



УДК 553.43; 551.215;
550.81, 84

Д. Гуревич

SRK Exploration Services, Алматы, Казахстан;
dgurevich@srkexploration.com

Картирование купольно-кольцевых структур при поисках и разведке порфировых и эпитермальных месторождений

Эффективность геологоразведочных работ всех стадий, направленных на выявление вулканогенных месторождений или месторождений, связанных с интрузивным магматизмом, может быть значительно повышена за счёт систематического картирования Семейств Купольно-Кольцевых Структур (СККС). Концепция СККС, развиваемая автором, расширяет рамки структурного картирования и позволяет в минимальные сроки выделить металлоносный вулканический центр, определить и ранжировать места вероятной локализации оруденения. СККС рассматривается как структурно-морфологическое выражение интрузивно-вулканического центра. Подобные центры достигают 160 км в диаметре и располагаются над магматическими очагами, сформированными вблизи нижней границы коры восходящими надсубдукционными астеносферными потоками магмы, тепла, воды и летучих. Центры объединяются в цепочки, которые формируют вулканические пояса. Каждый центр включает в себя материнский нижнекоровый магматический очаг, промежуточные очаги разных уровней, питающие каналы, вулканические постройки, тектонические структуры. Семейство ККС объединяет все купольно-кольцевые структуры, сформированные в результате эволюции всех очагов данного центра. Каждый Центр обладает определённым металлогеническим потенциалом, который может быть оценён по структурным особенностям СККС и имеющимся поисковым данным. Комплексный анализ позволяет выделить СККС при разных уровнях эрозионного среза, в различных тектонических обстановках и ландшафтах. Картирование СККС позволяет выделить площадь, перспективную на определённый комплекс полезных ископаемых и участки для крупномасштабных ГРП.

Введение

С вулканической деятельностью связано формирование громадного числа месторождений полезных ископаемых. Многообразие геодинамических обстановок проявления вулканизма, различия в геохимической специализации и истории развития вулканических поясов, различный уровень эрозионного среза, обнажающий разные уровни рудообразования — всё отражается в огромном разнообразии типов месторождений. При этом каждое из них занимает определенное положение в материнской вулcano-тектонo-магматической системе, месторождения «вызревают» в структурах определённого ранга и положения. Подобные закономерности определяют возможность и эффективность применения системного структурно-морфологического подхода при металлогенических и поисково-разведочных работах. В настоящей статье автор ставил своей задачей показать, что концепция Семейств Купольно-Кольцевых Структур (СККС) позволяет расширить рамки структурного картирования и сделать его более систематическим. Концепция СККС опирается на многие идеи и разработки в области изучения вулcano-тектонических и интрузивных систем, рудно-магматических центров, кольцевых структур,

глубинных процессов в зонах субдукции. В настоящей работе обсуждаются механизмы образования СККС и рассматриваются примеры этих структур.

Кальдера, купол, купольно-кольцевая структура

Вулканические формы традиционно разделяются на «положительные» — купола и вулканические конусы и «отрицательные» — кратеры, кальдеры, депрессии, которые сочетаются в различных комбинациях [12]. Весьма характерны морфоструктуры, образованные концентрическими формами разного знака: купол — кальдера, вулканическая постройка — кратер. Такой ряд (от купола до кратера) можно наблюдать, например, в строении Уксичанской вулканоструктуры (рис. 1). Подобные образования логично обозначать термином «купольно-кольцевая структура» (ККС), который был введен А. В. Авдеевым и О. Н. Егоровым и развит Ю. П. Масуренковым [10]. Автор рассматривает ККС как поверхностное выражение вулcano-тектонических систем (ВТС). ВТС включает магматический очаг, его интрузивные и вулканические производные, а также генетически связанные с ними системы остаточных деформаций. ККС характерны и для вулcano-магматических (в которых преобладают интрузивные

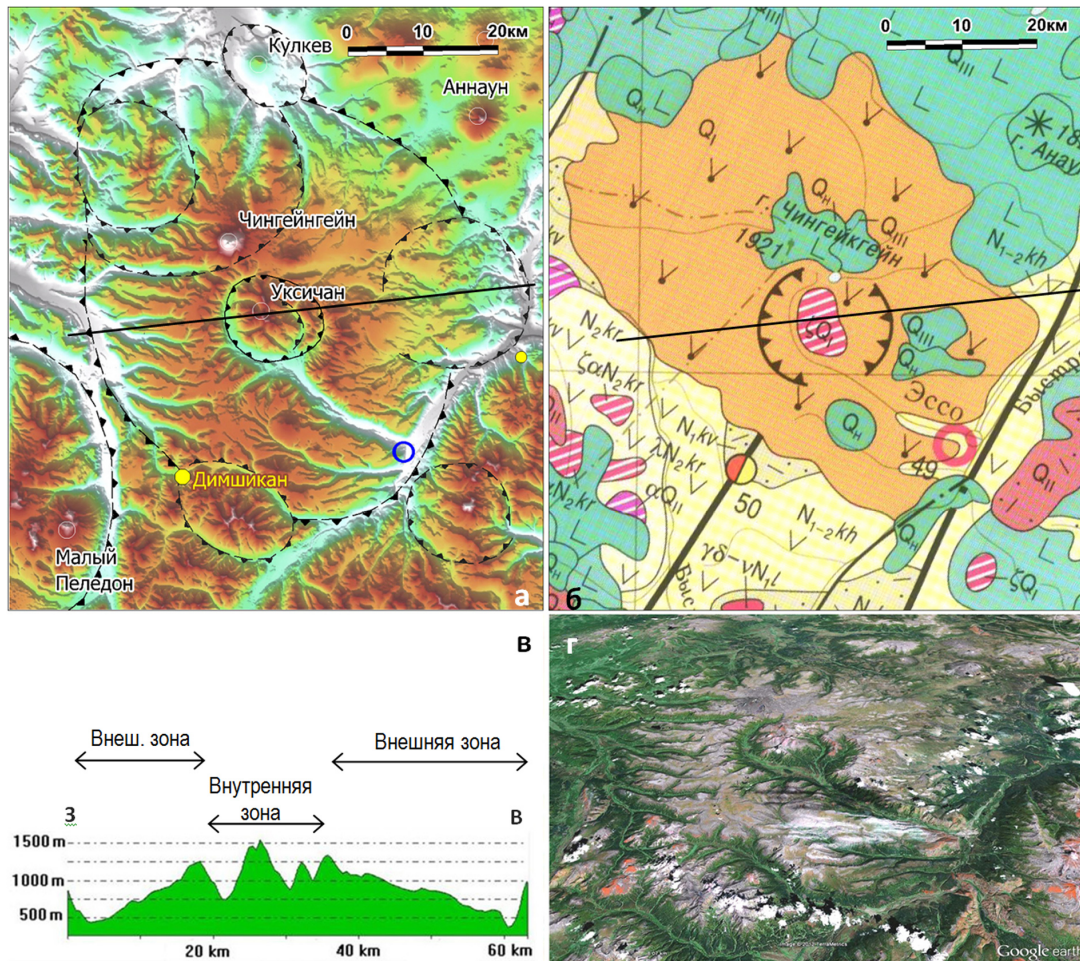


Рис. 1. Купольно-кольцевая структура Уксичан, Срединный хребет, Камчатка. а. Модель рельефа SRTM30 (показана линия высотного профиля, условные обозначения — на рис. 8). б. Фрагмент геологической карты Камчатки масштаба 1:1 500 000 (Н. Ф. Крикун и др., 2005 г.) в. Высотный профиль (по линии на рис. 1.а). г. Перспективный вид на ККС Уксичан с юга (снимок Landsat 7, Google Earth).

