

М. И. ЗУБИН, Б. В. ИВАНОВ, Г. С. ШТЕЙНБЕРГ

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ КАРЫМСКОГО ВУЛКАНА НА КАМЧАТКЕ И НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ГЕНЕЗИСА КАЛЬДЕР

Вопрос об образовании кальдер является одним из ключевых в вулканологии. Многочисленный фактический материал по геологическому строению кальдер [1, 2, 16, 18 и др.] не позволяет высказать более или менее аргументированную точку зрения на их генезис. Геофизические исследования кальдер сильно отставали и только в последнее время стали приобретать все более широкое развитие [15, 19, 20 и др.]. Несомненно, что только комплексные геолого-геофизические исследования могут дать вполне определенные выводы о генезисе этих образований. Настоящая статья является следующей [12] попыткой комплексного исследования этой проблемы на Камчатке.

Карымский вулкан — один из активнейших на Камчатке — располагается в центральной части кальдеры, находящейся в пределах Карымской кольцевой структуры Восточной вулканической зоны.

По геологическим данным [4—6] стенки кальдеры, опоясывающие современный конус Карымского вулкана, являются остатками мощного древнего вулканического сооружения, высота которого достигала 1800—2000 м (абс. отм.). Древний Карымский вулкан представлял собой довольно сложную вулканическую постройку, объем которой, включая лавовые потоки, составлял 50 км³. В настоящее время сохранились западная, северная и восточная стенки кальдеры; высота их изменяется от 10—15 м на юге до 250 м — на севере. Строение древнего Карымского вулкана и молодого конуса представлено на геологическом разрезе (рис. 1).

Лавы древнего Камырского вулкана представляют собой двупроксеновые андезито-базальты и андезиты. Фундаментом вулкана является ниже-среднечетвертичная туфовая толща.

На прилегающей к кальдере Карымского вулкана территории имеются многочисленные обнажения светло-желтых длиноволокнистых пемз (SiO₂ 63—68%). Общая площадь их распространения составляет 60 км², а суммарный объем около 6 км³ (рис. 2), мощность колеблется от 100—165 м в 1—3 км от западного борта кальдеры до 1—1,5 м в 10 км от северо-восточного борта.

Таким образом, видно, что мощность пемзовых отложений закономерно уменьшается при удалении от кальдеры. Это позволяет связывать их появление с образованием последней. Этап эксплозивной деятельности, в ходе которого образовались пемзовые отложения, по всей вероятности, состоял из серии взрывов, следующих друг за другом с некоторыми интервалами, в течение которых происходила эволюция химического состава пемз. По абсолютной датировке (C₁₄) возраст пемз

