

Г. С. ГОРШКОВ, С. И. НАБОКО

## РАЗВИТИЕ РУССКОЙ ВУЛКАНОЛОГИИ

Вулканология, как самостоятельная научная дисциплина, зародилась и получила развитие в нашей стране только в послереволюционные годы.

Основным объектом изучения этой науки являются действующие вулканы, которые на территории СССР имеются только на крайнем востоке — на Камчатке и на Курильских островах. Поэтому нижеследующий очерк касается работ преимущественно в этих областях.

Первые известия о вулканах Камчатки и Курильских островов появились в известном труде «Описание земли Камчатки» С. П. Крашенинникова, опубликованном в 1755 г. Писали о вулканах путешественники и исследователи XIX столетия А. Эрман, А. Постельс, К. Дитмар и др.

Основы геологии Камчатки были заложены на грани XIX и XX столетий К. И. Богдановичем, он же дал первый геологический очерк вулканизма Камчатки, ныне имеющий только исторический интерес. Геологический отдел Камчатской экспедиции Русского географического общества 1909—1911 гг. (С. А. Конради, Н. Г. Келл) собрал довольно обширный материал о вулканах Камчатки, но этот материал был обработан и опубликован только в очень небольшой степени.

Таким образом, первый дореволюционный период русских вулканологических исследований носил преимущественно физико-географический и частично геологический характер. Главнейшая часть вулканологии — изучение современной деятельности вулканов, их извержений и других проявлений активного вулканизма — практически отсутствовала.

Толчком к дальнейшему изучению вулканов явилось извержение вулкана Авача близ г. Петропавловска в 1926—1927 гг. Это извержение наблюдалось местным краеведом П. Т. Новограбленовым, а продукты извержения были изучены П. Н. Чирвинским.

В 1929 г. Академия наук СССР и Геологический комитет решили начать систематическое изучение вулканов Камчатки. Это можно считать началом второго этапа русских вулканологических работ.

В 1931 г. А. Н. Заварицкий организовал экспедицию для изучения вулкана Авача; в состав этой экспедиции входил Б. И. Пийп, который с этого времени посвятил свою жизнь изучению вулканов Камчатки. Изучение Авачи касалось главным образом строения этого вулкана и состава продуктов его извержений. Была выяснена сложная история его образования и смены лав различного состава. Одним из важных результатов было установление отложений пирокластических потоков, которые, как показали исследования последующих лет, характерны для

многих вулканов. В этой экспедиции впервые для Камчатки были изучены вулканические (фумарольные) газы и возгоны. При изучении вулкана была подмечена и основная правильность в линейном расположении Камчатских вулканов. В дальнейшем А. Н. Заварицким создана гипотеза о связи вулканизма и тектоники Камчатки, ныне подтвержденная и геофизическими данными. В том же 1931 г. Б. И. Пийп начал исследование горячих источников Камчатки.

А. Н. Заварицкий обработал петрографический материал К. И. Богдановича и С. А. Конради о северной группе вулканов Камчатки. Это были первые для Камчатки работы по петрографии вулканических пород, которые сохранили свое значение и до настоящего времени.

Начатые в 1931 г. А. Н. Заварицким вулканологические исследования на Камчатке уже не прерывались и постепенно охватили самые разнообразные стороны вулканизма.

В 1935 г. по инициативе Ф. Ю. Левинсона-Лессинга у подножия высочайшего и наиболее активного вулкана Камчатки — Ключевской сопки — была организована первая вулканологическая станция. С этого времени Ключевская группа вулканов находится под непрерывным наблюдением. В течение последующих десяти лет Камчатская вулканологическая станция была базой и для изучения других камчатских вулканов.

Первым начальником Камчатской вулканологической станции был В. И. Влодавец, затем станцию возглавляли А. А. Меняйлов, В. Ф. Понков и Б. И. Пийп. В послевоенные годы — Г. С. Горшков, И. И. Гущенко, Е. К. Мархинин, А. Н. Сирин, А. Е. Святловский и И. Т. Кирсанов.

За 1935—1945 гг. произошло два извержения Ключевского вулкана с прорывом новых побочных кратеров (группа Билукая в 1938—1939 гг. и Юбилейный прорыв в 1945 г.), извержения вулканов Авача в 1937—1938 гг. и Толбачик в 1941 г.