образования) и для интрузивно-тектонических систем (в которых вулканиды отсутствуют).

В первом приближении в строении ККС можно выделить две зоны — внутреннюю и внешнюю (рис. 1), а в её формировании — три стадии (рис. 2). В первую стадию (рис. 2.а) формируется магматический очаг и поднятие над ним. «Купольная геометрия» определяет формирование радиальной системы трещин, растущих от центра купола, то есть от места наибольших растягивающих напряжений. Вторая стадия охватывает основной период вулканической деятельности. Многократные инъекции магмы в резервуар (снизу) и отделение порций магмы и летучих (вверх и в стороны) изменяют давление в очаге и во всей магматической системе, формируя знакопеременное концентрическое поле напряжений и вызывая землетрясения, известные по наблюдениям за действующими вулканами и получившими название вулcano-тектонических [2]. Во внутренней зоне, вследствие изменения объёма очага, могут происходить локальные перемещения кровли. Во внешней зоне значительных подвижек

не происходит, но формируется определённая система остаточных деформаций; граница зоны примерно совпадает с границей купольного поднятия. Форма внутренней зоны в определённой мере зависит от формы магматического очага, по мере удаления от него поле деформаций, согласно принципу Гюйгенса, становится все более центрально-симметричным. В третью стадию поступление магмы прекращается, что, в совокупности с остыванием очага и отводом флюидов, инициирует падение давления и опускание кровли. При этом часть трещин преобразуется в кольцевой разлом, а на месте внутренней зоны образуется кальдера или (у крупных ККС с глубоким расположением очага) — депрессия.

Кольцевые разломы, ограничивающие внутреннюю зону ККС, могут падать к центру или от него, однако во всех случаях они остаются субвертикальными или крутопадающими [25]. Что касается внешней зоны, то, судя по результатам картирования многих сотен ККС, её видимые размеры могут варьировать в широких пределах. Судя по модели ККС, представленной на рис. 2, в наибольшей

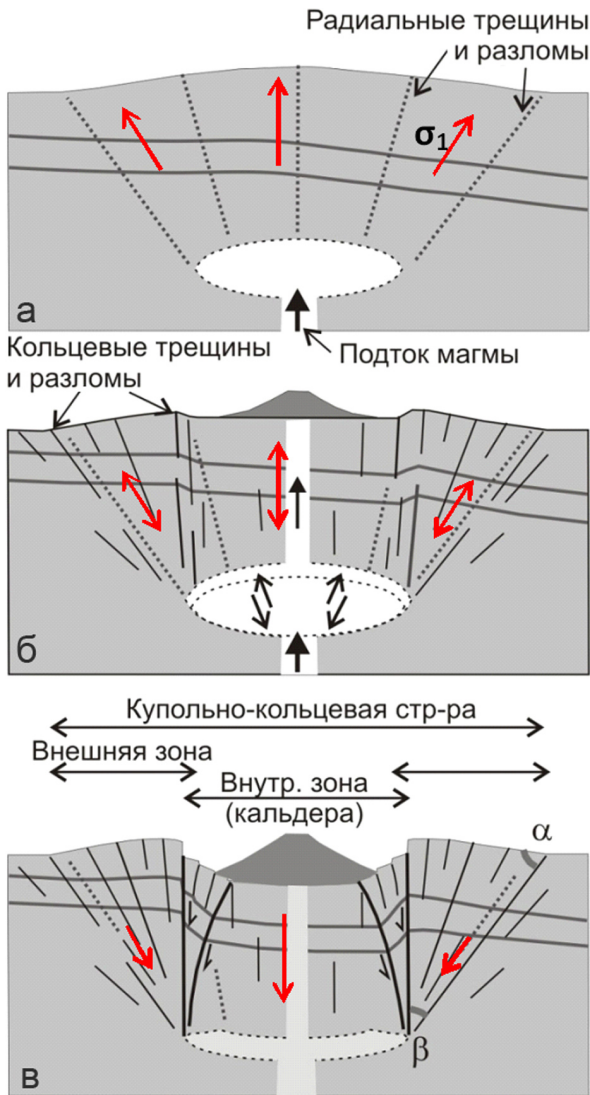


Рис. 2. Принципиальная модель формирования ККС в результате эволюции магматического очага. С использованием данных [6], [13], [23], [25], [27]. Показаны векторы наибольших главных напряжений (σ_1); α — угол смещения, β — угол впуска (angle of draw).

степени видимый размер определяется величиной эрозионного среза. Это следует и из сопоставления слабо и сильно эродированных вулканических центров: первые характеризуются широкой внешней зоной, диаметр которой может в три и более раз превышать диаметр внутренней зоны (рис. 1), у вторых внешняя зона может полностью отсутствовать (рис. 3). Размеры внешней зоны у разных структур могут различаться и безотносительно к величине эрозионного среза. Проявятся или нет в определенном месте деформации — это зависит от локальных прочностных свойств пород, от интенсивности и длительности воздействия, от траекторий распространения сейсмических волн, которые в свою очередь зависят от механизма возбуждения и от строения среды.

Трещины магматической системы рассматриваются обычно как цилиндрические (над очагом) и конические центриклинальные (во внешней зоне) трещины отрыва [13], при этом кольцевые разломы демонстрируют явные признаки сдвиговых перемещений [25, 27]. Это противоречие разрешается следующим образом (по [3]): любая запредельная деформация начинается с образования трещин отрыва; по мере развития деформаций трещины отрыва формируют кулисные зоны, выраженные тем лучше, чем выше активность флюидной фазы. Осевые плоскости зон располагаются под характерными «сколовыми» углами к направлению векторов наибольших главных напряжений, в случае продолжающихся деформаций по ним развиваются сколовые трещины и разрывы со смещением. Таким образом, можно ожидать, что, независимо от природы трещин, величина угла впуска (рис. 2) будет примерно соответствовать величине угла скола: от 20° до 45° при среднем около 30° .

Каждому этапу развития и каждому элементу ВТС соответствует определенное поле тектонических напряжений, которое формирует и изменяет свойства среды, делает её анизотропной и избирательно восприимчивой к типам и направлениям будущих воздействий. Анизотропия может проявиться практически сразу, определяя элементы залегания разломов или жил, или спустя миллионы лет — когда избирательная эрозия определит форму речной сети. Отметим, что развитие системы может замедлиться или остановиться на любой стадии, в результате могут возникнуть купол с радиальными трещинами (рис. 2.а), купол с радиальными и кольцевыми трещинами (2.б), ККС (2.с). Подобный ряд был установлен для вулканотектонических образований Венеры [26].