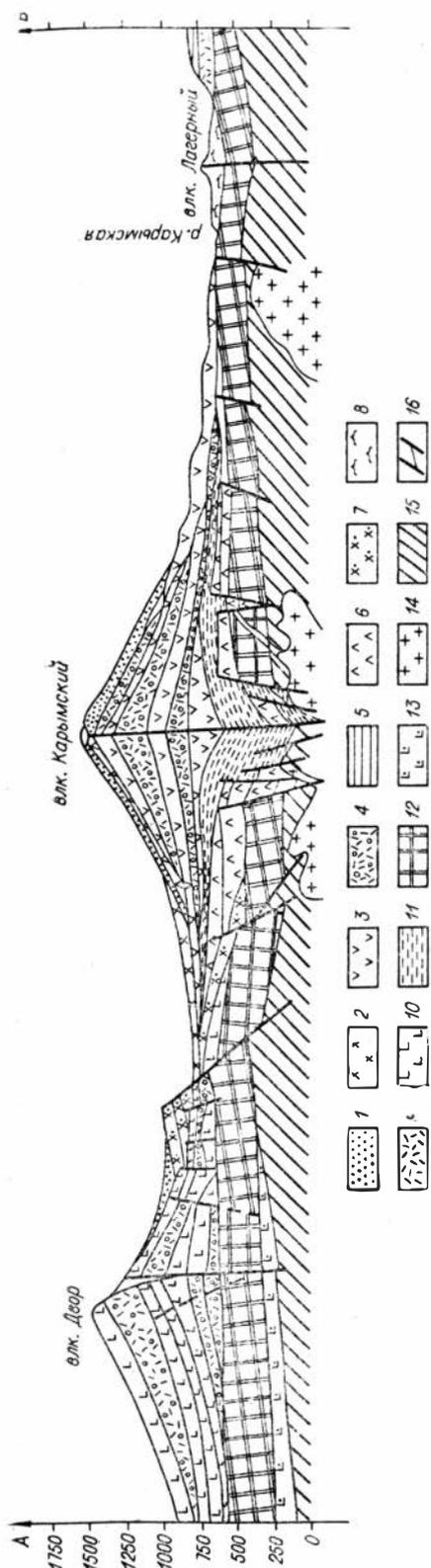


Рис. 1. Схематический геологический разрез Карымского вулкана (по Б. В. Иванову).

1 — современные рыхлые образования склонов конуса; 2 — двупироксеновые андезиты северного лавового комплекса (Q_3-4); 3 — двупироксеновые андезиты и андезиты-дациты современного конуса; 4 — пирокластические образования вулканических построек; 5 — пемзы дацитового состава, генетически связанные с образованием кальдеры; 6 — двупироксеновые андезиты древнего Карымского вулкана; 7 — двупироксеновые андезиты-базальты; 8 — лавовый купол Лаверный и его лавы андезито-дацитового состава; 9 — верхнечетвертичные (Q_3) туфы; 10 — андезиты и базальты вулкана Двор; 11 — рыхлые образования взрывного происхождения; 12 — фундамент древнего Карымского вулкана, ниже-среднечетвертичные туфы (Q_{1-2}); 13 — базальтовые лавы четвертичного плато; 14 — близповерхностные интрузии гранитоидного состава и их дайки (Q_1); 15 — плочконовые отложения (N_2); 16 — разрывные нарушения сбросово-взбросового типа.

определен в 7450 ± 200 лет (320 ГИН), т. е. образование кальдеры произошло в начале среднеголоценового времени Q_4^3 [5, 6].

Современный конус Карымского вулкана, возникший после образования кальдеры, является типичным стратовулканом высотой 1530 м и состоит из переслаивающихся потоков лав двупироксеновых кислых андезитов, андезито-дацитов и пирокластики. Общий объем андезито-дацитовых лав молодого конуса, заполнивших дно кальдеры, равен 2 км^3 .

С целью изучения глубинного геологического строения Карымского вулкана в кальдере и прилегающих к ней районах была проведена гравиметрическая съемка.

Карты Δg построены в редуции Буге при плотностях промежуточного слоя $2,3$ и $2,7 \text{ г/см}^3$ и отражают распределение поля силы тяжести на локальном участке — кальдере Карымского вулкана, вулкан Двор и прилегающий район. Для учета регионального фона использовалась гравиметрическая съемка среднего масштаба КТГУ. Снятие регионального фона в данном случае не изменяет общей картины (подчеркивается лишь положительная аномалия вулкана Двор). В дальнейшем рассматриваются карты в редуции Буге при $\sigma_{\text{пр. сл.}} = 2,3$ и $2,7 \text{ г/см}^3$ со снятым региональным фоном. Обе карты в целом схожи: территория вулкана Двор и кальдеры Карымского характеризуется

общим максимумом силы тяжести значительной интенсивности. На фоне этого максимума выделяются аномалии второго порядка: положительная — над Двором и пониженная — над центральным конусом Карымского.

Аномалия по широтному профилю через кальдеру Карымского вулкана представляет собой пологий максимум в 15 км в поперечнике с повышенным градиентом силы тяжести над бортами кальдеры (рис. 3).

