

## Дефекты кристаллической структуры породообразующих минералов как генетические метки метаморфических пород в разрезе Кольской сверхглубокой скважины

В.П. Лютов<sup>1</sup>, Н.П. Виноградова<sup>2</sup>, Ю.В. Глухов<sup>1</sup>, Е.Н. Котова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

<sup>2</sup> ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург

**Аннотация.** Сравнительный анализ структурных и спектроскопических особенностей породообразующих минералов из пород по разрезу СГ-3 и из гомологичных образований в обрамлении Печенгской структуры позволил получить ряд новых результатов, касающихся специфики погребенных архейских толщ и построения корреляционных взаимоотношений между глубинными и поверхностными образованиями. Исследования были проведены с использованием данных ЭПР по вакансионным дефектам ( $E_1$ -центры) и дефектам, связанным с изоморфным вхождением ионов Al-, Ge-, Ti- в решетку породообразующего кварца, а также данных по рентгенолюминесценции (РЛ) собственных и примесных дефектов в плагиоклазах. Выявлены ранговые корреляционные связи между качественным составом спектров РЛ плагиоклазов и петрогенетическими характеристиками вмещающих пород. Оценена зависимость системы примесных и собственных структурных дефектов в породообразующих минералах по разрезу СГ-3 от глубины залегания и петрогенеза вмещающих докембрийских пород. Показано, что примесные структурные дефекты в породообразующем кварце могут служить генетической меткой метаморфических пород докембрийских структурно-формационных комплексов и являются одним из критериев для типизации и корреляции глубоко преобразованных толщ раннего докембрия, вскрытых СГ-3.

**Abstract.** A comparative analysis of structural and spectroscopic peculiarities of the rock forming minerals in the SG-3 rocks and their homologues in the Pechenga structure framing allowed obtaining some new results concerning the specific character of buried Archaean units and constructing correlations between deep and surface formations. The investigations were performed with the use of the EPR data on vacancy defects ( $E_1$ -centres) and defects related to the isomorphous incorporation of Al-, Ge-, Ti-ions into the lattice of the rock forming quartz and the X-ray luminescence (XRL) data on the proper and admixture defects in plagioclase. Rank correlations between the qualitative composition of the plagioclase XRL patterns and petrogenetic characteristics of host rocks have been found. Dependence of the system of admixture and proper structural defects in the rock forming minerals along the SG-3 section vs the depth of occurrence and petrogenesis of the Precambrian host rocks has been estimated. Our study showed that the admixture structural defects in the rock forming quartz can serve as a genetic mark of metamorphic rocks in the Precambrian structural-formational complexes. They are one of the criteria for typization and correlation of deeply metamorphosed Early Precambrian units penetrated by SG-3.

### 1. Введение

Архейские породы, вскрытые Кольской сверхглубокой скважиной (СГ-3) в интервале глубин 6842-12262 м и представляющие собой фундамент печенгского рифтогенного осадочно-вулканогенного комплекса (PR<sub>1</sub>), сложены биотит-, амфибол-биотит-, гранат-биотит-, силлиманит-биотит-, ставролит-гранат-плагиоклазовыми и другими гнейсами, вмещающими согласные и секущие тела амфиболитов, гранитоидов, ультрабазитов и связанных с ними метасоматитов, маломощные пропластки магнетит-силикатных и других пород. Эти, существенно гнейсовые толщ, интенсивно диафторированы, мигматизированы и гранитизированы с широким проявлением процессов мусковитизации, микроклинизации, хлоритизации и окварцевания. На отдельных интервалах разреза породы значительно рассланцованы и дислоцированы с формированием бластомилонитов, бластокатаклазитов и псевдотахилитов по ним.

