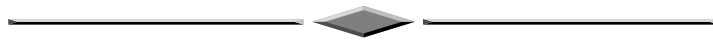


ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ



УДК 551.24.02

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (РЕШЕНИЕ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ГЕОДЕЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ)

Борис Тимофеевич Мазуров

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор, кафедра физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. (383)343-29-11, e-mail: btmazurov@mail.ru

Научное значение исследований геодинамических процессов заключается в получении новых знаний о Земле, ее строении, эволюции, разнообразных физических полях (гравитационных, магнитных и др.), пространственно-временной структуре физической поверхности. Важнейшим практическим значением изучения геодинамических процессов является решение задач прогноза, снижения риска и уменьшения последствий геодинамических катастроф природного и техногенного характера, мониторинга окружающей среды. Многодисциплинарная обратная задача в многомерных сложных средах – найти свойства среды при заданной информации о полях. Решая обратные задачи как многодисциплинарные, по комплексным геодезическим и геофизическим наблюдениям можно получить новые качественные результаты. Примером обратной задачи является также необходимость различать собственно вертикальные смещения точек земной поверхности и смещения уровенных поверхностей, горизонтальные смещения этих точек и изменения направления отвеса во времени.

В статье показан вариант решения обратной задачи в вулканической области по геодезическим наблюдениям, но с учетом увеличения внутриочагового давления при накапливании магмы в верхнем магматическом очаге вулкана.

Ключевые слова: геодинамические системы, обратные задачи, геодезические методы, вулканическая область, определение параметров магматического очага.

Геодинамические системы

Земля, совместно с геосферами (литосферой, атмосферой, гидросферой и др.), ее геофизическими полями (гравитационным, магнитным, деформационным и др.) и внешними возмущающими воздействиями, включая космические, представляет собой сложную природную систему. В работе [1] геодинамические системы отнесены к сложным системам с природными компонентами. Земля является сложной самоорганизующейся природной системой.

Геодинамические системы – объекты, процессы, явления – по охвату территории бывают глобальные (планетарные), региональные и локальные. В по-

следние могут включаться объекты инженерной геодинамики, состоящие из двух подсистем – инженерных сооружений и геофизической (физико-геологической) среды [2]. Изучение геодинамических объектов и процессов является не только актуальной научной, но и практической проблемой. Это относится, например, к районам добычи полезных ископаемых, крупным гидроузлам, инженерным сооружениям и т. д. Важнейшей характеристикой геодинамических объектов является их напряженно-деформированное состояние, так как при достижении некоторого критического значения напряжений может произойти резкое изменение структуры объекта, свойств и т. п., вызывающее нежелательные и даже катастрофические для людей последствия. Изучение геодинамических объектов и процессов должно опираться на серьезные теоретические исследования, основным содержанием которых является моделирование движений и полей деформаций и напряжений с учетом разрывов и неоднородностей в земной коре.

Информация о движениях и напряженно-деформированном состоянии (НДС) земной поверхности и земной коры, обусловленных эндогенными и экзогенными факторами, является важнейшей в аспекте прогноза катастрофических геодинамических процессов (землетрясений, извержений вулканов, оползней, сходов ледников, горных ударов и проседания грунтов в области разработки полезных ископаемых и т. п.). Аномальные техногенные геодинамические процессы вызывают горизонтальные сдвиги земной коры, разломообразование, подземные аварии, наводнения; при этом страдают не только промышленные объекты, инженерные конструкции, жилые здания, но и население.

Физические поля Земли и обратные задачи

Академик В. А. Магницкий в своих работах особенно обращал внимание ученых наук о Земле о взаимосвязях ее физических полей [3]. Академик В. Н. Страхов исследовал взаимосвязь гравитационных и магнитных полей [4]. М. С. Молоденский ввел понятие статической, кинематической и динамической геодезии [5]. Им высказана необходимость решения задачи различения собственно вертикальных смещений точек земной поверхности и смещений уровней поверхностей, горизонтальных смещений этих точек и изменений направления отвеса во времени, развиваемой в работах М. И. Юркиной [6].