У многих купольно-кольцевых структур проявлено ритмически-зональное расположение кольцевых и радиальных разломов (трещин). Такой рисунок характерен для многих природных объектов — от разбитой тарелки до гигантских метеоритных кратеров [4]. Единой теории этого явления не существует, наиболее полно оно было рассмотрено в геомеханике (И. Е. Шемякин, М. В. Курленя, В. Н. Опарин и др. [14] и др.). Центрантно-симметричное поле деформаций достаточной силы и длительности формирует конформный центрально-симметричный структурный рисунок. Трещины, ориентированные вдоль двух наибольших главных нормальных напряжений (кольцевые и радиальные), разрастаются, прочие остаются неизменными или залечиваются. Каждая трещина разгружает напряжения в определённой области (области конечного размера), что обеспечивает пространственный ритм рисунка трещин. Аналогичным образом на более высоком иерархическом уровне (в достаточно крупных системах) остаточные напряжения собираются в зоны трещиноватости или разломы. Если геометрия системы изменяется мало и источник более поздних

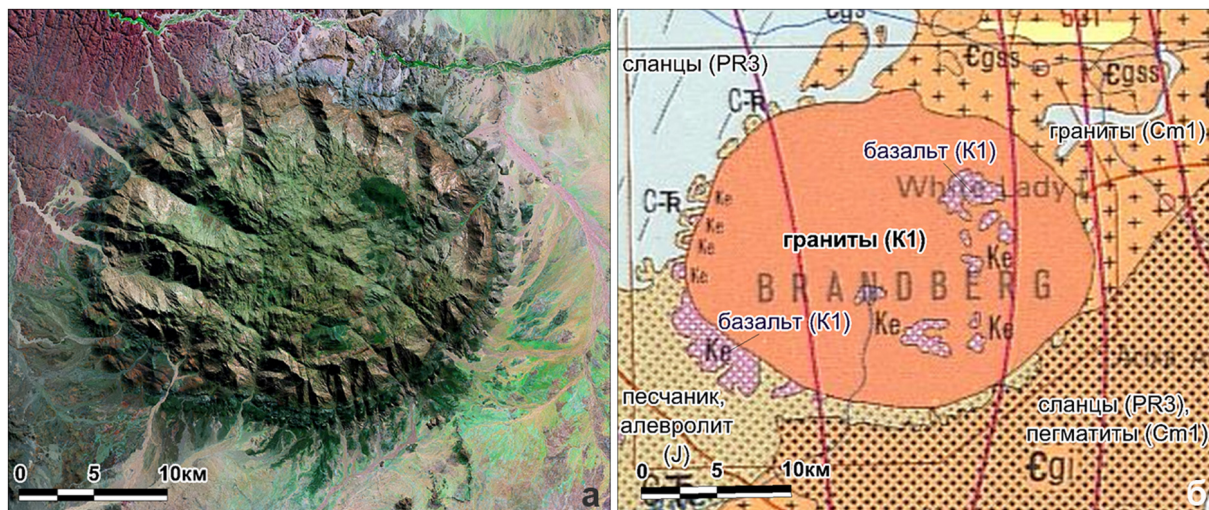


Рис. 3. Массив Брандберг, Намибия — пример глубоко эродированной интрузивно-вулканической системы и ККС без внешней зоны. а. Снимок Ландсат 7. в. Фрагмент геологической карты Намибии масштаба 1:1000 000 (Геологическая служба ЮАР, 1980 г.). Гранитный массив сформирован на месте очага интрузивно-магматической системы, эродированной до глубины 5 км [29].

деформаций располагается вблизи местоположения начального источника, эти же зоны концентрируют и более поздние напряжения, тем самым обеспечивая сохранность узора. В нашем случае источники напряжений располагаются в пределах внутренней зоны ВТС. На некотором удалении от неё поле будет оставаться осесимметричным, то есть центрально-симметричным на любом горизонтальном срезе. Трещины, сформировавшиеся на ранних этапах развития ВТС, будут поглощать более поздние напряжения, что и обеспечит развитие и сохранность радиально-кольцевого рисунка.

Отметим, что ритмичный центрально-симметричный узор может быть сформирован при мгновенном (ударном, взрывном) и при долговременном воздействии. В обоих случаях определяющими факторами являются симметрия среды и ритмичная разгрузка напряжений. В обоих случаях форма источника воздействия имеет значение только в ближней зоне.

Семейство ККС как морфологическое выражение вулканического центра

Семейство ККС — это морфологическое выражение крупного (20–160 км в диаметре) и долгоживущего (до первых десятков миллионов лет) вулканического центра (кластера, комплекса), объединяющего до десяти и более вулканов и кальдер. Такие центры были описаны для вулканических поясов Камчатки (Э. Н. Эрлих [19], С. Н. Балеста, Ю. П. Масуренков [10, 11], О. Н. Егоров, В. Л. Леонов и Е. Н. Гриб [8] и других регионов (В. Ф. Белый, Г. М. Фремд, Н. Williams, R. A. Bailey, T. Yoshida, W. Hildreth, А. П. Светов [15] и др.). Обособленные ККС, по-видимому, достаточно редки. Так и структуру Уксичан (рис. 1) следует рассматривать скорее как Семейство ККС, поскольку она осложнена ККС меньшего размера, расположенными по периферии

внешней зоны. Пример более развитого Семейства ККС представляет собой морфологическое выражение Карымского вулканического центра (рис. 4), который был ранее выделен и описан как целостное образование — «элементарная ячейка вулканического пояса» [11]. Здесь может быть выделено не менее четырёх поколений ККС, последовательное формирование которых находит отражение и в структуре, и в истории геологического развития.

По результатам картирования СККС в различных регионах (по публикациям и данным автора) можно заключить, что их диаметр может превосходить 160 км. Это лишь немного больше, чем размеры наиболее крупных «простых» вулканических форм, таких как кальдера Тоба на Северной Суматре (30 × 100 км). Это существенно меньше, чем размеры купольно-кольцевых структур на Венере, которые изменяются от 100 до 2600 км [26] или земных купольных поднятий над плюмами, диаметры которых достигают 1000 км и более [5]. Таким образом, СККС не являются «чрезмерно большими» и их происхождение, по мнению автора, может быть объяснено с тех же позиций, что и происхождение «простых» ККС, то есть как результат эволюции магматических очагов.

Механизмы формирования вулканических центров

Существование обособленных вулканических центров хорошо согласуется с результатами недавних геофизических исследований, посвящённых процессам в зоне субдукции и базирующихся на сейсмических данных и результатах численного моделирования (D. Zhao, Y. Tamura [34], P. M. Kelemen, G. Zhu и другие). В результате дегидратации материала погружающейся плиты выделяются летучие и вода, которые, смешиваясь с веществом астеносферного клина, понижают температуру его плав-

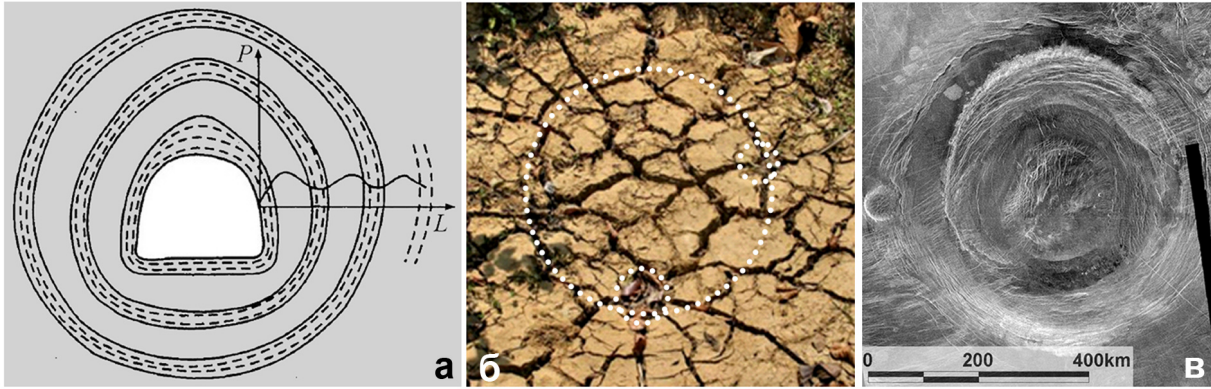


Рис. 4. Системы с ритмически-зональным узором трещин. а. Концентрически-зональное расположение областей дезинтеграции вокруг подземной выработки. P – величина горного давления, L – расстояние от стенки камеры; по В. М. Курленя, 1999 (по [14]). б. Глина на дне высохшей ямы; выделены внутренние зоны главной и двух малых «кальдер»; ширина ямы – около 1,5 м. в. Структура типа Корона, Венера (интрузивно-вулканический центр Арамати). Монтаж радарных снимков аппарата Магеллан, 1991 (по материалам NASA).

