Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«Сибирский государственный индустриальный университет»

Кафедра геологии и геодезии

Гумиров Ш.В.

Математический анализ распределения редкоземельных элементов

Часть 2.
Моделирование и технология адаптивного анализа минерагенеза редкоземельных и примесных элементов в минералах

Методические указания к выполнению
лабораторных работ

Новокузнецк
2014

УДК 551.3
М340

Рецензент
к.т.н., доцент кафедры
геотехнологий СибГИУ
В.И.Любогощев.

М340 Математический анализ распределения редкоземельных элементов. Часть 2 : Метод. указ. / Сиб. гос. индустр. ун-т ; сост. Ш.В. Гумиров. Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2014.– 33 с.

Приведена технология геолого-генетического анализа при выполнении лабораторной работы по дисциплине «Математические методы моделирования в геологии», изложена методология исследования закономерностей распределения примесных химических элементов в минералах и горных пород с применением инструментов математического анализа.

Во второй части даются сведения об адаптации минералов к факторам внешней среды и об адаптивном анализе с применением математического моделирования.

Варианты заданий студентам выдаются индивидуально, в виде табличных данных, геологических карт и разрезов.

Предназначена для студентов, обучающихся по специальности 130101 Прикладная геология.

Печатается по решению комиссии по усовершенствованию учебно-методической работы в институте горного дела и геосистем.

© Гумиров Ш.В., 2014
© Сибирский государственный индустриальный университет

Введение

Целью второй части лабораторной работы «Математический анализ распределения редкоземельных элементов» является ознакомление студентов с адаптацией минералов и горных пород к температуре, к давлению и к геохимическим условиям внешней среды, а также с методологией адаптивного анализа минерагенеза примесных элементов в различных минералах.

В процессе выполнения лабораторных работ студент использует математический аппарат и компьютерные технологии для моделирования распределения редкоземельных и других примесных элементов в минералах и в горных породах. Применение методологии адаптивного анализа объектов неживой природы, разработанной автором [5], к результатам моделирования позволяет провести геолого-генетическую интерпретацию математических моделей формирования примесного состава минералов и горных пород.

В ходе выполнения лабораторной работы студент приобретает способность анализировать информацию, видеть геологические объекты системно; овладевает умением использовать в практической деятельности новые знания и умения; применять на практике основные методы получения, хранения, обработки геологической информации и навыки работы с компьютером; проводить математическое моделирование геолого-генетических процессов; использовать геологические данные для составления отчетов и научных публикаций.

Для инженеров-геологов, работающих в рудной и угольной геологии, актуальным является исследование, с помощью современных технических и математических инструментов, геолого-генетических процессов, которые сформировали минералы, горные породы, залежи полезных ископаемых. Причина актуальности данной лабораторной работы заключается в том, что возрастает востребованность примесных химических элементов, содержание которых ничтожно мало в земной коре, в том числе лантаноидов и актиноидов.

В ходе выполнения лабораторной работы студенты учатся выяснять, с помощью компьютерных технологий и математического аппарата, причины накопления указанных химических элементов в виде примесей в минералах-концентраторах. Это умение позволит им в будущем открывать нетрадиционные виды сырья, востребованного для инновационного развития.

Данное методическое руководство предназначено для обучения студентов применению компьютерных технологий, математического аппарата и концепции адаптации объектов неживой природы в целях моделирования процессов рудогенеза и прогнозирования рудных месторождений.

1. Минерагенез как функция адаптации химического элемента к температуре внешней среды

Явление адаптации химических элементов к факторам внешней среды посредством своих атомных параметров установлено автором (Ш.В.Гумиров, 1993, 2004). Адаптация химического элемента в литосфере, к факторам внешней среды, включает в себя:

- вхождение или выход из объема минерала данного химического элемента посредством его твердофазной диффузии;
- создание или разрыв межатомных связей в кристаллической решетке данным химическим элементом.

Химические элементы в литосфере адаптируются к факторам внешней среды посредством атомных параметров:

- к температуре массива – посредством температуры Дебая (**Ѳ**), или, другими словами Дебаевской частоты колебания атома,
- к давлению в массиве – посредством расстояния до инертного газа (**e**) (термин автора),
- к геохимической обстановке – посредством адаптивности (**A**) (термин автора).

Термины

Дебаевская температура (**Θ**) химического элемента. Функция Дебаевской температуры соответствует предельной температуре среды, при превышении которой рвутся межатомные связи, например, в кристаллической решетке минерала. Причина разрыва в росте амплитуды всех мод колебаний в кристаллической решетке.

Расстояние до инертного газа (**e**): число электронов, получаемых или теряемых атомом при создании внешней электронной оболочки ближайшего инертного газа.

Адаптивность химического элемента **(A).** Равна ширине электрохимической области существования его соединений, т.е., это ширина электрохимического ареала соединений элемента:

$$A_i = E^o_{i\,(max)} - E^o_{i\,(min)}, \text{ вольт}, \qquad (1)$$

где A_i – адаптивность i-го химического элемента;

$E^o_{i\,(max)}$, $E^o_{i\,(min)}$ – соответственно наибóльший и наименьший стандартные окислительно-восстановительные потенциалы образова-

ния соединений i-го химического элемента

Адаптация химического элемента к температуре массива посредством атомного параметра температура Дебая, в процессе минерагенеза данного элемента, установлена автором [5] (рис. 1).

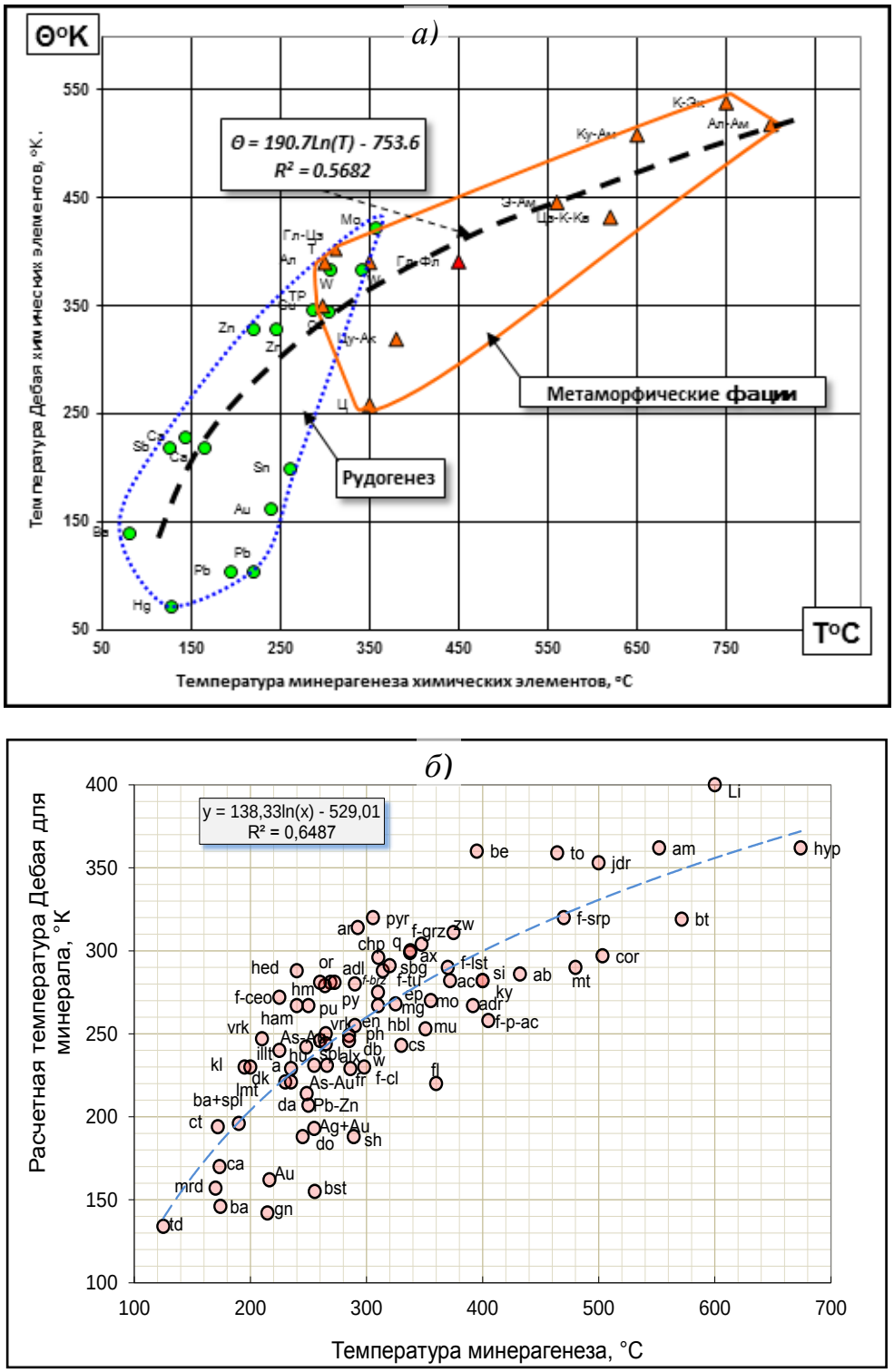


Рис. 1. Взаимосвязь между температурой Дебая и температурой в зоне рудогенеза, метаморфизма (*а*), и минерагенеза (*б*). (Использованы данные Е.М. Лазько [8], Д.В. Рундквиста [11] и др.). Теснота связи, по шкале Чеддока, высокая

Из диаграммы следует, что в более высокотемпературных условиях в минералы входят те химические элементы, у которых выше температура Дебая. Химический элемент с низкой температурой Дебая уходит из минерала, если температура массива в зоне минерагенеза превысит функцию температуры Дебая для данного элемента.

2. Минерагенез как функция адаптации химического элемента к давлению в массиве

Явление адаптации химических элементов, в процессе их минерагенеза, к давлению в массиве посредством атомного параметра расстояние до инертного газа, установлено автором [5] (рис.2).

Существует связь между давлением в массиве в зоне минерагенеза и расстоянием до инертного газа для химического элемента (при рудогенезе), или для химических элементов минерала-индикатора (для метаморфических фаций).

Давление (P) для метаморфических фаций:

$$\boldsymbol{e = 2.2417}\ \mathrm{e}^{\boldsymbol{0.0638P}}, \qquad R^2 = 0.82, \qquad (2)$$

где e – основание натурального логарифма;

$\boldsymbol{e}$ – расстояние до инертного газа, усредненное для атомов минерала - индикатора данной стадии метаморфизма по формуле $\boldsymbol{e} = \sum \boldsymbol{e_i} / \mathrm{n}$;

где $\boldsymbol{e}_i$ – расстояние до инертного газа для i-го катиона;

n – всего катионов в химической формуле минерала.

Подобная связь существует в зоне рудогенеза и для рудогенных элементов:

$$\boldsymbol{e} = 3.0614\ \mathrm{e}^{0.3872P}, \qquad R^2 = 0.44. \qquad (3)$$

Явление адаптации химических элементов к температуре и к давлению в литосфере, в процессе их минерагенеза, в том числе путем вхождения в породообразующие минералы в качестве примесных элементов, подтверждается их распределением в литотипах пород [5] (рис. 3).

При этом примесные химические элементы специализированы по типам пород, то есть определенная группа примесных элементов содержится именно в данном литотипе пород.

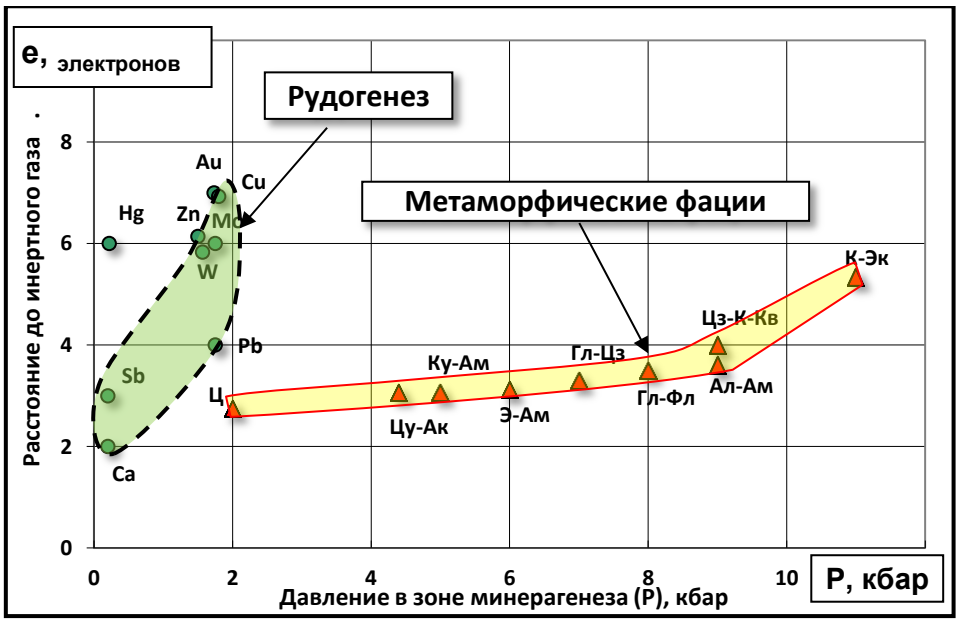


Рис. 2. Взаимосвязь между параметром «расстояние до инертного газа ***e***» (ось *y*) химического элемента (или минерала-индикатора) и давлением (ось *x*) в зоне минерагенеза элемента (рудогенез) и минерала-индикатора (метаморфические фации). Фации: Ц - цеолитовая, Цу-Ак - цумпеллит–актинолитовая; Гл-Фл - глаукофан-лавсонитовая; Гл-Цз - глаукофан-цоизитовая; Цз-К-Кв - цоизит-кианит-кварцевая; Э-Ам - эпидотовых амфиболитов; К-Эк - кианитовых эклогитов; Ал-Ам - альмандиновых амфиболитов; Ку-Ам - кумингтонитовых амфиболитов. Теснота связи, по шкале Чеддока, от заметной для рудных месторождений до весьма высокой для метаморфических фаций

Из диаграмм (см. рис. 3) следует, что в литосфере снизу-вверх, от ультраосновных пород к кислым и к щелочным породам (по оси *«x»* от 1 к 5), снижается температура Дебая примесных элементов, а также расстояние до инертного газа. То есть, примесные элементы адаптируются к уменьшению температуры в литосфере посредством снижения температуры Дебая примесных элементов, специализированных к данному литотипу, а к снижению давления в литосфере путем уменьшения расстояния до инертного газа.

