

И. ОБЩАЯ, РЕГИОНАЛЬНАЯ И ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ; ЛИТОЛОГИЯ

УДК 552.2.01:550.4

С.Г. Паняк

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ РУДОНОСНОСТИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОД ПО ДАННЫМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Метаморфогенные и магматогенные месторождения на Урале описаны достаточно детально, однако до настоящего времени не разработаны надежные критерии оценки их потенциальной рудоносности. Такая возможность появляется в связи с полученными результатами математического моделирования динамики геохимических процессов, позволяющими восстанавливать направленность миграции вещества, которая, в свою очередь, представляет возможность оценить концентрацию компонента в продуктах начала и конца кристаллизации.

Проблеме поиска источника рудного вещества при петрогенных процессах, разработке коэффициентов распределения полезного компонента в них посвящен ряд специальных работ автора [2, 3, 4, 5, 6]. Однако теоретические основы оригинального расчета коэффициентов распределения химических элементов и соответственно металлогенической оценки продуктов петрогенных процессов были разработаны для эффузивных пород Л.Н. Овчинниковым (1976). В основу этих расчетов положены определения концентрации химического элемента на начальных стадиях процесса (кристаллической фазе порфириновых вкрапленников) и конечных (в вулканическом стекле) с целью прослеживания его способности к накоплению или рассеиванию в начальных и конечных продуктах кристаллизации. Такая редкая возможность проследить поведение компонента на разных стадиях формирования породы возникает для эффузивных пород при наличии хорошо выраженных вкрапленников на фоне основной массы. Раздельное изучение концентрации химических элементов в отмеченных фракциях позволило Л.Н. Овчинникову обнаружить ряд закономерностей, предложить механизмы расчета коэффициентов распределения [1].

Полученные автором результаты, позволяющие оценивать термодинамическую и кристаллизационную активность компонентов по ходу всего порообразующего процесса, резко расширяют возможности методики Л.Н. Овчинникова. Сейчас открываются возможности для оценки потенциальной рудоносности не только эффузивных пород с порфириновой структурой, но и полнокристаллических пород, как магматических, так и метаморфических.

Раньше на большом и представительном статистическом материале автором было доказано, что при получении регулярных (описываемых математическими уравнениями) кривых распределений тех или иных химических элементов модальным значениям можно придавать определенный термодинамический смысл. Эмпирические распределения можно рассматривать как характеристику вероятностного состояния систем, а модальные значения в них - как наиболее вероятное, оптимальное состояние, т.е. такое, к которому стремятся системы.

Для метаморфических пород, формирование которых протекает на фоне возрастающей температуры, модальные значения достигаются в конце процесса. Они могут располагаться как в области низких концентраций (распределение с правосторонней асимметрией, в т. ч. логнормальные), так и в области высоких (распределения с левосторонней асимметрией).

Несколько по-иному следует интерпретировать эмпирические кривые распределения для магматических пород. В противоположность относительно открытым метаморфическим системам, магматические резервуары следует рассматривать как относительно закрытые. Кристаллизация в них происходит на фоне падающей температуры, а химический состав первых порций твердой фазы тесно коррелируется с химизмом расплава. Здесь оптимальные состояния системы могут фиксироваться только на кратковременном этапе начала кристаллизации, когда устойчивые для данных Р-Т-условий минералы имеют возможность извлекать из расплава необходимое количество химического компонента. В случае, если содержание компонента в первых порциях твердой фазы,

например, превышает среднее содержание в расплаве, то на завершающих этапах кристаллизации будет протекать при его резком дефиците, и наоборот. И только в редком для магматических систем случае кристаллизации эвтектонидных систем (при детерминанте процесса $F_x = \text{const}$) концентрация компонентов в твердой и жидкой фазах остается стабильной на всем протяжении петрогенного процесса. В таком случае, согласно разработанной ранее автором методике математического моделирования, компонент всегда должен обладать нормальным законом распределения, когда среднее содержание x и модалное M_0 совпадают. В термодинамическом смысле такая ситуация характеризует системы, достигшие максимума энтропии при одинаковой кристаллизационной активности всех петрогенных компонентов. Котектические и перитектические реакции способны создавать относительно низкоэнтропийные метастабильные системы.

