movements Earth's surface and changes in the gravitational field in the area of the current volcano, the news of higher educational institutions. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4, 11–21 [in Russian].
19. Maguskin, M. A., Demyanchuk, Yu. V., Titkov, N. N., & Maguskin, K. M. (2015). Earth surface movements in the zone of fissure eruptions on the extended southern slope of the Flat Tolbachik volcano and in the vicinity of the Klyuchevskaya volcano (Kamchatka). In *Sbornik materialov Ezhegodnoy nauchnoy konferentsii: Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy [Proceedings of the Yearly Scientific Conference: Volcanism and Related Processes]* (pp. 176–198). Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS FEB RAS Publ. [in Russian].
20. Fedotov, S. A., Zharinov, N. A., & Gontovaya, L. I. (2010). Magmatic feeding system of the Klyuchevskaya group of volcanoes (Kamchatka) according to its eruptions, earthquakes, deformations and deep structure. *Vulkanologiya i seismologiya [Volcanology and Seismology]*, 1, 3–35 [in Russian].
21. Dorogova, I. E., & Sargsyan, A. S. (2016). Studying and modelling of vertical crust movements in the area of active volcano. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 123–130). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

Received 14.11.2019

© I. E. Dorogova, N. N. Kobeleva, 2020