Увеличение, для специализированных примесных элементов, атомных параметров масса атома (M) и атомный радиус, в направлении снизу – вверх в литосфере, связано с более быстрой твердофазной диффузией, следовательно, с более быстрым выходом из минерала и более быстрой миграцией вверх тех примесных элементов, у которых больше атомная масса и атомный радиус [4]. Данный вывод подтверждается явлением роста скорости твердофазной диффузии по мере увеличения атомной массы (эффект массы атома) и атомного радиуса (эффект величины атома), впервые установленным автором (Ш.В.Гумиров, 1993).

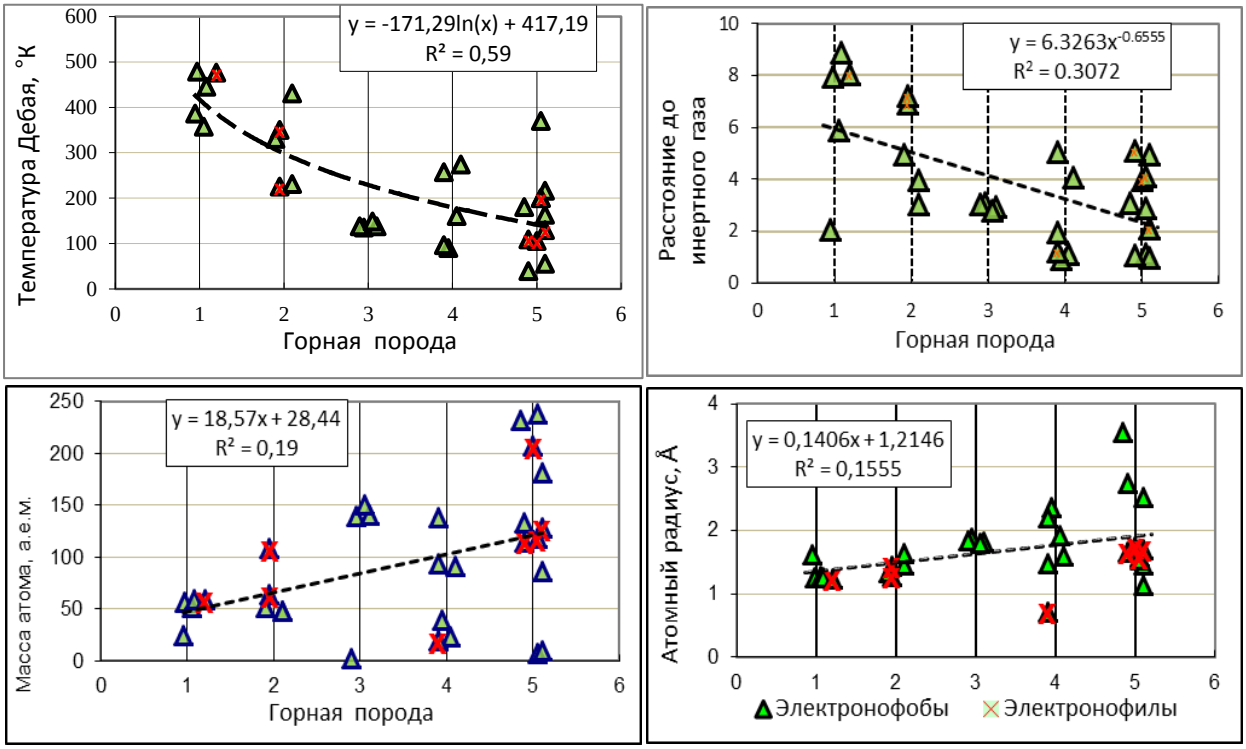


Рис. 3. Изменение атомных параметров (ось *y*) примесных элементов в магматических породах в ряду (ось *x*): 1-ультраосновные, 2 - основные, 3 - средние, 4 - кислые, 5 - щелочные. (Использованы табличные данные Л.Н. Овчинникова, 1988 г., [10]). По шкале Чеддока теснота связи от умеренной (для атомной массы и атомного радиуса), до заметной (для расстояния до инертного газа) и высокой (для температуры Дебая)

3. Минерагенез примесных элементов как функция твердофазной диффузии

Создание примесным химическим элементом межатомных связей в кристаллической решетке минерала – это, прежде всего, вхождение примесного элемента в потенциальную яму узла кристаллической решетки. Для этого необходимо выбить из потенциальной ямы атома-хозяина. Установленный автором эффект массы атома, когда в твердофазном материале быстрее диффундируют более массивные примесные атомы, позволил выделить решающую роль импульса атома в твердофазной диффузии. Это означает, что для успешного перескока примесного атома из одного узла кристаллической решетки минерала в другой, соседний узел, данный примесный атом должен обладать достаточным для этого импульсом [2, 3, 4]. Более быстрая твердофазная диффузия более массивных примесных атомов означает, что в каждой, бесконечно малой локальной области минерала, импульс примесного атома тем выше, чем больше его масса. А

такое возможно лишь при условии, если кинетическая энергия у всех атомов, входящих в данную локальную область, одинакова.

А именно: каждая локальная область минерала получает одинаковую энергию тепловых колебаний, отсюда примем, что средние кинетические энергии всех атомов в локальной области приблизительно одинаковы:

$$\frac{m_1 V_1^2}{2} = \frac{m_2 V_2^2}{2}; \qquad (4)$$

но если:

$$m_2 > m_1 \text{ , то } V_2 < V_1 \text{ ,}$$

причем:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{V_2^2}{V_1^2}. \qquad (5)$$

Импульсы (P) вычисляются по формуле:

$$P_1 = m_1 V_1 \text{ и } P_2 = m_2 V_2. \qquad (6)$$

Следовательно:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{V_1}{V_2} > 1 \Rightarrow P_2 > P_1, \qquad (7)$$

и более тяжелый атом с массой m_2 имеет больший импульс.

Таким образом, эффект массы обусловлен тем, что с ростом массы атома возрастают его импульс, и, как следствие, вероятность его перескока в соседний кристаллический узел.

Твердофазная диффузия примесного атома в минерале складывается из множества его перескоков из одной потенциальной ямы кристаллической решетки в другую, соседнюю яму, и состоит из следующих этапов:

1. *Вхождения* диффундирующего атома в *i*-ю потенциальную яму с выбиванием из нее элемента-хозяина.
2. *Выхода* из *i*-й потенциальной ямы. Затем следуют либо *перескок*, либо *возврат*.
3. *Перескок* в соседнюю *i+1* потенциальную яму.
4. *Возврат* в *i*-ю потенциальную яму.

Для реализации этапа *вхождения* атома, с выбиванием из нее элемента-хозяина, нужен достаточно большой импульс диффундирующего атома. Импульс прямо пропорционален его атомной массе и

его кинетической энергии, именно здесь проявляется эффект массы.

Вероятность реализации этапа *выхода* из потенциальной ямы (п.2) растет с увеличением импульса атома, следовательно, его массы, а также его радиуса и частоты его колебания. Частота колебания примесного атома увеличивается прямо пропорционально температуре среды, то есть частоте колебания элементов матрицы (минералообразующих химических элементов).

Если частота колебания элементов матрицы возрастают до Дебаевской частоты колебания рассматриваемого атома, то связи данного атома с элементами матрицы рвутся, и вероятность его выхода из потенциальной ямы приближается к единице.

Этап *перескока* в соседнюю яму (п.3) – это повторение этапа вхождения (п.1). Если он не реализуется, то следует этап *возврата*.

Из выше приведенного следует, что минерагенез является функцией, зависящей от твердофазной диффузии.

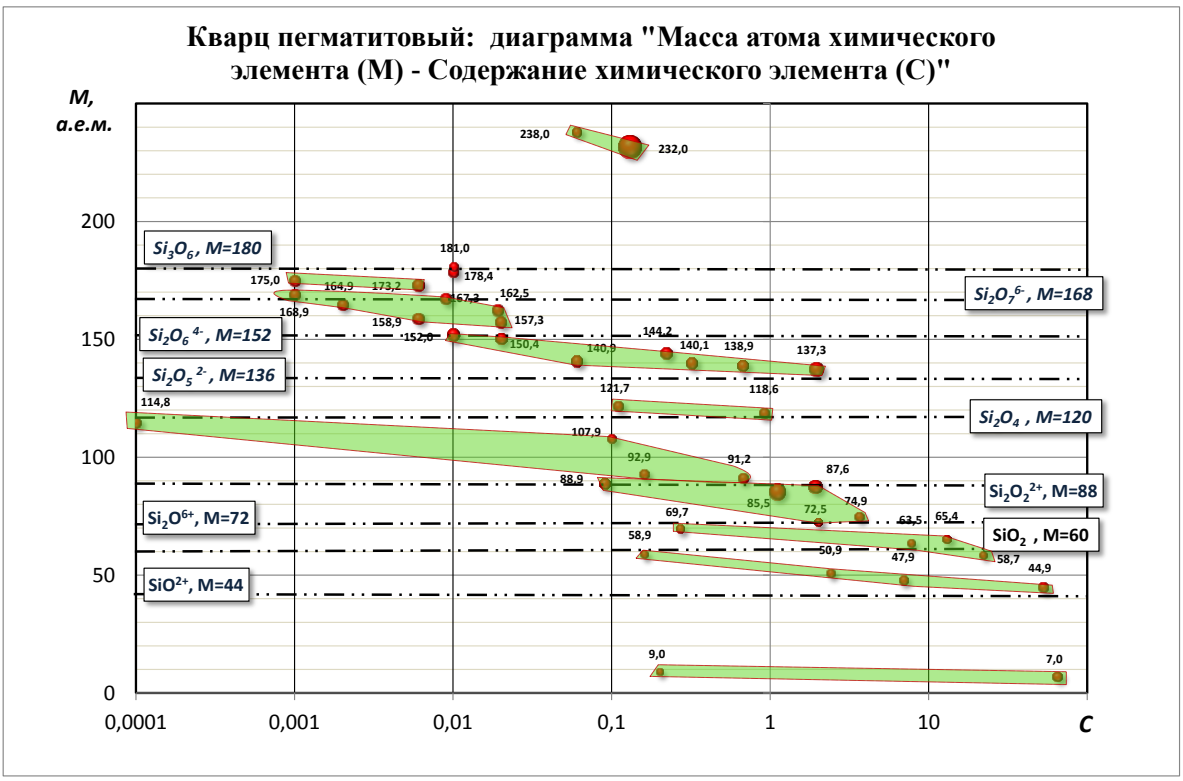
Например, метасоматические процессы могут происходить в твердой фазе. Если температура породного массива превысит функцию температуры Дебая (Дебаевской частоты колебания) *j*-го химического элемента, то его атом разорвет свои связи с соседними атомами минерала и диффундирует в твердой фазе из объема минерала. И, если его масса больше массы элемента матрицы (здесь – атома) минерала, или равна ей, то твердофазная диффузия будет происходить путем перескока из одного узла кристаллической решетки в другой.

Если масса *j*-го химического элемента меньше массы элемента матрицы минерала, то его твердофазная диффузия будет происходить по междоузлию и по дефектам кристаллической решетки минерала, ускоряясь при тектонических подвижках массива.

4. Влияние на минерагенез примесных элементов импульса примесного атома и элементов матрицы минерала

Выполненные автором исследования показали, что элементами матрицы минералов являются не только атомы, но и комплексы атомов. В частности, в кварце выявлены следующие виды матричных элементов (рис.4): Si, $(Si_2O_6)^{4-}$, O^{2-}, SiO^{2+}, SiO_2, $(SiO_4)^{4-}$ и др.

