

Numerical Estimates of Magnetic Anomalies Caused by Changes in the Temperature Field in the Magmatic Focus of Klyuchevskaya Sopka Volcano

A.A. Zaplavnova<1,2>, L.V. Tsibizov<2>, M.P. Kozlova<2>
<1> NGU, <2> INGG SO RAn

Summary

Numerical estimates of magnetic anomalies caused by changes in the temperature field in the magmatic focus of Klyuchevskaya Sopka volcano.

«Численные оценки магнитных аномалий, вызванных изменением температурного поля в области магматического очага вулкана Ключевская сопка»

А.А. Заплавнова* (НГУ, ИНГГ СО РАН), Л.В. Цибизов (ИНГГ СО РАН), М. П. Козлова (ИНГГ СО РАН)

Введение

Механизмы вулканических извержений до сих пор остаются загадкой для исследователей. На данный момент, информация об изменении вулканического режима в основном является интерпретацией сейсмических, геохимических и температурных данных. Последние 2 типа данных получаются путём измерений, проведённых в приповерхностной зоне, что делает неоднозначной интерпретацию глубинных структур. Глубинность сейсмических исследований вполне адекватна рассматриваемой задаче [Koulakov, et al., 2017], однако сейсмический мониторинг является достаточно дорогим и длительным процессом, так же, как последующая обработка и интерпретация данных. В свою очередь, магниторазведка является одним из самых мобильных геофизических методов, доставляющих информацию непосредственно от глубинного источника. Проведение мониторинга с помощью магнитосъёмки, например, аэромагнитосъёмки с использованием дронов, может значительно увеличить объём информации о вулканической деятельности и ускорить процесс определения стадии активности вулкана.

При проведении мониторинга стоит учитывать значение термического режима промежуточных камер в подготовке извержений. Гипотеза о существовании таких камер впервые была выдвинута по результатам данных сейсморазведки на вулкане Авачинский 1960-1962 годах. На вулкане была зафиксирована положительная гравитационная аномалия. Глубина залегания и форма аномального тела были определены методом подбора. [Пашкевич Р. И., 2014] На данный момент малоглубинные магматические очаги встречаются в моделях, построенных на основе данных сейсмотомографии, гравиразведки и МТЗ для вулканов, расположенных в различных частях земного шара, что подтверждает выдвинутую гипотезу. Данные, полученные с помощью магнитосъёмки, могут дополнить существующие модели, подтвердить или опровергнуть выдвинутые гипотезы. Если малоглубинный очаг существует, то вследствие протекающих в нём процессов теплопереноса происходит перемагничивание пород (при нагреве выше точки Кюри породы теряют намагниченность), что отразится на измеренных данных.

Таким образом, мониторинг глубины залегания глубины изотермы Кюри мог бы стать важным этапом в построении динамической модели магматического очага, и наиболее достоверным признаком тепловой эволюции этой зоны.

Теория и Методы

В основе модели лежит эффект потери породой намагниченности при нагревании выше критического значения. Экспериментально было установлено, что ферромагнитные свойства кристаллов сохраняются до определённой критической температуры (точки Кюри), выше которой переходят в парамагнитные. Данный эффект является следствием того, что при значении температуры выше критического тепловая энергия становится больше энергии связи, удерживающей собственные магнитные моменты в определённом направлении, т.е. происходит нарушение доменной структуры. После нагрева породы выше точки Кюри

значение намагниченности уменьшается на несколько порядков, направление совпадает с направлением внешнего поля, действующего на породу при её остывании.

Тогда, области земной коры, температура которых выше точки Кюри магнитных минералов (585 С - для магнетита), обладают слабой намагниченностью. На основе данного эффекта можно выделить границу магнитного слоя Земли по изотерме Кюри магнитных минералов с наибольшим значением температуры. Процессы теплопереноса при подготовке вулканических извержений связаны с изменением формы и размера магматического очага, что, в свою очередь, приводит к изменениям изолиний температур. Таким образом, магматический очаг представляет собой слабомагнитное тело во вмещающих сильномагнитных породах.

Данные эффекты наблюдались в ходе исследований на вулкане Белом (Новая Зеландия) По результатам мониторинга [A.W. Hurst 1973, 2004] в течении 15 лет с 1968 года были построены зависимости аномалий магнитного поля от температуры и вулканической активности. Изменение значений магнитного поля достигает сотен нанотесла в год. В периоды вулканической активности наблюдается уменьшения значений магнитного поля, что интерпретируется, как процесс перемагничивания пород. В статье [A.W. Hurst 1973] было рассчитано аномальное магнитное поле вдоль профиля над сферическим магматическим очагом (двумерная модель), центр которого располагается на глубине 200м ниже дневной поверхности.