В геологическом строении района заложения скважины, помимо осадочно-вулканогенных толщ раннего протерозоя, участвуют породы двух структурно-формационных комплексов – интенсивно преобразованного гнейсогранулитового (AR<sub>1</sub>) в северо-восточном и юго-западном обрамлении Печенгской структуры и зеленокаменного (AR<sub>2</sub>), слагающего Каскамско-Шууртинский фрагмент зеленокаменного пояса (Виноградова и др., 2000). Зеленокаменный комплекс представлен амфиболовыми, хлорит-актинолитовыми, цоизит-хлорит-актинолитовыми, гранат-эпидот-амфиболовыми и другими сланцами, амфиболитами, гранатовыми амфиболитами, а также двуслюдяными, слюдисто-хлоритовыми, слюдисто-актинолитовыми, магнетит-куммингтонит-кварцевыми и другими – силлиманит-, гранат-, ставролит содержащими гнейсами и

сланцами, имеющими реликтовые структурно-текстурные и минеральные признаки вулканогенно-осадочных пород. Доминирующее значение в составе гнейсогранулитового комплекса имеют биотит-плагиоклазовые гнейсы, переслаивающиеся с амфибол-биотит-, гранат-биотит-плагиоклазовыми гнейсами и амфиболитами, а также гранат-, кордиерит-гранат-, силлиманит-гранат-, биотит-плагиоклазовые гнейсы и гранулиты, переслаивающиеся с подчиненно развитыми двупироксен-роговообманковыми гранулитами.

В сравнении с гомологичными образованиями в обрамлении Печенгской структуры, породы архея с глубин 6842-12262 м оказались интенсивно преобразованными процессами диафореза, связанными с лапийским и карельским тектогенезом. Их корреляция с породами района заложения скважины на основании только петрографических и геохимических, в том числе изотопно-геохимических, исследований оказалась весьма затруднительной и неоднозначной (*Кольская сверхглубокая...*, 1998; *Homologies of rocks...*, 1998; *Vinogradova, Smirnov*, 2000).

Предшествующие работы по изучению химического состава, параметров и упорядоченности кристаллической структуры полевых шпатов метаморфических пород разреза СГ-3 и района ее заложения показали перспективность использования данных типоморфных особенностей породообразующих минералов для решения задач по расчленению архейских глубинных комплексов пород и их корреляции с поверхностными образованиями (*Магматические и метаморфические...*, 1986; *Vinogradova*, 1998; *Виноградова, Сангаджиев*, 1989). Предлагаемый вариант выявления и верификации возможных поверхностных гомологов для пород по разрезу СГ-3 базируется на данных по реперным примесным дефектам в структуре кварца и полевых шпатов из реликтовых минеральных парагенезисов протолита и низкотемпературных новообразований. Они могут быть использованы и при интерпретации самого разреза архейской части СГ-3.

## 2. Методика исследований

Коллекции мономинеральных проб кварца (около 150 проб) и полевых шпатов (130 проб) из kernового материала СГ-3 и предполагаемых пород-гомологов района заложения скважины были подготовлены в лабораториях ВСЕГЕИ (Н.П. Виноградова) в ходе предшествующих работ. Использованы также пробы кварца (6 проб) и полевых шпатов (6 проб) из протерозойских пород, предоставленные П.К. Скуфьиным, 9 проб прожилкового пегматитового кварца из архейской части разреза, переданные для изучения С.В. Икорским. Выделение мономинеральных фракций из пород было произведено во ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург), где ранее были выполнены также химический и рентгеноструктурный анализы использованных проб. Спектроскопическое изучение кристаллохимических особенностей минералов, их электронно-микроскопические и микрозондовые анализы, фазовая ИК-диагностика произведены на аппаратуре Института геологии Коми НЦ УрО РАН.

Спектроскопические исследования плагиоклазов проведены методом рентгенолюминесценции (РЛ) на оригинальной аппаратуре, построенной на базе монохроматора AAS-1 (Carl Zeiss, Jena), свечение минералов возбуждалось рентгеновским излучением аппарата УРС-1,0 (трубка БСВ-2, Fe-антикатод, 50 кВ; анодный ток – 14 мА). Аппаратура позволяла регистрировать люминесценцию в спектральном диапазоне 240-830 нм. Оптическое излучение регистрировалось с помощью ФЭУ-106. Стабилизация спектрального состава люминесценции достигалась предварительной одночасовой рентгенизацией образцов. Осуществлялась коррекция спектров на спектральную чувствительность установки, а также дальнейшая компьютерная обработка по декомпозиции спектральных контуров. В целях выявления распределения плагиоклазов по данным РЛ был произведен анализ экспериментального массива спектров посредством приближенной качественной оценки вклада отдельных полос в общий спектр, основанный на выделении доминантных полос излучения (*Лютюев и др.*, 1999; *Lutov et al.*, 2000; *Глухов и др.*, 2002).