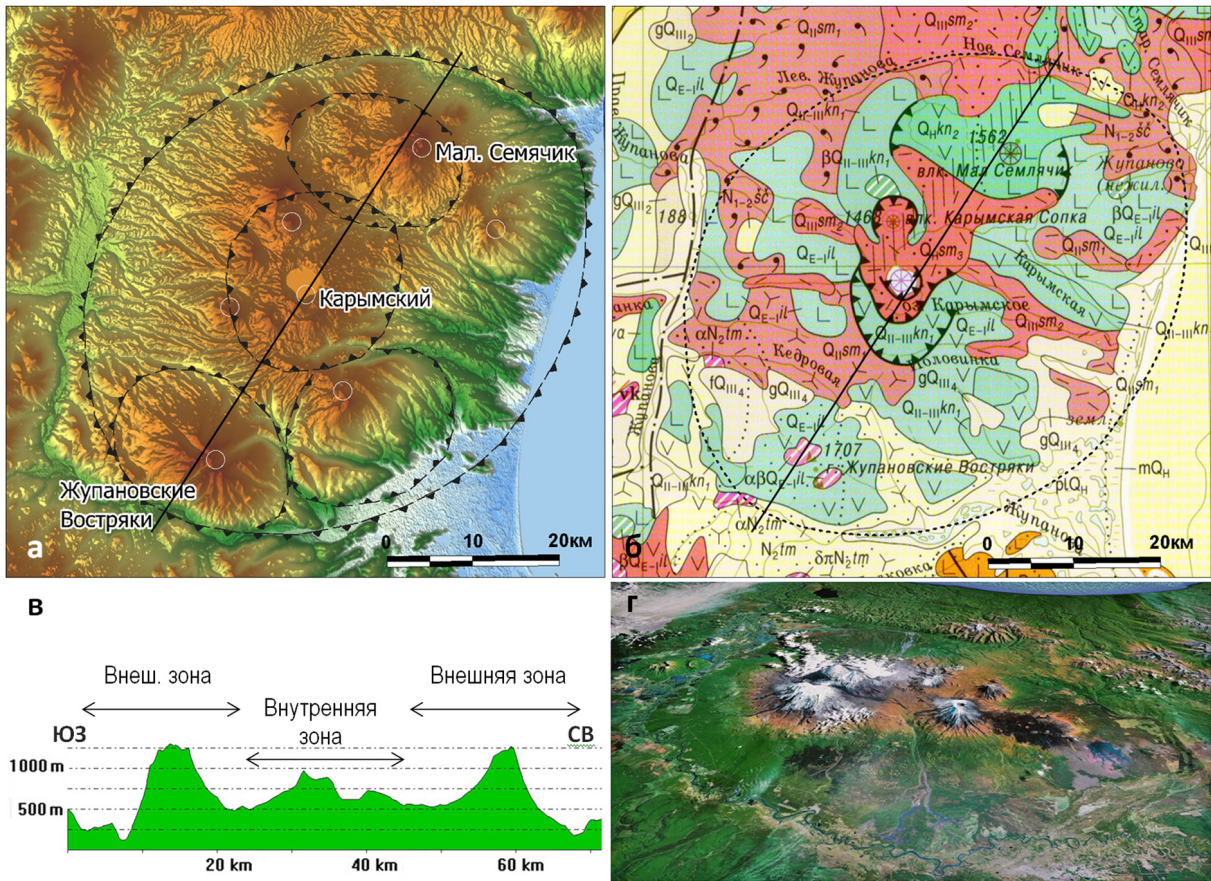


Рис. 5. Семейство ККС Карымского вулканического центра, Восточный хребет, Камчатка. а. Модель рельефа SRTM30 (показана линия высотного профиля). б. Фрагмент геологической карты Камчатки масштаба 1:1 000 000 (2006 г., ФГУП «Камчатгеология»). в. Высотный профиль (по линии на рис. 1.а). Перспективный вид на Карымский вулканический центр с запада (снимок Landsat 7, Google Earth).

ления и плотность, формируя восходящие потоки вещества и энергии. По мере подъема потоки концентрируются в изометричные в плане диапиры, что объясняется энергетическими преимуществами упорядоченного (струйного) течения. Эти диапиры получили название «горячих пальцев» [34] или плю-

мов 4-го рода [5]. Диапиры объединяются в цепочки, ориентированные вдоль зон субдукции.

Так как плотность коры существенно меньше, чем плотность астеносферы, при достижении её подошвы восстающий поток должен замедлить движение или остановиться, поскольку резко уменьшится

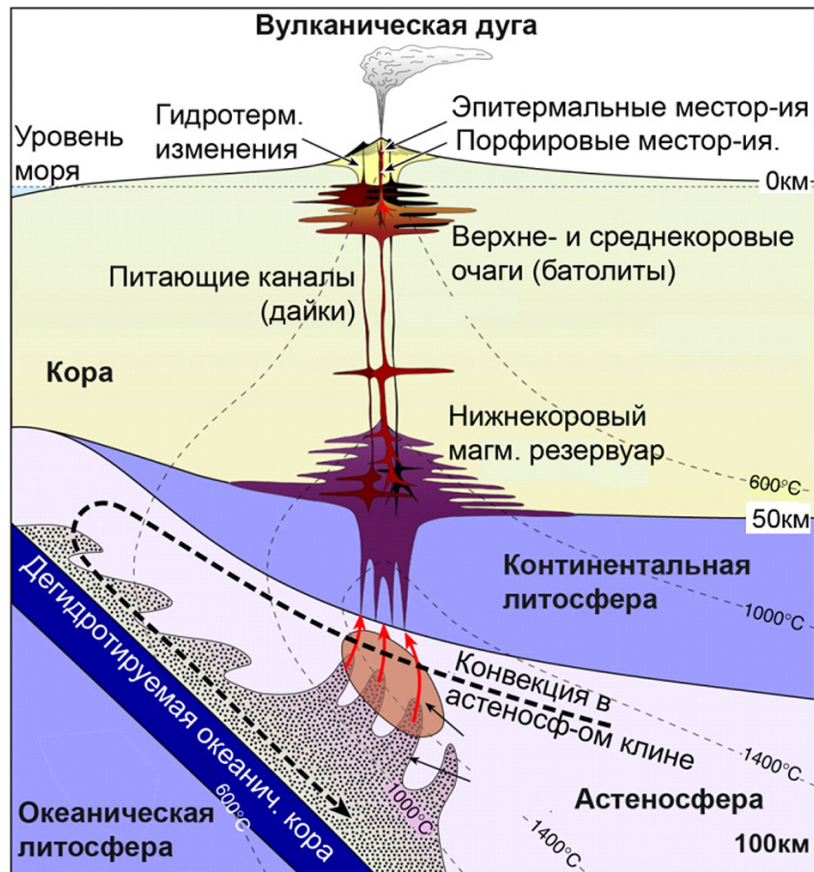


Рис. 6. Генерализованный разрез через краевой вулканический пояс, показывающий развитие материнского очага в подошве коры. J. P. Richards, 2011 [30].