Классическим примером некорректной обратной задачи в геофизике являются попытки объяснить существовавшую модель расположения слоев [7]. Дж. Эверест определил уклонения отвеса в Индии и приписал их воздействию Гималаев. Однако, последующие независимые исследования английского астронома Б. Эри в 1855 г. и несколько позже Джона Пратта для объяснения различий между астрономо-геодезическими и топографическими уклонениями отвеса привели к предложению гипотезы изостазии – компенсации топографических масс.

Практические вопросы решения обратных задач широко распространены в гравиразведке. Комплексная интерпретация различных геофизических полей, применение гравиметрии и геодезических методов при мониторинге природной и техногенной геодинамики обсуждались в работах [8, 9]. Ведутся исследования по определению влияний на значение топографической редукции силы тяжести [10–13]. Многие результаты имеют практическое применение в виде геоинформационных систем различного назначения и наполнения [14, 15]. Проводятся исследования связи гравитационных данных и деформаций [16–18].

Исследование вулканизма

Современные возможности измерений гравитационных и деформационных полей очень востребованы при исследовании вулканизма [19–24]. Опасным в глобальном масштабе считается вулкан Йеллоустоун (США) — один из самых крупных супервулканов в мире. Размер кальдеры — циркообразной котловины супервулкана — составляет примерно 72 км (рис. 1). Проводится мониторинг состояния вулкана Геологической службой США (USGS). На официальном сайте USGS (<https://www.usgs.gov/>) есть интерактивная карта, отображающая в онлайн-режиме статус опасных вулканов планеты.

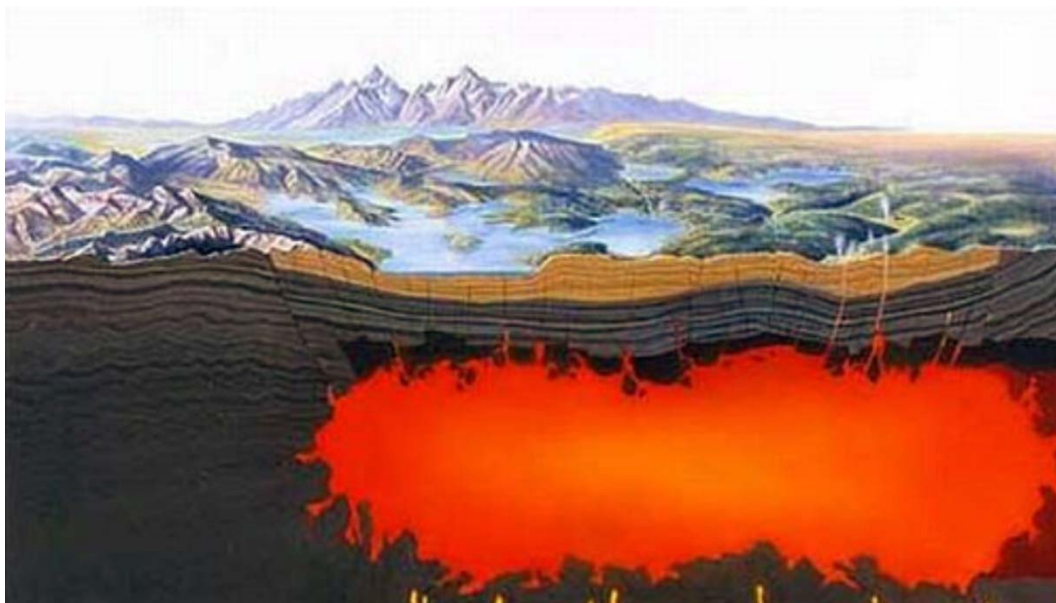


Рис. 1. Магматическая камера вулкана Йеллоустоун

Геофизики из России (Новосибирск, Томск, Петропавловск-Камчатский), Франции, Саудовской Аравии и Египта описали в 2016 г. в журнале *Nature Communications* строение самого опасного супервулкана Земли – Тобы, расположенного на Суматре (Индонезия). Ученые представили модель строения вулкана, основанную на имеющихся сейсмических наблюдениях. По их мнению,

на глубине более 150 километров под погружающейся вниз литосферной плитой газы и расплавы формируют потоки магмы, которые поднимаются вверх. Это приводит к образованию на глубине 75 километров под Тобой магматической камеры объемом 50 тысяч кубических километров. Извержение супервулкана происходит тогда, когда давление в камере достигает критического значения. В этом случае магма поступает вверх, что приводит к расплавлению (разрыву) коры, и изливается на поверхность планеты.