По геологическим данным, максимальная мощность лав, заполняющих кальдеру, — 300 м. Максимальное значение аномалии силы тяжести, которое они могут давать, составляет лишь некоторую часть наблюдаемой аномалии. Кривая Δq , полученная вычитанием из наблюдаемой аномалии, рассчитанной от лавовой толщи, представляет собой пологий максимум с довольно постоянным градиентом.

Можно предположить, что эта остаточная аномалия обусловлена мощной лавовой толщей в кальдере, геологически не установленной.



Рис. 2. Схема распространения пемзовых отложений, генетически связанных с образованием кальдеры.

1 — современный конус; 2 — кальдера Карымского вулкана; 3 — дугообразная постройка вулкана Двор; 4 — пемзы.

В этом случае общая мощность лав составит 1—1,5 км. Тогда общая мощность толщи внутри кальдеры с учетом коэффициента explosивности (70—82%) должна была бы составить не менее 3 км. Эта величина маловероятна, независимо от точки зрения на генезис кальдеры. Кроме того, расчетная кривая Δq для этого варианта плохо сходится с формой графика остаточной аномалии.

Для определения глубины залегания центра тяжести объекта, создающего остаточную аномалию, использован способ пересчета в нижнее полупространство. Расчет по методу секток с последующим суммированием по нескольким вертикальным профилям дает положение особой точки на глубине 4,5 км.

Такой особой точкой может быть центр тяжести сферического тела. Сходную глубину центра тяжести — 5 км дает формула Афанасьева (прямой метод интерпретации). По формуле Грина избыточная положительная масса объекта составляет (с поправкой на небесноконечность пределов при интегрировании) $17 \cdot 10^{15}$ г. Дальнейшие вычисления — определение объема и размеров

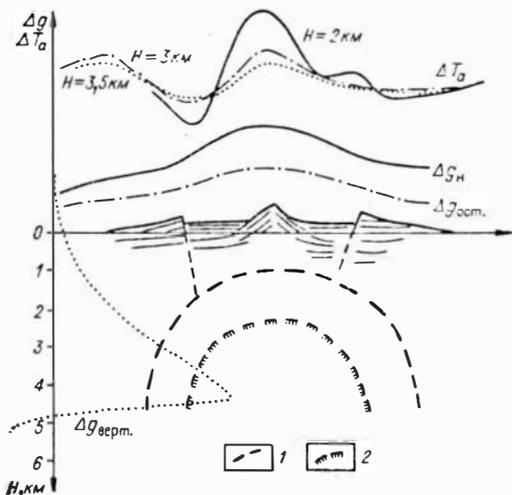


Рис. 3. Графики Δg и ΔT_a . Широтный профиль через кальдеру Карымского вулкана. 1—2 — предполагаемые границы магматического очага при $\sigma_{изб}$ 0,1 и 0,3 г/см³.

быть центр тяжести сферического тела. Сходную глубину центра тяжести — 5 км дает формула Афанасьева (прямой метод интерпретации). По формуле Грина избыточная положительная масса объекта составляет (с поправкой на небесноконечность пределов при интегрировании) $17 \cdot 10^{15}$ г. Дальнейшие вычисления — определение объема и размеров

объекта зависят от выбора избыточной плотности и, следовательно, геологических допущений о природе аномалиеобразующего тела.

Вмещающими породами могут быть породы плиоценового фундамента, который сложен конгломератами, песчаниками и туффитами с плотностью 2,4—2,6 г/см³. Объект с центром тяжести на глубине 4 км представляется возможным отождествить с субвулканической интрузией или промежуточным магматическим очагом. Это предположение находится в соответствии с геологическими соображениями. Согласно петрохимическим и геохимическим особенностям продуктов извержений и присутствию в пирокластике, генетически связанной с образованием кальдеры Карымского вулкана, ксенолитов гранитоидного состава, можно с достаточной уверенностью говорить о существовании под Карымским вулканом кислых по составу магматических масс и о некоторой ассимиляции гранитоидного материала, которая возможна в условиях существования близповерхностной магматической камеры.