действующая на него сила Архимеда. Продолжающееся поступление магмы, воды и тепла будет поддерживать разрастание очага в стороны. В конечном итоге этот процесс должен привести к формированию крупного нижнекорового магматического очага базальтового состава, в котором будет происходить выплавление андезитовых магм (W. Hildreth, W. S. Fyfe, C. Annen [21], J. P. Richards [30]). Более лёгкие андезитовые магмы продолжают путь вверх до поверхности и (или) до плотностного раздела, где возникнет следующий очаг. Дифференциация в этом (дочернем) очаге приведет к отделению ещё более кислых и лёгких магм, которые продолжают подъём до следующего раздела и т. д. Таким образом, над диапиром будет образована серия очагов и вулканов, соединённых питающими каналами, то есть *магматическая колонна*; верхняя часть колонны вместе с продуктами извержений и тектоническими структурами соответствует *вулканическому центру*; цепочка диапиров сформирует цепочку вулканических центров или *вулканический пояс*.

Важнейшую роль играет при этом содержание воды и соотношение гидростатического и литостатического давлений. Промежуточные очаги образуются там, где давление жидкости, заключённой в поднимающемся расплаве-растворе, превосходит внешнее давление пород. Очаг формируется за счёт рез-

кого увеличением объёма при быстром отделении газовой-жидкой фазы и её активного взаимодействия с вмещающими породами. Это происходит на глубинах тем больших, чем больше воды и летучих в магме. По Н. И. Селивёрстову [16] «при 10%-ном содержании воды и температуре 1100° С андезитобазальтовые магмы выделяют свободный водный флюид начиная с глубин около 25 км, а при содержании 3% — с глубин менее 5 км». Поскольку содержание воды определяет интенсивность «производства» андезитов [21], [30], «влажные» магматические системы должны быть более активными и формировать более крупные очаги.

Развитие системы восходящих потоков магмы и флюидов отражается в формировании зон низких скоростей и роев разноглубинных землетрясений (Е. И. Гордеев, В. И. Горельчик и В. Т. Гарбузова [2]; A. Špičák [32], J. M. Leeset и др.). Такие землетрясения группируются в «сейсмические колонны» [32], которые начинаются с глубин около 100 км, достигая максимальной активности на глубинах 50–30 км и выше, то есть примерно на уровне подошвы коры — уровне формирования материнского магматического резервуара. Источник сейсмической активности может быть связан как с общей динамикой изменения давления в магматической системе, так и с отделением флюидной фазы, в результате ко-

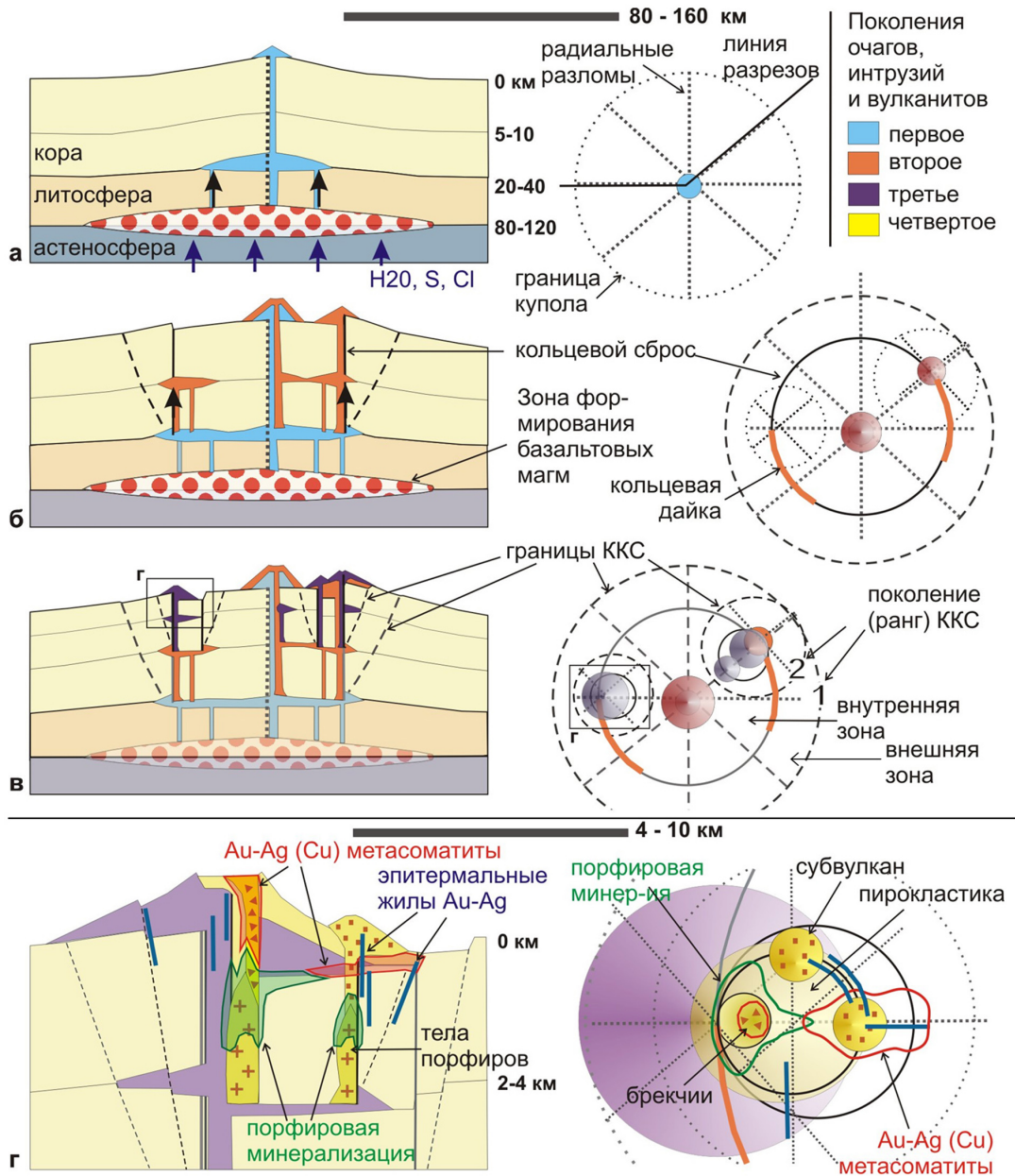


Рис. 7. Модель развития надсубдукционного вулканического центра, его СККС, порфирового и эпитермального оруденения. По [5], с использованием [6], [7], [8], [31], с дополнениями.

того «вся многокилометровая магматическая колонна может являться источником многочисленных сейсмических событий с динамическими характеристиками ГДП-землетрясений» [16]. «Суммарная» тектоно-магматическая колонна, в течение миллионов лет оставаясь на одном месте, может сформировать в окружающем пространстве осесимметричный рисунок деформаций, центрально-симметричный на горизонтальных срезах и продолжающий вверх рисунок внешней зоны материнского очага.