Опираясь на рассчитанный градиент температур [Пашкевич Р. И., 2014] и данные сейсмотомографии об изменении формы магматического очага [Koulakov I. et al, 2018] были проведены расчёты аномалий магнитного поля для вулкана Ключевская сопка. Было построено 4 модели, соответствующие стадиям подготовки извержения данного вулкана в 2005 году.

Для моделей магматического очага Авачинского вулкана, полученных по данным гравиразведки (Пашкевич Р. И., 2014), были построены распределения температур, в которых на границе магматического очага устанавливалась температура 900 С для сферического приближения очага и 700 С для эллиптического. Температура магмы, поступающей из глубинного магматического очага, оценивается в 1200 С. [Павлов К. А., 2017]

В то же время, в статьях [Vargas C. A., et al. 2017; Koulakov I. et al., 2012; Koulakov I., Vargas C. A., 2018], по результатам сейсмической томографии, для нескольких вулканов были выделены контуры магматического очага на разных стадиях активности, которая определяется содержанием флюида и его миграцией. Во всех примерах центр приповерхностного очага находится на глубине около 4 км, а характерный размер очага отличается от использованных при расчётах изолиний температур не более, чем на 1км. Также, в рассмотренных температурных моделях, расстояние от выделяемой границы магматического очага (700-900 С) до изотермы 600 С в самой высокопроводящей области составляет не более 500 м. Таким образом, границы, выделяемые по данным сейсмотомографии, скорее всего, являются кристаллизационным фронтом (зоной перехода от расплава к твёрдой породе).

Магнитная модель была создана в виде трёхмерной сетки с заданной 3D геометрией, разбивающей среду на кубы равного размера. Таким образом, всё изучаемое пространство оказалось разделено на участки. Так как расстояние до точек приёмников гораздо больше характерного размера ячеек сетки, то была использована аппроксимация источников точечными диполями, располагающимися в центре каждой ячейки сети.

Для расчёта аномального поля были взяты компоненты нормального поля, соответствующие району расположения вулкана. Согласно используемой модели, вклад в аномальное результирующее поле, имели только источники, расположенные выше или вне изотермической границы Кюри. Таким образом, от глубины залегания и формы изотермической границы зависит количество источников, используемых для расчёта результирующего магнитного поля.

Значение поправки рассчитывалось в каждой точке измерения путём вычитания поля от всех источников из аномального.

Полученные результаты

По данным сеймотомографии рисунок 1, для вулкана Ключевская сопка (Koulakov I. et al., 2012) были построены модели приповерхностного магматического очага с 2001 по 2004 годы. Изучаемая область была ограничена глубиной в 10 км, так как более глубокие области имеют температуру выше 600 С, а значит не дают вклад в аномальное магнитное поле.

