

КРАТКИЕ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 551.21

А. П. ГОРШКОВ

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ
ВУЛКАНА МАЛЫЙ СЕМЯЧИК НА КАМЧАТКЕ
ПО ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Малый Семячик — один из действующих вулканов, расположенных в пределах центральной части Восточного вулканического пояса Камчатки.

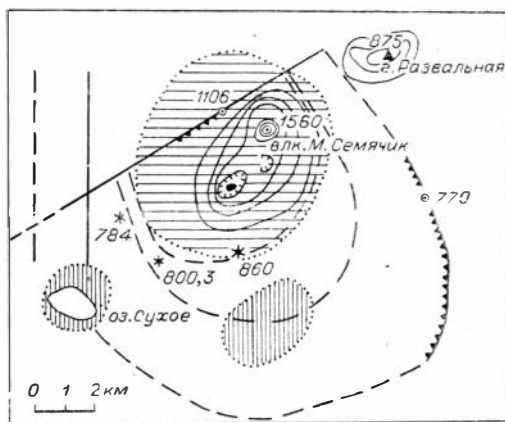
Современная активность вулкана приурочена к молодому кратеру Троицкого, нижняя часть которого заполнена теплым озером объемом $25 \cdot 10^6$ м³. Тепловая разгрузка вулкана осуществляется через поверхность кратерного озера площадью 0,23 км²; фумаролы и термальные площадки в стенках кратера и на внешних склонах отсутствуют. Тепловая мощность вулкана составляет $80-90 \cdot 10^{-3}$ ккал/с. Эта величина в 1,5 раза превышает мощность таких крупных гидротермальных систем Узон-Семячинского района, как Узон, Долина Гейзеров и вулканический массив Б. Семячика [1].

Вода кратерного озера имеет высокую минерализацию 35—40 г/л и повышенную кислотность $pH=0,5-0,7$, температура воды на поверхности 25—40°С. Кратерное озеро является своеобразной природной ловушкой как для тепла, так и для химических элементов, выносимых фумарольными газами. Мощный концентрированный вынос тепла позволяет предполагать наличие близко расположенного теплового источника.

Изучение глубинного строения вулкана представляет интерес в связи с особенностями проявления вулканической активности. С этой целью на вулкане М. Семячик в 1970—1971 гг. была проведена детальная гравиметрическая съемка. Аномалии силы тяжести вычислялись в редукции Буге. Среднеквадратичная погрешность определения аномалий составила $\pm 1,0$ мгл. Плотность промежуточного слоя в целом для площади съемки принята 2,3 г/см³. Она определена графическим способом Неттлтона [8].

Основной особенностью гравитационного поля в исследуемом районе является наличие интенсивного максимума, приуроченного непосредственно к конусу вулкана, и двух минимумов, расположенных к югу и юго-западу от вулкана (рис. 1). В плане максимум имеет почти изометричную форму с поперечником 6—7 км. Контурам положительной аномалии не соответствуют какие-либо четко выраженные морфологически границы постройки. Только на юге в зоне высоких градиентов расположена линия шлаковых конусов.

При интерпретации положительной аномалии силы тяжести особое внимание было обращено на правильное редуцирование и выбор плотности промежуточного слоя. Изучение плотности образцов пород, слагающих современный конус и его подножие, дало следующие результаты (см. таблицу).



1 × 2 — 3 — 4 — 5 — 6 — 7

Рис. 1. Схема гравитационных аномалий в районе вулкана М. Семячик.

1 — кратерное озеро; 2 — шлаковые конуса; 3, 4 — разломы, установленные и предполагаемые; 5 — остатки вулкана Стена; 6, 7 — контуры положительных и отрицательных аномалий.

дами интерпретации независимыми от предварительных допущений о форме тела, определялись положение центра тяжести и избыточная масса аномального тела. Способ пересчета аномального поля в нижнее полупространство дал глубину центра тяжести 1,5 км. Глубина центра тяжести $z=2,5$ км получена при использовании формулы Н. Л. Афанасьева [2].

Определение аномальной массы по интегральной формуле Грина дало значение аномалии $M_a=1,5 \times 10^{16}$ г.

Дальнейшая интерпретация — определение объема и размеров аномального тела — зависит от выбора избыточной плотности или формы тела.