В этот период изучение действующих вулканов и их извержений является основным содержанием вулканологических исследований. Много внимания уделяется изучению вулканических газов и петрографии свежих вулканических продуктов. Главными итогами, кроме работ А. Н. Заварицкого о вулкане Авача, являются его труды по петрографии северных вулканов Камчатки, монография «Введение в петрохимию изверженных горных пород», исследование С. И. Набоко о побочном извержении кратера Билукая и монографии Б. И. Пийпа: «Термальные ключи Камчатки» и «Ключевской вулкан и его извержения в 1944—1945 гг. и в прошлом».

Следующий — третий — этап развития русских вулканологических исследований начинается в 1946 г. с организации А. Н. Заварицким самостоятельной Лаборатории вулканологии АН СССР, в состав которой входила и Камчатская вулканологическая станция.

Первой большой экспедицией Лаборатории была аэровулканологическая экспедиция А. Н. Заварицкого на Камчатку в 1946 г. Впервые для изучения вулканов была использована аэрофотосъемка — исключительно эффективный метод, нашедший в дальнейшем большое применение в вулканологии. Материалы этой экспедиции были опубликованы в книге А. Н. Заварицкого «Вулканы Камчатки», а позже использованы А. Е. Святловским в «Атласе вулканов СССР».

С организацией Лаборатории вулканологии исследования распространяются на другие районы СССР. В 1946 г. Г. С. Горшков начинает многолетние работы на Курильских островах. В 1947 г. А. Н. Заварицкий организует вторую аэровулканологическую экспедицию на Кавказ. Он продолжает исследования на Кавказе в течение последующих

нескольких лет; позже его ученики в Армении открывают Лабораторию вулканологии АН Армянской ССР. Исследования сотрудников Лаборатории вулканологии охватывают также Закарпатье, Монголию, континентальные районы северо-востока Азии, Индонезию. В этот же период организуется Лаборатория вулканологии при Сахалинском КНИИ, а на Камчатке начинаются работы по практическому использованию термальных вод и подземного пара для энергетических целей.

В конце сороковых годов по инициативе А. Н. Заварицкого начинается внедрение геофизических методов в вулканологию, в первую очередь сейсмических. Со временем это направление приобретает особо важное значение.

С 1954 г. начинают развиваться и крепнуть международные научные связи советских вулканологов; советские ученые участвуют в совещаниях и симпозиумах, а с 1957 г. Г. С. Горшков, В. И. Влодавец и Б. И. Пийп входят в руководящие органы Международной ассоциации вулканологии.

Большое значение в организации и развитии вулканологических исследований сыграли Всесоюзные вулканологические совещания: первое в 1959 г. (Ереван) и второе в 1964 г. (Петропавловск-Камчатский). Однотомник трудов первого совещания и трехтомник второго являются существенным вкладом в мировую вулканологию. Большое значение сыграли также вулканологические симпозиумы, которые начиная с 1960 г. почти ежегодно организовывали Лаборатория вулканологии, а позже Институт вулканологии по гидротермальным процессам в областях активного вулканизма, по петрохимии молодых вулканических пород, по туфоловам и игнимбрикам и др. (Том трудов московского симпозиума по игнимбрикам был издан также в США.)

В 1958 г. Б. И. Пийп организовал Камчатскую геолого-геофизическую обсерваторию, большое значение в работах которой имели вулканологические (в частности, вулканофизические) и геотермальные исследования. В 1962 г. на базе Лаборатории вулканологии и геолого-геофизической обсерватории был организован Институт вулканологии, первым директором которого стал Б. И. Пийп.

В последние двадцать лет советская вулканология достигла выдающихся успехов и завоевала одно из ведущих мест в мировой вулканологической науке.

Предлагаемый очерк успехов советской вулканологии не претендует на полноту и всеобъемлемость. Он освещает, главным образом, итоги последних двадцати лет работы Лаборатории вулканологии (1946—1962) и ее наследника — Института вулканологии.

## Современный вулканизм

Исследования последних лет установили, что общее число крупных и мелких вулканов и вулканических образований четвертичного возраста на Камчатке и Курильских островах достигает 2000.

До 1946 г. о вулканах Курильских островов почти ничего не было известно. Сейчас на Курилах насчитывается около 200 вулканов, в том числе 104 голоценового возраста, а 39 из них относятся к категории действующих. Описаны форма и строение всех вулканов, дана история их развития и для большинства — состав вулканических продуктов (Г. С. Горшков). Особенно детальные работы были проведены в северной части о. Парамушир (В. Н. Шилов, В. И. Федорченко и др.).