Каждый вид указанных элементов матрицы кварца способствует накоплению в нем того или иного примесного элемента



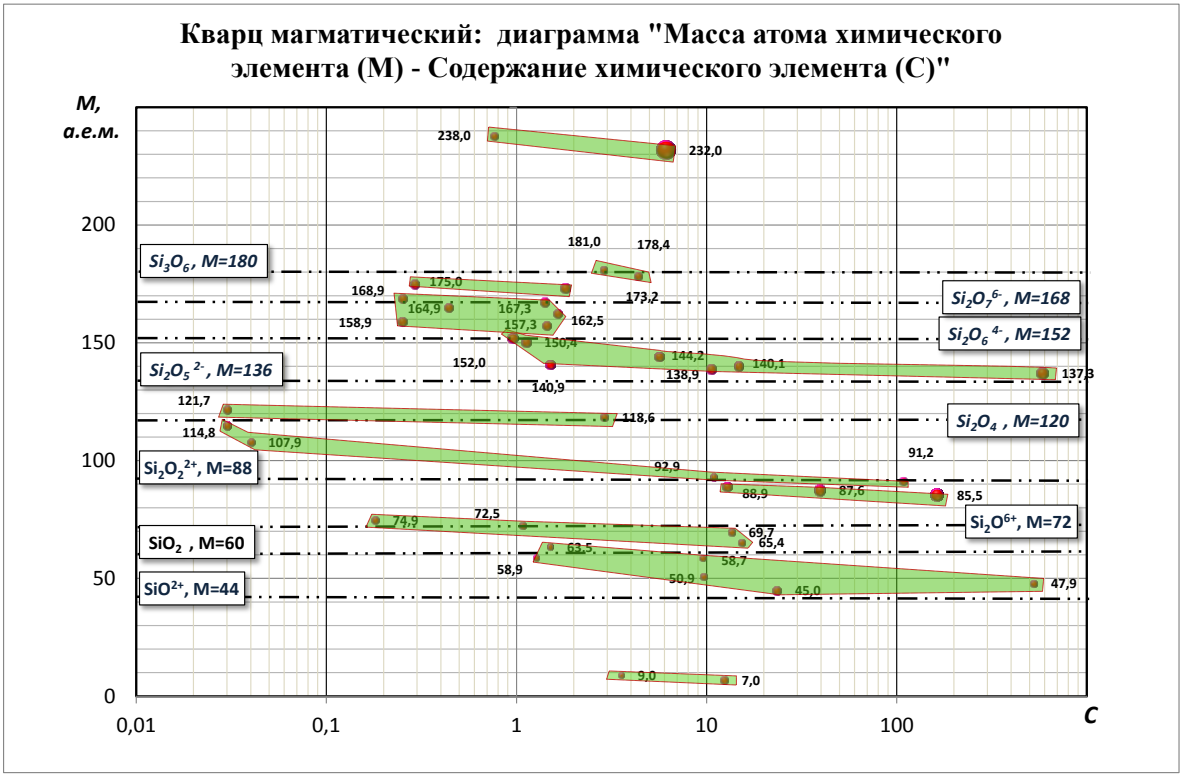


Рис. 4. Влияние, на содержание примесных химических элементов в кварце, элементов матрицы кварца (атомов, комплексов атомов) и массы (М) матричных и примесных элементов. На диаграмме диаметр знака примесного элемента пропорционален его атомному радиусу

Поступление редкоземельных элементов в центр зерна клинопироксена регулируется матричным элементом $(Si_4O_3)^{10-}$, с массой 160 а.е.м. На диаграмме для клинопироксена (рис. 5) редкоземельные

элементы имеют массу от 138,9 а.е.м. до 175 а.е.м., и они ступенчато разделяются на массе матричного элемента $(Si_4O_3)^{10-}$.

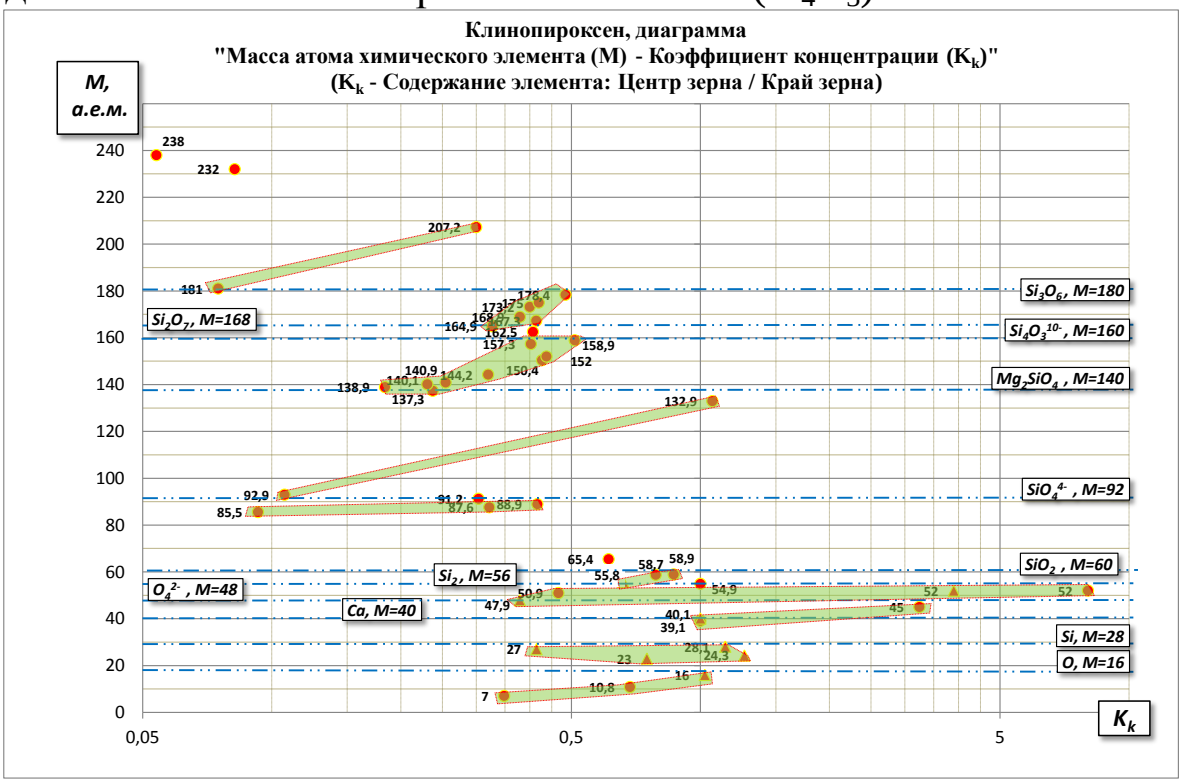


Рис. 5. Степень влияния, на коэффициент концентрации примесных химических элементов в клинопироксене, элементов матрицы клинопироксена (атомов, комплексов атомов) и массы (М) матричных и примесных элементов

Из диаграмм «Масса атома химического элемента – Содержание химического элемента в кварце» следует, что, в интервале атомных масс между двумя матричными элементами, существует закономерное снижение содержания примесных элементов по мере увеличения атомной массы примеси (см. рис.4). Например, в интервале между матричными элементами SiO^{2+}, SiO_2. Затем следует рост содержания примесных элементов для следующего интервала SiO_2, Si_2O^{6+}. А внутри интервала SiO_2, Si_2O^{6+} повторяется снижение содержания примесных элементов по мере увеличения атомной массы примеси.

Причина такого ступенчатого изменения содержания примесных элементов, когда масса атома примеси равна массе матричного элемента (здесь SiO_2 или Si_2O^{6+}), заключается в следующем. Атом примеси может войти в потенциальную яму в том случае, если масса примесного атома равна или больше массы матричного элемента. Например, все примесные элементы с массой, приблизительно равной или больше массы SiO_2, входят в потенциальную яму SiO_2.

Затем эти примесные элементы начинают перескакивать в соседние с ними потенциальные ямы. Чем успешнее перескок, тем вы-

ше скорость твердофазной диффузии и активации примесного атома. Следовательно, такой атом примеси быстрее уходит из кварца, а значит, содержание данной примеси снижается. И чем больше масса примесного атома, тем быстрее он совершает успешный перескок в соседнюю потенциальную яму.

Отсюда становится ясным и механизм такого перескока: примесный атом при этом вынужден оставаться в связке с матричным элементом, то есть он входит в комплекс матричного элемента, замещая один из его атомов. И в ходе перескока примесный атом вынужден из положения равновесия смещаться вместе со всем комплексом матричного элемента. Чем больше масса примесного атома, тем больше его импульс, и тем больше величина смещения, то есть выше вероятность его перескока.

На содержание примесных элементов в пегматитовом кварце оказывают значительное влияние следующие матричные элементы: SiO_2, Si_2O^{6+}, Si_2O_4, $Si_2O_5^{2-}$, $(Si_2O_7)^{6-}$ (см. рис. 4).

Кварц является минералом-концентратором золота по следующей причине. Атомы золота способны войти в кварц и удержаться в его кристаллической решетке благодаря эффекту массы, то есть взаимодействию с матричным элементом – комплексом $Si_3O_7^{2-}$, масса которого равна 196,25 а.е.м., в то время как у атома золота масса 196,97 а.е.м. То есть, масса атома золота больше, чем комплекса $Si_3O_7^{2-}$. Поэтому атом золота входит в потенциальную яму, занятую данным комплексом, выбивая его, или, скорее смещая из потенциальной ямы. Затем комплекс возвращается в свою потенциальную яму, но встречает там атом золота. Поскольку импульс комплекса меньше импульса атома золота, то комплекс не может выбить из потенциальной ямы атом золота. Поэтому комплекс, при возвращении в свою потенциальную яму, теряет один или два своих атома, а их место занимает атом золота. На фоне снижения температуры породного массива соседние комплексы $Si_3O_7^{2-}$, с массой приблизительно равной массе атома золота, начинают играть роль «сторожей», не позволяющих атому золота перескочить в соседнюю потенциальную яму. Именно это и приводит к концентрации золота в кварце.

Масса атома золота лишь на 0,77 а.е.м. превышает массу матричного элемента кварца. Из этого следует, что концентрация золота в кварце может происходить на фоне слабого снижения температуры породного массива. И, при увеличении температуры, золото немедленно покинет кварц благодаря эффекту массы.

Степень влияния матричного элемента на содержание химического элемента в кварце демонстрирует диаграмма «Масса атома химического элемента – Коэффициент концентрации химического элемента», где коэффициент концентрации химического элемента равен содержанию химического элемента в кварце, деленному на его содержание в земной коре (рис. 6). Степень влияния снижается в ряду Si_2O_4, SiO_4^{4+}, SiO_2, Si_2O^{6+}, $Si_2O_6^{4-}$.

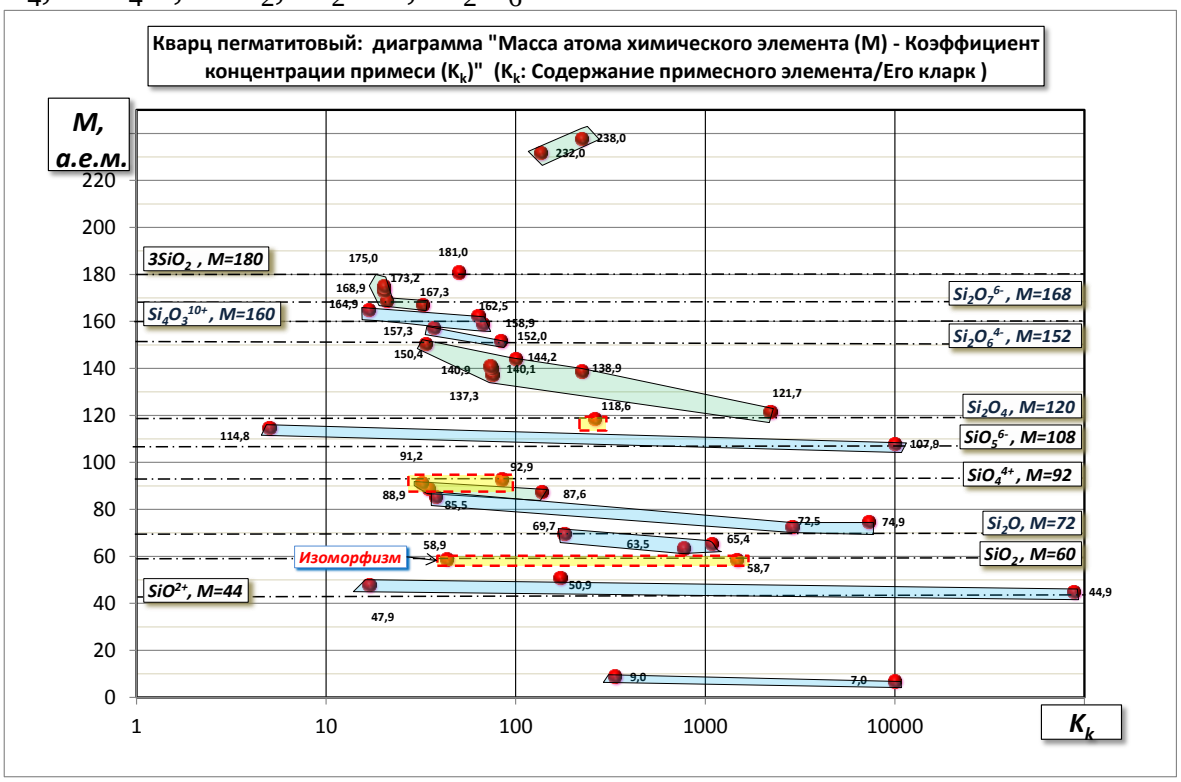


Рис. 6. Степень влияния, на коэффициент концентрации примесных химических элементов в кварце, элементов матрицы кварца (атомов, комплексов атомов) и массы (М) матричных и примесных элементов. На диаграмме диаметр знака примесного элемента пропорционален его атомному радиусу

5. Технология геолого-генетического анализа явления адаптации примесных элементов в процессе минерагенеза

Методология адаптивного анализа объектов неживой природы включает в себя:

- выделение объекта неживой природы,
- определение факторов внешней среды, к которым данный объект адаптируется,
- нахождение адаптивных параметров объекта, с помощью которых объект адаптируется к факторам внешней среды.