Формы кривой и относительно высокое положение центра тяжести аномального объекта ($Z_{ср}=2$ км) значительно ограничивают неоднозначность выбора формы тела. На рис. 2 показаны некоторые варианты возможного положения аномального тела, которые дают удовлетворительное совпадение с наблюдаемой кривой. Аномальная масса во всех вариантах симметрично расположена относительно центра тяжести. На этом рисунке видно, что вариации поперечных размеров тела и положения верхней кромки незначительны, однако положение нижней кромки тела остается неопределенным в интервале глубин 3—5 км. Вертикальные размеры тела составляют таким образом 2—5 км.

Плотностные характеристики пород вулкана М. Семячик

Порода	Кол-ч. обр.	Плотность, г/см ³		Кол-ч. обр.	Удельный вес, г/см ³		Пористость, %	
		средн.	пределы колеб.		средн.	пределы колеб.	средн.	пределы колеб.
Базальты	45	2,57	2,15—2,80	11	2,89	2,84—2,94	8,1	2,8—20,8
Андезито-базальты	57	2,51	2,02—2,78	5	2,70	2,57—2,80	7,0	0,3—12,5
Дациты	6	2,32	2,12—2,45	2	2,50	—	3,0	2,0—4,0
Игнимбриды и туфолавы	29	2,11	1,65—2,30	2	2,72	2,67—2,77	18,0	15,7—20,2
Пирокластические отложения	44	1,86	1,30—2,70	—	—	—	—	—
Ксенолиты дноритов-гранодноритов	9	2,45	2,40—2,60	2	2,79	—	11,5	10,7—12,2

Непосредственно из данных гравиметрических измерений была вычислена средняя плотность пород конуса $\sigma_{эфф}=2,0-2,15$ г/см³. Это позволило ввести дополнительную поправку в расчетные значения Δg_a и определить процентное содержание лав и пирокластики, слагающих конус: 20—40% — лавы и 80—60% — пирокластика (коэффициент explosивности конуса 60—80%).

Учитывая изометричность положительной аномалии, для интерпретации был взят профиль, проходящий через вершину вулкана и усредненный по трем направлениям. Прямыми мето-

Вмещающими аномальное тело породами являются вулканогенные палеоген-неогеновые отложения с плотностью $2,2\text{--}2,6\text{ г/см}^3$, залегающие на меловом фундаменте, плотность пород которого $2,7\text{ г/см}^3$. Мощность вулканогенной толщи в Восточном вулканическом поясе составляет несколько километров [7]. Если принять среднюю плотность вмещающей среды $2,4\text{ г/см}^3$, то аномальное тело имеет плотность $2,65\text{--}2,9\text{ г/см}^3$. Исходя из геологической ситуации, можно предположить, что объектом, создающим положительную аномалию над действующим вулканом и имеющим указанные размеры и плотность, может быть периферический магматический очаг или субвулканическая интрузия основного состава.

Постройка вулкана сложена преимущественно базальтами и андезито-базальтами. Плотность полнокристаллических аналогов андезитов и базальтов (от кварцевого диорита до габбро) составляет $2,80\text{--}2,97\text{ г/см}^3$. Для расплавов того же состава возможно уменьшение в среднем на 10% , что дает величину $2,52\text{--}2,67\text{ г/см}^3$ [6]. Учитывая преимущественное развитие основных пород, в том числе ксенолитов диорито-гранодиорита (таблица), и высокие значения их минералогической плотности (удельного веса), можно полагать, что весь диапазон возможных значений плотности для системы расплав — интрузия составляет $2,6\text{--}3,0\text{ г/см}^3$.

Не зная процентного содержания кристаллической фазы и расплава в очаге, мы можем предположительно оценить пределы плотности пород от $2,7$ до $2,9\text{ г/см}^3$.

Для дальнейшего уточнения параметров предполагаемого очага была сделана попытка оценить положение нижней кромки аномального объекта, исходя из предположения о том, что аномалия создается только той частью тела, которая располагается выше поверхности мелового фундамента. Действительно, если очаг заполнен расплавом, то его максимальная плотность $2,7\text{ г/см}^3$ равна плотности вмещающей среды, и положительной аномалии не будет. Таким образом, задача сводится к определению глубины залегания мелового фундамента.