Позиция эпитермального и порфирового оруденения в модели СККС

На рис. 7 представлена принципиальная модель формирования Семейства ККС в результате воз-

действия плюма на слоистую литосферу. Модель рассматривает несколько этапов, каждый из которых связан с формированием и эволюцией магматических очагов одного поколения. Полный цикл начинается с образования материнского очага и заканчивается с опусканием кровли последнего магматического резервуара. С большой долей условности могут быть выделены следующие стадии (рис. 7):

1. формирование структур 1-го ранга (поколения) — глубинного очага и поднятия с радиальными разломами, контролирующими инициальный магматизм (рис. 7.а);

2. уменьшение мощности начального очага (остывание, релаксация) приводит к проседанию кровли и формированию кольцевых сбросов. Опускающая-

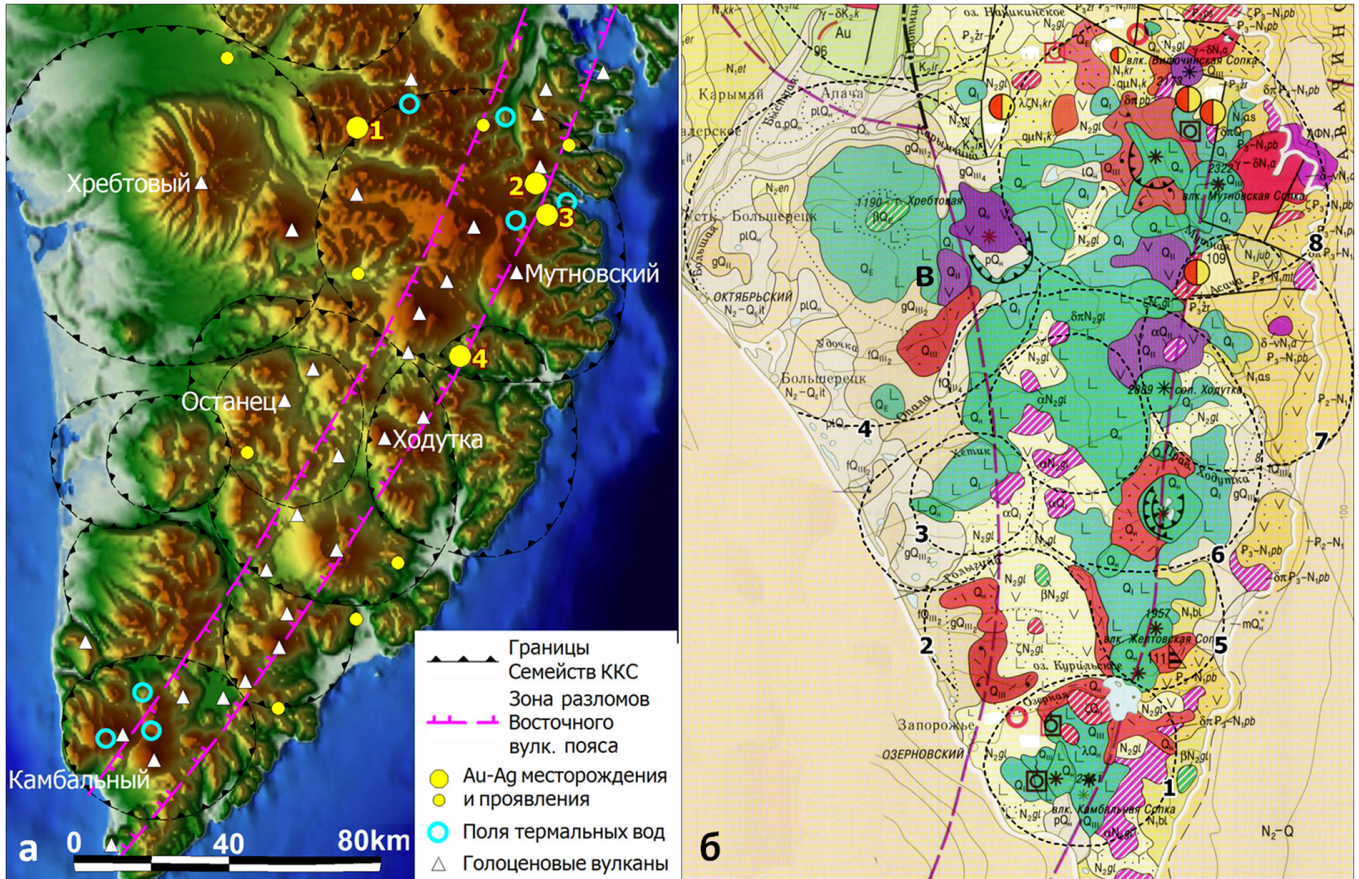


Рис. 8. Восточно-Камчатский Вулканический пояс как цепочка Семейств ККС. а.: Цифровая модель рельефа. б.: Фрагмент геологической карты Камчатки масштаба 1:1 500 000 (Н. Ф. Крикун и др., 2005 г.) с контурами СККС. Золото-серебряные месторождения (на рис. 5.а): 1 – Порожистое, 2 – Родниковое, 3 – Мутновское, 4 – Асачинское. Семейства ККС или вулканические центры (на рис. 5.б): 1 – Паужетка, 2 – Галыгина, 3 – Хетик, 4 – Хребтовый, 5 – Желтовский, 6 – Останец, 7 – Ходутка, 8 – Метновка. С использованием [8] и [10].

яся кровля выдавливает магму в стороны и вверх (вдоль кольцевых разломов). Вблизи пологих литологических границ формируются промежуточные очаги 2-го поколения и соответствующие поднятия. Завершается формирование ККС 1-го ранга (рис. 7.б);

3. эволюция промежуточных очагов инициирует образование следующего (3-го) поколения очагов, интрузий, вулканитов и кольцевых структур. На поверхности завершается формирование ККС 2-го поколения (рис. 7.в);

4. эволюция очагов 3-го поколения, образование ККС 3-го и 4-го поколений (рис. 7.в, 7.г).

Модель ограничена рассмотрением четырёх поколений структур, хотя, судя по результатам картирования СККС в районах с мощной континентальной корой, развитие может идти до структур пятого и шестого поколений. Присутствуют и другие допущения, например, принято, что все очаги одного поколения находятся на одном уровне. В то же время, модель отражает многие существенные особенности СККС, включая расположение порфировых и эпитермальных месторождений в пределах дочерних ККС, находящихся вблизи кольцевого раз-

лома, ограничивающего внутреннюю зону материнской ККС и образующих характерные «орбитальные структуры» [1].

Опираясь на ранее сделанные выводы о механизмах формирования вулканических центров, можно предположить, что металлогенетическая специализация центра должна быть обусловлена геохимическим составом подстилающей астеносферы, количеством воды и летучих, участвующих в формировании диапира, составом пород коры и интенсивностью процессов их ассимиляции, дифференциацией в магматических очагах. Особую роль при этом должен играть материнский очаг системы: протекающие в нём процессы сепарации и перемешивания вещества могут определить общую геохимическую специализацию всех интрузивных и вулканических пород центра. Процессы дифференциации в других очагах, образующихся по мере подъёма главного фронта магмообразования, должны действовать все более локально и контрастно, в благоприятных условиях приводя к формированию экономически-значимых концентраций. Эти соображения подтверждаются тем, что рудоносные вулканические центры обладают хорошо выраженными и развитыми се-

местами ККС: чем больше поколений, тем выше степень дифференциации вещества и тем больше шансов для формирования месторождений (однако слишком большое количество дочерних структур может, по-видимому, снизить шансы формирования крупных месторождений). Как было отмечено ранее, наличие крупного и развитого СККС может свидетельствовать о повышенной концентрации воды, что также способствует гидротермальной деятельности и рудогенезу. Наконец, присутствие хорошо проявленных разноранговых ККС с широкими внешними зонами говорит о слабой эродированности центра, что благоприятно для сохранности малоглубинных месторождений. Эти достаточно общие рассуждения приобретают вполне конкретный смысл при картировании СККС определённого центра. Ниже рассматриваются два примера СККС с золото-серебряными месторождениями, расположенных в молодых вулканических поясах Камчатки и Новой Зеландии; ранее были даны описания Кимитинской структуры (Центральная Камчатка) [4] и серии СККС Охотско-Чукотского вулканического пояса [5].