Как показывает практика, эмпирические распределения химических компонентов в подавляющем большинстве случаев асимметричны, т. е. характеризуют метастабильно равновесные системы, а модалное и среднее содержания обладают разными значениями, которые, в свою очередь, фиксируют содержание компонентов в твердой фазе различных стадий кристаллизации. Как уже упоминалось выше, ранее возможность оценки содержаний компонента в твердой фазе начала и конца кристаллизации существовала только для эффузивных пород с хорошо выраженной порфировой структурой, чем воспользовался Л.Н. Овчинников.

Смысл коэффициентов распределения для метаморфических и магматических пород несколько различен, поэтому рассмотрим их отдельно.

Метаморфические породы

Обладая оценкой концентрации на ранних (x) и конечных (M_0) этапах процесса, для метаморфических пород коэффициент распределения примет вид $k = x / M_0$. При $M_0 > x$ (распределение $1 - \lambda$, где λ - логнормальная модель) подвижная часть компонента ($M_0 - x$) обладает положительным знаком и является оценкой его возможного накопления в пределах системы. Такой тип распределения характеризует ореол концентрации, охотного вхождения компонента в формирующуюся твердую фазу. В системе в целом ощущается дефицит компонента, т.к. его среднее содержание меньше оптимального, модалного, к которому устремлена система.

Для случая, когда $M_0 < x$ (логнормальное и близкие им распределения с правосторонней асимметрией), величина ($M_0 - x$) приобретает отрицательные значения и может служить оценкой количества выносимого компонента, его рассеивания. Такой компонент избыточен для данной породы, образует ореолы рассеивания и, при возможности, выносится за пределы системы. Нередко он изоморфно входит в решетки "чуждых" ему минералов, нарушая конституцию и во всех случаях повышает энтропию системы. Повышение матричной энтропии компонента убедительно доказывается математическим моделированием процесса рассеивания, которое в природе является наиболее типичным явлением и отражает течение процесса в соответствии со вторым началом термодинамики. Именно поэтому в науке давно отмечается так называемый "феномен логнормальных распределений", термодинамический смысл которого был расшифрован автором (Паняк, 1988).

Оценкой количества выносимого компонента, его рассеивания или избыточного содержания в системе может служить предлагаемый коэффициент отделения:

$$K_{от} = [(x - M_0) / x] > 0.$$

Так как x всегда больше M_0 , значение коэффициента отделения всегда имеет положительное значение. Соответственно при левосторонней асимметрии распределений $M_0 > x$, и тогда

$$K_{от} = [(x - M_0) / x] < 0.$$

Величину $K_{от}$ в данном случае можно рассматривать как оценку дефицита, определенного "вакуума" компонента в системе.

Формирующаяся при таком метаморфическом процессе новая минеральная матрица обладает более низким энтропийным уровнем. Как показывает практика, среди породообразующих компонентов лишь меньшая их часть (не более трех - четырех) способна "противостоять" второму началу термодинамики, т. е. снижать энтропию. Именно они должны учитываться "правилом фаз Гиббса", увязывающего количество минеральных фаз (Φ) в породе с количеством породообразующих компонентов (k) при заданном числе степеней свободы (i):

$$\Phi = k + 2 - i.$$

Полученные результаты, таким образом, придают конкретный смысл ранее весьма расплывчатым понятиям: "инертные", "пассивные", "активные", "подвижные" компоненты. Подтверждается также мнение о том, что кристаллизационная и термодинамическая активность

химических компонентов определяется, прежде всего, законом действующих масс. Даже щелочи могут вести себя в разных условиях по-разному. Например, Na_2O на калиевом этапе метаморфизма выступает в качестве пассивного компонента. Не представляют исключения и редкие элементы, слабая термодинамическая активность которых определяется только их низкими концентрациями.