В случае анализа распределения примесных элементов в минералах объектом нижнего уровня является атом химического элемента,

а его основными адаптивными параметрами, как показано выше, являются температура Дебая и расстояние до инертного газа. Посредством функций указанных атомных параметров химический элемент реагирует соответственно на воздействие температуры массива и давления в массиве.

Адаптация химического элемента включает в себя, помимо реагирования на температуру среды и на давление в массиве, возможность его перемещения путем твердофазной диффузии, которая обеспечивает уход атома химического элемента из неблагоприятной среды и последующий его минерагенез в благоприятной среде.

Технология геолого-генетического анализа явления адаптации химических элементов в процессе их минерагенеза включает в себя построение диаграмм и собственно анализ этих диаграмм.

1. Строятся следующие диаграммы:
2. Содержание химического элемента в минерале – Масса атома химического элемента.
3. Содержание химического элемента в минерале – Радиус атома химического элемента.
4. Содержание химического элемента в минерале – Температура Дебая химического элемента.
5. Содержание химического элемента в минерале – Электроотрицательность химического элемента.
6. Содержание химического элемента в минерале – Адаптивность химического элемента.
7. Содержание химического элемента в минерале – Расстояние до инертного газа химического элемента.
8. Коэффициент концентрации химического элемента в минерале – Масса атома химического элемента.
9. Коэффициент концентрации химического элемента в минерале – Радиус атома химического элемента.
10. Коэффициент концентрации химического элемента в минерале – Температура Дебая химического элемента.
11. Коэффициент концентрации химического элемента в минерале – Электроотрицательность химического элемента.
12. Коэффициент концентрации химического элемента в минерале – Адаптивность химического элемента.
13. Коэффициент концентрации химического элемента в минерале – Расстояние до инертного газа химического элемента.

При создании диаграмм используется таблица 1.

В процессе анализа диаграмм необходимо выяснить причину накопления примесных химических элементов в минералах, в горных породах. Необходимо выявить матричные элементы и установить участие в минерагенезе тех матричных элементов, которые отсутствуют в составе минерала или горной породы, однако они присутствовали в ходе минерагенеза и оказывали существенное воздействие на процесс минералообразования.

Например, в результате анализа коэффициента концентрации химических элементов в центре зерна клинопироксена относительно его края, на диаграмме «Коэффициент концентрации химического элемента в минерале – Температура Дебая химического элемента» установлено участие в процессах минерагенеза атомов водорода и ионов гидроксильной группы. В то же время водород не входит в состав формулы клинопироксена (рис. 7).

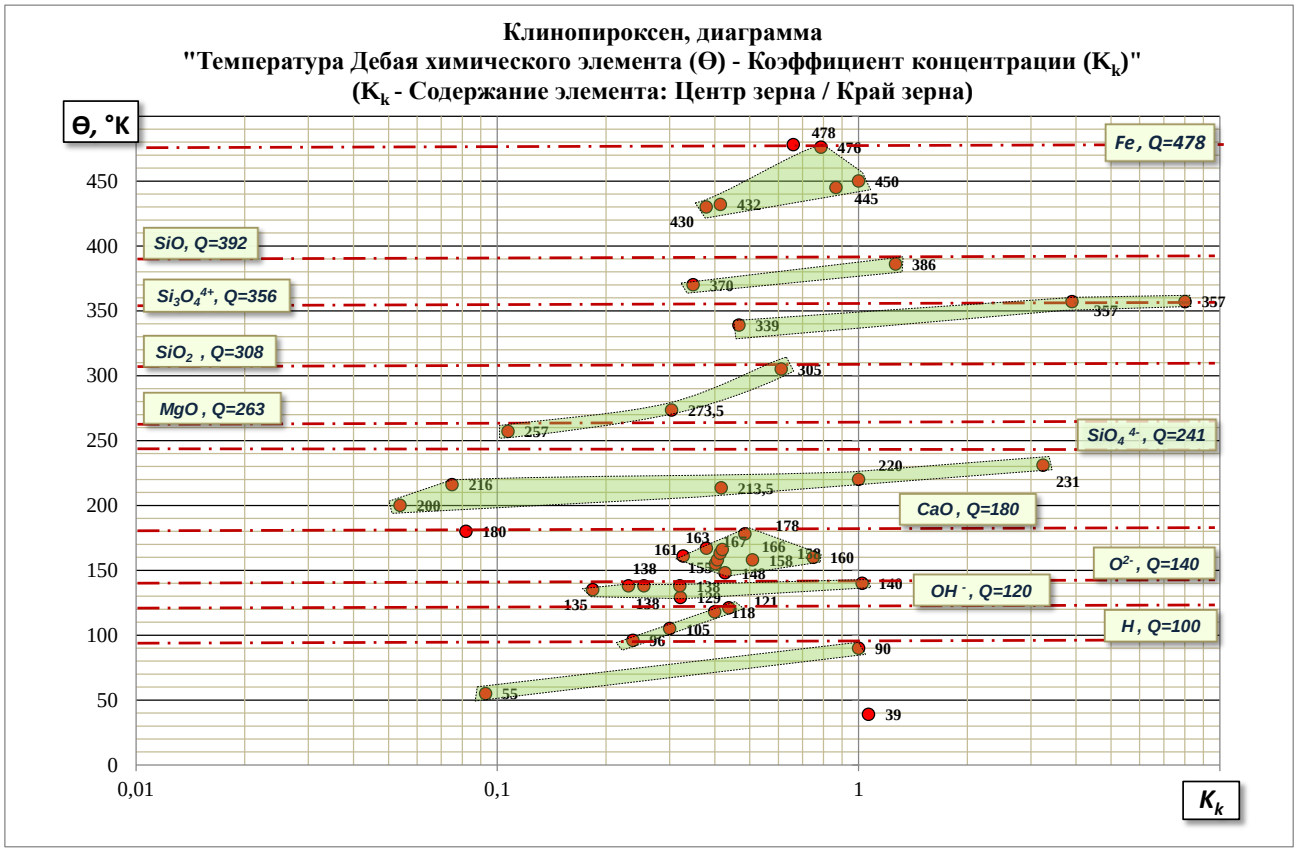


Рис. 7. Влияние, на коэффициент концентрации примесных химических элементов в клинопироксене, элементов матрицы клинопироксена (атомов, комплексов атомов) и температура Дебая (Ѳ) матричных и примесных элементов. На диаграмме обнаруживается влияние на минерагенез атомов водорода (H) и ионов гидроксильной группы (OH^-), отсутствующих в формуле клинопироксена. На диаграмме показаны массы атомов примесных элементов

Таблица 1

Параметры химических элементов и их содержание в земной коре

Элемент	Кларк, %	Масса атома, а.е.м.	Радиус атома, Å	Электроотрицательность	Температура Дебая, °К	Расстояние до инертного газа	Адаптивность, вольт
H	0,88	1	1,54	2,1	100	1	-
Li	0,006	7	1,33	0,9	370	1	-
Be	0,0006	9	1,02	1,8	1060	2	0,77
B	0,0003	10,8	0,73	2,01	1219	3	0,92
C	0,087	12	0,6	2,5	1860	4	3,55
N	0,03	14	0,54	3	400	-3	5,94
O	49,5	16	0,57	3,5	140	-2	5,88
F	0,028	19	0,64	4	200	-1	5,13
Na	2,63	23	1,55	0,9	160	1	0,01
Mg	1,95	24,3	1,32	1,2	386	2	0,32
Al	7,57	27	1,26	1,5	432	3	0,69
Si	25,8	28	1,16	1,9	645	4	1,8
P	0,09	31	1,11	2,1	300	-3	2,11
S	0,048	32	0,94	2,6	180	-2	3,45
Cl	0,19	35,5	0,99	3	180	-1	2,2
K	2,41	39,1	1,96	0,8	90	1	0,01
Ca	3,38	40,1	1,47	1	220	2	0,16
Sc	0,0006	45	1,48	1,2	231	3	0,52
Ti	0,41	47,9	1,36	1,5	430	4	1,73
V	0,014	50,9	1,34	1,6	339	5	2,18
Cr	0,019	52	1,22	1,6	357	6	2,63
Mn	0,085	54,9	1,19	1,95	450	7	3,25
Fe	4,7	55,8	1,16	1,8	478	8	2,91
Ni	0,015	58,7	1,1	1,8	476	-8	2,51
Co	0,0037	58,9	1,11	1,7	445	9	2,55
Cu	0,01	63,5	1,12	1,9	345	-7	1,66
Zn	0,012	65,4	1,18	1,6	305	-6	0,68
Ga	0,0015	69,7	1,24	1,6	333	-5	0,69
Ge	0,0007	72,5	1,21	2	406	-4	0,75
As	0,0005	74,9	1,21	2	285	-3	3,48
Se	0,00006	79	1,16	2,4	89	-2	2,07
Br	0,00016	79,9	1,14	2,9	100	-1	2,25
Rb	0,029	85,5	2,1	0,8	55	1	0,01
Sr	0,014	87,6	1,57	1	129	2	0,1
Y	0,0026	88,9	1,63	1,2	214	3	-
Zr	0,021	91,2	1,54	1,4	274	4	0,83

Элемент	Кларк, %	Масса атома, а.е.м.	Радиус атома, Å	Электроотрицательность	Температура Дебая, °К	Расстояние до инертного газа	Адаптивность, вольт
Nb	0,0019	92,9	1,47	1,6	257	5	0,45
Mo	0,0003	95,9	1,38	1,45	380	6	1,54
Pd	0,000001	106	1,2	1,35	275	-8	1,29
Ag	0,00001	108	1,28	1,9	225	-7	2,67
Cd	0,00005	112	1,36	1,7	213	-6	0,81
In	0,000015	115	1,42	1,7	109	-5	0,66
Sn	0,0035	119	1,4	1,3	200	-4	1,09
Sb	0,00005	122	1,4	1,9	204	-3	1,24
I	0,00004	127	1,33	2,6	70	-1	2,35
Te	0,000001	128	1,28	2,1	129	-2	2,16
Cs	0,00037	133	2,32	0,7	39	1	0,01
Ba	0,026	137	1,61	0,9	96	2	0,05
La	0,003	139	1,8	1,2	135	3	0,38
Ce	0,0043	140	1,63	1,2	138	4	4,09
Nd	0,0022	144	1,74	1,3	138	6	-
Sm	0,0006	150	1,72	1,3	148	8	-
Eu	0,00012	152	1,68	1,2	121	9	-
Gd	0,00054	157	1,69	1,3	155	10	1,37
Tb	0,00009	159	1,68	1,3	158	11	-
Dy	0,0003	163	1,67	1,3	158	12	-
Ho	0,00012	165	1,66	1,3	161	13	-
Er	0,00028	167	1,65	1,3	163	14	-
Tm	0,000048	169	1,64	1,3	167	15	-
Yb	0,0003	173	1,7	1,2	118	16	-
Lu	0,00005	175	1,62	1,3	166	17	0,47
Hf		178	1,52	1,3	178	4	0,8
Ta	0,0002	181	1,46	1,5	216	5	-
W	0,0064	184	1,41	1,8	384	6	0,96
Re		186	1,31	2	415	7	1,1
Pt	1E-07	195	1,23	1,44	235	-8	1,28
Au	5E-07	197	1,24	2,4	162	-7	1,68
Hg	0,000007	201	1,33	1,44	357	-6	1,64
Tl	0,000045	204	1,44	1,8	79	-5	2,21
Pb	0,0018	207	1,44	1,9	105	-4	2,64
Bi	0,00002	209	1,51	1,9	117	-3	2,03
Th	0,00096	232	1,75	1,15	180	3	0,58
U	0,00027	238	1,7	1,15	200	3	3,01

Участие указанных матричных элементов легко распознается на диаграммах «Содержание химического элемента в минерале – Температура Дебая химического элемента».