Восточный вулканический пояс, Южная Камчатка: цепочки СККС

Как было показано ранее, в структурно-геоморфологическом отношении вулканические пояса представляют собой цепочки СККС, при этом каждый из центров может отличаться особой историей развития, строением, металлогенией. Месторождения располагаются только в некоторых центрах, слабо или умеренно эродированных, характеризующихся сложным геологическим строением и развитыми СККС. В качестве примера можно рассмотреть СККС Юга Камчатки, выделенные автором с использованием комплекса дистанционных данных, мелкомасштабных геологических карт, карт кольцевых структур СССР В. В. Соловьёва (1981 г.) и В. Н. Брюханова и др. (1982 г.), схем, представленных в работах Ю. П. Масуренкова [10], Э. Н. Эрлиха [19], В. Л. Леонова и Е. Н. Гриб [9]. Из семи вулканических центров, показанных на рис. 8, только два имеют активные гидротермальные поля и только один из них, Мутновский (обладающий наиболее сложным геологическим строением), вмещает промышленные месторождения Au и Ag. При этом через оба центра проходит центральная часть зоны глубинных (магмоподводящих) разломов вулканического пояса.

Рудный узел Вайхо: СККС слабо эродированного вулканического центра

Вулканический центр Вайхо расположен на полуострове Коромандел, в северной части Северного острова Новой Зеландии. Он входит в цепочку центров северо-западного простираения, расположенную параллельно зоне субдукции миоценового возраста, и контролирует одноименный рудный узел. В пределах центра выявлено 30 проявлений Au и Ag, преимущественно жильного адуляр-кварцево-

го эпitherмального типа. Крупнейшее месторождение — Вайхи (208 т Au и 1310 т Ag) разрабатывается с 1862 г. по настоящее время [22]. Рудный узел Вайхо может рассматриваться как один из наиболее богатых и хорошо изученных золоторудных узлов, связанных с вулканизмом.

Породы вулканического центра сформировались в период между 18 и 2 млн л. н., при этом большая часть Au-Ag проявлений была сформирована между 6,9 и 6,0 млн лет [22]. Элементы купольно-кольцевых структур данного центра в значительной мере скрыты под неэродированными покровами пирокластики и современными маломощными осадочными отложениями, поэтому для картирования СККС наряду с имеющимися дистанционными и геологическими данными использовались геофизические материалы, заимствованные из публикации [28]. Анализ имеющихся данных позволяет заключить, что пространственное расположение месторождений определяется следующими факторами:

1. рудовмещающий комплекс (подгруппа Вайвава, 6,9–6,0 млн лет), представленный лавами и субвулканическими телами андезитов, дацитов и риолитов, а также туфами и игнимбритами; широко развиты аргиллизация и окварцевание;
2. внутренняя зона материнской ККС (включая кольцевой разлом);
3. граница внутренней зоны (зона кольцевого разлома);
4. дочерние ККС, в первую очередь — ККС Вайхи;
5. грабен Каранан;
6. радиальные разломы материнской и дочерних ККС.

Указанные факторы и их взаимодействие контролируют расположение практически всех проявлений золотосеребряной минерализации. Первый и, возможно, второй факторы являются обязательными, другие могут сочетаться в разных вариантах, при этом обязательно участие (пересечение) не менее чем двух факторов. Несмотря на более чем 150-летнюю историю изучения и отработки месторождений данного центра, как самостоятельная единица он не исследовался. Поэтому даже предварительное картирование купольно-кольцевых структур, произведенное автором, позволяет выделить новые перспективные площади и объекты для постановки ГРП и (или) крупномасштабного картирования. Речь, во-первых, идёт о западной части СККС Вайхо, перекрытой пострудными отложениями. Во-вторых, о дочерних структурах, таких как ККС Танаити, сходных со структурами с выявленным промышленным оруденением. В-третьих, о недоизученных проявлениях Au-Ag минерализации, таких как Охароа, которые располагаются в структурных позициях, сходных с позициями крупных месторождений.

Список литературы

1. Василевский М. М., Тарасенко Т. В., Харченко Ю. И. Вулканы как индикаторы долгоживущих магмати-