Исследование накопления магмы в магматических очагах и ее подъем к поверхности является одной из важных проблем в вулканологии и геодинамике. В механическом аспекте эта проблема может решаться с привлечением методов геодезии и геофизики. Геодезические методы (нивелирование, угловые, линейные измерения, GPS-наблюдения) позволяют определить перемещения земной поверхности, которые являются следствием меняющегося напряженно-деформированного состояния в окрестности очага землетрясения. Но это изменение НДС является в свою очередь следствием увеличения внутриочагового давления при накапливании магмы в верхнем магматическом очаге вулкана. Таким образом, мы имеем дело с перемещением масс (наполнение верхнего магматического очага). Следовательно, наблюдения геодезическими приборами, которые устанавливаются в рабочее положение с помощью уровня, должны обрабатываться совместно с геофизическими (гравиметрическими) наблюдениями. Обычно для оценки параметров верхнего магматического очага (глубина образования до 50 км) по смещениям поверхности ведутся наблюдения в районе радиусом около 10 км от кратера вулкана [25]. Выделить смещения от деформации глубинного очага (глубина 50–300 км) на фоне современных движений обычно не удается.

Решение обратных задач по геодезическим данным

Изменения характеристик НДС по результатам геодезических и геофизических измерений возможно определить только дискретно – в точках наблюдений и через какие-то интервалы времени между эпохами наблюдений. В работах [26, 27] создание модели геодинамического объекта заключалось в вычислении вертикальных и горизонтальных смещений заложенных в окрестности вулкана геодезических пунктов, а также в вычислении характеристик гравитационного поля на этих пунктах для нескольких эпох наблюдений. Система наблюдений в каждую эпоху включала нивелирные превышения с точностью $0,5 \text{ мм} \sqrt{L}$; горизонтальные углы – $0,25''$; светодальномерные дальности – 2 мм; GPS наблюдения – 4 мм для ΔX и ΔY , 7 мм для ΔZ ; абсолютные значения силы тяжести – 5 мкгал.

Исходные геофизические предпосылки создания модели могут быть следующие. Литосфера принимается вязкоупругой с коэффициентом вязкости $\eta_{\text{лит.}} = 10^{17} \text{ Па} \cdot \text{с}$ и модулем упругости $E = 10^{10} \text{ Па}$, коэффициент Пуассона

$\nu = 0,3$, магматический очаг сферическим, скорость увеличения объема в очаге $\nu_V = 5 \cdot 10^7 \text{ м}^3 / \text{год}$. Для вязкоупругой среды Максвелла (полупространства с шаровой полостью) при постоянной скорости увеличении объема давление в камере $P_{\text{очага}}(t)$ со временем изменяется по экспоненте:

$$P_{\text{очага}}(t) = P_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}}\right); \quad (1)$$

$$P_{\infty} = \frac{\nu_V \eta_{\text{лит.}}}{2\pi R_{\text{очага}}^3 (1 + \nu)}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) P_{∞} – асимптотическое значение давления, соответствующее чисто вязкой среде с вязкостью $\eta_{\text{лит.}}$, $\tau_0 = \eta_{\text{лит.}} / E$ – время релаксации среды.

Для принятых нами характеристик литосферы и магматического очага вычисляются:

$$P_{\infty} = 1,27 \cdot 10^8 \text{ Па}, \quad \tau_0 = 31,7 \text{ года},$$

– давление в очаге для первой эпохи ($t = 0$ лет)

$$P_{\text{очага}}(t = 1) = 0 \text{ Па},$$

– давление в очаге для второй эпохи ($t = 2$ года)

$$P_{\text{очага}}(t = 2) = 7,78 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

– давление в очаге для третьей эпохи ($t = 4$ года)

$$P_{\text{очага}}(t = 3) = 1,51 \cdot 10^7 \text{ Па}.$$

Давление в шаровом очаге (магматической камере) (рис. 2) вызывает напряженно-деформированное состояние упругого полупространства. Следствием являются смещения поверхности полупространства по вертикали u_z и в горизонтальной плоскости u_r в цилиндрической системе координат с началом на поверхности (точка O – проекция на поверхность центра сферы) и осью z , проходящей через центр сферы z_0 (рис. 3).