Расчет массы или температуры Дебая для матричного элемента, представляющего собой комплекс атомов минерала, производится по (8, 9):

$$M_{\text{матр}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} k \cdot m_i}{n}, \quad (8)$$

где $M_{\text{матр}}$ – масса матричного элемента,

m_i – масса i-го химического элемента, входящего в матричный элемент,

k – число атомов i-го химического элемента в формуле минерала,

n – общее число химических элементов, входящих в формулу минерала.

Для температуры Дебая:

$$\Theta_{\text{матр}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} k \cdot \Theta_i}{n}, \quad (9)$$

где $\Theta_{\text{матр}}$ – температура Дебая матричного элемента,

Θ_i – температура Дебая i-го химического элемента, входящего в матричный элемент,

k – число атомов i-го химического элемента в формуле минерала,

n – общее число химических элементов, входящих в формулу минерала.

В результате анализа диаграмм необходимо выявить степень участия шести указанных атомных параметров в процессах минералообразования.

Конкретные задачи студенту ставит преподаватель, выдавая задания в виде таблиц содержания химических элементов в минералах и в горных породах.

Задания студентам выдаются индивидуально в виде таблиц, геологических карт, отчетов.

Ниже приведены таблицы с исходными данными для выполнения студентами лабораторных и практических работ. Таблицы взяты из научных статей, указанных в списке литературы.

Table F1. Trace element concentrations (ppm) in minerals determined by LA-ICP-MS (continued)

Mineral	Act	Act	Act	Act	Act	Act	Act
LA-ICP-MS Spot ID	G909166_25-1	G909166_25-3	G909166_27-1	G909166_27-2	G909166_29-1	G909166_29-2	G909166_29-4
Data Quality (1-3)	1	0	1.5	1	1.5	1	1
1 standard error (ppm)**							
Li	0.22	0.97	0.16	0.31	0.20	0.64	0.25
B	0.85	3.97	0.68	0.49	2.63	0.66	1.11
Si	4893.37	4893.37	4893.37	4893.37	4893.37	4893.37	4893.37
P	33.22	287130.75	8.18	28.15	1429.19	1370.91	16275.30
Sc	4.03	4.06	2.73	3.23	5.04	6.08	5.22
Ti	52.21	57.68	53.85	116.01	271.91	196.63	146.20
V	12.98	16.60	10.64	15.51	14.80	15.83	12.55
Cr	1.02	2.12	0.72	0.77	2.30	4.35	1.59
Mn	200.06	166.55	134.97	147.06	157.56	195.43	144.96
Co	2.60	2.09	1.81	1.99	2.09	2.37	2.66
Cu	1.68	4.05	1.06	1.53	1.66	1.18	2.76
Cu	1.67	3.92	1.06	1.57	1.50	1.26	3.06
Zn	7.29	6.06	5.19	6.23	6.08	6.04	8.86
Zn	6.99	5.95	4.78	6.11	6.46	6.79	9.35
As	1.00	98.18	0.91	0.66	1.47	0.98	6.77
Se	0.69	5.08	0.56	0.57	0.76	0.80	1.05
Se	0.69	18.92	0.33	0.07	0.43	BDL	2.47
Rb	0.03	0.12	0.14	0.02	0.51	0.34	0.25
Sr	6.19	124.70	9.78	2.67	3.85	8.42	10.54
Mo	0.03	0.22	0.07	0.05	0.11	0.07	0.15
Sn	0.09	0.14	0.10	0.11	0.12	0.16	0.11
Te	BDL	BDL	0.01	BDL	0.01	BDL	BDL
Cs	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
Ba	0.23	6.97	2.07	38.74	0.45	98.82	0.40
Ba	0.15	7.23	2.12	60.39	0.52	93.24	0.64
W	0.03	1.36	0.05	0.02	0.09	0.06	0.19
Pb	0.10	0.97	0.11	0.07	0.07	0.19	0.25
Bi	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
Th	0.17	11.11	0.24	0.36	0.36	0.17	1.77
U	0.18	4.41	0.18	1.64	0.15	0.17	0.71
Tl	0.00	0.02	BDL	BDL	0.00	0.00	0.00

Table F1. Trace element concentrations (ppm) in minerals determined by LA-ICP-MS (continued)

Mineral	Act	Act	Act	Act	Act	Act	Act
LA-ICP-MS Spot ID	G909166_29-5	G909166_34-2	G909166_36-1	G909166_36-2	G909166_36-3	G909166_36-4	G909166_37-1
Data Quality (1-3)	1.5	1	1	1.5	1.5	1.5	1
Li (ppm)	1.60	18.55	2.00	0.70	2.65	4.48	0.91
B (ppm)	1.11	1.85	2.05	2.28	3.17	2.89	1.47
Si (ppm)	142436.42	142436.42	142436.42	142436.42	142436.42	142436.42	142436.42
P (ppm)	11.33	323.97	1351.78	118.55	630.30	4700.68	10.04
Sc (ppm)	29.44	38.21	34.62	49.83	50.68	60.18	48.66
Ti (ppm)	178.83	193.80	209.11	1847.08	3236.71	1700.92	668.24
V (ppm)	73.24	215.96	181.40	128.52	265.42	222.55	145.61
Cr (ppm)	6.59	7.89	4.30	4.75	13.16	4.25	7.58
Mn (ppm)	1828.98	3615.69	2584.42	2928.90	2624.93	3105.27	2630.93
Co (ppm)	18.61	68.81	33.18	30.36	46.05	51.76	27.69
Cu(63) (ppm)	16.85	106.21	15.38	17.70	39.29	35.69	9.05
Cu(65)* (ppm)	16.67	110.81	15.45	17.16	38.97	36.23	8.59
Zn(66)* (ppm)	90.35	276.19	157.37	129.91	164.92	227.55	112.52
Zn(68) (ppm)	91.50	268.32	152.47	125.56	160.41	220.21	108.28
As (ppm)	2.33	2.09	3.12	3.69	4.49	4.49	2.27
Se(76) (ppm)	0.34	2.19	0.70	0.95	1.06	0.83	0.90
Se(77)* (ppm)	BDL	BDL	0.28	0.79	0.24	BDL	BDL
Rb (ppm)	8.07	3.37	1.46	0.37	1.97	1.98	0.39
Sr (ppm)	45.36	5.77	13.61	9.30	45.63	20.71	7.17
Mo (ppm)	0.25	0.35	0.16	1.25	0.47	0.15	0.06
Sn (ppm)	0.30	0.47	0.48	0.46	0.80	0.75	0.31
Te (ppm)	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cs (ppm)	0.13	0.33	0.05	0.08	0.12	0.10	0.05
Ba(137) (ppm)	101.89	2.82	16.76	BDL	32.95	2.50	5.02
Ba(138)* (ppm)	104.13	2.93	18.68	BDL	31.25	2.53	4.54
W (ppm)	0.14	0.11	0.30	0.39	1.62	0.27	0.15
Pb (ppm)	0.87	1.49	0.60	1.55	2.10	0.89	0.97
Bi (ppm)	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Th (ppm)	0.40	0.32	0.77	0.30	1.34	1.10	0.08
U (ppm)	0.18	0.88	0.53	0.67	1.02	0.78	0.26
Tl (ppm)	0.04	0.01	0.01	BDL	0.01	0.01	BDL
SiO2 wt.%	30.47	30.47	30.47	30.47	30.47	30.47	30.47

Table F1. Trace element concentrations (ppm) in minerals determined by LA-ICP-MS (continued)

Mineral	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl
LA-ICP-MS Spot ID	80JD-94D_02-3	80JD-94D_03-1	80JD-94D_03-3	80JD-94D_03-4	80JD-94D_03-5	80JD-94D_05-1	80JD-94D_05-2
Data Quality (1-3)	1.5	0	1	2.5	2	2	3
Li (ppm)	10.50	14.79	22.35	45.33	41.82	59.56	43.65
B (ppm)	19.60	4.87	1.63	2.13	0.94	2.32	1.21
Si (ppm)	132619.67	132619.67	132619.67	132619.67	132619.67	132619.67	132619.67
P (ppm)	112.66	380458.08	10427.70	86.84	1104.01	46.36	26.59
Sc (ppm)	34.78	16.17	6.28	3.06	1.81	2.34	1.97
Ti (ppm)	1633.68	346.61	11741.79	5621.19	1133.83	8182.39	151.65
V (ppm)	157.51	166.98	115.63	110.29	88.46	161.34	123.84
Cr (ppm)	26.27	50.19	51.34	64.21	64.67	52.00	43.35
Mn (ppm)	1739.29	1263.35	1516.19	2081.65	2296.62	1803.54	2437.90
Co (ppm)	6.13	12.34	27.36	36.83	41.02	35.24	29.17
Cu(63) (ppm)	134.66	261.38	269.05	542.03	408.38	989.26	222.37
Cu(65)* (ppm)	132.72	255.97	272.92	544.05	409.75	1056.82	219.17
Zn(66)* (ppm)	27.19	38.86	93.01	130.37	132.16	128.01	136.78
Zn(68) (ppm)	63.16	48.04	92.38	128.22	129.35	128.25	131.63
As (ppm)	7.48	35.06	1.37	0.53	0.46	1.03	0.15
Se(76) (ppm)	2.25	BDL	2.39	3.06	2.10	3.80	0.08
Se(77)* (ppm)	BDL	0.66	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Rb (ppm)	32.87	14.86	2.22	33.73	2.53	87.66	0.64
Sr (ppm)	2820.66	3726.76	60.03	61.08	38.43	BDL	238.45
Mo (ppm)	0.01	0.12	0.28	0.17	BDL	0.17	0.11
Sn (ppm)	1.16	0.93	0.82	0.38	0.27	0.47	0.18
Te (ppm)	BDL	BDL	BDL	0.05	0.13	BDL	BDL
Cs (ppm)	1.54	1.01	0.30	3.08	0.67	6.28	0.18
Ba(137) (ppm)	691.02	90.63	7.19	25.94	8.74	82.19	3.06
Ba(138)* (ppm)	709.33	88.75	7.77	24.51	8.97	79.16	3.25
W (ppm)	0.32	12.61	1.92	2.48	0.45	2.47	BDL
Pb (ppm)	18.55	4.82	1.13	4.06	1.68	3.21	1.58
Bi (ppm)	0.79	0.91	0.07	0.03	0.02	0.19	0.03
Th (ppm)	1.64	20.33	0.61	0.02	0.02	0.01	0.08
U (ppm)	2.34	6.66	0.76	0.39	0.19	0.33	0.16
Tl (ppm)	0.22	0.11	0.01	0.27	0.03	0.65	0.02
SiO2 wt.%	28.37	28.37	28.37	28.37	28.37	28.37	28.37

Table F1. Trace element concentrations (ppm) in minerals determined by LA-ICP-MS (continued)

Mineral	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl
LA-ICP-MS Spot ID	ANN006001.045-7	ANN006001.045-8	ANN006001.045-9	ANN006002.023-2	ANN006002.023-3	ANN006002.023-4	ANN006002.023-5
Data Quality (1-3)	1.5	1.5	1.5	2.5	1.5	2.5	1.5
1 standard error (ppm)**							
Li	5.32	6.11	6.48	2.85	3.10	2.43	3.33
B	1.08	1.57	0.66	0.47	0.45	0.79	0.61
Si	4533.63	4533.63	4533.63	4394.08	4394.08	4394.08	4394.08
P	12.04	55.28	231.87	8.48	19.37	70.15	87.97
Sc	0.36	0.28	0.44	0.15	0.23	0.23	0.25
Ti	1474.67	1403.56	2116.28	186.00	2582.31	746.50	1549.70
V	27.34	22.50	26.79	7.23	22.72	9.35	19.26
Cr	11.17	14.09	13.58	2.68	5.28	2.78	3.40
Mn	37.25	33.21	31.97	108.87	139.11	58.41	128.80
Co	3.29	3.28	3.22	4.34	5.34	3.47	8.74
Cu	1.41	3.12	0.45	0.23	0.32	0.43	0.20
Cu	0.67	3.73	0.76	0.28	0.30	0.49	0.33
Zn	7.38	6.75	5.06	18.48	23.12	11.55	22.11
Zn	11.09	8.93	7.65	18.18	20.82	13.08	19.74
As	0.25	0.33	0.18	BDL	0.23	0.21	BDL
Se	5.07	3.81	2.05	2.59	2.16	2.25	3.59
Se	1.57	BDL	BDL	BDL	BDL	0.33	1.54
Rb	0.64	0.08	0.37	4.34	1.01	5.12	0.13
Sr	1.34	0.24	0.33	1.16	0.83	17.79	0.13
Mo	BDL	BDL	BDL	BDL	0.05	0.15	0.06
Sn	0.28	0.28	0.36	0.04	0.11	0.07	0.07
Te	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cs	0.05	0.03	0.07	0.79	0.20	0.53	0.13
Ba	7.02	1.66	0.71	61.59	4.52	68.71	0.20
Ba	8.74	0.98	0.67	56.65	4.17	66.78	0.19
W	0.20	0.13	0.36	0.02	0.34	0.05	0.10
Pb	0.12	0.34	0.15	0.10	0.09	0.64	0.08
Bi	0.10	0.05	0.05	BDL	0.01	0.00	0.01
Th	0.02	BDL	0.02	BDL	0.03	BDL	BDL
U	0.03	0.04	0.05	0.01	0.03	0.05	0.05
Tl	0.03	BDL	0.02	0.09	0.03	0.09	0.01