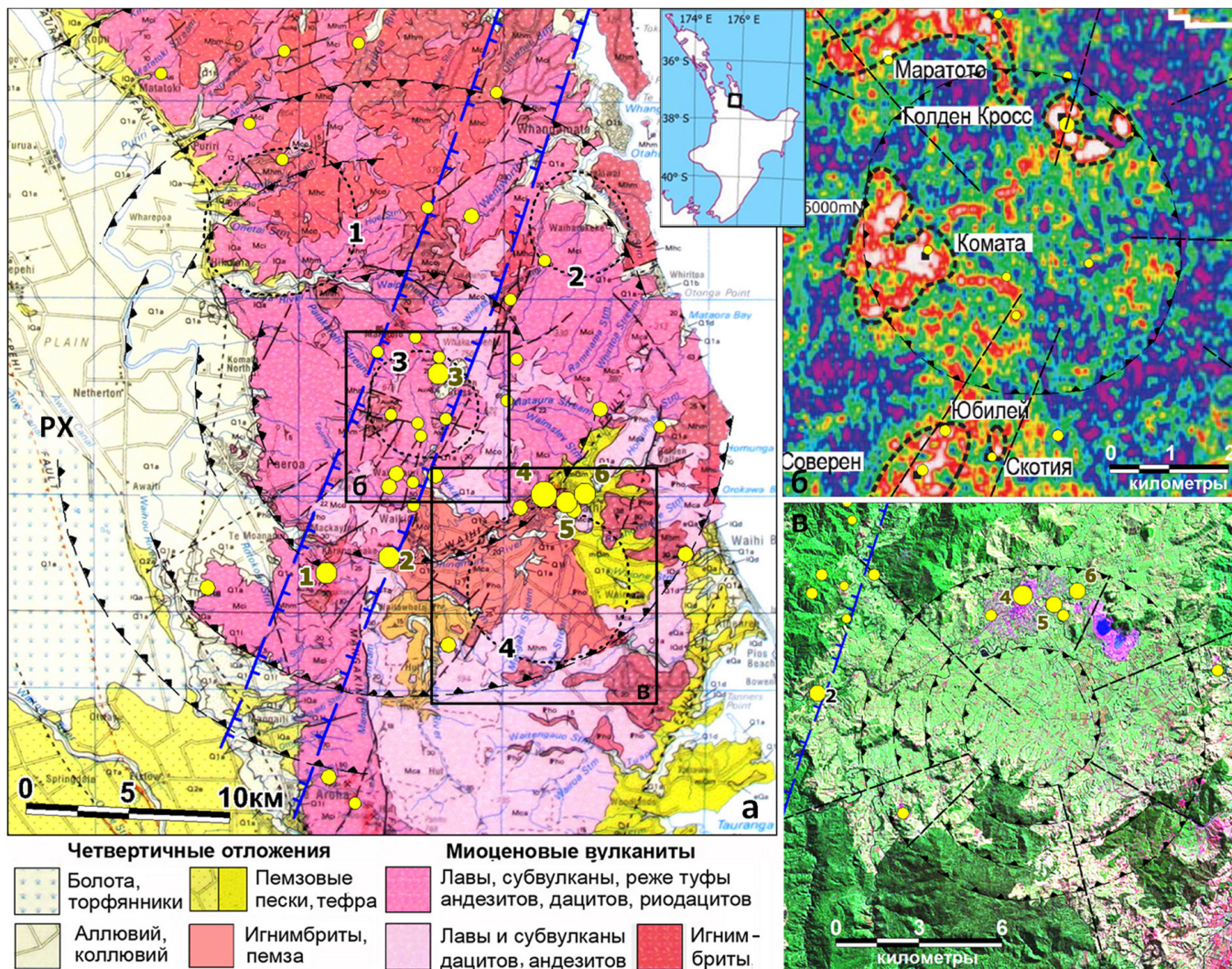


Рис. 9. Вулканический центр Вайхо, п-ов Коромандел, Северный остров, Новая Зеландия. а.: Фрагмент геологической карты масштаба 1:250 000 (GNS, 2001) с Au-Ag проявлениями (по [22]) и элементами СККС. Дочерние структуры: 1. ККС Хикутайа, 2. Кальдера Танаити; 3. Кальдера Голден Кросс; 4. ККС Вайхи. ТК — тренд Каранан; РХ — рифт Хаураки. Месторождения: 1. Карангахакке; 2. Охароа; 3. Голден Кросс; 4. Вайхи; 5. Юнион Хилл; 6. Фавона. б.: Кальдера Голден Кросс на карте ореолов калия (с использованием данных А. Е. Morell et al. [28]). в.: ККС Вайхи на снимке Landsat 7.

ческих и металлогенических центров. Геодинамика, магмообразование и вулканизм. Петропавловск-Камчатский, 1974. С. 168-174.

2. Горельчик В.И., Гарбузова В.Т.. Сейсмичность Ключевского вулкана как отражение его современной магматической деятельности. Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001.
3. Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С. Введение в тектонофизику. М.: Книжный дом Университет, 2005. 496 с.
4. Гуревич Д.В. Кольцевые структуры: важнейшие механизмы образования // Региональная геология и металлогения, № 39. СПб, 2010. С. 14-23.
5. Гуревич Д.В. Семейства купольно-кольцевых структур как результат деятельности мантийных плюмов // РГиМ, № 43. СПб, 2010. С. 65 — 74.
6. Дьяконов В.В. Медно-порфировые месторождения условия локализации и поиска. М.: Изд-во РУДН, 2010. 24 п.л.
7. Ежов Б.В., Худяков Б.И. Морфотектоника геодинамических систем центрального типа. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. 129 с.
8. Кривцов А.И. Геологические основы прогнозирования и поисков медно-порфировых месторождений. М.: Недра, 1986. 256 с.
9. Леонов В.Л., Гриб Е.Н. Структурные позиции и вулканизм четвертичных кальдер Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2004. 189 с.
10. Масуренков Ю.П., Комкова Л.А. Геодинамика и рудообразование в купольно-кольцевой структуре. М.: Наука, 1978. 288 с.
11. Масуренков Ю.П. (ред.). Вулканический центр: строение, динамика, вещество (Карымская структура). М.: Наука, 1980. 292 с.

12. Мелекесцев И. В. Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 212 с.
13. Невский В. А. Трещинная тектоника рудных полей и месторождений. М.: Недра, 1979. 147 с.
14. Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Розенбаум М. А. и др. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок. Новосибир.: Изд-во СО РАН, 2008. 278 с.
15. Светов А. П., Свириденко Л. П. Центры эндогенной магматической активности и рудообразования Фенноскандинавского щита. Петр-ск: Карел. центр РАН, 2005. 357 с.
16. Селивёрстов Н. И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с.
17. Щепотьев В. М., Вартаная С. С., Орешин В. Ю., Гузман Б. В. Золоторудные месторождения островных дуг Тихого океана. М.: ЦНИГРИ, 1989. 237 с.
18. Фаворская М. А., Томсон И. Н. и др. Глобальные закономерности размещения крупных рудных месторождений. М.: Недра, 1974. 192 с.
19. Эрлих Э. Н. Современная структура и четвертичный вулканизм западной части тихоокеанского кольца. Новосибирск: Наука, 1973.
20. Юшманов В. В. Тектоно-магматические концентрические комплексы. М.: Наука, 1985. 235 с.
21. Annen, C., Blundy, J.D., Sparks, R.S.J. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones. *J. of Petrology*, 2006. Vol. 47, P. 505-539.
22. Christie A. B., Simpson M. P., R. Brathwaite, et al. Epithermal Au-Ag and Related Deposits of the Hauraki Goldfield, Coromandel Volcanic Zone, New Zealand. *Econ. Geol.* 2011. Vol. 102, P. 785-816.
23. Cole J. W., Milner D. M., K.D. Spinks. Calderas and caldera structures: a review. *Earth-Science Reviews*, 2005. Vol. 69, P. 1-26.
24. Elston W. E. Siliceous Volcanic Centers as Guides to Mineral Exploration: Review and Summary, 1994. *Economic Geology*. Vol. 89, P. 1662-1686.
25. Gudmundsson A., Nilsen K. Ring-faults in composite volcanoes: structures, models and stress fields associated with their formation. Geological Society, London, Special Publications, 2006. Vol. 269; P. 83-108
26. Krassilnikov A. S. Tectonics and Evolution of Novae and Coronae on Venus: Tectono-physical Modeling Based on Gravitational Models. *S.S.R.*, Vol. 36, No. 4, 2002, P. 293-321.
27. Martí J., A. Geyer, Folch A., Gottsmann J. A Review on Collapse Caldera Modelling. In: Martí J., J. Gottsmann (eds). *Developments in Volcanology*. Vol. 10, 2008, P. 233-283.
28. Morell A. E., Locke C. A., J. Cassidy et al. Geophysical Characteristics of Adularia-Sericite Epithermal Au 0Ag Deposits in the Waihi-Waitekauri Region, New Zealand. *Economic Geology*, 2011. Vol. 106, P. 1031-1041
29. Raab M. J., Brown R. W. Gallagher K. et al. Denudational and thermal history of the Early Cretaceous Brandberg and Okenyenya igneous complexes. *TECTONICS*, 2005, Vol. 24, TC3006.
30. Richards J. P. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins. *Ore Geology Reviews*, 2011, Vol. 40, P. 1-26.
31. Sillitoe R. H. Porphyry Copper Systems // *Economic Geology*, 2010. Vol. 105, P. 3-41.
32. Špičák A., Jiří V., Václav H. Seismically active column and volcanic plumbing system beneath the island arc of the Izu-Bonin subduction zone. *Geophys. J. Int.* 2009. Vol. 179, P. 1301-1312.
33. Tamura, Y., Y. Tatsumi, D. Zhao et al. Hot fingers in the mantle wedge: new insights into magma genesis in subduction zones, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002. Vol. 197, P. 105-116.
34. Williams, Howell Alexander R. McKinney. *Volcanology*. Freeman Cooper Co., 1979, P. 397.