

**ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ ЛИТОСФЕРЫ В РАЙОНЕ ПРОФИЛЯ
ОБЛУЧЬЕ – МЫС ДАТТА (ПРИАМУРЬЕ)**

Л.А. Маслов, В.Е. Кузнецов**, О.С. Комова**

**Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск*

***ФГУГП «Дальгеофизика», г. Хабаровск*

На основе сейсмологических и геоэлектрических разрезов земной коры и верхней мантии и материалов геолого-геофизических исследований построена модель глубинного строения области сочленения Буреинского массива с Сихотэ-Алинской складчатой системой. По распределению выявленных аномальных плотностей рассчитано современное поле напряжений по методике аналитического решения поставленной механической задачи. Полученная картина напряжений интерпретируется как индикатор новейших деструктивных процессов в земной коре и верхней мантии Северного Сихотэ-Алия: приповерхностные области повышенных касательных напряжений контролируют мелкофокусную сейсмичность, повышенная деформированность материала в зонах максимальных напряжений обуславливает подъем кровли астеносферного слоя, локализации ослабленных зон создают условия формирования и эволюции магматических очагов.

Ключевые слова: плотностное и геомеханическое моделирование, сеймотектоника, Приамурье.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение взаимосвязи между строением земной коры и верхней мантии Приамурья, геофизическими полями и геодинамической активностью региона крайне важно как для реализации различных практических задач, так и для решения фундаментальных проблем геодинамики. Для этой цели использовалась комплексная геолого-геофизическая модель, составленная по материалам глубинных геофизических исследований Федерального Государственного Унитарного Геологического Предприятия (ФГУГП) «Дальгеофизика» [4].

Рассматриваемое профильное сечение (г. Облучье – м. Датта) (рис. 1) пересекает область сочленения Буреинского массива с Сихотэ-Алинской складчатой системой и наложенные на нее молодые структуры Среднеамурской впадины, а также Западно-Сихотэ-Алинской (ЗСАВЗ) и Восточно-Сихотэ-Алинской (ВСАВЗ) вулканогенных зон. Модель глубинного строения содержит элементы плотностного, сейсмологического и геоэлектрического разрезов земной коры и верхней мантии (рис. 2). Комплекс приведенных характеристик дополняют кривые изменения напряженности магнитного и гравитационного полей (рис. 2а).



Рис. 1. Схема расположения глубинного разреза г. Облучье – мыс Датта.