Исходным материалом для этой оценки послужили данные региональной гравиметрической съемки. На рис. 3 представлен график Δg_H

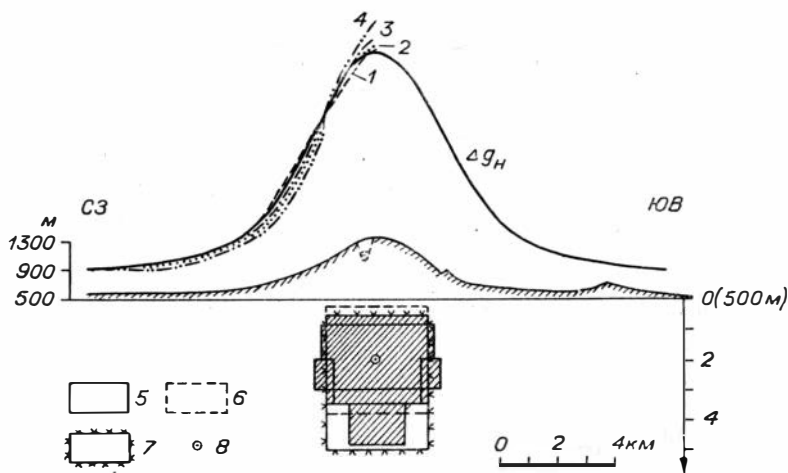


Рис. 2. Гравиметрический профиль через вулкан М. Семячик.

Расчетные кривые: 1 — диск $\mu = \Delta\sigma \cdot h = 1,47$ ($h = 3$ км, $R = 1,8$ км при $\Delta\sigma = 0,5\text{ г/см}^3$ и $h = 3,6$, $R = 1,8$ при $\Delta\sigma = 0,4$), 2 — суммарная кривая двух дисков ($h_1 = 1,2$, $R_1 = 2,0$; $h_2 = -1,0$; $R_2 = 2,2$; $\Delta\sigma = 0,5$), 3 — суммарная кривая трех дисков ($h_1 = 1,2$, $R_1 = 2,0$; $h_2 = 1,5$, $R_2 = 1,5$; $h_3 = 1,4$, $R_3 = 1,0$; $\Delta\sigma = 0,5$), 4 — суммарная кривая для цилиндра с переменной плотностью ($h_1 = 1,5$, $R_1 = 1,8$; $\Delta\sigma_1 = 0,5$; $h_2 = 3,0$, $R_2 = 1,8$, $\Delta\sigma_2 = 0,25$); 5 — контуры тел с избыточной плотностью соответственно 0,5; 0,4 и переменной; 8 — положение центра тяжести аномального тела.

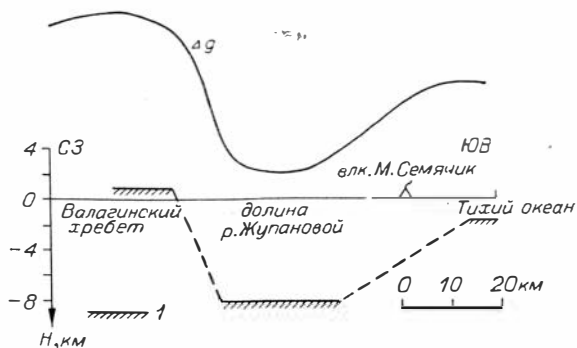


Рис. 3. Положение мелового фундамента по профилю Валагинский хребет — побережье Тихого океана. 1 — меловой фундамент.

метках 1,0—1,5 км выше уровня моря, далее на восток меловой фундамент интенсивно прогибается (структура типа грабен-синклиналь) [10]. Восточное крыло прогиба воздымается более плавно, но вблизи побережья остается ниже уровня моря на 2 км, или более, т. к. двухкилометровые скважины (в районе Богачевки) на Кроноцком полуострове не встретили меловых пород [3]. Форма кривой и общая геологическая ситуация позволяют в данном случае для определения глубины залегания фундамента в зоне максимального прогиба использовать билогарифмические палетки для интерпретации аномалий Δg от возмущающих тел в форме прямоугольного параллелепипеда с верхней гранью на плоскости наблюдений [4]. Применение этого способа дало следующие результаты: мощность блока $h=7-10$ км. При $\Delta\sigma=-0,33\div 0,28$ г/см³ для случая $l/s=2-5$ (l и s — длины большого и малого ребер параллелепипеда).