Новая обширная область подводных вулканов обнаружена экспедициями Института океанологии у берегов Курильских островов в Охотском море и Тихом океане (П. Л. Безруков, Г. Б. Удинцев, В. Ф. Канаев и др.).

Из числа Камчатских вулканов детально изучены: Ключевская группа (Б. И. Пийп, Г. С. Горшков, Г. Е. Богоявленская, А. Н. Сирин, К. М. Тимербаева и др.), вулканы Кроноцкого района и Семьячинской группы (В. И. Влодавец, Г. Е. Богоявленская, Б. В. Иванов, Ю. М. Дубик и др.), Шивелуч (А. А. Меняйлов), Хангар и Бакенин (Т. Ю. Маренина и А. Е. Святловский), Ичинский (Т. Ю. Маренина и Н. В. Огородов), Корякский (Т. Ю. Маренина, А. Н. Сирин, К. М. Тимербаева), Горелый и Мутновский (И. Т. Кирсанов), вулканы Срединного хребта (Н. В. Огородов, Н. Н. Кожемяка, О. А. Важеевская). Описана морфология большинства вулканов (И. В. Мелекесцев).

Наиболее интересные данные получены в результате побочных извержений Ключевского вулкана в 1946 г. (С. И. Набоко), 1951 и 1953 гг. (С. И. Набоко), 1951 и 1953 гг. (Б. И. Пийп), в 1956 г. (Г. С. Горшков) и 1966 г. (И. Т. Кирсанов и др.); гигантского взрыва 30 марта 1956 г. вулкана Безымянного (Г. С. Горшков)\*, извержения Шивелуча в 1944—1951 гг. (Б. И. Пийп, А. А. Меняйлов, Г. С. Горшков, А. А. Былинкина и др.) и в 1964 г. (Б. И. Пийп, Е. К. Мархинин, Ю. М. Дубик, Г. С. Горшков); длительного извержения Карымского вулкана (Б. В. Иванов, И. Т. Кирсанов и др.).

На Курильских островах наиболее интересными были извержения Пика Сарычева на о. Матуа в 1946 г. (Г. С. Горшков), Пика Креницына на о. Онекотан в 1952 г. (Б. И. Пийп, А. Е. Святловский, Г. С. Горшков, Г. Е. Богоявленская) и извержение в кальдере Заварицкого на о. Симушир в 1957 г. (Е. К. Мархинин, Г. С. Горшков).

Среди этих извержений имели место все известные в «классической» вулканологии типы, за исключением ярко выраженного гавайского, хотя некоторые извержения Толбачика близки к нему. Здесь в провальном кратере появляется озеро жидкой лавы, образуются характерные потоки волнистой лавы и длинные лавовые нити, так называемые волосы Пеле. Стромболианский тип извержений — выбросы раскаленного светящегося пепла и шлаков — проявляется при извержении многих вулканов, в том числе Ключевского, Авачи и др. Вулканский тип извержений — выбросы темного несветящегося пепла — имеет место при многих извержениях Ключевского, Карымского и др. вулканов. Частое образование побочных кратеров на склонах Ключевского вулкана сближает его с извержениями типа Этны, а перемежаемость взрывных явлений с излияниями потоков лавы представляет смешанный тип извержений, или тип Везувия.

Извержения вулкана Авача на Камчатке и Пика Сарычева на Курильских островах с выбросами из открытого кратера мощных лавин раскаленного пирокластического материала близки к типу Суффриера. Рост экстремального купола на вулкане Шивелуч в 1946—1951 гг. и на вулкане Безымянном в 1956—1966 гг. с образованием раскаленных лавин говорит о близости к извержениям типа Мерапи (о. Ява) и извержениям Пеле в 1929—1932 гг. Направленный взрыв 30 марта 1956 г. на вулкане Безымянном сходен с извержением вулкана Катмай на Аляске, а взрыв в ноябре 1964 г. на Шивелуче — с извержением типа Бандай-сан.

\* Извержение этого вулкана продолжалось до 1966 г., и в его изучении приняли участие многие сотрудники вулканологической станции (Г. Е. Богоявленская, Е. К. Мархинин, Ю. М. Дубик и др.).