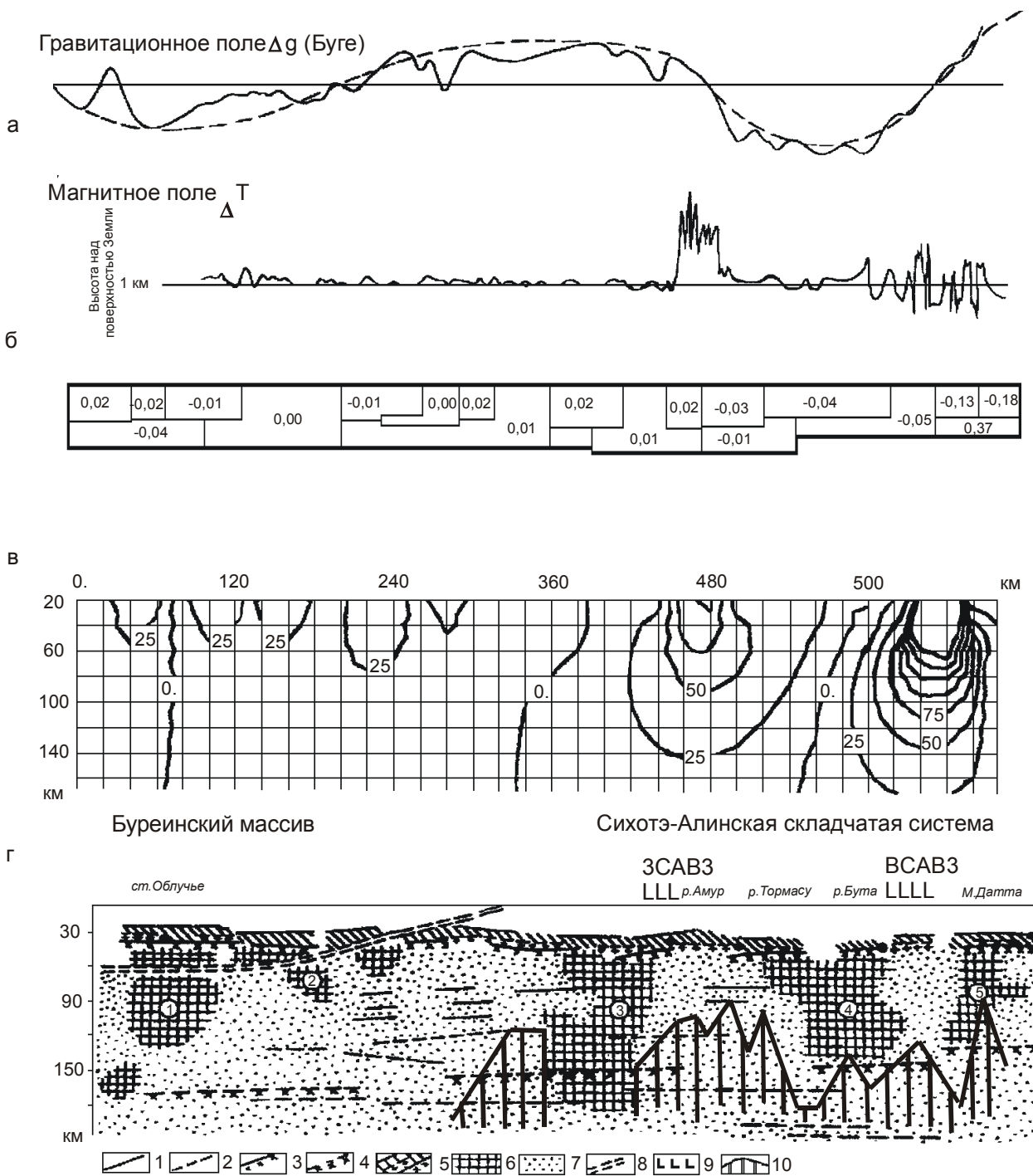


Рис. 2. Комплексная модель глубинного строения.

а – кривые магнитного (ΔT) и гравитационного (Δg) полей; б – плотностная модель разреза, значения аномальной плотности даны в $г/см^3$; в – распределение касательных напряжений (изолинии проведены через 25 МПа; вязкость среды принята равной $20 \cdot 10^{20}$ Па·с; сокращения: ЗСАВЗ – Западно-Сихотэ-Алинская вулканогенная зона, ВСАВЗ – Восточно-Сихотэ-Алинская вулканогенная зона); г – сейсмическая модель разреза по данным МОБЗ; сейсмические границы: 1 – нормальные, 2 – инверсные, 3 – отождествляемые с разделом Мохоровичича, 4 – и кровлей астеносферы, 5 – "базальтовый" слой в основании земной коры с инверсными зонами, отождествляемыми с деструкцией и частичным плавлением среды, 6 – участки высокой плотности обменов волн типа PSH (Хинганский – 1, Урмийский – 2, Амурский – 3, Анюйский – 4, Тумнинский – 5), 7 – участки отсутствия обменов волн типа PSH, 8 – зона сместителя литосферного срыва, 9 – проявления базальтового вулканизма на земной поверхности, 10 – положение коромантийного проводящего слоя по данным МТЗ.

ОПИСАНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Плотностное моделирование проводилось для разреза, составленного из прямоугольных призм “бесконечной” протяженности перпендикулярно плоскости разреза. Применение двумерного моделирования оправдано в данном случае тем, что рассматриваемый профиль ориентирован перпендикулярно простиранию структур, достаточно слабо меняющихся по обе стороны от профиля. Положение призм и их размеры задавались по данным о морфологии гравитационного поля и данным МОВЗ. Плотности призматических ячеек определялись программным путем с регуляризацией искомого решения [4]. В качестве нормальной была принята параметрическая континентальная модель Земли (РЕМ-К), несколько измененная с учетом региональных особенностей. Полученное в результате моделирования распределение плотностных неоднородностей показано на рисунке 2б. В плотностном разрезе земной коры можно выделить три зоны. Две из них, отвечающие интервалам 0–250 км и 480–560 км, характеризуются дефицитом плотности пород. Разделяющая их центральная часть сечения является областью избыточной плотности. Она известна как Среднеамурский гравитационный максимум [6]. Участки скачков плотностей характеризуются значительными градиентами гравитационного поля и интенсивными магнитными аномалиями.

На сейсмогеологической модели, дополненной геоэлектрическими данными (рис. 2г), показаны основные сейсмические границы обмена волн, отождествляемые с элементами стратификации коры, а также ряд других границ, имеющих значение для понимания структуры и геодинамики разреза. В интервале глубин 150–180 км системой протяженных инверсных площадок фиксируется граница, отождествляемая с кровлей астеносферного слоя. В данном случае под кровлей астеносферного слоя подразумевается уровень, отвечающий наиболее низкому положению трансирюющих ее положение протяженных инверсных площадок. Отдельные площадки, расположенные выше этого уровня и приуроченные к зонам разрыва сплошности основной границы, фиксируют наличие астенолинз и апофиз астеносферного материала. Их положение контролируется пакетами инверсных площадок и областями отсутствия обменов волн типа PSH.

В западной части разреза эшелонированной системой сейсмических границ обмена фиксируется структурная зона, рассматриваемая нами в качестве сместителя, по которому произошел срыв и лате-

ральное смещение коромантийного блока [3]. В данной работе высказано предположение о действии горизонтальных сил, внешних по отношению к области, занятой рассматриваемым разрезом. Согласно комплексу геолого-геофизических признаков, более подробно рассмотренных в упомянутой работе, срыв литосферной пластины произошёл в плиоценовое – плиоцен-четвертичное время. Этому событию предшествовали процессы общей тектонической активизации региона, зафиксированные в кайнозойском разрезе Среднеамурской системы впадин погребением миоценовых осадков и выпадением некоторых интервалов временного разреза. В это же время была сформирована система дочетвертичных грабенов Среднеамурской впадины. Срыв пластины сопровождался широкомасштабными излияниями плиоцен-четвертичных базальтов.

Кратко остановимся на структурах, выражающихся в неоднородностях волнового поля PSH. Их природа рассматривалась многими исследователями (см., например, [1, 2, 8]). Е.И. Гальпериным [2], а также В.А. Бормотовым [1], показано, что обмены волн типа PSH наиболее характерны для участков с высокой анизотропией скоростей. Такими участками могут быть, в частности, плоскости разрывов, а также субвертикальные каналы тепломассопереноса, выполненные конформными интрузивными телами и зонами измененных пород. Можно предположить, что повышенной плотностью обменов волн типа PSH фиксируются участки разреза, на которых вещество обладает значительной скоростной анизотропией. Относительное снижение плотности обменов волн типа PSH может быть обусловлено термофлюидной проработкой вещества, способствовавшей скоростной нивелировке среды и уменьшению степени ее анизотропии.

В представленной модели заметно различие строения земной коры и верхней мантии под Буреинским массивом и Сихотэ-Алинской складчатой системой (рис. 2г).