Для проверки полученных результатов решалась прямая задача — рассчитывалась избыточная плотность при заданных размерах прямоугольного параллелепипеда по Б. А. Андрееву [2]. При $l/s=3$ и $s=20-30$ км получены сходные значения: $h=9$ км при $\Delta\sigma=-0,3$ г/см³.

Полученные данные позволяют оценить глубину залегания фундамента в районе вулкана М. Семячик в 5—6 км. Избыточная плотность вулканогенной толщи по сравнению с породами фундамента составляет $-0,3$ г/см³, следовательно, плотность среды, вмещающей аномальный объект, равна 2,4 г/см³.

Уточнив положение нижней кромки аномального объекта, мы должны подобрать форму тела таким образом, чтобы аномальная масса разместилась симметрично относительно центра тяжести. Это можно сделать либо за счет уменьшения с глубиной поперечных размеров тела, либо введя переменную по глубине плотность аномального тела. Наилучшее совпадение наблюдаемой и расчетной кривой достигается при цилиндрической форме тела, несколько сужающейся на глубине, с переменной избыточной плотностью (рис. 4). Расчет проводился для трех дисков с параметрами: $h_1=1,3$ км, $R_1=1,9$ км, $\Delta\sigma_1=0,5$ г/см³; $h_2=1,5$, $R_2=1,5$, $\Delta\sigma_2=0,4$; $h_3=2,0$, $R_3=1,3$, $\Delta\sigma_3=0,3$.

Полученное таким образом тело с переменной плотностью 2,7—2,9 г/см³, находящееся в вулканогенных отложениях со средней плотностью 2,4 г/см³, следует рассматривать как магматический очаг или частично закристаллизовавшуюся субвулканическую интрузию. Повышенная плотность в верхней части может быть обусловлена тем, что кристаллизация начинается с верхних частей очага в зоне более интенсивной теплоотдачи. Однако эта интерпретация, естественно, не является единственной. Переменная избыточная плотность аномального тела мо-

по субширотному профилю от Валагинского хребта до побережья Тихого океана. Влияние глубинных границ снято путем построения разностной кривой $\Delta g_{\text{набл}} - \Delta g_{\text{средн}}$ ($R=35$ км). Можно считать, что характер остаточного гравитационного поля обусловлен преимущественно положением кровли мелового фундамента. В Валагинском хребте выходы меловых пород встречены на от-

жет быть также следствием увеличения с глубиной плотности вмещающих пород.

Обе выявленные отрицательные аномалии силы тяжести имеют изометричную форму, примерно одинаковые размеры и интенсивность. Для интерпретации использован обобщенный профиль, полученный осреднением обеих аномалий по нескольким направлениям. Прямыми методами интерпретации определен дефект масс $M_a = 1,6 \cdot 10^{15}$ г и глубина центра тяжести аномального объекта $z = 0,5 - 1,0$ км.

Форма кривой и местоположение минимумов позволяют представить форму аномального тела в виде перевернутого конуса — воронки взрыва (оз. Сухое является взрывным центром типа маара с сохранившимся бортом в восточной части). Хорошее совпадение расчетного значения на оси перевернутого конуса с наблюдаемым получается в двух вариантах: при $\Delta\sigma = -0,2$ г/см³, размеры воронки — $R = 2$ км, $h = 2$ км и при $\Delta\sigma = -0,4$, $R = 1,5$, $h = 1,8$. Контролем в данном случае может служить совпадение объемов — вычисленного по размерам воронки и определенного по дефекту масс и аномальной плотности.

Интересно сопоставить полученные данные с результатами гравиметрической съемки на современной кальдере Кракатау, образовавшейся после катастрофического извержения в 1883 г. Соответствующая этой кальдере отрицательная аномалия силы тяжести интерпретируется как эффект воронки взрыва с размерами $R = 3$ км, $h = 1$ км, при $\Delta\sigma = -0,3$ г/см. Дефект масс оценен в $2,8 \cdot 10^{15}$ г [12]. Параметры взрывных воронок вулкана М. Семячик и Кракатау близки по порядку величины. Учитывая это обстоятельство, можно полагать, что формирование воронок связано с кальдерообразующей стадией в процессе развития вулкана М. Семячик. Следует отметить, что вопрос о происхождении кальдеры Кракатау является дискуссионным. По Вильямсу, например, Кракатау относится к кальдерам обрушения [11]. В данной работе мы не рассматриваем вопроса о генезисе кальдер, а воронками взрыва называем крупные эксплозивные центры, которые по гравиметрическим данным сопоставимы с кальдерой Кракатау.