В продуктах метаморфогенно-метасоматических процессов отмечаются случаи бимодальных распределений, отражающих наложение двух примерно одинаковых по интенсивности процессов, когда активность компонента на разных стадиях проявляется по-разному. Такая ситуация хорошо моделируется математически для случая, когда при наложении второго процесса часть компонента остается неподвижной. Геологическая модель такого процесса - формирование порфиробластов на фоне неизменной мелкозернистой основной массы. Ярким примером могут служить ставролитовые сланцы Кочкарского метаморфического комплекса с крупными (1 - 3 см) крестовидными порфиробластами ставролита на фоне мелкозернистой породы со ставролитом (1 - 3 мм) первой генерации. В них бимодальность фиксируется для железо-магнезиальных компонентов. Бимодальность распределений химических компонентов нередко отмечается для продуктов контактового метаморфизма, приводящего к формированию порфириовидных структур. Химическая динамика такого процесса отчетливо фиксируется на эмпирических кривых распределения (рис. 1) в высокоглиноземистых породах Панимбинского участка Енисейского кряжа (аналитические данные П.С. Козлова). Здесь отмечается наложение контактового метаморфизма, связанного с внедрением гранитоидов, на слабометаморфизованные углистые филлиты кординской свиты верхнего протерозоя. Приведенная картина распределений основных петрогенных компонентов отчетливо иллюстрирует реакцию образования андалузита за счет мусковита - серицита с образованием биотита:

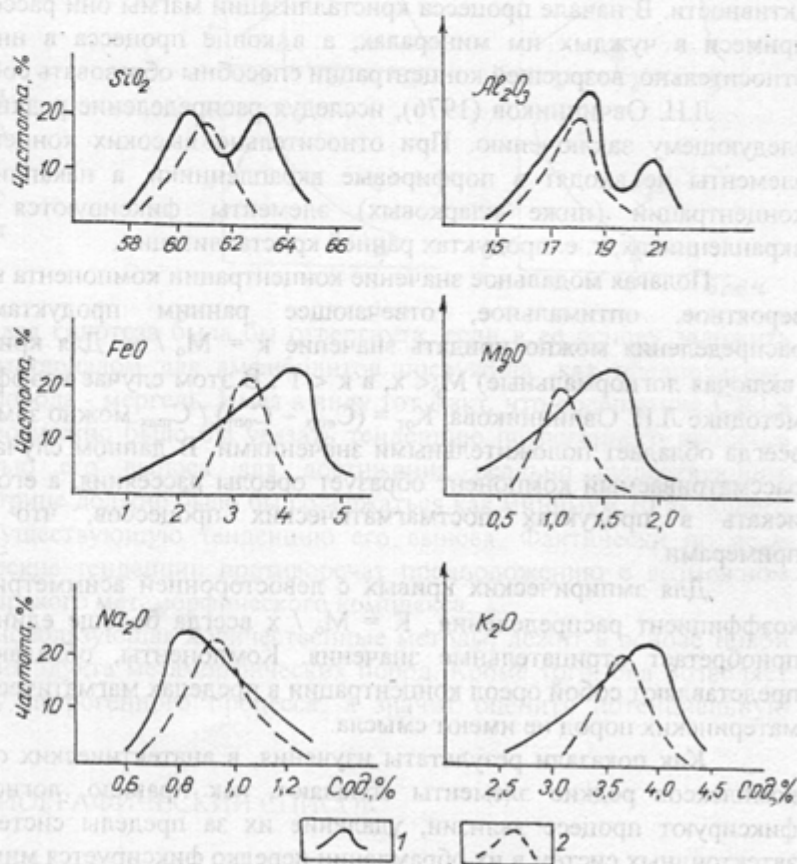
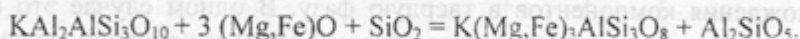


Рис. 1. ЭКР петрогенных компонентов в сланцах Панимбинского участка (Енисейский кряж): 1 - в андалузит-содержащих (46 проб); 2 - в породах без андалузита

Менее интенсивные процессы не способны преодолеть энергетический барьер для разрушения существующих кристаллических решеток, а более интенсивные приводят к полной перекристаллизации исходной матрицы, т. е. полной гомогенизации породы.

В исходных породах с практически не нарушенным балансом вещества эмпирические кривые распределений близки к нормальной модели (пунктирная линия). Контактво-метаморфические процессы, которые достигали биотитовой ступени, привели к нарушению исходного равновесия, которое выразилось отчетливой асимметрией кривых (сплошная линия). В зонах образования андалузита устанавливается необходимый, в соответствии с приведенной выше реакцией, привнос железа, магния и кремния. Согласно типам кривых распределения, привносу подвергнуты также алюминий и калий, выносу - натрий. Так как процесс протекал с формированием порфиробластового андалузита, то на кривых содержащихся в нем компонентов (кремнезем, глинозем) появилась неизбежная в таких случаях бимодальность.