В рамках геоэлектрической модели также наблюдается четкое различие подстилающих структур Буреинского массива и Сихотэ-Алинской складчатой системы. Граница между этими зонами фиксируется подъемом с запада на восток кровли проводящего слоя с двумя отчетливо выраженными максимумами в районах Западно-Сихотэ-Алинской и Восточно-Сихотэ-Алинской вулканогенных зон, соответственно. Интересной представляется пространственная корреляция границ, полученных по данным МОВЗ, и выступов границы мантийного проводящего слоя в районе Сихотэ-Алинской складчатой системы, по данным МТЗ. В целом, пространственная и

морфологическая корреляция аномалий проводимости с областями отсутствия обменов волн типа PSH согласуется с представлениями о влиянии процессов термофлюидной проработки среды на ее сейсмологические характеристики.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ

Расчет напряжений и деформаций в земной коре и верхней мантии данного разреза проводился на основе плотностной модели (рис 2б) по методике, в основу которой положено применение аналитических решений задач теории упругости и гидродинамики [7]. Кратко поясним эту методику. Распределение напряжений и деформаций рассчитывается в полупространстве, занятом линейно-вязкой несжимаемой жидкостью. Вязкость среды считается постоянной. Плотностные неоднородности $\Delta\rho(x,y,z)$ существуют на рассматриваемом участке среды. Вне этого участка аномалии плотности равны нулю. Мгновенное поле скоростей несжимаемой ньютоновой жидкости при малых числах Рейнольдса и постоянной вязкости описывается уравнением Навье-Стокса и условием несжимаемости:

$$\mu \Delta \mathbf{u}(x,y,z) = \text{grad}[p(x,y,z)] - \delta\rho(x,y,z)\mathbf{g} \quad (1)$$

$$\text{div } \mathbf{u}(x,y,z) = 0 \quad (2)$$

Здесь μ – коэффициент вязкости; $\mathbf{u}(x,y,z)$ – вектор скорости; Δ – лапласиан; $p(x,y,z)$ – давление; $\delta\rho(x,y,z)$ – плотностные аномалии среды; вектор ускорения силы тяжести $\mathbf{g}=(0, 0, g_z)$. На границе полупространства ($z=0$) в задачах подобного рода обычно задается кинематическое условие: $u_n = 0$, где u_n – нормальная компонента вектора скорости вязкого течения среды. Из этого условия находятся нормальные напряжения σ_z и поддерживаемый ими рельеф. Однако такое граничное условие не учитывает активность поверхностных денудационных и седиментационных процессов. В общем случае учет интенсивности денудационных и седиментационных процессов представляет большие трудности. Сделаем следующее допущение: пусть имеет место динамическое равновесие экзогенных и эндогенных процессов. Это позволяет вместо $u_n = 0$ использовать следующее граничное условие

$$\sigma_z(x,y) = \rho_t(x,y) \cdot h(x,y) \cdot g, \quad \tau(x,y) = 0 \text{ при } z=0 \quad (3)$$

Здесь σ_z , τ – нормальные и касательные напряжения на координатной плоскости $z=0$, соответственно; $\rho_t(x,y)$ – плотность масс рельефа; $h(x,y)$ – высоты рельефа, сложившегося в результате действия эндогенных и экзогенных процессов.

Для нахождения решения задачи (1–3) воспользуемся решениями (соответствующими функциями Грина) теории упругости [5]. Положив коэффи-

циент Пуассона равным 0.5 и изменив в этих решениях модуль сдвига на коэффициент вязкости (при этом упругие смещения приобретут смысл и размерность скорости), получим решение соответствующей гидродинамической задачи для несжимаемой вязкой жидкости. Напряжения и скорости деформаций для произвольного распределения плотности $\delta\rho(x,y,z)$ находятся в виде интегралов свертки, которые определяются численно.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2в показано распределение касательных напряжений, рассчитанных на основе приведенной плотностной модели и по предлагаемой методике. Области максимальных касательных напряжений соответствуют зонам контакта блоков земной коры различной плотности, участкам высоких градиентов магнитного поля и интенсивных магнитных аномалий.