Основным методом изучения кварца из пород по разрезу СГ-3 и их гомологов на поверхности являлся электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), позволяющий производить селективную регистрацию разнообразных атомных дефектов в структуре минерала. Для выявления максимально возможного многообразия атомных дефектов в кварце и оценки их концентраций нами использована многоступенчатая процедура радиационно-термического воздействия на минерал. Она включала отжиг при температурах 320, 530 и 1000°C,  $\gamma$ -облучение образцов дозами в 0.5 и 30 Мрад. Облучение производилось в Санкт-Петербургском государственном технологическом институте на установке МРХ- $\gamma$ -20, изотоп –  $^{60}\text{Co}$ . Для отжига образцов кварца использована печь трубчатой конструкции с автоматической регулировкой температуры с точностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Спектры ЭПР порошковых препаратов кварца регистрировались на серийном радиоспектрометре SE/X 2547 (RadioPAN, Польша) при комнатной температуре и температуре кипения жидкого азота. Навеска порошка составляла приблизительно 200 мг. Концентрации парамагнитных центров оценивались с помощью отраслевых эталонов ВИМС

(Концентрационные..., 1986). Погрешность измерения концентраций парамагнитных центров без учета систематической ошибки их содержания в эталоне – около 5 %, абсолютные значения концентраций центров в большинстве случаев оценивалось с погрешностью, близкой к 20 %.

Некоторые образцы кварца были проанализированы на электронном микроскопе Jeol 6400 (Япония), укомплектованным энергодисперсионной приставкой Link Isis, обеспечивающей проведение микрозондовых анализов, оператор – В.Н. Филиппов. Фазовый состав минералов контролировался с помощью инфракрасной спектроскопии (Specord M80), оператор – М.Ф. Самотолкова.

### 3. Изоморфные примеси плагиоклазов по данным рентгенолюминесценции

Для получения информации о наличии изоморфных замещений в плагиоклазе – одном из главных минералов пород по разрезу СГ-3, методом рентгенолюминесценции (Lehmann, 1984; Walker, 1985; Борозновская, 1989; Морошкин и др., 1987) было изучено 80 препаратов плагиоклаза, довольно равномерно представляющих основные типы пород архейской части разреза СГ-3 в интервале 6842-12052 м, 9 образцов из метабазальтов маярвинской свиты в интервале 6170-6739 м, около 40 проб плагиоклазов из пород-гомологов гнейсогранулитового и зеленокаменного комплексов архейского обрамления Печенгской структуры, а также пробы плагиоклазов из разноглубинных габбро-долеритов протерозойских осадочно-вулканогенных образований. Химический состав исследованных плагиоклазов варьирует от альбита до битовнита. Достоверность химического определения номеров плагиоклаза подтверждена согласованной оценкой их основности по данным ИК-спектроскопии (коэффициент корреляции 0.87,  $n = 91$ ). Наиболее часто как в породах разреза СГ-3, так и в гомологах на поверхности, встречаются олигоклаз и андезин (рис. 1).

Все изученные пробы плагиоклазов метаморфических пород разреза СГ-3 и района ее заложения обладают интенсивной РЛ в регистрируемом спектральном диапазоне. Спектры РЛ являются суперпозицией нескольких полос, обусловленных излучением собственных структурных дефектов и примесных ионов металлов. Характеристика полос излучения получена при разложении всех спектров на гауссовы составляющие (рис. 2), для интерпретации полос излучения использованы литературные данные (Marfunin, 1979; Walker, 1985; Леснов и др., 1980; Горобец, 1981; Борозновская, 1989; Борозновская, Коноваленко, 1990).