Избыточная плотность такого объекта относительно вмещающей туфовой толщи может колебаться от 0 до 0,3 г/см³. При допустимых значениях плотности и величине массы, определенной выше, объем предполагаемого очага может составлять от 50 до 170 км³ (заметим, что объем древнего конуса Карымского вулкана составляет около 50 км³). Полагая (чисто формально), что очаг имеет сферическую форму, получим величину радиуса от 2,3 до 3,5 км, а глубину залегания верхней кромки соответственно 2—1 км ниже уровня моря.

По результатам аэромагнитной съемки среднего масштаба [11] построена карта магнитного поля ΔT_a в изолиниях для района Карымского вулкана (рис. 4). Бросается в глаза очевидная связь магнитных аномалий с рельефом. За некоторыми исключениями положительные формы рельефа фиксируются положительными магнитными аномалиями. Только вулканы Крайний и Разлатый характеризуются интенсивными отрицательными аномалиями.



Рис. 4. Карта ΔT_a района Карымского вулкана.

лиями ΔT_a . Отметим, что оба вулкана древнее (Q_{1-2}) остальных вулканов группы. Однако это совпадение требует специального исследования. Можно предположить, что отрицательные аномалии под этими вулканами обусловлены обратной намагниченностью пород, что является характерным для нижнечетвертичных эффузивов.

Кальдера Карымского вулкана фиксируется достаточно локальной положительной магнитной аномалией. Точка максимального значения

аномального поля (1200 γ) расположена около восточного борта кальдеры. Возможно, что этот максимум вызван экструзией гиперстеновых андезито-базальтов, располагающейся вне кальдеры, неподалеку от ее края. Наложение этого эффекта искажает истинное распределение поля ΔT_a над кальдерой, нарушая его изометричность и четкую приуроченность к топографическим формам.

Для проведения количественной интерпретации А. А. Таракановским были отработаны широтные аэромагнитные профили через кальдеру Карымского вулкана на высотах 2 км, 3 и 3,5 км (см. рис. 3). Кривая ΔT_a над кальдерой представляет собой хорошо выраженный максимум с менее четкими, но определенными минимумами с обеих ее сторон. Наличие минимумов (которые сохраняются на всех уровнях наблюдения) свидетельствует об ограниченности размеров аномалиеобразующего объекта по глубине. Для определения глубины залегания верхней кромки тела, ограниченного по вертикали, можно использовать метод полных градиентов. Рассчитанная глубина верхней кромки составляет 1,3 км ниже уровня моря. Была сделана попытка пересчета поля ΔT_a в нижнее полупространство (с использованием маршрутов ΔT_a на различных высотах). Особые точки аномальных тел в этом случае располагаются на глубине 1 км или несколько ниже. Эти количественные оценки почти совпадают с допускаемой по геологическим данным глубиной залегания верхней кромки объекта, создающего гравитационную аномалию (магматический очаг).

Обратимся теперь к вопросу о происхождении кальдеры Карымского вулкана. Существуют три точки зрения. По В. И. Влодавцу [2], кальдера Карымского вулкана является чисто провальным образованием, обусловленным оттоком магмы из неглубоко залегающего магматического очага, располагающегося под рядом находящимся вулканом Двор. Стенки кальдеры Карымского вулкана сложены лавами вулкана Двор и не являются продуктами самостоятельного вулканического центра. Таким образом, В. И. Влодавец отрицает существование древнего Карымского вулкана. По А. Е. Святловскому [10], кальдера Двор является частью кальдеры Карымского вулкана. Г. С. Горшков [4] считает, что кальдера Карымского вулкана является самостоятельным сооружением. Стенки кальдеры сложены лавами древнего вулканического центра. Образование кальдеры, по мнению Г. С. Горшкова, произошло в результате обрушения стенок канала, расширенного предшествующими эксплозиями (гипотеза Эшера [14]). Точка зрения Г. С. Горшкова подтверждается следующим фактическим материалом [5, 6]: 1. Падение лавовых горизонтов в западном и восточном бортах кальдеры явно указывает на существование древнего центра извержения, располагающегося в центральной части кальдеры Карымского вулкана. 2. Горизонты лав, обнажающихся в северном борту кальдеры, относятся к эффузивным образованиям древнего вулканического центра, располагающегося на месте современного конуса Карымского вулкана, и не являются лавами вулкана Двор, как предполагал В. И. Влодавец. Об этом свидетельствуют элементы залегания лавовых горизонтов, показывающие постоянное падение лав к северу (3—6°), а не к югу. 3. Отдельные горизонты лав, обнажающиеся в северном борту кальдеры, переходят в постройку кальдеры Карымского вулкана. 4. Отложения пемзы, генетически связанной с образованием кальдеры Карымского вулкана, покрывают северо-западные, северные и южные борта кальдеры, образуя горизонт мощностью до 10—12 м. Залегание пемзовых отложений на стенках кальдеры Карымского вулкана совершенно определенно свидетельствует, во-первых, о целой серии катастрофических эксплозий,