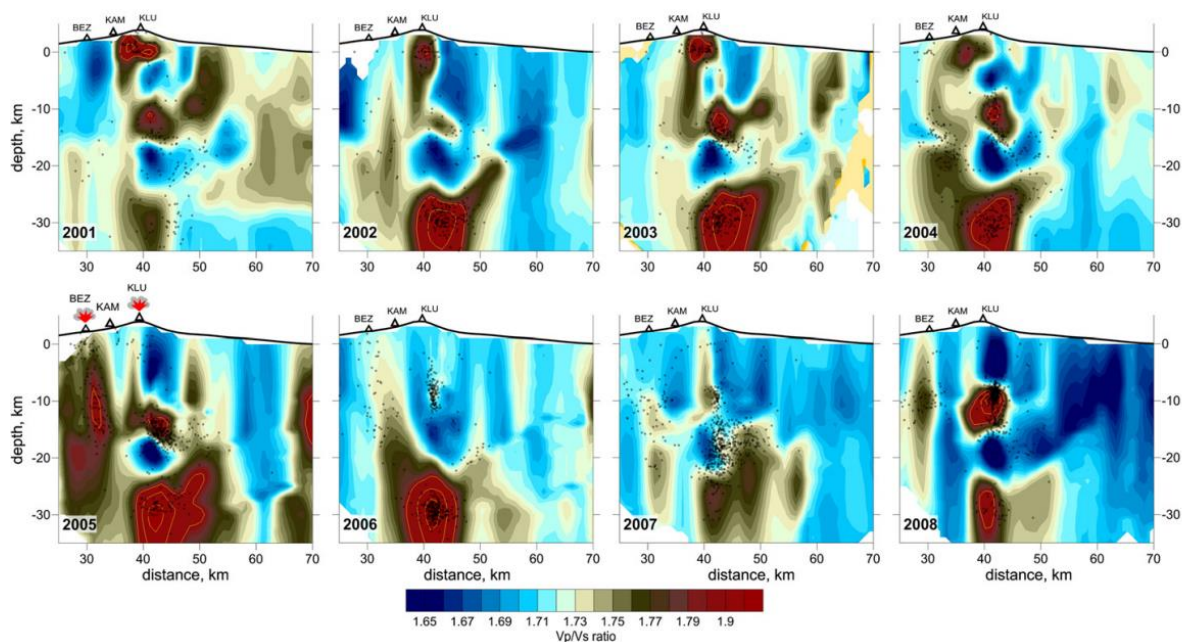
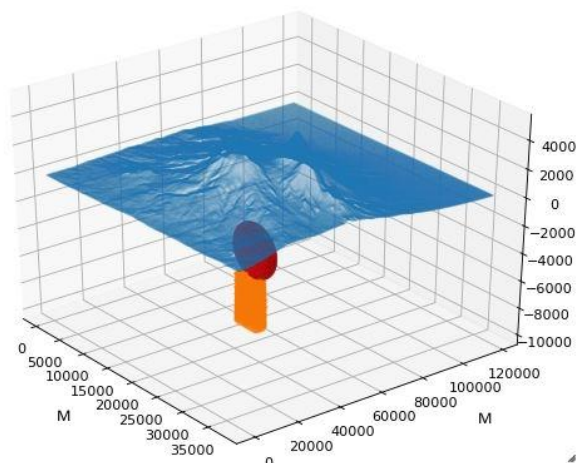
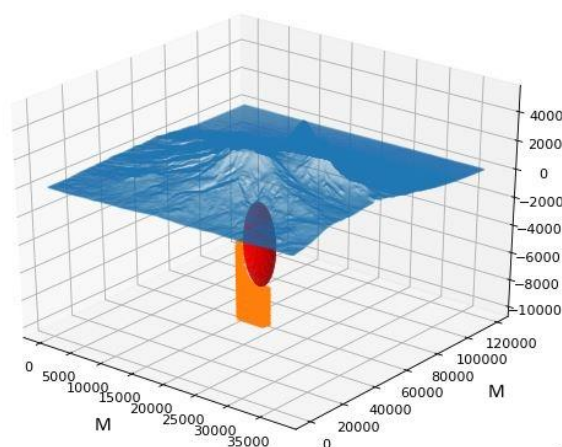


Рисунок 1. Поперечные сечения V_p / V_s за 2001-2008 гг. В областях с высоким V_p / V_s желтыми линиями отмечены контуры $V_p / V_s = 2.0, 2.1$ и 2.2 . Точками обозначены землетрясения в пределах 0,5 км от профиля, а треугольниками - расположение вулканов. Выделены извержения Ключевского и Безымянного вулканов в 2005 году. [Koulakov I. et al. 2012]

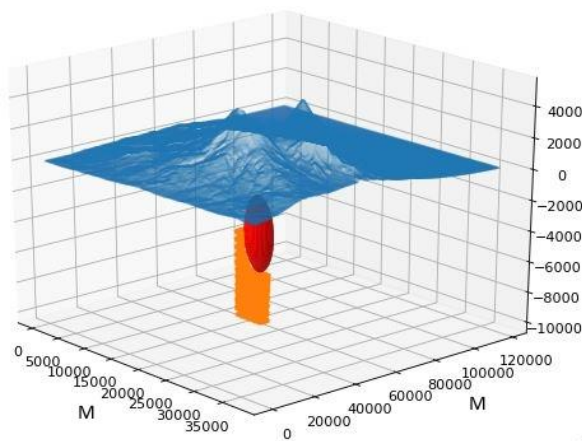
На рисунке 2 представлены модели изменения формы и размера магматического очага и подводящего канала, по которым было посчитано результирующее поле. Точки приёма располагались на высоте 400 м над поверхностью рельефа.



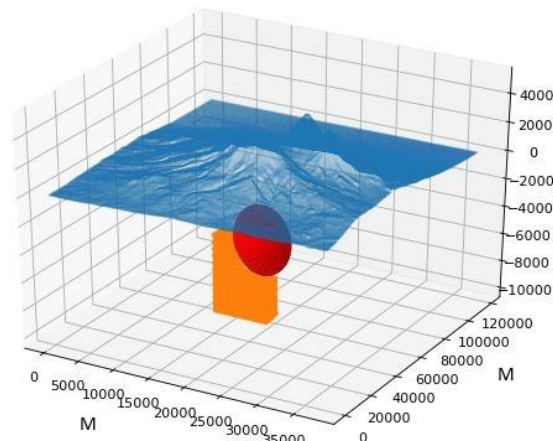
2001г



2002г



2003г



2004г

Рисунок 2. Модели малоглубинного магматического очага с 2001 по 2004 годы, выполненные по данным сейсмотомографии. Синим цветом показан рельеф, красным форма магматического очага, подводный канал, питающий очаг.