Извержения Пика Креницына (1952) и в кальдере Заварицкого (1957) были подводными и происходили в кальдерных озерах.

Извержения Карымского вулкана позволили открыть субаэральный тип подушечных лав и редкий тип жидкостных потоков дацитовой лавы.

На примере вулкана Авача была уточнена классификация извержений типа Суфриер (Б. И. Пийп). В результате изучения вулканов Безымянного и Шивелуча, а также из анализа литературных данных по извержениям вулканов Пеле и Катмаи была выдвинута и обоснована новая категория извержений — направленные вулканические взрывы и дана новая классификация взрывных извержений (Г. С. Горшков).

Выявлены закономерности формирования экструзивных куполов; показано, что главную роль играют температура и вязкость, а состав — втлоростепенную (Г. Е. Богоявленская).

На основании изучения многочисленных извержений Ключевского вулкана через вершинный и побочный кратеры определены закономерности формирования лавовых потоков, шлаковых конусов, установлены температуры базальтовой лавы (до  $1125^{\circ}$ ), вязкость, скорость движения, условия кристаллизации лавы, условия формирования пирокластики, механизм золотой дифференциации рыхлого вулканического материала, перенос металлов летучими и в поверхностных пленках пепловых частиц, закономерности рассеяния и концентрации рудных компонентов и т. д.

Даны первые количественные оценки геологического эффекта крупных извержений и расчеты энергии катастрофических взрывов. Наибольший геологический эффект имел направленный взрыв 30 марта 1956 г. на вулкане Безымянном: образовался огромный кратер размером  $1,7 \times 2,8$  и глубиной до 0,5 км. Туча пепла поднялась до 35—40 км; объем пепла оценивается в  $0,4 \text{ км}^3$ . На площади в  $500 \text{ км}^2$  слоем от 30—40 до 1—2 см отложился горячий пирокластический материал направленного взрыва; пирокластический поток имел длину 18 км при мощности от 10—15 до 60—65 м; его объем достигает  $1 \text{ км}^3$ . Грязевой поток прошел почти 90 км и нес до  $0,5 \text{ км}^3$  пепла. Энергия воздушной волны равнялась  $10^{21}$ — $10^{22}$  эрг. Кинетическая энергия взрыва оценивается величиной  $10^{24}$  эрг, а тепловая энергия извержения  $10^{25}$  эрг. Общий объем извергнутого материала приближается к  $3 \text{ км}^3$ . Суммарный объем легкорастворимых веществ в пирокластических отложениях, по данным И. И. Товаровой, составляет 20 млн. т.

По количеству извергнутого материала и энергии взрыва с извержением Безымянного сопоставимо извержение Шивелуча 12 ноября 1964 г. Отложения направленного взрыва покрывают площадь около  $100 \text{ км}^2$  при мощности от 3—5 до 30 и более метров, их объем приближается к  $1 \text{ км}^3$ ; пирокластические потоки имеют длину до 10—12 км при мощности от 2—3 до 10 м, их объем оценивается около  $1/4 \text{ км}^3$ . Кинетическая энергия взрыва оценивается в  $10^{22}$  эрг. Объем легкорастворимых веществ в пирокластике — около 1,5 млн. т.

Произведена общая оценка геологических результатов взрывных извержений. В общем балансе извергнутого вулканами мира материала на долю рыхлых продуктов (пеплов) приходится свыше 50%, что составляет в среднем в год 2—4 млрд. т. Около 400 млн. т в год образуется за счет извержений камчатско-курильских вулканов. Из этого количества около 7% пирокластики идет на формирование грубообломочных фаций в районе аппаратов вулканов, 43% на рыхлые континентальные отложения и 50% отлагается в акватории Охотского моря и Тихого океана (И. И. Гущенко).

Опубликована сводка анализов лав вулканов Камчатки и Курильских островов и высказаны предположения о связи петрохимических особенностей с типом тектонического режима в различных участках островных дуг (Э. Н. Эрлих).

### Вулканофизика

Применение геофизических методов в вулканологии началось совсем недавно, и сам термин «вулканофизика» очень молод.

Первым существенным результатом вулканофизических исследований в нашей стране было обнаружение явления экранирования поперечных сейсмических волн магматическим очагом. На этой основе глубина магматического бассейна Ключевской группы вулканов была оценена в 60—80 км (Г. С. Горшков). Позже значительное поглощение поперечных сейсмических волн было установлено на Авачинском и некоторых других вулканах Камчатки. Предполагается, что от зоны генерации магмы с глубин 80—90 км вверх поднимаются столбообразные тела, обогащенные магматическим веществом (С. А. Федотов, А. И. Фарберов).