Из рисунка следует, что имеют место две области наибольших значений касательных напряжений – в районе Западно-Сихотэ-Алинской и Восточно-Сихотэ-Алинской вулканогенных зон. Концентрация напряжений приурочена к областям резкого градиента плотности земной коры и, соответственно, гравитационного поля. Значения напряжений в области Западно-Сихотэ-Алинской вулканогенной зоны достигают 300 МПа, а в области Восточно-Сихотэ-Алинской – 600 МПа при вязкости среды 20 МПа·с. Значительные напряжения, в пределах 100 МПа, прослеживаются до глубины 150 км. Именно здесь следует ожидать ослабленного состояния среды верхней мантии и появления зон повышенной проницаемости, которые могут служить вертикальными каналами тепломассопереноса, питающими коровые магматические очаги вулканогенных зон. Здесь мы фиксируем изменение физических свойств среды, прежде всего таких, как плотность и электропроводность (рис. 2г). Одним из поверхностных проявлений таких изменений являются контрастные аномалии ΔT_a магнитного поля (рис. 2а). Они коррелируются с областями развития покровов базальтоидов плиоцен-четвертичного и более древнего возраста. Графики аномального поля ΔT_a хорошо фиксируют интервалы геологически закартированных покровных фаций кайнозойских базальтов (Восточно- и Западно-Сихотэ-Алинских вулканогенных зон). Широкомасштабное проявление базальтового магматизма связано с действием касательных напряжений.

В интервале глубин 150–90 км, в районах Западно-Сихотэ-Алинской и Восточно-Сихотеалинской вулканогенных зон, в разрезе МОВЗ отмечается подъем кровли астеносферы и связанных с ним оча-

гов инверсии скоростей (пакеты инверсных границ), насыщающих коромантийный разрез (рис.2г). Здесь же наблюдается подъем границы коромантийного проводящего горизонта и появление очагов аномальной электрической проводимости. Это вызвано, по-видимому, термофлюидной проработкой коромантийного проводящего горизонта.

Можно предположить, что области максимальных касательных напряжений должны контролироваться выраженной сейсмичностью, по крайней мере, в достаточно хрупкой коре. В Восточно-Сихотэ-Алинской вулканогенной зоне это действительно так. Здесь расположен Ванинский эпицентральный узел. Западный же участок концентрации касательных напряжений (Западно-Сихотэ-Алинская вулканогенная зона) в настоящее время асейсмичен, что можно объяснить релаксацией напряжений в предполагаемых очагах разуплотнения и частичного плавления вещества коры и верхней мантии, фиксируемых стопками инверсных границ МОВЗ.

Заметим также, что величины касательных напряжений здесь существенно ниже аналогичных значений в области Восточно-Сихотэ-Алинской вулканогенной зоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчеты позволяют установить связь между геофизическими характеристиками (гравитационное и магнитное поля), распределением плотностных неоднородностей земной коры, областями концентрации касательных напряжений, скоростными и электрическими аномалиями в коре и верхней мантии. Для Сихотэ-Алинской складчатой системы показано, что локальные участки подъема астеносферы и электропроводящего слоя в мантии хорошо коррелируются с распределением касательных напряжений, вызванным структурой плотностных неоднородностей земной коры разреза. Геодинамика рассматриваемой части разреза может быть объяснена напряжениями, вызванными собственными неоднородностями земной коры, без привлечения внешних сил.