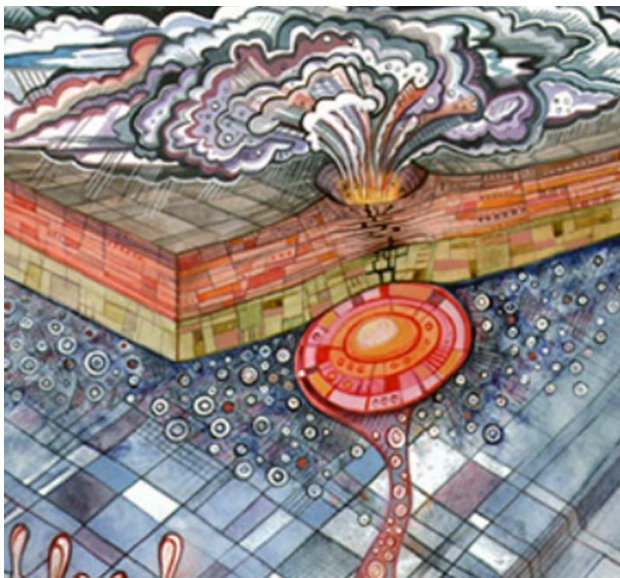


Рис. 2. Магматическая камера

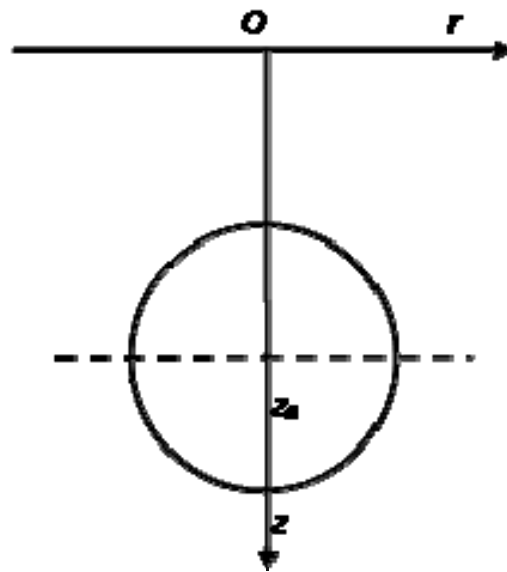


Рис. 3. Модель полупространства

Для вычисления перемещений на поверхности u_z и u_r , используем формулы из работы [25]:

$$u_r = 2P_{\text{очага}} R_{\text{очага}}^3 \frac{1-v^2}{E} \frac{r}{(r^2 + z_0^2)^{3/2}}; \quad (3)$$

$$u_z = -2P_{\text{очага}} R_{\text{очага}}^3 \frac{1-v^2}{E} \frac{z_0}{(r^2 + z_0^2)^{3/2}}. \quad (4)$$

Поля деформаций и напряжений возможно получать по наблюдениям горизонтальных и вертикальных смещений пунктов сети, т. е. дискретным в пространстве и времени геодезическим наблюдениям. Очевидно, вектор параметров геодинамического объекта должен содержать координаты пунктов. Описание локального гравитационного поля можно выполнять введением в вектор параметров аномальных масс аналогично тому, как это было сделано в работах [26, 27]. По значениям и координатам этих масс могут быть вычислены компоненты уклонений отвесной линии ξ , η и аномалия силы тяжести Δg для любой точки геодинамической системы.

В работах [26, 27] на модельных примерах показан алгоритм решения обратной задачи в вулканической области. Для анализа НДС по полученным оценкам смещений пунктов был сделан переход от пространственной прямоугольной системы координат к пространственной цилиндрической (см. рис. 3). По оценкам смещений u_x , u_y , u_H для каждого пункта геодезической сети (включая исходные) были найдены значение радиального смещения от кратера u_r (3)

и поднятие u_z (4) за время между первой и второй эпохой и первой и третьей эпохой наблюдения.