Большой объем геофизических работ (преимущественно магнитометрических и гравиметрических) был проведен на Авачинском вулкане. Было установлено, что Авачинская группа вулканов располагается в вулcano-тектонической депрессии и контролируется глубинными разломами северо-западного простирания. Предполагается, что на глубине около 2 км под Авачинским вулканом имеется небольшой периферический очаг (Г. С. Штейнберг, С. Т. Балеста, М. И. Зубин, А. А. Таракановский).

Многолетними сейсмологическими наблюдениями в районе Ключевской группы вулканов установлены связи между извержениями, землетрясениями и вулканическим дрожанием. Показана принципиальная возможность прогноза извержений (Г. С. Горшков, Б. И. Пийп, П. И. Токарев).

Проводились палеомагнитные наблюдения в ряде вулканических районов Курило-Камчатской дуги (В. А. Бернштейн, Г. А. Поспелова, О. М. Алыпина и др.).

Оценки и измерения кондуктивного теплового потока в континентальных и морских частях дуги дали примерно удвоенную его величину по сравнению с невулканическими районами (Б. Г. Поляк, А. П. Горшков и др.).

Большое значение для вулканологии имели геофизические работы Института физики Земли, которые установили строение земной коры и верхней мантии в районе Курильских островов (И. П. Косминская и др.) и пониженные значения сейсмических скоростей в подкорковых частях мантии под вулканическими зонами (С. А. Федотов).

На основе комплексного рассмотрения имеющихся геофизических, геологических и петрохимических данных из всех основных вулканических районов Земли была выдвинута гипотеза, основные положения которой сводятся к следующему: 1) очаги питания вулканов лежат за пределами земной коры — в верхней мантии; 2) роль ассимиляции материала коры на пути магмы к поверхности довольно ограничена; 3) петрохимия вулканических пород отображает процессы, происходящие в верхней мантии. Таким образом, вулканизм может рассматриваться как индикатор состава и состояния вещества верхней мантии. На этой основе предложена схема эволюции вулканизма как отображение эволюции верхней мантии (Г. С. Горшков).

## Поствулканические процессы (фумаролы и гидротермы) и геотермоэнергетика

За истекшие годы было выполнено около 1000 анализов фумарольных газов и конденсатов, выявлены закономерности поведения летучих в зависимости от состава исходной магмы, характера извержений и времени остывания лавового материала (Л. А. Башарина и др.). Предложен метод оценки суммарного количества газов по высоте взлета бомб при взрывах (Е. К. Мархинин).

Проведены первые анализы подводных фумарол (К. К. Зеленов). На вулканах Камчатки и Курильских островов изучено более 60 минералов возгонов и по их химизму определены закономерности переноса металлов в газовой фазе (С. И. Набоко, Е. К. Серафимова и др.).

Вулканическая деятельность является непрерывным источником обогащения атмосферы и гидросферы летучими продуктами извержения. Многочисленными анализами воздуха и атмосферных осадков в окрестностях активных вулканов установлено, что влияние вулканизма на атмосферу является узлокальным и кратковременным. После сильных извержений временно нарушается равновесие, и в атмосфере создаются микрорайоны максимального загрязнения ее; атмосферные воды на короткий срок приобретают минерализацию до 450 мг/л, становятся кислыми, заражаются хлором и серной кислотой (Л. А. Башарина).