Table F1. Trace element concentrations (ppm) in minerals determined by LA-ICP-MS (continued)

Mineral	Musc	Musc	Musc	Musc	Musc	Musc	Musc
LA-ICP-MS Spot ID	G909153_15-2	G909153_15-3	G909153_15-4	G909153_15-5	G909153_15-6	G909153_15-7	G909153_16-1
Data Quality (1-3)	3	2.5	3	3	3	1.5	3
1 standard error (ppm) *							
Li	0.52	0.45	0.37	0.38	0.29	0.64	0.35
B	4.43	3.11	3.12	2.85	3.14	3.47	1.89
Si	4688.67	4688.67	4688.67	4688.67	4688.67	4688.67	4688.67
P	15.16	11.15	20.03	9.86	12.76	140.45	11.05
Sc	2.21	1.55	1.09	0.93	1.29	0.44	0.41
Ti	39.67	44.05	41.25	41.98	42.15	34.18	37.96
V	37.45	21.37	13.90	19.44	26.85	7.68	9.03
Cr	3.35	6.43	3.05	2.17	2.52	2.25	1.79
Mn	1.81	1.98	1.79	1.66	1.54	1.74	1.59
Co	0.10	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.09
Cu	0.33	0.52	0.18	0.26	0.15	1.10	0.33
Cu	0.68	0.79	0.37	0.27	0.22	1.53	0.23
Zn	0.69	0.48	0.46	0.55	0.32	0.34	0.36
Zn	3.44	3.71	2.25	2.28	2.14	2.10	1.51
As	BDL	BDL	0.10	0.10	BDL	0.13	BDL
Se	0.63	0.35	0.20	0.27	0.30	0.35	0.19
Se	BDL	0.74	0.40	BDL	BDL	0.54	BDL
Rb	11.12	10.69	9.63	11.62	9.17	8.47	10.01
Sr	0.39	0.95	0.53	0.37	0.44	0.82	0.35
Mo	BDL	0.13	BDL	BDL	0.06	BDL	BDL
Sn	0.25	0.24	0.30	0.34	0.26	0.15	0.21
Te	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cs	0.14	0.11	0.08	0.17	0.10	0.14	0.09
Ba	51.79	55.70	38.50	33.30	43.48	26.47	30.95
Ba	52.45	54.08	31.22	38.14	46.73	28.60	35.05
W	0.14	0.26	0.04	0.21	0.20	0.16	0.19
Pb	0.05	0.06	0.04	0.09	0.04	0.03	0.03
Bi	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	BDL	0.01
Th	0.01	0.03	0.05	0.03	0.01	0.07	0.02
U	0.02	0.07	0.03	0.01	0.04	0.04	0.01
Tl	0.15	0.14	0.11	0.10	0.22	0.09	0.10

Таблица 1 Содержание микроэлементов (г/т) и геохимические отношения в кварцитах и вмещающих породах

№ пробы	57-С	64-С	59-С	58/1-С	60-С	61-С	63-С	65-С	66-С	67-С	68-С
	слюдисто-кварцевая порода	сланец	кварциты								
P	1298,2	1590,6	651,0	556,95	1046,	1126,9	1165,0	392,42	865,15	471,10	934,3
Sc	59,91	32,58	1,92	2,29	2,99	5,08	4,53	0,83	0,29	0,41	1,25
Ti	5882,7	4454,9	261,7	221,18	303,3	280,11	250,3	58,11	335,40	141,74	648,5
V	308,16	235,84	20,03	12,42	55,10	10,65	20,03	14,81	57,73	12,36	77,7
Cr	102,81	31,43	15,08	19,79	5,33	6,19	7,04	0,81	11,40	0	19,6
Mn	581,80	-	237,0	-	335,4	184,65	519,15	-	-	536,74	-
Co	36,68	36,81	4,50	5,18	5,82	3,32	4,16	2,71	4,82	4,651	6,16
Ni	60,16	44,74	23,79	20,42	22,89	22,29	20,79	6,38	19,36	8,28	46,35
Cu	17,43	161,82	308,2	24,06	149,2	40,23	50,68	50,15	38,29	6,89	67,34
Zn	131,92	156,41	14,28	0	156,8	0	47,18	53,05	49,91	19,69	132,4
Ga	16,02	12,07	2,89	2,26	4,75	1,82	3,47	2,36	5,71	2,84	8,16
Ge	2,16	1,54	1,22	1,32	1,19	2,21	1,45	1,18	1,68	1,62	1,28
Se	0,30	9,36	8,27	1,09	17,31	19,09	10,49	0	8,50	4,44	0,55
Rb	9,13	0	2,95	4,02	3,08	5,22	4,10	0	0	0	16,85
Sr	49,36	39,02	6,01	7,62	8,08	14,69	9,12	0,13	0	0	55,92
Zr	7,53	27,27	3,90	13,24	4,26	8,53	3,94	2,33	2,07	0	202,97
Nb	0,68	3,48	0,56	0,88	0,62	0,65	0,66	0,44	0,37	0,47	14,02
Mo	2,25	1,60	0,58	0,91	0,94	0	0,04	0,59	0,76	0,68	0,85
Ag	0	0,04	0,07	0,16	0,52	0,11	0	0	0	0	0
Cd	0,31	0,14	0	0	0	0	0	0,38	0	0	0,38
Sn	0,02	1,16	0	0,36	1,44	1,05	0,95	0	0	0,01	3,19
Sb	0	0	0,37	0,31	0,41	0,34	0,17	0	0	0,05	1,44
Te	0,66	0,68	0,09	0,36	0,02	0,38	0,85	0	0,25	0	0
Cs	0,16	0	0,22	0,28	0,37	0,57	0,38	0	0	0	0,64
Ba	83,69	11,21	26,67	34,68	25,08	49,23	33,59	2,84	0	2,54	59,99
Hf	0,49	0,95	0,19	0,31	0,24	0,39	0,14	0,26	0,19	0,01	4,87
Ta	0,04	0,56	0,17	0,05	0,09	0,12	0,06	0	0,23	0	1,22
W	0,17	0,22	4,32	8,04	1,29	1,09	2,63	1,31	6,20	0,67	5,76
Au	0,13	0,07	0,09	0,07	0	0	0,03	0	0,04	0	0,08
Hg	0	0	0	0,40	0,13	0,23	0,46	0	0	0,01	0,26
Tl	0,09	0,13	0,02	0,02	0,03	0,03	0,09	0	0,00	0,01	0,35
Pb	4,83	12,44	2,16	0	2,53	9,96	10,54	4,28	0	0,76	16,18
Bi	0,04	0,28	0	0	0,02	0,08	0,02	0,09	0	0	0
Th	0	5,21	0,51	0,82	0,81	1,37	1,02	0,12	0	0,32	0,99
U	0,11	3,02	0,22	0,54	0,28	0,49	0,67	0,36	0,11	1,10	0,67
La	2,11	13,57	2,91	1,89	2,02	3,89	2,62	1,05	0	1,48	8,92
Ce	3,75	33,88	6,31	3,83	4,78	8,90	5,51	0	0	1,45	14,12
Pr	1,10	4,94	0,65	0,32	0,51	0,72	0,59	0,25	0	0,21	1,87
Nd	7,05	21,38	2,55	1,27	1,80	3,24	1,93	1,59	0,37	2,64	7,19
Sm	2,40	5,46	0,60	0,34	0,75	0,74	0,52	0,44	0,23	0,55	1,38
Eu	1,11	1,39	0,09	0,03	0,20	0,15	0,04	0,11	0,22	0,17	0,56
Gd	4,11	7,18	0,32	0,19	0,46	0,61	0,20	0,45	1,10	0,53	1,88
Tb	0,62	1,01	0,06	0,04	0,05	0,09	0,13	0,05	0,12	0,02	0,21
Dy	3,97	6,36	0,49	0,25	0,25	0,35	0,55	0,19	0,29	0,05	0,84
Ho	0,84	1,28	0,07	0,06	0,06	0,09	0,08	0,05	0,09	0,01	0,21
Er	1,99	4,22	0,22	0,25	0,34	0,35	0,24	0,13	0,33	0,18	0,57
Tm	0,34	0,52	0,04	0,02	0,05	0,04	0,04	0,02	0,02	0,04	0,08
Yb	2,15	3,36	0,22	0,17	0,25	0,41	0,09	0,03	0,32	0,38	0,58
Lu	0,22	0,47	0,07	0,03	0,01	0,06	0,02	0,0001	0,002	0,01	0,08
Y	16,61	27,11	1,69	1,01	1,88	2,52	1,71	0,52	2,29	1,26	4,49
∑(REE+Y)	48,37	132,13	16,29	9,7	13,41	22,16	14,27	4,88	5,38	8,98	42,98

Концентрации редких элементов (ppm) в природных (G-1, G-2) и экспериментальных (G-3385/12, G-3369) образцах пиропов

Компонент	G-1	G-3385/12	G-2	G-3369
Sr	11,93	10,03	14,56	10,74
Ba	159,00	111,04	214,43	145,59
Y	13,34	11,68	27,66	19,92
Zr	62,78	33,37	53,19	44,28
Hf	1,44	0,92	1,38	1,32
Ta	0,001	0,001	4,17	0,001
Nb	1,24	0,18	1,97	0,29
La	2,00	1,71	3,03	2,49
Ce	4,43	3,36	7,20	5,41
Pr	1,00	0,74	0,81	0,74
Nd	4,51	3,64	4,29	3,46
Sm	1,28	1,11	1,59	1,47
Eu	0,43	0,26	0,39	0,33
Gd	1,82	1,46	1,81	1,38
Tb	0,29	0,22	0,35	0,23
Dy	2,17	1,47	2,70	1,59
Ho	0,49	0,32	0,45	0,29
Er	1,50	1,25	1,75	1,17
Tm	0,23	0,23	0,35	0,24
Yb	1,41	1,45	2,11	1,47
Lu	0,21	0,19	0,42	0,26

Химические составы «замороженных жил»

Образец	SB-805	S198/115	Образец	SB-805	S198/115	Образец	SB-805	S198/115
SiO_2	**68,34**	**67,97**	V	71	62	Dy	2,0	0,7
TiO_2	0,49	0,40	Cr	51	29	Ho	0,3	0,2
Al_2O_3	**15,80**	**15,63**	Co	28	12	Er	0,7	0,5
$Fe_2O_3^*$	4,29	3,36	Ni	48	43	Tm	0,1	0,1
MnO	0,05	0,04	Rb	40	52	Yb	**0,7**	**0,5**
MgO	1,84	2,13	Sr	**416**	**452**	Lu	0,1	0,1
CaO	4,78	5,59	Ba	536	344	Zr	227	199
Na_2O	2,93	2,85	Y	**8,9**	**4,6**	Hf	5,1	4,4
K_2O	0,67	1,38	La	25,4	4,8	Ta	0,5	0,2
P_2O_5	0,11	0,05	Ce	50,5	8,0	Nb	6,7	5,0
Ba+Ce	0,05	0,03	Pr	5,5	0,8	Th	4,1	0,2
Sr	0,04	0,04	Nd	20,2	2,9	U	1,1	0,2
Zr	0,02	0,02	Sm	3,6	0,8	Sr/Y	**47**	**98**
п.п.п	0,72	0,60	Eu	1,3	0,7	La/Yb	**36**	*10*
Сумма	100,15	100,11	Gd	3,3	0,8	La/Sm	7	**6**
			Tb	0,5	0,1	Sm/Yb	**5**	*2*

Примечания: Места отбора образцов: SB-805 – Узкая Салма (=S204/28), S198/115 – Широкая Салма. Главные элементы и оксиды – масс.% (по данным RFA), редкие и редкоземельные элементы – ppm (по данным ICPMS). *Все железо в виде Fe_2O_3. Концентрации характеристических элементов или их отношения соответствующие определению адакитов выделены жирным шрифтом, несоответствующие – выделены курсивом.