предшествовавших образованию кальдеры и, во-вторых, о местоположении эксплозивного центра, располагающегося на месте современного конуса Карымского вулкана. Остроугольные внутренние очертания стенок кальдеры показывают, что катастрофические эксплозии сопровождалась обрушением стенок канала по системе кольцевых и радиальных трещин.

Приведенная интерпретация гравиметрических данных подтверждает мнение В. И. Влодавца о наличии неглубоко залегающего магматического очага. Однако очаг располагается не под вулканом Двор, а под Карымским вулканом. Чтобы оценить правильность мнения В. И. Влодавца о провальном способе образования кальдеры Карымского вулкана, проделан следующий расчет. Для того чтобы могло произойти погружение древней постройки вулкана в близповерхностный очаг, вес исчезнувшей части Карымского вулкана и нижележащей толщи пород над очагом (упрощенно: вертикальный цилиндр с радиусом кальдеры и высотой, равной сумме высоты борта кальдеры и глубины до верхней кромки очага) должен был превосходить силы сцепления цилиндрической поверхности погружающегося блока с окружающими породами ($\tau_{пр}$ взято из экспериментальных работ [3]). Оказывается, что силы сцепления равны $3 \cdot 10^{14}$ кг, а вес $1 \cdot 10^{14}$ кг. Расхождение коэффициентов при одинаковых порядках действующих сил легко может быть объяснено тем, что прочность пород в естественном залегании ниже, чем у отдельных образцов: к тому же облегчить проседание могли тектонические причины.

Таким образом, этот грубый расчет показывает, на наш взгляд, возможность образования кальдеры Карымского вулкана путем обрушения в близповерхностный магматический очаг.

Рассматривая вариант эксплозивного образования кальдеры Карымского вулкана, целесообразно использовать хорошо разработанный и экспериментально подтвержденный аппарат физики взрыва на выброс. Рассматривая кальдеру как воронку взрыва, мы имеем чаще всего лишь один параметр — ее радиус. Работы по моделированию крупных взрывов [9] показывают, что радиус воронки обозначается следующей зависимостью:

$$R = W \left(0,6 + \lg \frac{E}{\rho g W^4 + P_0 W^3 + \sigma W^3} \right),$$

где R — радиус воронки, W — кратчайшее расстояние от центра взрыва до поверхности, E — энергия взрыва, ρ — плотность пород, g — ускорение силы тяжести, P_0 — атмосферное давление, σ — прочность пород.

Уравнение может быть решено графически (рис. 5). Здесь рассмотрены зависимости $R=f(W)$ при данных значениях энергии.