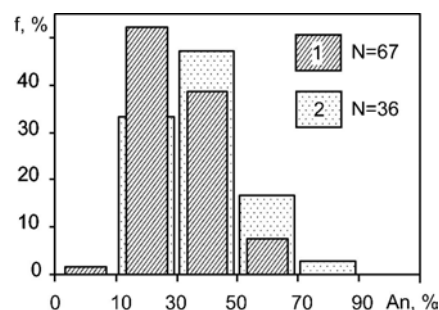


Рис. 1. Нормативная основность плагиоклазов из пород архейской части разреза СГ-3 (1) и района ее заложения (2); число проб 67 и 36 соответственно

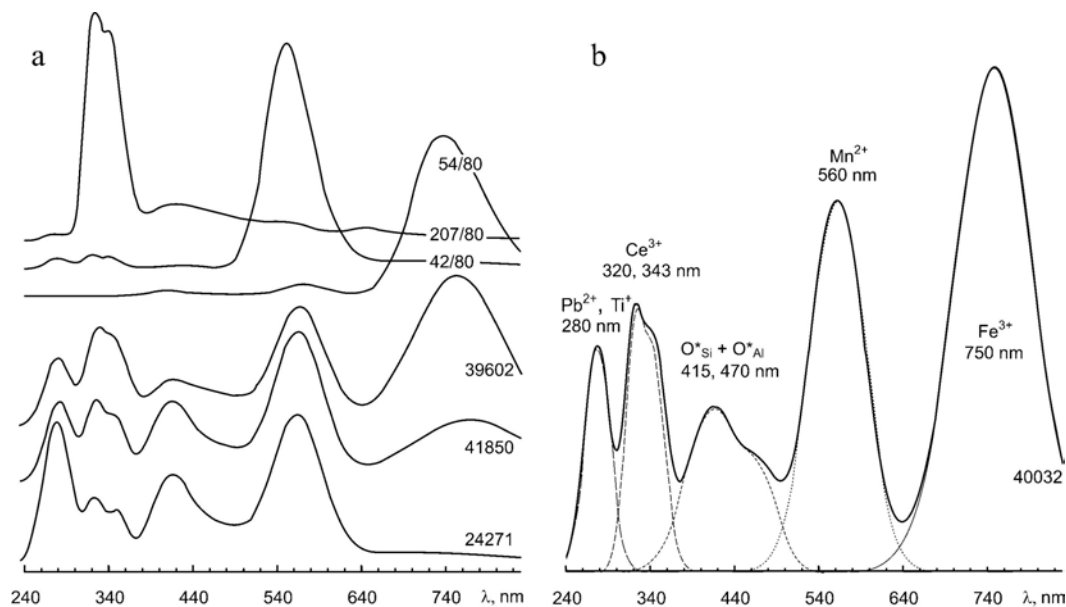


Рис. 2. Спектры рентгенолюминесценции плагиоклазов из пород разреза СГ-3 (обр. 24271, 39602, 41850), района заложения скважины (обр. 42/80, 207/80, 54/80) (а), и пример гауссовой декомпозиции спектральной кривой (обр. 40032 из СГ-3) (б)

Полоса РЛ с максимумом 745-755 нм и полушириной 80-125 нм в красной спектральной области отнесена к проявлению структурных примесей  $\text{Fe}^{3+}$  в тетраэдрических позициях. Полоса РЛ с максимумом в диапазоне 555-565 нм и с полушириной  $\Delta\lambda = 55-65$  нм отнесена к излучению примесных ионов  $\text{Mn}^{2+}$ , замещающих  $\text{Ca}^{2+}$  в плагиоклазах. Полоса РЛ с максимумом в области 410-420 нм ( $\Delta\lambda = 60$  нм) связана с кислородными дырочными радикалами типа  $\text{O}^*$  – собственными структурными дефектами в кремнекислородной подрешетке. Аналогичные  $\text{O}^*$ -центры в тетраэдрах с замещенным кремнием на алюминий ( $\text{AlO}_4$ -центры) обуславливают появление полосы с максимумом РЛ в области 460-480 нм ( $\Delta\lambda = 50$  нм). Дублетная полоса в области 315-350 нм связана с излучением центра, представляющего собой ион  $\text{Ce}^{3+}$ , изоморфно замещающий  $\text{Ca}^{2+}$ . В наших образцах эти компоненты дублета имеют максимумы на 315-325 и 340-350 нм и полуширину 20-30 нм. Крайняя ультрафиолетовая полоса с максимумом в области 275-285 нм и полушириной 25-35 нм обусловлена излучением ионов  $\text{Pb}^{2+}$  и/или  $\text{Tl}^+$ , изоморфно замещающими  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Na}^+$  в кристаллической решетке плагиоклаза.