По значениям радиального смещения от кратера u_r и поднятия u_z и с учетом уравнений (3) и (4) могут быть вычислены значения глубины z_0 центра шаровой полости (очага вулкана):

$$z_0 = -r \frac{u_z}{u_r}.$$

Обратим внимание на признак некорректности обратных задач. А именно – найти значение внутриочагового давления $P_{\text{очага}}$ и $R_{\text{очага}}$ по оценкам u_r и u_z невозможно. Один из этих параметров для этого необходимо определять геофизическими методами. Но возможно вычислить величину $P_{\text{очага}} R_{\text{очага}}^3$, которая позволит рассчитать характеристики НДС вулканической области. Из формул (3) и (4) получаем формулы, дающие один и тот же результат вычисления $P_{\text{очага}} R_{\text{очага}}^3$:

$$P_{\text{очага}} R_{\text{очага}}^3 = \frac{E}{1-\nu^2} \frac{(r^2 + z_0^2)^{3/2}}{2r} u_r,$$

или

$$P_{\text{очага}} R_{\text{очага}}^3 = -\frac{E}{1-\nu^2} \frac{(r^2 + z_0^2)^{3/2}}{2z_0} u_z.$$

Значение $P_{\text{очага}} R_{\text{очага}}^3$ вычислим для каждого пункта сети за время между первой и второй эпохой и первой и третьей эпохой. Параметры НДС на поверхности будем вычислять, используя формулы, приведенные в работе [25]:

$$\sigma_r = \frac{P_{\text{очага}} R_{\text{очага}}^3}{2} \left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{-2r^2 + (z - z_0)^2}{[r^2 + (z - z_0)^2]^{5/2}} - \frac{2(3 - 2\nu)}{[r^2 + (z + z_0)^2]^{3/2}} + \right. \\ \left. + \frac{3(11z^2 + 14zz_0 + 3z_0^2)}{[r^2 + (z + z_0)^2]^{5/2}} - \frac{30z(z + z_0)^3}{[r^2 + (z + z_0)^2]^{7/2}} \right] \end{array} \right\};$$

$$\sigma_z = \frac{P_{\text{очага}} R_{\text{очага}}^3}{2} \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{r^2 - 2(z - z_0)^2}{[r^2 + (z - z_0)^2]^{5/2}} - \frac{1}{[r^2 + (z + z_0)^2]^{3/2}} \right] - \\ & \left[\frac{3(5z^2 + 4zz_0 - z_0^2)}{[r^2 + (z + z_0)^2]^{5/2}} + \frac{30z(z + z_0)^3}{[r^2 + (z + z_0)^2]^{7/2}} \right] \end{aligned} \right\};$$

$$\sigma_\varphi = \frac{P_{\text{очага}} R_{\text{очага}}^3}{2} \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{[r^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}} + \frac{3 - 8\nu}{[r^2 + (z + z_0)^2]^{3/2}} + \\ & + \frac{6(z + z_0)[(-1 + 2\nu)z + 2\nu z_0]}{[r^2 + (z + z_0)^2]^{5/2}} \end{aligned} \right\};$$

$$\sigma_{rz} = -\frac{3}{4} P_{\text{очага}} R_{\text{очага}}^3 r \left\{ \begin{aligned} & \frac{z - z_0}{[r^2 + (z - z_0)^2]^{5/2}} + \frac{5z + z_0}{[r^2 + (z + z_0)^2]^{5/2}} - \\ & - \frac{20z(z + z_0)^2}{[r^2 + (z + z_0)^2]^{7/2}} \end{aligned} \right\};$$

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{z\varphi} = 0.$$

Полученную физико-математическую модель возможно использовать для моделирования пространственно-временных рядов комплексных геодезических и геофизических наблюдений и последующего уточнения компьютерной технологии их совместной математической обработки. Следующим шагом является решение обратной задачи по геодезическим данным. Совместная обработка геодезических и гравиметрических наблюдений позволила при адекватной модели закономерностей движений земной поверхности и изменений масс глубинного маскона (верхний магматический очаг вулкана) достичь высокой точности оценивания.

Заключение

При решении обратных задач, связанных с определением структуры приповерхностного слоя земной коры, важное значение имеют геодезические методы наблюдений. Результаты обработки геодезических измерений количественно выражены и статистически обоснованы. Совместная математическая обработка геодезических и геофизических наблюдений позволяет определить характеристики некоторых глубинных геодинамических процессов. Например, подготовку вулканического извержения с учетом увеличения внутриочагового давления при накапливании магмы в верхнем магматическом очаге вулкана.