Энергия сильнейших землетрясений в земной коре и верхней мантии не превышает 10^{25} — 10^{26} эрг. Учитывая, что энергия сейсмической волны и упругого поля напряжений не превышает 10% полной энергии взрыва [9], можно в качестве максимальных значений параметра E принять 10^{26} — 10^{27} эрг. Тогда по графику (см. рис. 5) находим, что при оптимальных условиях взрывы, приводящие к образова-

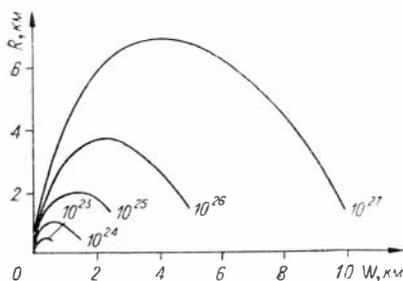


Рис. 5. Зависимость $R=f(W)$ при значениях энергии от 10^{23} до 10^{27} эрг для кальдер при $P_0=1$ атм; $\sigma=300$ кг/см²; $g=9,81$ м/сек².

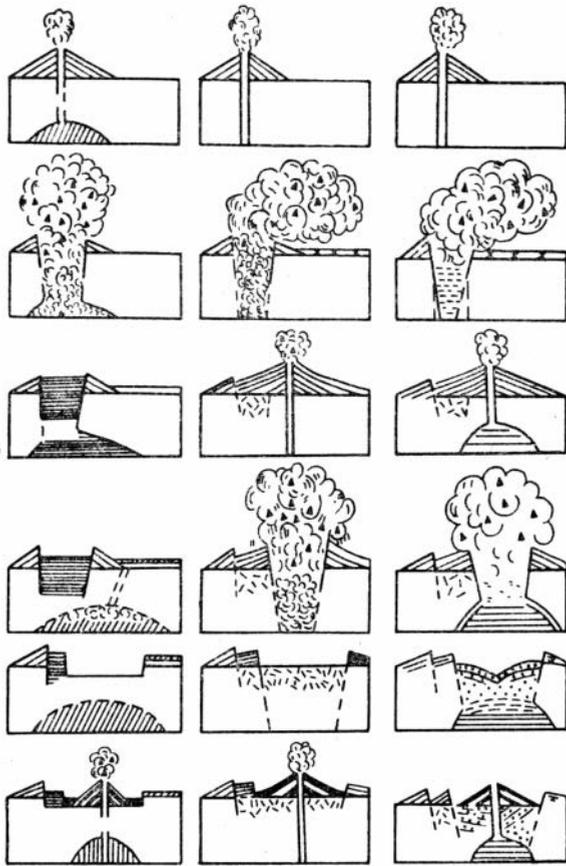


Рис. 6. Схема развития дугообразной вулканической постройки вулкана Двор и кальдеры Карымского вулкана по В. И. Влодавцу — слева, по Г. С. Горшкову — в центре, справа — по данным авторов статьи.

нию кальдер, происходят на глубине от 300—400 м до 4 км, то есть в самых верхних горизонтах земной коры. Из той же зависимости видно, что при взрывах мощностью 10^{26} — 10^{27} эрг максимальный диаметр воронки не превышает 7—13 км.

Для кальдеры Карымского вулкана при радиусе 2,5 км глубина заложения взрыва составляет 1,5 км при энергии $E=10^{25}$ эрг, т. е. глубина взрыва соответствует глубине верхней кромки предполагаемого магматического очага.

Таким образом, рассмотренная нами геолого-геофизическая обстановка в районе кальдеры Карымского вулкана позволяет предполагать, что и взрыв, и обрушение могут быть причиной образования кальдеры. На первое указывает широкое развитие эксплозивных отложений, на второе — фестончатые ограничения кальдеры.

Наиболее вероятным механизмом образования кальдеры Карымского вулкана является взрыв, центр которого располагался в верхней части промежуточного магматического очага, с последующим обрушением бортов воронки (рис. 6).

Приведенные данные показывают, что предложенная в работах [19, 20] связь между знаком гравитационной аномалии и типом каль-

деры (отрицательная аномалия — тип Кракатау, положительная — тип Гленко по Вильямсу) вряд ли универсальна. Гравитационная аномалия определяется сложным комплексом поверхностных и глубинных объектов и в каждом конкретном случае нуждается в детальной геолого-геофизической интерпретации.

В заключение представляется возможным сделать следующие выводы:

1. Кальдера Карымского вулкана образовалась в результате серии катастрофических эксплозий в близповерхностном магматическом очаге и последующего обрушения.