Таблица. Химический состав представительных образцов средне- нижнекоровых ксенолитов северной Пацифики

№ обр.	EN131-5	G3s	EN131-2	EN132	EN131-16	EN131-15	VL1-LC1	VL5-LC1	16-11k	NVF-1	**NPA_LC**	**± 1σ**
Порода	n	n	GAR	n	GAR	GAR	gn	GAR	n	gn	**среднее(N=29)**	
Вулкан	Энмелен	Энмелен	Энмелен	Энмелен	Энмелен	Энмелен	Вилига	Вилига	Имурук	Нунивак		
Долгота,°	175.19 W	175.36 W	175.19 W	175.28 W	175.19 W	175.19 W	155.15 E	155.57 E	163.2 W	166.34 W		
Широта,°	65.04	65.11	65.04	65.06	65.04	65.04	61.213	61.393	65.45	60.14		
SiO_2	51.52	53.07	44.92	52.39	47.83	47.86	52.29	46.57	58.23	49.54	**50.3**	5.7
TiO_2	0.81	1.24	0.48	0.19	1.2	1.18	0.89	1.01	0.49	0.4	**0.7**	0.5
Al_2O_3	19.82	16.7	23.15	22.28	17.41	17.63	17.36	16.09	13.42	17.43	**17.7**	3.3
FeO	7.85	11.3	6.79	5.06	10.2	10.16	8.52	9.3	7.79	4.39	**7.6**	2.5
MnO	0.11	0.22	0.09	0.09	0.17	0.16	0.17	0.18	0.24	0.09	**0.1**	0.1
MgO	4.49	5.53	7.26	5.65	6.71	6.84	6.43	8.25	6	9.89	**8.3**	5.4
CaO	8.88	6.22	14.43	9.71	10.7	10.68	8.75	9.93	5.84	15.74	**9.9**	3.4
Na_2O	4.32	3.45	1.73	3.41	3.46	3.19	3.71	4.92	3.95	1.63	**3.0**	1.4
K_2O	1.13	0.63	0.33	0.6	0.86	0.8	0.77	2.01	3.01	0.03	**0.9**	0.9
P_2O_5	0.18	0.31	0.07	0.02	0.34	0.35	0.13	0.31	0.07	0.02	**0.2**	0.1
ппп		0.07		0.05					0.08			
Сумма	99.11	98.74	99.25	99.45	98.88	98.85	99.02	98.57	99.12	99.16	**98.7**	
Cr	73	90	108	194	54	203	241	395	230	979	**335**	368
Ni	55	43	92	126	28	65	120	113	84	102	**277**	623
Sc	26.6	20.4	22.2	18.9	38.7	31.7	22	23	24.7		**24**	13
Pb	3.9	6.5				1.5	2.6	1.6	2.6	5.1	**3.7**	2.3
Rb	4.8	2.9	3.3	3.2	1.5	4.3	3.5	17	21	1.6	**9.7**	17
Ba	288	530	107	178	53	321	202	462	229	17	**282**	286
Sr	596	424	610	725	546	934	537	823	346	274.7	**613**	315
Ta	0.4	0.6	1.5	0	0.1	0.3	0.16	0.45	0.8	0.01	**0.4**	0.4
Nb	7.2	6.6	11	0.5	0.9	4.4	5.6	11.1	12.4	0.5	**5.5**	7.9
Hf	1.9	0.4	1.6	0.2	0.4	0.8	0.8	1.4	1.4	0.4	**1.0**	0.6
Zr	87	52	44	23	32	51	46.0	72	78	14.3	**51**	27
Y	16.7	13.5	4.8	2.4	14.2	17.5	12.8	19.4	30.3	7.5	**14**	7.9
Th	0.40	0.10	1.30	0.10	0.10	0.30	0.20	0.54	0.70	0.04	**0.4**	0.4
U	0.20	0.20	0.60	0.00	0.10	0.20	0.11	0.28	0.30	0.01	**0.3**	0.3
La	12.6	11.8	4.4	1.8	1.2	7.9	6.9	9.3	6.1	1.1	**5.8**	4.6
Ce	28	24.6	8.6	3.5	3.3	19.5	23.0	30.0	13.9	3.2	**14.4**	10.3
Pr	3.8	3.2	1.1	0.4	0.7	2.9	1.9	3.0	1.8	0.5	**2.0**	1.3
Nd	16	13.2	4.7	1.9	4.1	14.3	9.0	14.4	7.8	2.7	**8.7**	6.1
Sm	3.6	2.8	1.2	0.4	1.6	3.6	2.2	3.6	2.2	0.9	**2.1**	1.6
Eu	1.2	1.1	0.6	0.9	0.8	1.4	0.9	1.2	1.4	0.5	**0.9**	0.5
Gd	3.2	2.5	1.1	0.5	2	3.8	2.7	4.4	3.4	0.8	**2.7**	1.6
Tb	0.5	0.3	0.2	0.1	0.4	0.5	0.35	0.60	0.7	0.19	**0.4**	0.3
Dy	2.9	2.2	1.0	0.4	2.2	3.1	2.37	3.68	5.0	1.21	**2.6**	1.5
Ho	0.6	0.4	0.2	0.1	0.5	0.6	0.45	0.70	1.2		**0.6**	0.3
Er	1.7	1.4	0.5	0.3	1.4	1.7	1.40	1.98	3.6	0.69	**1.5**	0.9
Tm	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.17	0.24	0.6		**0.2**	0.1
Yb	1.5	1.3	0.5	0.4	1.2	1.5	1.40	1.75	3.6	0.63	**1.2**	0.9
Lu	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.18	0.22	0.6	0.09	**0.2**	0.1
$^{87}Sr/^{86}Sr$	0.70508	0.70514	0.70384	0.70450	0.703907	0.703665	0.704644*	0.70366	0.70616	0.70247	**0.70400**	0.001
$^{143}Nd/^{144}Nd$	0.51257	0.51259	0.51295	0.51271	0.512846	0.512793	0.512913*	0.51285	0.51298	0.51317	**0.51285**	0.0001
$^{206}Pb/^{204}Pb$	18.45	18.40	18.18	18.36	18.43	18.45	18.49*	18.07	18.57	18.16	**18.44**	0.06
$^{207}Pb/^{204}Pb$	15.52	15.49	15.47	15.57	15.56	15.54	15.57*	15.45	15.44	15.40	**15.52**	0.04
$^{208}Pb/^{204}Pb$	38.24	38.13	37.87	38.29	38.31	38.21	38.28*	37.80	38.04	37.48	**38.22**	0.03
$\varepsilon Nd_{(0)}$	-0.5	-0.1	6.7	2.1	3.7	3.6		4.8	8.7	10.4	**4.7**	
$T_{(Dm)}$	1093	987	500	812		908		750	146		**820**	
Mg#	0.545	0.507	0.692	0.701	0.580	0.585	0.574	0.613	0.618	0.801	**0.636**	0.1
Vp, км/с	6.9	6.8	7.3	7.0	7.1	7.1	7.0	7.1	6.7	7.4	**7.1**	0.3

Примечание: Породы: n – ортопироксеновый гранулит, gn – двупироксеновый гранулит, GAR – гранатовое (келифитовое) габбро. NPA_LC – средний состав нижней коры севера Пацифики, рассчитанный из состава 29 образцов глубинных коровых ксенолитов. $T_{(Dm)}$ – расчетный Nd модельный возраст отделения коры от деплетированной мантии в млн лет, Mg# = Mg/(Mg + Fe) мол., V_p – расчетная скорость сейсмических волн (по уравнению Behn, Kelemen, 2003).
* - Для монофракции клинопироксена.

Major and trace-element compositions of lunar mare-basalt meteorites and similar basalts from Apollo 12 and 15 collections

	Mare basalt meteorites						Apollo 12 and 15 basalts								
	LAP 02 205	Dho 287A	NWA 032	Y-793169	A-881757	EET 87521 (clast A)	12016, 9	12054, 62	15119, 19	15556, 177	A 12 QNB 12,056	A 12 QNB 12,047	A 15 QNB B-22	A 15 QNB B-45	15,475, 152
wt %		1	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9
SiO_2	45.2	43.2	44.7	46.0	47.1	48.4	42.8	45.9	44.9	45.7	43.4	45.1	47.5	46.9	49.0
TiO_2	3.38	2.76	3.08	2.19	2.45	1.13	4.02	4.63	2.57	2.62	5.07	5.20	2.49	2.63	1.75
Al_2O_3	10.0	8.35	8.74	11.1	10.0	12.5	7.23	10.5	8.96	9.48	8.82	10.10	13.00	12.71	9.77
Cr_2O_3	0.19	0.65	0.40	0.24	0.29	0.21	0.57	0.33	0.59	0.84	0.48	0.31	0.16	0.16	0.36
FeO	23.2	22.1	23.0	21.2	22.5	19.2	22.6	19.5	22.2	21.7	21.6	20.5	19.7	21.0	19.9
MnO	0.23	0.29	0.33	0.32	0.34	0.24	0.30	0.29	0.28	0.28	0.29	0.29	0.22	0.26	
MgO	5.99	13.2	8.45	5.75	6.30	6.30	12.7	6.76	9.38	8.15	9.30	6.59	4.61	4.92	8.42
CaO	11.2	8.74	10.9	12.0	11.8	11.7	8.42	11.9	10.0	10.6	10.2	11.3	11.5	11.6	10.8
Na_2O	0.33	0.53	0.37	0.27	0.25	0.41	0.22	0.31	0.26	0.26	0.29	0.31	0.31	0.27	0.31
K_2O	0.11	0.19	0.11	0.06	0.04	0.07	0.06	0.07	0.05	0.05	0.07	0.08	0.04	0.05	0.05
P_2O_5	0.12	0.21	—	—	—	0.08	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.10	0.06	0.05	
Total	100.0	100.2	99.7	99.2	101.0	100.0	99.0	100.2	99.2	99.6	99.6	99.9	99.6	100.5	100.4
Mg#	31.4	51.5	39.6	32.6	33.3	37.3	49.9	38.2	43.0	40.1	43.33	36.34	29.39	29.38	42.90
	ppm	μg/g	μg/g	μg/g	μg/g	μg/g	μg/g	μg/g	μg/g	μg/g					
Li	11.70	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
Be	1.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
Sc	58.6	35.2	56	93.7	99.4	44	—	—	44	46	60	61			
V	129.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
Co	37.3	42.3	42	29.8	27.9	46	54	31	50	50	42	32			
Ni	27.6	20	50	53	52	29	25	—	59	63					
Rb	2.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
Sr	135.3	530	142	78	115	104	126	162	112	101	159	171			
Y	73.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	55	57			
Zr	200.3	60	175	59	45	140	117	128	95	94	135	141			
Nb	14.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	7			
Cs	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
Ba	164.7	200	242	34	27	88	59	64	44	44	62	69			
La	13.40	12.9	11.2	4.72	3.69	8.3	—	—	5.36	5			7	8	5
Ce	37.31	30.3	29.7	14.8	10.9	20.9	16.2	18.8	15.9	15.8	20.2	20.1	21.1	22.5	15.0
Pr	5.15	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
Nd	25.12	20.4	21	11.9	8.31	13	—	—	15	13			17	22	11
Sm	7.56	6.31	6.61	4.3	2.88	3.86	5.5	6	3.82	3.65	6.40	6.50	4.55	4.77	3.45
Eu	1.24	1.18	1.1	1.31	1.1	0.98	1.06	1.27	0.94	0.96	1.31	1.36	0.98	1.00	0.92
Gd	9.95	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
Tb	1.93	1.22	1.56	1.02	0.76	0.8	1.42	1.85	0.83	0.87	1.73	1.80	0.99	1.11	0.79
Dy	12.08	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
Ho	2.45	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
Er	6.71	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
Tm	0.94	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
Yb	6.37	3.35	5.79	4.59	3.26	3.19	5	5.8	2.36	2.27	6.00	5.90	3.08	3.29	2.45
Lu	0.88	0.51	0.8	0.66	0.52	0.48	0.67	0.78	0.32	0.31	0.82	0.89	0.47	0.48	0.38
Hf	5.39	2.64	5	3.01	2.2	2.88	6.3	4.8	2.89	2.89	4.80	5.10			
Ta	0.77	0.71	0.62	0.31	0.22	0.37	—	—	0.41	0.39					
W	0.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
Pb	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
U	0.55	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
Th	2.33	0.9	1.9	0.68	0.42	0.95	—	—	0.49	0.46			0.87	1.01	

Data sources: 1, Anand et al. (2003a); 2, Fagan et al. (2002); 3, major elements from Warren and Kallemeyn (1993) and minor elements from Koeberl et al. (1993); 4, Warren and Kallemeyn (1989); 5, Rhodes et al. (1977); 6, Ryder and Schuraytz (2001); 7, Rhodes et al. (1977); 8, Vetter et al. (1987); 9, Ryder (1985).