Вулканическая область с аномальными массами и движениями земной поверхности не единственная геодинамическая система, к исследованию которой может быть применен описанный выше подход к математической обработке. Это могут быть геодинамические объекты различных масштабов (глобальные, региональные, локальные), как природные, так и техногенные (плотины ГЭС, шахты, рудники, месторождения нефти и газа, высотные сооружения и здания).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полищук Ю. М. Имитационно-лингвистическое моделирование систем с природными компонентами. – Новосибирск : Наука, 1992. – 214 с.
2. 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. – № 9. – С. 30–35.
3. Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. – М. : Недра, 1965. – 379 с.
4. Страхов В. Н. Две парадигмы в теории интерпретации гравитационных и магнитных аномалий // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1987. – № 1. – С. 46–61.
5. Молоденский М. С. Современные задачи изучения фигуры Земли // Геодезия и картография. – 1958. – № 7. – С. 3–5.
6. Юркина М. И. Исследования по совместному определению изменений земного гравитационного поля и вертикальных движений земной коры по повторным гравиметрическим и нивелирным наблюдениям // Повторные гравиметрические наблюдения. – М., 1988. – С. 6–22.
7. Торге В. Гравиметрия : Пер. с англ. – М. : Мир, 1999. – 429 с.
8. Голиздра Г. Я. Комплексная интерпретация геофизических полей при изучении глубинного строения земной коры. – М. : Недра, 1988. – 212 с.
9. Дементьев Ю. В., Каленицкий А. И. Топографо-геодезическое обеспечение определения полной топографической редукции силы тяжести // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 2 (26). – С. 3–8.
10. Дементьев Ю. В., Каленицкий А. И. Влияние сжатия Земли на значение топографической редукции силы тяжести // Геодезия и картография. – 2012. – № 11. – С. 13–14.
11. Елагин А. В., Дорогова И. Е., Мареев А. В. Исследование взаимосвязи смешанных и чистых аномалий силы тяжести // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 3 (27). – С. 70–83.
12. Дементьев Ю. В., Каленицкий А. И., Мареев А. В. Влияние стационарной атмосферы Земли на значение силы тяжести // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 9–16.

13. Дементьев Ю. В., Каленицкий А. И., Мареев А. В. Влияние водных масс промежуточного слоя Земли на значение силы тяжести // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 40–44.
14. Мазуров Б. Т., Николаева О. Н., Ромашова Л. А. Интегральные экологические карты как инструмент исследования динамики экологической обстановки промышленного центра // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 88–92.
15. Мазуров Б. Т., Николаева О. Н., Ромашова Л. А. Совершенствование информационной базы региональных ГИС (РГИС) для инвентаризации и картографирования ресурсов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 130–135.
16. Маслов А. А. Расчет деформаций поверхности Земли по гравитационным данным // Геология и геофизика. – 1983. – № 5. – С. 30–35.
17. Heck В., Malzer Н. On some problems connected with the determination of recent vertical crustal movements from repeated levellings and gravity measurements tectonophysics. – 1986. – P. 299–305.
18. 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.
19. Большое трещинное Толбачинское извержение (1975 – 1976 гг., Камчатка) / отв. ред. С. А. Федотов. – М. : Наука, 1984. – 637 с.
20. Geodetic and geophysical effects associated with seismic and volcanic hazards. Edited by Jose Fernandez. – Birkhauser Verlag, 2004. – P. 1301–1611.
21. Battaglia M., Segall P. The interpretation of gravity changes and crustal deformation in active volcanic areas // Geodetic and geophysical effects associated with seismic and volcanic hazards / Edited by Jose Fernandez. – Birkhauser Verlag, 2004. – P. 1453–1467.
22. Bonaccorso A., D'Amico S., Mattia M., Patane D. Intrusive Mechanisms at Mt. Etna Forerunning the July-August 2001 eruption from seismic and ground deformation data // Geodetic and geophysical effects associated with seismic and volcanic hazards / Edited by Jose Fernandez. – Birkhauser Verlag, 2004. – P. 1469–1487.
23. Bonaccorso A., Sansosti E., Berardino P. Comparison of integrated geodetic data models and satellite radar interferograms to infer magma storage during the 1991-1993 Mt. Etna eruption // Geodetic and geophysical effects associated with seismic and volcanic hazards / Edited by Jose Fernandez. – Birkhauser Verlag, 2004. – P. 1345–1357.
24. GPS monitoring in the N-W part of the volcanic island of Tenerife, Canaries, Spain: Strategy and results // Geodetic and geophysical effects associated with seismic and volcanic hazards / Edited by Jose Fernandez. – Birkhauser Verlag, 2004. – P. 1359–1377.
25. Ефимов А. Б., Демин С. С. Исследование напряженно-деформированного состояния вблизи магматического очага // Вулканология и сейсмология. – 1979. – № 1. – С. 16–27.
26. Мазуров Б. Т. Модель системы наблюдений за вертикальными движениями земной поверхности и изменениями гравитационного поля в районе действующего вулкана // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 3. – С. 93–101.
27. 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.