Магматические породы

Ранее автором было доказано наличие минимум пяти возможных моделей кристаллизации магматических расплавов. Первая из них - модель кристаллизации эвтектоидных систем, когда содержание компонента, поступающего из расплава в твердую фазу, стабильно. Вторая модель иллюстрирует кристаллизацию литофильных компонентов, которые быстро расходуются на построение решеток твердой фазы, а на заключительных этапах ощущается их дефицит в расплаве. В этом случае x_i - порции компонента, переходящие в i -момент в твердую фазу, представляют собой нисходящий ряд. Третья модель описывает кристаллизацию литофобных компонентов, когда порции x_i образуют возрастающий ряд. Такие компоненты, как правило, накапливаются в остаточном (иногда пегматитовом) расплаве и могут создавать ореолы концентрации в постмагматических продуктах кристаллизации.

Четвертая и пятая модели описывают более сложные процессы с двумя разорванными по времени этапами вхождения компонентов в твердую фазу. В одном случае это кристаллизация в глубинных условиях порфировых вкрапленников (первый этап) и основной массы на поверхности (второй). В другом случае описывается наложение двух процессов кристаллизации редких элементов, для которых по мере повышения концентрации в остаточном расплаве нередко проявляется инверсия активности. В начале процесса кристаллизации магмы они рассеиваются, образуя лишь изоморфные примеси в чуждых им минералах, а в конце процесса в интерстициальных пространствах при относительно возросшей концентрации способны образовать собственную минеральную фазу.

Л.Н. Овчинников (1976), исследуя распределение редких элементов в эффузивах, пришел к следующему заключению. При относительно высоких концентрациях (выше кларковых) редкие элементы не входят в порфировые вкрапленники, а накапливаются в стекле. В случае низких концентраций (ниже кларковых) элементы фиксируются преимущественно в порфировых вкрапленниках, т. е. продуктах ранней кристаллизации.

Полагая модальное значение концентрации компонента в магматической породе как наиболее вероятное, оптимальное, отвечающее ранним продуктам кристаллизации, коэффициенту распределения можно придать значение $k = M_0 / x$. Для кривых с правосторонней асимметрией (включая логнормальные) $M_0 < x$, а $k < 1$. В этом случае коэффициент отделения, определяемый по методике Л.Н. Овчинникова, $K_{от} = (C_{max} - C_{отг}) / C_{max}$ можно заменить на $K_{от} = (x - M_0) / x$, причем $K_{от}$ всегда обладает положительными значениями. В данном случае для массива магматических пород рассматриваемый компонент образует ореолы рассеяния, а его повышенные концентрации следует искать в продуктах постмагматических процессов, что подтверждается многочисленными примерами.

Для эмпирических кривых с левосторонней асимметрией (включая распределения $1 - \lambda$) коэффициент распределения $K = M_0 / x$ всегда больше единицы, а $K_{от} = (x - M_0) / x < 0$, т. е. приобретает отрицательные значения. Компоненты, обладающие подобными распределениями, представляют собой ореол концентрации в пределах магматических систем, а их поиски за пределами материнских пород не имеют смысла.

Как показали результаты изучения, в анатектических образованиях гнейсово-мигматитовых комплексов редкие элементы обладают, как правило, логнормальными распределениями, т. е. фиксируют процесс эвлюзии, удаление их за пределы системы. В таких случаях за пределами эвтектоидных систем в их обрамлении нередко фиксируется микроэлементная базификация.

В заключении статьи коснемся комбинированных моделей, отражающих результаты наложения метаморфических процессов на первично магматические породы. Полученные результаты здесь позволяют предложить новую, оригинальную методику восстановления первичной породы субстрата, например, для амфиболитов. Дискуссия на эту тему ведется очень давно, однако надежной методики пока не предложено.