REE abundances (in ppm) in silicate and phosphate minerals in LAP 02205 measured by SIMS

	Pyroxene																					
	apx33	1σ	apx36	1σ	apx75	1σ	apx79	1σ	f2px34	1σ	f2px40	1σ	f2px49	1σ	f2px55	1σ	f2px57	1σ	f2px60	1σ	f2px66	1σ
La	1.39	0.08	0.31	0.03	0.06	0.01	0.13	0.01	0.42	0.05	7.43	0.30	0.14	0.02	0.29	0.04	0.07	0.01	0.39	0.05	0.82	0.05
Ce	5.77	0.27	1.16	0.08	0.26	0.02	0.64	0.05	1.87	0.18	24.93	0.78	0.67	0.06	1.44	0.12	0.35	0.02	2.28	0.18	3.64	0.20
Pr	1.27	0.07	0.31	0.02	0.06	0.01	0.15	0.02	0.42	0.05	4.73	0.23	0.15	0.02	0.36	0.03	0.10	0.01	0.50	0.05	0.71	0.05
Nd	7.68	0.26	1.97	0.09	0.39	0.02	0.98	0.05	2.62	0.17	20.90	0.60	1.04	0.05	2.16	0.12	0.66	0.03	2.89	0.16	4.99	0.17
Sm	3.58	0.23	0.99	0.09	0.28	0.03	0.53	0.05	1.64	0.16	7.91	0.49	0.65	0.06	1.14	0.12	0.39	0.04	1.54	0.13	2.77	0.13
Eu	0.17	0.02	0.05	0.01	0.01	0.00	0.03	0.01	0.09	0.02	0.54	0.08	0.04	0.01	0.06	0.01	0.03	0.01	0.06	0.02	0.17	0.02
Gd	5.47	0.46	2.09	0.19	0.46	0.04	1.07	0.09	2.27	0.30	10.30	0.84	0.98	0.10	2.28	0.22	0.70	0.07	2.30	0.24	3.48	0.29
Tb	1.47	0.10	0.35	0.04	0.11	0.01	0.20	0.02	0.61	0.08	2.50	0.21	0.25	0.02	0.57	0.06	0.16	0.02	0.63	0.06	0.78	0.06
Dy	10.71	0.39	3.46	0.14	1.12	0.04	2.07	0.09	4.04	0.21	16.59	0.59	2.05	0.10	3.74	0.19	1.41	0.06	3.99	0.22	5.73	0.23
Ho	2.24	0.16	0.75	0.06	0.29	0.03	0.44	0.04	0.90	0.09	3.30	0.19	0.46	0.04	0.76	0.07	0.31	0.02	0.71	0.07	1.19	0.08
Er	7.87	0.29	2.47	0.09	0.90	0.04	1.55	0.08	2.68	0.18	10.43	0.40	1.71	0.09	2.65	0.14	1.03	0.04	2.62	0.14	3.73	0.16
Tm	1.30	0.08	0.34	0.03	0.12	0.01	0.23	0.03	0.44	0.05	1.48	0.09	0.25	0.02	0.46	0.05	0.16	0.01	0.39	0.05	0.52	0.04
Yb	8.70	0.42	3.00	0.17	1.12	0.06	1.63	0.11	2.81	0.30	10.65	0.58	1.58	0.12	2.47	0.19	1.08	0.08	2.09	0.16	3.78	0.21
Lu	1.50	0.14	0.53	0.05	0.18	0.02	0.25	0.03	0.41	0.07	1.47	0.16	0.32	0.05	0.43	0.06	0.17	0.02	0.31	0.07	0.56	0.06
Wo	22.3		30.6		8.6		20.8		40.4		35.1		23.1		29.2		14.2		38.3		16.6	
En	4.4		22.1		57.9		36.6		5.9		8.5		39.8		43.7		54.9		40.0		34.1	

	f2px68	1σ	fpx123	1σ	fpx128	1σ	fpx130	1σ	fpx173	1σ	hpx40	1σ	hpx45	1σ	hpx64	1σ	hpx68	1σ	hpx94	1σ	jpx71	1σ
La	0.30	0.04	0.08	0.01	0.15	0.02	0.35	0.05	0.18	0.02	0.21	0.03	0.47	0.04	1.85	0.05	0.20	0.02	0.09	0.01	5.41	0.28
Ce	1.59	0.11	0.17	0.03	0.62	0.04	2.09	0.16	0.83	0.05	0.69	0.07	2.44	0.16	5.38	0.17	1.25	0.07	0.34	0.02	16.42	0.70
Pr	0.37	0.03	0.06	0.01	0.11	0.01	0.32	0.03	0.19	0.02	0.17	0.02	0.56	0.05	0.88	0.05	0.31	0.02	0.09	0.01	2.55	0.16
Nd	2.57	0.14	0.34	0.03	1.02	0.04	2.49	0.15	1.13	0.05	1.19	0.06	3.35	0.14	4.30	0.13	1.85	0.08	0.58	0.03	13.41	0.47
Sm	1.23	0.13	0.24	0.04	0.53	0.04	1.31	0.12	0.61	0.04	0.51	0.07	1.72	0.12	1.68	0.08	1.17	0.07	0.38	0.03	4.79	0.30
Eu	0.08	0.01	0.01	0.00	0.03	0.01	0.11	0.02	0.05	0.01	0.03	0.01	0.12	0.01	0.08	0.01	0.04	0.01	0.03	0.01	0.38	0.06
Gd	2.91	0.24	0.32	0.10	1.01	0.09	2.41	0.23	1.25	0.10	1.32	0.17	2.30	0.24	2.30	0.20	2.15	0.17	0.53	0.07	6.86	0.60
Tb	0.56	0.06	0.09	0.02	0.27	0.02	0.54	0.05	0.29	0.02	0.19	0.04	0.59	0.05	0.59	0.04	0.46	0.04	0.17	0.01	1.62	0.12
Dy	4.02	0.20	0.95	0.06	2.36	0.08	3.88	0.22	2.03	0.09	1.90	0.10	4.49	0.20	4.42	0.18	4.17	0.17	1.36	0.06	9.60	0.39
Ho	0.90	0.08	0.24	0.02	0.63	0.04	0.72	0.10	0.47	0.03	0.45	0.04	0.90	0.07	1.01	0.07	0.95	0.07	0.30	0.02	2.18	0.14
Er	3.08	0.16	0.70	0.05	1.91	0.06	3.08	0.18	1.62	0.06	1.46	0.08	2.84	0.15	3.03	0.13	3.32	0.15	0.89	0.05	6.09	0.29
Tm	0.50	0.05	0.13	0.01	0.29	0.02	0.34	0.04	0.25	0.01	0.19	0.02	0.40	0.03	0.55	0.04	0.44	0.03	0.17	0.01	0.84	0.07
Yb	3.42	0.21	0.79	0.08	2.30	0.11	2.52	0.27	1.65	0.09	1.65	0.13	2.75	0.19	3.30	0.17	3.63	0.27	1.11	0.07	6.82	0.36
Lu	0.53	0.07	0.15	0.03	0.42	0.04	0.34	0.07	0.32	0.04	0.32	0.05	0.40	0.06	0.57	0.04			0.19	0.02	1.13	0.10
Wo	24.2		0.9		9.9		35.4		18.7		33.2		36.9		20.9		16.4		21.1		17.9	
En	29.0		46.0		40.5		41.0		41.8		44.4		36.2		21.3		3.7		47.8		14.4	

	Olivine						Plagioclase												Phosphates					
	a2ol16	1σ	a2ol23	1σ	hol13	1σ	f2pl82	1σ	f2pl88	1σ	f2pl95	1σ	jpl49	1σ	gpl8	1σ	gpl9	1σ	p2Ap1	1σ	p2Wh2	1σ	p7Apl0	1σ
La							0.62	0.05	0.83	0.05	0.52	0.03	1.66	0.08	0.68	0.06	0.59	0.03	1225	14	4400	27	2408	15
Ce							1.49	0.10	2.16	0.12	1.28	0.08	3.85	0.16	1.64	0.09	1.25	0.06	3723	28	11264	48	6614	28
Pr							0.19	0.02	0.27	0.02	0.14	0.01	0.50	0.04	0.20	0.02	0.14	0.01	543	9	1396	14	888	9
Nd							0.67	0.04	1.20	0.05	0.50	0.04	1.87	0.07	0.82	0.04	0.67	0.03	2695	27	6376	41	4355	26
Sm							0.20	0.03	0.28	0.04	0.13	0.03	0.47	0.04	0.15	0.03	0.16	0.02	793	22	1782	33	1217	21
Eu							1.36	0.08	1.80	0.09	1.54	0.06	3.64	0.14	1.99	0.09	2.17	0.08	32	2	100	4	51	2
Gd	0.04	0.01	0.03	0.01			0.26	0.04	0.42	0.05	0.16	0.03	0.56	0.05	0.18	0.03	0.16	0.02	789	25	1836	37	1247	23
Tb	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.04	0.01	0.06	0.01	0.03	0.01	0.09	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	145	6	378	10	246	6
Dy	0.18	0.01	0.08	0.01	0.11	0.01	0.16	0.02	0.43	0.03	0.09	0.02	0.59	0.03	0.18	0.02	0.10	0.01	856	16	2539	27	1476	16
Ho	0.07	0.01	0.03	0.01	0.03	0.00	0.04	0.01	0.12	0.01	0.02	0.01	0.12	0.01	0.05	0.01	0.04	0.01	173	6	547	11	302	6
Er	0.28	0.02	0.13	0.01	0.10	0.01	0.08	0.02	0.30	0.03	0.06	0.02	0.34	0.02	0.10	0.02	0.07	0.01	383	11	1463	21	715	11
Tm	0.06	0.01	0.03	0.01															45	3	208	7	87	3
Yb	0.53	0.03	0.27	0.03	0.20	0.02	0.05	0.02	0.31	0.04	0.07	0.02	0.25	0.03	0.07	0.02	0.06	0.01	223	11	1208	23	491	12
Lu	0.13	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01			0.05	0.01			0.03	0.01	0.01	0.01			25	4	147	8	57	4
Fo	42.4		58.3		62.4																			
An							89.2		88.6		86.9		84.6		87.4		88.2							

Errors are 1σ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко С.В. Геохимические особенности кварцитов нижнего протерозоя в центральной части Южно-Печенгская зоны./ С.В. Бондаренко, В.А. Шатров, В.И. Сиротин // Геология и геоэкология: исследования молодых. Материалы XVI конференции молодых ученых, посвященной памяти чл.-кор. К.О. Кратца. Под ред. акад. РАН Митрофанова Ф.П – Апатиты, 2005. – 426 с.

2. Гумиров Ш.Ш. Моделирование процесса твердофазной диффузии. /Сбор.тез. участ. 15 Росс. конф. «Юность, наука, культура».- Обнинск: ДНТО Интеллект будущего, 2000.- с.112-113.

3. Гумиров Ш.В. Участие импульса атома в биохимии, углефикации, минерагенезе. / Ш.В. Гумиров – Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов : сб. науч. статей / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н.Фрянова. – Новокузнецк, 2014.– с. 345-355.

4. Гумиров Ш.В. Моделирование твердофазной диффузии элементов для объяснения их дифференциации в литосфере и рудогенеза. – Естественные и технические науки, №1, 2008. – с. 183-188.

5. Гумиров Ш.В. Основы теории адаптации неживых объектов и адаптивный анализ в геологии. /Ш.В. Гумиров - Новокузнецк, СМИ, 1993. - 409 с.

6. Гумиров Ш.В. Моделирование процесса твердофазной диффузии химических элементов для объяснения их дифференциации в литосфере. / Ш.В.Гумиров, Ш.Ш. Гумиров // Вестник РАЕН (Западно-Сибирское отделение) Выпуск 5. Кемерово, 2002 г.- С. 273-282.

7. Конилов А.Н. Петрология «Замороженных жил» в эклогитах Беломорской провинции на Кольском полуострове. / А.Н. Конилов, А.А. Щипанский. // Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи. Мат. конф. посв. 110-лет. Д.С. Коржинского. - М., 2009.- с. 198-203.

8. Лазько Е.М. Термобарогеохимия и прогнозирование постмагматического оруденения. / Е.М. Лазько и др. // Термобарохимические исследования процессов минералообразования. - Новосибирск: Наука, 1988. - С. 136 - 149.

9. Медведев В.Я. Влияние шоковой декомпрессии на распределение LIL - и HFS-элементов в пиропах из кимберлитов. / В.Я. Медведев, К.Н. Егоров, Л.А. Иванова // Физико-химические факторы пет-

ро- и рудогенеза: новые рубежи. Мат. конф. посв. 110-лет. Д.С. Коржинского. - М., 2009.- с. 269-271.

10. Овчинников Л.Н. Образование рудных месторождений. / Л.Н. Овчинников - М.: Недра, 1988. - 255 с.

11. Рундквист Д.В. Общие принципы построения геолого - генетических моделей рудных формаций. Т.1. / Д.В. Рундквист - Новосибирск: Наука, 1983. - С. 14 - 26.

12. Anand M. Petrology and geochemistry of LaPaz Icefield 02205:A new unique low-Ti mare-basalt meteorite. / M. Anand, Lawrence A. Taylor, Christine Floss, Clive R. Neal, Kentaro Terada, Shiho Tanikawa.

Составитель
Шамил Валетдинович Гумиров

Математический анализ распределения редкоземельных элементов

Часть 2.

Моделирование и технология адаптивного анализа минерагенеза редкоземельных и примесных элементов в минералах

Методические указания к выполнению лабораторных работ

Компьютерный набор Ш.В.Гумиров

Напечатано в полном соответствии с авторским оригиналом

Подписано в печать 15.06.2014
Формат бумаги 60×84. 1\16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,91. Уч. изд. л. 2,16. Тираж 50 экз. Заказ

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.
Издательский центр СибГИУ