Получено 08.12.2016

© Б. Т. Мазуров, 2017

GEODYNAMICAL SYSTEM (THE SOLUTION OF INVERSE PROBLEMS GEODETIC METHODS)

Boris T. Mazurov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., D. Sc., Professor, Department Physical Geodesy and Remote Sensing, tel. (383)343-29-11, e-mail: btmazurov@mail.ru

The scientific significance of the researches of geodynamic processes is to obtain new knowledge about the Earth, its structure, evolution, various physical fields (gravitational, magnetic, etc.), the spatial and temporal structure of the physical surface. The most important practical significance of studying of geodynamic processes is the solution of problems of the forecast, reduce risk, and reduce the effects of geodynamic catastrophes of natural and technogenic of the impact, environmental monitoring. Multidisciplinary inverse problem in the multidimensional complex measurements to find the properties of the medium at the specified information about the fields. Solving the inverse problem as a multidisciplinary, comprehensive geodetic and geophysical measurements, we can obtain new qualitative results. An example of the inverse problem is also the need to distinguish between actual vertical displacement of the earth's surface points and the displacement of the water level surface, horizontal displacement of these points and change the direction of the plumb line in time.

The article shows the solution to the inverse problem in a volcanic field from geodetic measurements, but with the increase intralesional pressure in the accumulation of magma in the upper magma chamber of the volcano.

Key words: geodynamic system, inverse problem, geodesy methods, volcanic region, determination of the parameters of the magma chamber.

REFERENCES

1. Polishhuk, Ju. M. (1992). *Imitacionno-lingvisticheskoe modelirovanie sistem s prirodnyimi komponentami [Simulation-linguistic modelling of systems with natural components]*. Novosibirsk: Nauka [in Russian].
2. Mazurov, B. T., Pankrushin, V. K., & Seredovich, V. A. (2004). Mathematical modeling and identification of stressed-strained state of geodynamic systems in terms of forecasting natural and man-made disasters. *Vestnik SGGGA [Vestnik SSGA]*, 9, 30–35 [in Russian].
3. Magnickij, V. A. (1965). *Vnutrennee stroenie i fizika Zemli [Internal structure and physics of the Earth Internal structure and physics of the Earth]*. Moscow: Nedra [in Russian].
4. Strahov, V. N. (1987). Two paradigms in theory interpretation of gravity and magnetic anomalies. *Izvestija AN SSSR. Fizika Zemli [Izvestija USSR Academy of Sciences. Physics Of The Earth]*, 1, 46–61 [in Russian].
5. Molodenskij, M. S. (1958). Modern tasks of studying the shape of the Earth. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 7, 3–5 [in Russian].
6. Jurkina, M. I. (1988). Studies on the joint determination of Earth's gravitational field changes and vertical crustal movements on the re-leveling and gravimetric observations. In *Povtornye gravimetricheskie nabljudenija [Repeated gravity observations]*. Moscow [in Russian].
7. Torge, V. (1999). *Gravimetrija [Gravimetry]*. Moscow: Mir [in Russian].
8. Golizdra, G. Ja. (1988). *Kompleksnaja interpretacija geofizicheskikh polej pri izuchenii glubinnogo stroenija zemnoj kory [Integrated interpretation of geophysical fields in the study of the deep structure of the earth's crust]*. Moscow: Nedra [in Russian].