Рентгенолюминесцентное свечение плагиоклазов сильно зависит от химического состава минерала. Так, относительный вклад полосы  $\text{Mn}^{2+}$  в интегральную яркость люминесценции положительно коррелирует с содержанием в составе плагиоклаза кальция, т.е. определяется долей анортитового минерала (рис. 3). Наличие такой зависимости объясняется тем, что изоморфизм  $\text{Mn}^{2+}$  осуществляется по кальциевым позициям минерала. Линейный характер этой связи у поверхностных гомологов достигается при систематически меньшем значении спектрального вклада  $\text{Mn}^{2+}$  за счет в среднем более ярких полос люминесценции в ультрафиолетовой части спектра, чем у плагиоклазов глубинных архейских толщ (Лютюев и др., 1999а).

Типизация плагиоклазов по спектральному составу РЛ была произведена путем выделения доминантных компонентов и качественной оценки вклада отдельных полос в общий спектр (Лютюев и др., 1999б; Lutov et al., 2000; Глухов и др., 2002). В качестве критерия выделения доминантных полос в индивидуальном спектре использовано некоторое пороговое значение  $d$  для отношения интенсивностей каждой отдельной  $i$ -й полосы к интенсивности наиболее яркой из них:  $x_i = I_i/I_{\max}$ . При классификации полосы спектра ей присваивается значение:

$$h(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i \geq d \\ 0, & x_i < d \end{cases} \quad (1)$$

Весь спектр РЛ представляется в виде двоичного числа, разряды которого определены функцией  $h(x_i)$ . Для определенности младший двоичный разряд закрепляется за самой коротковолновой полосой. Десятичный эквивалент такого "образа" спектра запишется в следующем виде:

$$C = \sum_{i=0}^{n-1} 2^i \cdot h(x_i), \quad (2)$$

где  $n$  – число полос в спектре, а  $i = 0$  соответствует самой коротковолновой полосе РЛ. В общем имеется  $2^n - 1$  сочетания полос или типов спектров плюс один случай отсутствия свечения, в котором  $h(x_i)$  хотя и не определены, но положим, что  $C = 0$ . В итоге весь динамический диапазон интенсивностей люминесценции разбивается на два уровня: 1) яркая полоса –  $h(x_i) = 1$ , 2) свечение в полосе слабое –  $h(x_i) = 0$ . При этом качественно усилится информация о спектральном составе свечения, которая в большей степени контролируется ведущими факторами минералообразующей среды, а влияние аппаратных и несущественных факторов в значительной мере будет подавляться.

В спектрах РЛ плагиоклазов выделяется пять полос ( $n = 5$ ), следовательно, в "непустых" спектрах РЛ возможна всего 31 их комбинация. Последовательность представления полос спектра двоичным числом в данном случае выглядит следующим образом:  $\{\text{Fe}^{3+}, \text{Mn}^{2+}, \text{O}^*, \text{Ce}^{3+}, \text{Pb}^{2+}\} \rightarrow \{h(x_4), h(x_3), h(x_2), h(x_1), h(x_0)\}$ . Выбор величины критерия  $d$  определяется характеристиками вариаций спектрального состава РЛ в анализируемом массиве спектров. Оптимальным следует признать значение  $d$ , выявляющее максимальное число комбинаций доминирующих полос. Наибольшее число комбинаторных типов спектров РЛ в данной выборке плагиоклазов из гнейсов реализуется при  $d = 0.3 \div 0.4$ , а из метабазитов – при  $d = 0.12 \div 0.25$  (Глухов и др., 2002).