Детальными геологическими работами на вулкане М. Семячик в 1971 г. выявлены три телескопические кальдеры (Ю. П. Масуренков, О. Б. Селягин — устное сообщение). На рис. 1 видно, что местоположение взрывных воронок действительно приурочено к кальдерным линиям. Положение же внутренней, самой молодой кальдеры практически совпадает с контурами верхней кромки аномального тела (очага) (см. рис. 4).

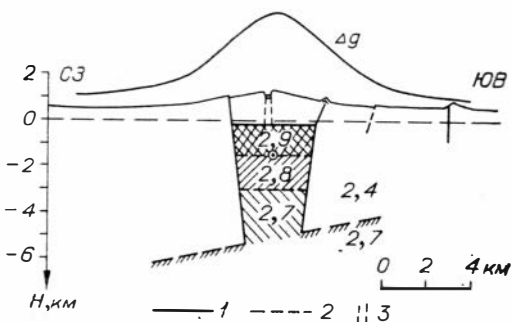


Рис. 4. Схематический структурно-геофизический разрез вулкана М. Семячик.

1, 2 — разломы, установленные и предполагаемые, 3 — предполагаемые контуры канала.

Заключение

Гравиметрические материалы позволяют предположить наличие периферического магматического очага основного состава под вулканом М. Семячик. Очаг, вероятно, имеет форму сужающегося цилиндра с диаметрами верхнего и нижнего оснований — 3,8 и 2,6 км и высотой 5 км.

Особенностью этого очага является относительно высокое положение верхней кромки (на уровне моря). Расстояние от дна кратера до верхней кромки очага составляет 1 км, в то время как для других вулканов Камчатки — Карымского и Авачинского, у которых по геофизическим данным выявлены периферические очаги, это расстояние составляет 3 и 4 км соответственно [5, 9].

Высокое положение верхней кромки очага может обуславливать стабильное нагревание кратерного озера, характерный же для других вулканов режим с длительным накоплением энергии и последующей кратковременной разрядкой в виде извержения в данном случае не проявляется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверьев В. В., Богоявленская Г. Е., Брайцева О. А., Вакин Е. А., Пилипенко Г. Ф. Вулканизм и гидротермы Узон-Семячинского геотермального района на Камчатке. Сб. Вулканизм и глубины Земли. «Наука», 1971.
2. Андреев Б. А., Клушин И. Г. Геологическое истолкование гравитационных аномалий. «Недра», 1965.
3. Белова М. Б., Васильев В. Г., Власов Г. М. и др. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Камчатки. Гостоптехиздат, 1961.
4. Ващилов Ю. Я. Билогарифмическая палетка для интерпретации аномалий Δg от возмущающих тел в форме прямоугольного параллелепипеда с верхней гранью по плоскости наблюдений. Геофиз. исслед., сб. 1. Изд-во МГУ, 1964.
5. Зубин М. И., Мелекесцев И. В., Таракановский А. А., Эрлих Э. Н. Четвертичные кальдеры Камчатки. Сб. Вулканизм и глубины Земли. «Наука», 1971.
6. Справочник физических констант горных пород. «Мир», 1969.
7. Супруненко О. И., Декин Г. П. Об особенностях гравитационного поля Южной Камчатки. ДАН СССР, 1968, т. 181, № 4.
8. Успенский Д. Г. Гравirazведка. «Недра», 1968.
9. Штейнберг Г. С., Зубин М. И. О глубине залегания магматического очага под Авачинским вулканом. ДАН СССР, 1963, т. 152, № 4.
10. Эрлих Э. Н. Петрохимия кайнозойской Курило-Камчатской вулканической провинции. «Наука», 1966.
11. Williams H. Calderas and their origin. Berkeley and Los Angeles, 1941.
12. Yokoyama J., Hadikisumo A. A Gravity Survey on the Krakatau Islands, Indonesia. Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, v. 47, p. 5, 1969.

*Институт вулканологии ДВНЦ,
г. Петропавловск-Камчатский*

*Поступила в редакцию
24 мая 1972 г.*