9. Dement'ev, Ju. V., & Kalenickij, A. I. (2014). Topographic and geodetic support for determining complete topographic reduction of gravity. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 2(26), 3–8 [in Russian].
10. Dement'ev, Ju. V., & Kalenickij, A. I. (2012). The Earth's compression impact on the value of gravity topographic reduction. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 11, 13–14 [in Russian].
11. Elagin, A. V., Dorogova, I. E., & Mareev, A. V. (2014). Research of relationship gravity disturbance and gravity anomaly. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 3(27), 70–83 [in Russian].
12. Dement'ev Ju. V., Kalenickij A. I., Mareev A. V. (2015). The influence of stationary Earth's atmosphere on the gravity value. *Izvestija vuzov. Geodezija i aerofotos'emka [Izvestija Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 5/C, 9–16 [in Russian].
13. Dement'ev, Ju. V., Kalenickij, A. I., & Mareev, A. V. (2015). Gravitational correction for the influence of water masses of the intermediate layer. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(31), 40–44 [in Russian].
14. Mazurov, B. T., Nikolaeva, O. N., & Romashova, L. A. (2012). Integral ecological maps as a an instrument for investigating the industrial centre ecological situation dynamics. *Izvestija vuzov. Geodezija i aerofotos'emka [Izvestija vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 2/1, 88–92 [in Russian].
15. Mazurov, B. T., Nikolaeva, O. N., & Romashova, L. A. (2012). Improvement of regional GIS data base for natural resources inventory and mapping. *Izvestija vuzov. Geodezija i aerofotos'emka [Izvestija vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 2/1, 130–135 [in Russian].
16. Maslov, A. A. (1983). Calculation of deformations of the Earth's surface gravity data. *Geologija i geofizika [Geology and Geophysics]*, 5, 30–35 [in Russian].
17. Heck, B., & Malzer, H. (1986). *On some problems connected with the determination of recent vertical crustal movemens fro repeated levellings and gravitymeasurments tectonophysics*, 130, 299–305.
18. 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].
19. *Bol'shoe treshhinnoe Tolbachinskoe izverzhenie (1975–1976 gg., Kamchatka) [Tolbachinskii great fissure eruption (1975–1976, Kamchatka)]*. (1984). S. A. Fedotov (Ed.). Moscow: Nauka [in Russian].
20. *Geodetic and geophysical effects associated with seismic and volcanic hazards*. (2004). Jose Fernandez (Ed.). Birkhauser Verlag.
21. Battaglia, M., & Segall, P. (2004). The interpretation of gravity changes and crustal deformation in active volcanic areas. In *Geodetic and geophysical effects associated with seismic and volcanic hazards*. Jose Fernandez (Ed.). Birkhauser Verlag.
22. Bonaccorso, A., D'Amico, S., Mattia, M., & Patane, D. (2004). Intrusive Mechanisms at Mt. Etna Forerunning the July-August 2001 eruption from seismic and ground deformation data. In *Geodetic and geophysical effects associated with seismic and volcanic hazards*. Jose Fernandez (Ed.). Birkhauser Verlag.
23. Bonaccorso, A., Sansosti, E., & Berardino, P. (2004). Comparison of integrated geodetic data models and satellite radar interferograms to infer magma storage during the 1991–1993 Mt. Etna eruption. In *Geodetic and geophysical effects associated with seismic and volcanic hazards*. Jose Fernandez (Ed.). Birkhauser Verlag.
24. GPS monitoring in the N-W part of the volcanic island of Tenerife, Canaries, Spain: Strategy and results. (2004). In *Geodetic and geophysical effects associated with seismic and volcanic hazards*. Jose Fernandez (Ed.). Birkhauser Verlag.
25. Efimov, A. B., & Demin, S. S. (1979). Study of stress-strain state near magmatic hearth. *Vulkanologija i sejsmologija [Volcanology and Seismology]*, 1, 16–27 [in Russian].

26. Mazurov, B. T. (2007a). The system model and observations of vertical movements of the earth's surface and changes of the gravitational field in the center of an active volcano. *Izvestija vuzov. Geodezija i aerofotos'emka [Izvestija vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 3, 93–97 [in Russian].

27. Mazurov B. T. (2007b). Joint mathematical processing and interpretation of the leveling and gravimetric observations of vertical movements of the earth's surface and changes of the gravitational field in the center of an active volcano, the news of higher educational institutions. *Izvestija vuzov. Geodezija i aerofotos'emka [Izvestija vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4, 11–21 [in Russian].

Received 08.12.2016

© B. T. Mazurov, 2017