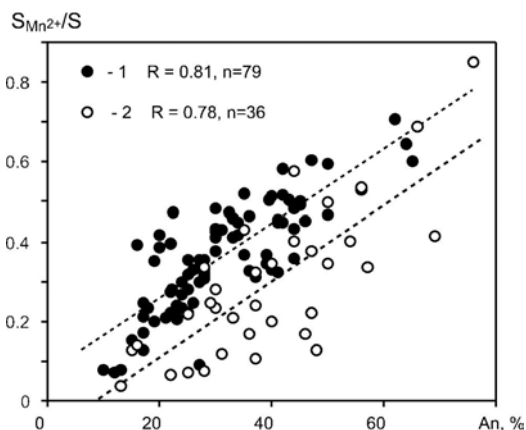


Рис. 3. Зависимость относительного вклада полосы  $\text{Mn}^{2+}$  в интегральную яркость рентгенолюминесцентного свечения от нормативного состава плагиоклаза ( $n$  – число образцов):

- 1 – архейские породы по разрезу СГ-3;
- 2 – породы района заложения скважины

На гистограмме распределения плагиоклазов по типам спектров РЛ (рис. 4) хорошо видно, что спектры довольно разнообразны по числу комбинаций доминирующих полос. В выборке преобладают два типа спектров (56 % от всего количества) с доминирующими полосами ионов железа, марганца и свинца (таллия), образующими следующие примерно равновероятные сочетания: 11000, 11001. На гистограмме также обнаруживается многочисленная группа спектров (01000, 01111, 01001, 11111, 11011, 11101), в которых к перечисленным главным полосам может добавляться яркое свечение собственных дефектов и ионов церия. По нашим данным, присутствие полосы РЛ церия является также специфическим признаком спектров плагиоклазов из поверхностных двупироксен-амфибол-плагиоклазовых гранулитов в районе заложения скважины.

Сравнительный анализ РЛ плагиоклазов из метабазитов (метабазальтов, амфиболитов, метадолеритов, основных гранулитов) и из гнейсов (биотит-плагиоклазовых, гранат-биотит-плагиоклазовых и других) разреза СГ-3 позволяет выявить черты сходства и различия соответствующих им спектральных составов РЛ (рис. 4). Сходство спектров РЛ плагиоклазов из обеих групп пород выражается наличием качественно идентичных спектральных составов 11000, 11001, 01001, 11101. Практически все разнообразие РЛ породообразующих плагиоклазов достигается за счет проб (38 из 89), выделенных из различных гнейсов. Специфику спектров РЛ полевых шпатов, выделенных из гнейсов, подчеркивают частые комбинации с доминирующими проявлениями ионов церия и полосы собственных дефектов. В спектрах полевых шпатов из метабазитов такая роль принадлежит комбинаторному типу с единственной полосой ионов марганца. Спектры плагиоклазов, входящих в состав различных метабазитов, в целом однородны и представлены разновидностями из числа наиболее встречающихся в общей выборке – типами 11000, 11001, 01001 с неполным набором полос, а также типом 01000, зарегистрированным только для полевых шпатов из данных пород.

Анализ выборок спектров РЛ полевых шпатов из метабазитов различной формационной принадлежности указывает на сходство спектров (типы 11000, 11001) плагиоклазов из амфиболовых сланцев (метабазальтов) маярвинской свиты печенгского рифтогенного комплекса и из метадолеритов наиболее глубокой части разреза СГ-3. Вместе с тем зеленосланцевое перерождение метабазитовых пород интрукстального комплекса, связанное с карельской тектономагматической деятельностью (Глухов и др., 2002), отчетливо проявилось в спектрах плагиоклазов относительным увеличением яркости люминесценции в полосе  $\text{Ce}^{3+}$ .

Детальное рассмотрение спектров РЛ плагиоклазов из различных гнейсов выявило ряд следующих закономерностей (рис. 5). Гранат-биотит-плагиоклазовые гнейсы с примесью высокоглиноземистых минералов (ВГМ) содержат плагиоклазы, характеризующиеся частым типом спектра РЛ 01111, а также плагиоклазы с более редкими спектрами 11101, 01011 и 01101. И те, и другие типы спектров для полевых шпатов иных разновидностей гнейсов нехарактерны. Таким образом, яркая среднестатистическая "безжелезистая" специализация отчетливо полихромных спектров РЛ является типоморфным признаком плагиоклазов гранат-биотит-плагиоклазовых гнейсов.