Наиболее резкие изменения структуры происходят на последнем этапе подготовки к извержению. Так, в первых трех моделях аномальное магнитное поле опускается ниже 8 нТл, тогда как в последней составляет -12 нТл. Данные изменения, представленные на рисунке 2, не позволяют определить стадию активности вулкана при проведении единовременной магнитной съёмки, так как могут сильно отличаться даже для одного объекта. При мониторинге магнитного поля можно отследить даже относительно небольшие изменения, происходящие в магматической камере и оценить её критический размер, после которого последует извержение.

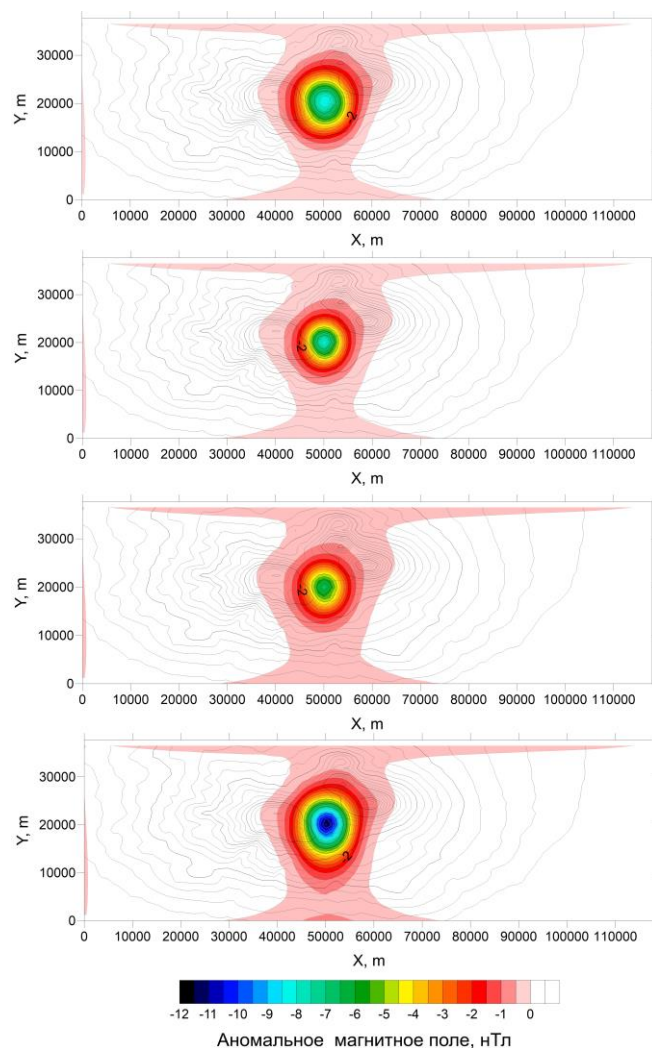


Рисунок 3. Аномалии магнитного поля, для различных моделей магматического очага, сверху вниз от 2001 до 2004 года. Чёрным отмечены изолинии рельефа

Выводы

Аномалии, создаваемые магматическим очагом, расположены точно над исследуемым объектом и не оказывают значительного воздействия на измеренное магнитное поле за пределами вулканической постройки, благодаря этому, становится возможным определить расположение очага. В то же время, при данных параметрах магматического очага, значения аномалий содержатся в интервале от 0.5 до -12 нТл, что является величиной измеримой высокоточными магнитометрами.

Данные магнитной съёмки не позволяют однозначно определить глубину залегания, форму магматического очага и стадию активности вулкана. Но при проведении мониторинга, с помощью магниторазведки возможно оценить даже небольшие изменения состояния магматического очага, его появление, рост и развитие.

Магниторазведка является одним из самых мобильных методов. Получение и обработка информации с использованием этого метода гораздо быстрее и дешевле относительно других геофизических методов, таких как сейсморазведка, гравиразведка, МТЗ. Использование магниторазведки в комплексе с другими методами может стать важным этапом в построении динамической модели магматического очага. Также, изменения значений и формы аномалий магнитного поля могут быть использованы для определения стадии активности вулкана.