Рассмотрим, например, химическую динамику петрогенного процесса формирования амфиболитов северного обрамления Санарского гранитного массива на Южном Урале (рис. 2). Стрелками на рисунке показаны средние содержания компонентов в диабазе, который взят как предположительный субстрат в качестве нулевой гипотезы. По всем петрогенным компонентам, без исключения, нулевая гипотеза находит свое подтверждение. Отражаемые соответствующим типом кривых распределений тенденции геохимической динамики подтверждают сделанное предположение. Следует отметить при этом, что эти тенденции весьма специфичны, выносу подвергаются обе щелочи, обе формы окисления железа, глинозем. Привносятся MgO и CaO при нейтральном поведении кремнезема. Подобные геохимические тенденции не характерны для обычных профилей гранитизации или базификации.

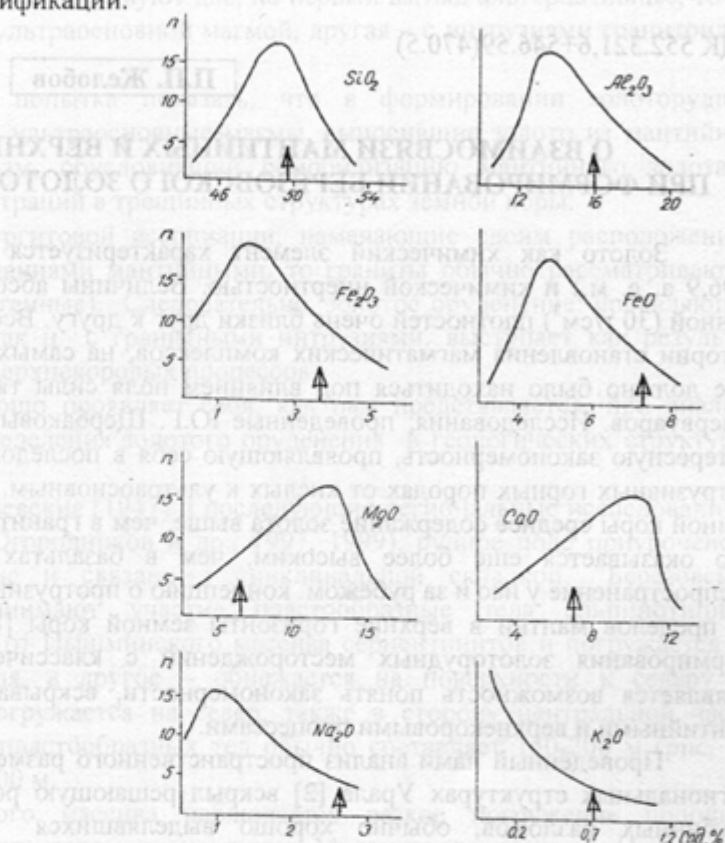


Рис. 2. Кривые распределения петрогенных компонентов в амфиболитах Кочкарского комплекса. Среднее содержание сравниваемого эдукта показано стрелкой. Пояснения в тексте

Нетрудно убедиться, что нулевая гипотеза была бы отвергнута, если в ее основу заложить предпосылку о том, что исходным материалом для амфиболитов послужила, как предполагают некоторые исследователи, осадочная порода - мергель. Имея в виду тот факт, что содержание CaO в этой породе всегда больше 10 %, невозможно было бы увязать тенденцию петрогенного процесса (привнос кальция) с необходимостью его выноса для достижения реально существующих концентраций. Кроме того, в такой матрице должно было бы содержаться как минимум 10 % общего железа для того, чтобы сохранить существующую тенденцию его выноса. Фактически по всем остальным компонентам петрохимические тенденции противоречат предположению о возможном мергелевом эдукте амфиболитов Кочкарского метаморфического комплекса.

Предложенная аргументация, использующая количественные методы, лежит в основе новой оригинальной методики восстановления эдукта метаморфических пород. Кроме того, она позволяет проследить геохимическую динамику петрогенного процесса, а значит оценить потенциальную рудоносность пород.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчинников Л.Н. Источники рудного вещества эндогенных месторождений и надежность критериев их установления // Источники рудного вещества эндогенных месторождений. М: Наука, 1976. С. 44-52.
2. Паняк С.Г. Распределение химических элементов в изверженных породах и их математические модели // ДАН СССР, 1980. Т. 253. № 5. С. 1200-1203.

3. **Паняк С.Г.** Математическое моделирование геохимии петрогенных процессов в связи с проблемой источника рудного вещества // ДАН СССР, 1981. Т. 261. № 5. С. 1190-1193.