Изучение термальных источников современных гидротермальных растворов проходило в направлении разработки их генетической классификации и гидрохимии (В. В. Иванов и др.), динамики и генезиса (В. В. Аверьев и др.), химической дифференциации их (К. П. Флоренский и др.), роли их в гидротермальном изменении пород и минералообразовании (С. И. Набоко, К. К. Зеленов, Л. М. Лебедев, Г. А. Карпов и др.), геологических позиций гидротермального процесса (В. И. Белоусов, Сугробов, Вакин и др.), энергетического эффекта гидротермальных систем и, наконец, практической геотермии. Было успешно дано теоретическое обоснование использования термальных вод Камчатки и Курильских островов в энергетике, теплофикации, сельском хозяйстве и химической промышленности. Всесоюзные совещания по геотермии в 1956 и 1964 гг. подвели итоги и определили направление геотермических исследований в СССР. Детальные опытные геотермические исследования на Паужетском месторождении положили начало новой отрасли в практике геологоразведочных работ и отечественной гидрогеологии. В течение 1958—1960 гг. на Паужетке Камчатским геологическим управлением было успешно освоено колонковое бурение при высоких температурах и совместно с Институтом вулканологии разработана методика исследования пароводяных скважин, создана специальная измерительная аппаратура. Разведаны и подсчитаны запасы пароводяной смеси, обеспечивающей геотермоэлектростанцию мощностью 5000 квт. Одновременно успешно проводятся работы по концентрированию отдельных компонентов для использования их в химической промышленности. Дальнейшими работами (В. В. Аверьев, Ковалев и др.) выявлены новые термальные поля в пределах Южной и Восточной Камчатки, перспективные для использования в народном хозяйстве.

Выявлены геологические позиции проявления гидротермальных процессов: приуроченность к вулканотектоническим депрессиям с локальными структурами поднятий типа брахиантиклиналей; приуроченность к областям развития молодого кислого вулканизма и локализация в вулканогенно-осадочных породах с водонепроницаемым горизонтом, перекрытым водоупором, или же в зонах разлома плотных пород (В. В. Аверьев, В. М. Сугробов, В. И. Белоусов, Е. А. Вакин и др.).

Определены температуры в недрах гидротермальных систем, превышающие  $200^{\circ}$  на глубине первого километра, тепловая мощность в пределах  $100\ 000$  ккал/сек, плотность теплового потока, превышающая в сотни раз средний кондуктивный тепловой поток, и продолжительность существования гидротермальных систем — в пределах до  $10\ 000$  лет (В. В. Аверьев и др.). Выдвинуто представление, что кислый вулканизм и гидротермальная деятельность являются следствием особой формы вулканизма, при которой главной причиной является перегретый водный флюид, а не силикатный расплав — магма (В. В. Аверьев).

Открыта и изучена современная формация гидротермальноизмененных пород со множеством минеральных фаций, имеющая аналоги в древних вулканических областях. Доказывается генетическое единство формаций пропилитизированных пород и вторичных кварцитов серно-кислотного ряда. Генетическое единство их определяется в основном физико-химическими особенностями гидротермальных растворов в субвулканических условиях глубинности. Доказывается, что ведущим элементом в этом процессе является вскипание и дегазация глубинных перегретых растворов в зонах разлома, миграция летучих по тектоническим нарушениям в положительные структуры и окисление серы в приповерхностных условиях (С. И. Набоко).

Разработаны критерии генетического типа рудоносной формации гидротермальноизмененных пород. Определены физико-химические параметры конкретных минералообразующих растворов и минералов в интервале глубин до километра, температур  $100$ — $200^{\circ}$  и среды от ультракислой до щелочной. Полученные параметры контролируют параметры, полученные при изучении естественных минеральных ассоциаций и газовожидких включений ископаемых минералов (С. И. Набоко, Г. А. Карпов).

### Вулканическая геология

Изучение современных вулканических процессов позволяет судить о процессах прошлого. На этой основе разработаны вопросы влияния типов извержений на формирование вулканогенных формаций и фаций. На основании анализа последних разработана методика картирования вулканических областей с реконструкцией вулканических аппаратов, типов вулканов и извержений, разломов, по которым поднималась магма, полей гидротермальноизмененных пород, что в общем позволяет делать прогнозы поисков полезных ископаемых (Е. Ф. Малеев, Э. Н. Эрлих и др.).

В. И. Влодавец, Л. Г. Кваша, Е. Ф. Малеев и др. предложили основы классификации пирокластических пород.

В результате сопоставления особенностей проявления магматизма на Кавказе и Камчатке доказано существование зон постоянной генерации магматических расплавов в течение последних  $30$  млн. лет. Зоны реализуются на поверхности вулcano-плутоническими процессами; плутонические фации и постмагматические процессы приурочены к ядрам положительных структур, а центры вулканизма располагаются на их склонах и обрамлениях (Ю. П. Масуренков).

На примере Курильской островной дуги подтверждена гипотеза Дж. Вильсона, Руби и др. о ведущей роли вулканизма при формировании земной коры, гидросферы и атмосферы (Е. К. Мархинин).