Библиография

1. Павлов К.А. //Исследование процессов теплопереноса в породах Авачинской площади в естественном состоянии при перспективном получении геотермальной энергии. – 2017.
2. Пашкевич Р. И., Павлов К. А. О размере, глубине залегания и свойствах магматического очага Авачинского вулкана //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №. S2.
3. Fedotov S. A. et al. On the possibility of using heat stored in the magma chamber of the Avachinsky Volcano and the surrounding rock for heat and power supply //Journal of volcanology and Seismology. – 2007. – Т. 1. – №. 1. – С. 28-41.
4. Koulakov I. et al. Rapid changes in magma storage beneath the Klyuchevskoy group of volcanoes inferred from time-dependent seismic tomography //Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2013. – Т. 263. – С. 75-91.
5. Koulakov I., Abkadyrov I., Al Arifi N., Deev E., Droznina S., Gordeev E.I., Jakovlev A., El Khrepy S., Kulakov R.I., Kugaenko Y., Novgorodova A., Senyukov S., Shapiro N., Stupina T., West M. Three different types of plumbing system beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezymianny, and Klyuchevskoy in Kamchatka // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2017. – Т. 122. – № 5. – С. 3852-3874
6. Koulakov I., Vargas C. A. Evolution of the magma conduit beneath the Galeras volcano inferred from repeated seismic tomography //Geophysical Research Letters. – 2018. – Т. 45. – №. 15. – С. 7514-7522.
7. Koulakov I. et al. Causes of volcanic unrest at Mt. Spurr in 2004–2005 inferred from repeated tomography //Scientific reports. – 2018. – Т. 8.
8. Hurst A. W., Christoffel D. A. Surveillance of White Island volcano, 1968–1972: part 3—thermo-magnetic effects due to volcanic activity //New Zealand journal of geology and geophysics. – 1973. – Т. 16. – №. 4. – С.
9. Hurst A. W. et al. Magnetic field changes on White Island, New Zealand, and the value of magnetic changes for eruption forecasting //Journal of volcanology and geothermal research. – 2004. – Т. 136. – №. 1-2. – С. 53-70.
10. Vargas C. A. et al. Breathing of the Nevado del Ruiz volcano reservoir, Colombia, inferred from repeated seismic tomography //Scientific Reports. – 2017. – Т. 7. – С. 46094.

References

1. Pavlov K.A. //Issledovanie processov teploperenosa v porodah Avachinskoj ploshchadi v estestvennom sostoyanii pri perspektivnom poluchenii geotermal'noj ehnergii. – 2017.
2. Pashkevich R. I., Pavlov K. A. O razmere, glubine zaleganiya i svojstvah magmaticheskogo ochaga Avachinskogo vulkana //Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). – 2014. – №. S2.
3. Fedotov S. A. et al. On the possibility of using heat stored in the magma chamber of the Avachinsky Volcano and the surrounding rock for heat and power supply //Journal of volcanology and Seismology. – 2007. – Т. 1. – №. 1. – С. 28-41.

4. Koulakov I. et al. Rapid changes in magma storage beneath the Klyuchevskoy group of volcanoes inferred from time-dependent seismic tomography //Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2013. – Т. 263. – С. 75-91.
5. Koulakov I., Abkadyrov I., Al Arifi N., Deev E., Droznina S., Gordeev E.I., Jakovlev A., El Khrepy S., Kulakov R.I., Kugaenko Y., Novgorodova A., Senyukov S., Shapiro N., Stupina T., West M. Three different types of plumbing system beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezymianny, and Klyuchevskoy in Kamchatka // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2017. – Т. 122. – № 5. – С. 3852-3874
6. Koulakov I., Vargas C. A. Evolution of the magma conduit beneath the Galeras volcano inferred from repeated seismic tomography //Geophysical Research Letters. – 2018. – Т. 45. – №. 15. – С. 7514-7522.
7. Koulakov I. et al. Causes of volcanic unrest at Mt. Spurr in 2004–2005 inferred from repeated tomography //Scientific reports. – 2018. – Т. 8.
8. Hurst A. W., Christoffel D. A. Surveillance of White Island volcano, 1968–1972: part 3—thermo-magnetic effects due to volcanic activity //New Zealand journal of geology and geophysics. – 1973. – Т. 16. – №. 4. – С.
9. Hurst A. W. et al. Magnetic field changes on White Island, New Zealand, and the value of magnetic changes for eruption forecasting //Journal of volcanology and geothermal research. – 2004. – Т. 136. – №. 1-2. – С. 53-70.
10. Vargas C. A. et al. Breathing of the Nevado del Ruiz volcano reservoir, Colombia, inferred from repeated seismic tomography //Scientific Reports. – 2017. – Т. 7. – С. 46094.