Представляется, что поле напряжений, вызванное плотностными неоднородностями земной коры Северного Сихотэ-Алиня активно влияло (и влияет) на течение новейших деструктивных процессов в верхней мантии. В частности, роль напряжений велика в локализации ослабленных зон, контролирующих движение к земной поверхности флюидных потоков. Эти потоки определяют объем и интенсивность термофлюидной проработки субстрата, контролируют условия формирования и эволюции магматических очагов, в том числе и кайнозойский ру-

догенез. Области максимальных касательных напряжений создают благоприятные условия для быстрого подъема и излияния на земную поверхность базальтоидов. В областях пониженных напряжений условия для теплопереноса менее благоприятны, глубинные процессы замедлены. Повышенная деформированность земной коры и верхней мантии в зонах действия максимальных напряжений обусловила подъем соответствующих участков кровли астеносферного слоя. В разрезе мантии и коры здесь почти нет очаговых инверсных структур. В то же время, область относительно медленного перемещения глубинного материала в интервале рек Тормасу и Бута (рис.2г) характеризуется достаточно плотной колонной очагов инверсии на всю изученную мощность разреза. Здесь разгрузка перегретого астеносферного материала происходит более спокойно и не сопровождается резким подъемом границы астеносферы.

Несомненно, существуют и другие источники напряжений, которые также необходимо (по возможности) учитывать при изучении геодинамики региона. Однако, несмотря на их влияние на структуру полей напряжений и, соответственно, тектонику литосферы (послойные и секущие срывы, структуры горизонтальной расслоенности и т.д.), роль внешних сил в рассматриваемом нами случае представляется вторичной.

Авторы выражают признательность д.г.-м.н. Ю.Я. Ващилову и проф. Ю.Ф. Малышеву за конструктивные замечания, способствовавшие улучшению работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бормотов В.А. Методика исследований методом обменных волн землетрясений и сейсмическая модель глубинного строения Комсомольско-Баджалского района Приамурья. Автореф. дис.... канд. геол.-минер. наук Хабаровск, 1993. 25 с.
2. Гальперин Е.И. Поляризонный метод сейсмических исследований. М.: Недра, 1977.
3. Кузнецов В.Е. Глубинное строение и современная геодинамика Приамурья // Тихоокеан. геология. 1998. Т.17, № 2. С. 61–67.
4. Кузнецов В.Е., Бормотов В.А., Войтенко А.А. Отчет по результатам глубинных исследований (Прогнозный и Анюйский объекты). Хабаровск: ФГУГП, 1998.
5. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.
6. Потапов С.В. Соотношение поверхностной и глубинной структуры земной коры Приамурья и Приморья // Глубинное строение литосферы Дальневосточного региона (по геофизическим данным). Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 43–53.
7. Maslov L.A., Komova O.S. Stresses in upper mantle of Asia-Pacific transition zone using its density model // Geo-

- logy and Geophysics of the Japan Sea / Ed. By N. Isezaki, I.I.Bersenev, K.Tamaki, B.Ya. Karp, E.P.Lelikov, Terra Sci. Publishing Company (Terrapub), 1996. P. 399–405.
8. Pavlenkova N.I. The nature of seismic boundaries in the continental lithosphere // *Tectonophysics*. 1988. V. 154. P. 211–255.

Поступила в редакцию 1 марта 2000 г.

Рекомендована к печати Ю.Ф.Мальшевым

L. A. Maslov, V. E. Kuznetsov, O. S. Komova

Stress field due to crustal density inhomogeneities in the area of profile Obluchie - Datta Cape (Priamurye), relation to deep structure and geophysical fields

A deep structure model of the Bureya Massif and Sikhote-Alin fold system juncture area is constructed on the basis of seismological and geoelectrical crust and upper mantle sections and materials of geological and geophysical studies. The recent stress field is calculated from distribution of the revealed anomalous densities using the method of analytical solution of the problem of mechanics. The stress pattern obtained is interpreted as an indication of the new destructive crust and upper mantle processes in the Northern Sikhote-Alin: subsurface areas of the increased tangential stresses control shallow seismicity; an increased deformation of rocks in areas of the maximum stresses stipulates an upwarping of the asthenosphere top; localizations of the weakened zones cause the formation and evolution of magma chambers.