2. Под современным конусом Карымского вулкана на глубине 1,5 — 2 км от уровня моря располагается промежуточный магматический очаг изометрической формы с поперечником 4,5 — 7 км.

3. Значительная часть магматического очага имеет температуру ниже точки Кюри для ферромагнитных минералов (+600°C) и соответственно создает магнитную аномалию. По-видимому, краевые зоны кислото-промежуточного магматического очага находятся в кристаллическом состоянии.

4. По генетическому признаку следует различать:

а) чисто взрывные образования (маары, соммы, кальдеры — диаметром до 5 — 7 км);

б) образования провальные: тип Кракатау (обрушение в магматический очаг, опустошенный катастрофическими эксплозиями и извержением ювенильного материала) и тип Килауэа (обрушение вследствие оттока или перераспределения магматического материала). К этой группе генетически примыкают вулcano-тектонические депрессии или кольцевые структуры (диаметр более 20 км). Последние в отдельных случаях могут ассоциироваться с чисто тектоническими депрессиями и постепенно в них переходить.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беммелен Р. В. Горообразование. Л., 1956.
2. Влодавец В. И. Классификация отрицательных вулканических форм рельефа. Изв. АН СССР, сер. геол., 1944, № 5.
3. Воларович М. П., Томашевская И. С. Новая методика определения горных пород на срез. Тр. ИФЗ, 1962, № 23.
4. Горшков Г. С. Заметки об извержении Карымского вулкана в 1960 г. Бюлл. вулканол. ст., 1962, № 32.
5. Иванов Б. В. Геологический и энергетический эффекты извержения Карымского вулкана в 1962—65 гг. В сб. Современный вулканизм. «Наука», 1969.
6. Иванов Б. В. Извержение Карымского вулкана в 1962—65 гг. и вулканы Карымской группы. «Наука», 1969.
7. Мак Коун Дикки. Некоторые соотношения между геологией и эффектом подземных ядерных взрывов на полигоне в Неваде. В сб. Подземные ядерные взрывы. ИЛ, 1962.
8. Мархинин Е. К. Роль вулканизма в формировании земной коры. «Наука», 1967.
9. Садовский М. А., Адушкин В. В., Родионов В. Н., Старцев Г. Н. Об одном способе моделирования крупных взрывов на выброс. Физика горения и взрыва, 1967, № 1.
10. Святловский А. Е. Атлас вулканов СССР, 1959.
11. Штейнберг Г. С., Ривош Л. А., Чирков А. М. Магнитная съемка в районе Авачинской группы вулканов. Геол. и геофиз., 1962, № 2.
12. Штейнберг Г. С., Зубин М. И. О глубине залегания магматического очага под Авачинским вулканом. ДАН, 1963, т. 152, № 4.
13. Waldwin R. B. Relationship between Crater Parameters, The Measure of the Moon, Univ. of Chicago Press, Chicago, 1963.
14. Echer B. C. On the formations of calderas. Leidsche geol. med. vol. 3, 1928.

15. Macdonald H. A. Hawaiian Calderas. Pacific Science., vol. XIX, July, 1965.
16. Reck H. Santorin der Werdegang eines inselvulkans und sein Ansbruch. 1936.
17. Short N. M. A Comparision of Natures characteristic of Nuclear Expostion craters and astroblemes. Ann. New-York, Academy of Sciences, 1965, vol. 123, № 2.
18. Williams H. Calderas and their origin. Bull. Dep. Geol. Sci. vol. 25, № 6, p. 239—346, 1941.
19. Yokoyama I. Gravity survey of Kuttyaro Caldera lake. I. of Physica of the Earth, vol. 6, № 2, 1958.
20. Yokoyama I. Structure of caldera and gravity anomaly. Bull. Volcanol., Napoli, tome 26, 1963.

*Институт вулканологии
Сибирского отделения АН СССР,
Петропавловск-Камчатский*

*Статья поступила в редакцию
24 марта 1969 г.*