4. **Паняк С.Г.** Геохимические критерии потенциальной рудоносности продуктов петрогенных процессов // Мат-лы X Всесоюз. петрограф. сов. Алма-Ата: Наука, 1983. С. 141-142.

5. **Паняк С.Г.** Закономерности распределения химических компонентов при петрогенных процессах и их математическое обоснование // ДАН СССР, 1987. Т. 296. № 4. С. 968-973.

6. **Паняк С.Г.** Логнормальные распределения параметров природных систем как отражение второго начала термодинамики // ДАН СССР, 1988. Т. 300. № 4. С. 957-960.

УДК 552.321,6+546.59(470.5)

П.П. Желобов

О ВЗАИМОСВЯЗИ МАНТИЙНЫХ И ВЕРХНЕКОРОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ БЕРЁЗОВСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ (Средний Урал)

Золото как химический элемент характеризуется достаточно большой атомной массой (196,9 а. е. м.) и химической инертностью. Величины абсолютных значений атомной (26 г/см^3) и ионной (30 г/см^3) плотностей очень близки друг к другу. Всё это даёт возможность заключить, что в истории становления магматических комплексов, на самых ранних этапах развития Земли, золото уже должно было находиться под влиянием поля силы тяжести в нижних частях магматических резервуаров. Исследования, проведенные Ю.Г. Щербаковым и Г.А. Пережогиним, выявили очень интересную закономерность, проявляющую себя в последовательном повышении кларков золота в интрузивных горных породах от кислых к ультраосновным. Другими словами, в базальтовом "слое" земной коры среднее содержание золота выше, чем в гранитном "слое", а в мантийных гипербазитах оно оказывается еще более высоким, чем в базальтах. Если считать получившую широкое распространение у нас и за рубежом концепцию о протрузивном характере внедрения серпентинитов из пределов мантии в верхние горизонты земной коры [8] несостоятельной и решать проблему формирования золоторудных месторождений с классических ортомагматических позиций, то появляется возможность понять закономерности, вскрывающие механизмы взаимосвязей между мантийными и верхнекоровыми процессами.

Проведённый нами анализ пространственного размещения золоторудных месторождений в региональных структурах Урала [2] вскрыл решающую роль в локализации золотого оруденения глубинных разломов, обычно хорошо выделявшихся поясовым расположением массивов серпентинизированных гипербазитов дунит-гарцбургитовой ассоциации. На тесную пространственную связь золотого оруденения Урала с серпентинитами обращали внимание многие уральские исследователи (Чернышов, 1889; Карпинский, 1889; Лодочников, 1936; Бородаевский, 1948; Кутюхин, 1968; Желобов 1972, 1979 и др.).

Ф.Н. Чернышев и А.П. Карпинский приписывали золотому оруденению генетическое родство с ультраосновными интрузиями, полагая, на примере изучавшихся ими месторождений Калкановском и Камышакском Южного Урала, что золото, в ничтожных количествах связанное с породообразующими минералами перидотитов, при серпентинизации последних переходило в растворы, вызывающие этот процесс, и могло ими концентрироваться.

Исследования, проведенные Ю.Г. Щербаковым и Г.А. Пережогиним [7], выявили очень интересную закономерность, проявляющую себя в последовательном повышении кларков золота в интрузивных горных породах от кислых к ультраосновным. Другими словами, в базальтовом "слое" земной коры среднее содержание золота выше, чем в гранитном "слое", а в мантийных гипербазитах оно оказывается ещё более высоким, чем в базальтах.

Ту же мысль высказывал В.Н. Лодочников (1936). По словам В.Ф. Казимирского (устное сообщение), на Кировском месторождении Южного Урала в своё время в качестве руды на золото обрабатывались серпентиниты.

Н.И. Бородаевский [1] в 1948 году описал золотоносные залежи серпентинитов и образовавшихся по ним тальцитов, но их золотоносность (наблюдая в серпентинитах кварцевые прожилки с золотом) он генетически связывал с гранитоидным магматизмом.

Фишером было описано Лоувельдское месторождение в Ю. Африке, где серпентиниты обрабатывались как золотая руда. Рудные залежи выявлялись только в результате опробования