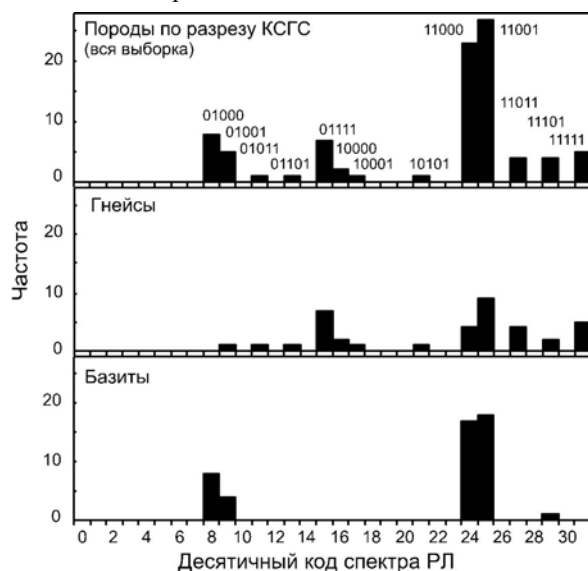


Рис. 4. Распределение плагиоклазов различных пород в дискретном пространстве комбинаторных типов рентгенолюминесценции.

Десятичный код спектра РЛ получен на основе выделения доминирующих полос. Приведенные двоичные эквиваленты соответствуют следующей последовательности полос:  $\{\text{Fe}^{3+}, \text{Mn}^{2+}, \text{O}^*, \text{Ce}^{3+}, \text{Pb}^{2+}\}$ ; "1" – доминанта; "0" – фоновая интенсивность.

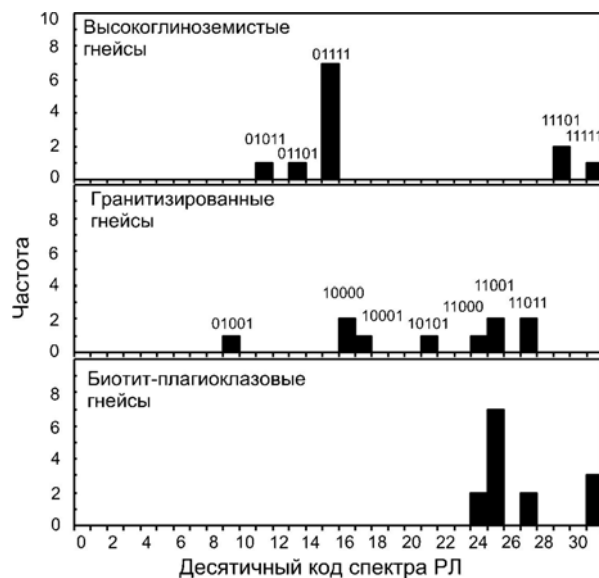


Рис. 5. Специфика спектральных составов рентгенолюминесценции породообразующих плагиоклазов из различных гнейсов разреза СГ-3

Биотит-плагиоклазовые гнейсы и их гранитизированные разновидности содержат плагиоклазы с одними и теми же типами спектров РЛ – 11001, 11011, 11000. Эти спектры обладают различной степенью полихромности и явно более частой "железисто-марганцевой" специализацией. Характерным признаком биотит-плагиоклазовых гнейсов является частое обнаружение в них плагиоклазов с типом спектра 11001 и "предельно полным" комбинаторным типом 11111, один раз встреченным также среди спектров РЛ полевых шпатов гранат-биотит-плагиоклазовых гнейсов с ВГМ. Специфической особенностью биотит-плагиоклазовых гнейсов нижней части разреза СГ-3 оказалось полное отсутствие в них плагиоклазов, имеющих спектры РЛ с доминантами ионов церия.

Отличительной чертой гранитизированных биотит-плагиоклазовых гнейсов является наличие в них плагиоклазов с редкими комбинаторными типами спектров 10000, 01001, 10001 и 10101. Схожая среднестатистическая встречаемость главных компонентов в спектрах плагиоклазов из неизмененных и гранитизированных биотит-плагиоклазовых гнейсов и одновременное их различие по комбинаторным типам спектров РЛ позволяют предположить, что процесс гранитизации гнейсов разреза СГ-3 обуславливает геохимическое разделение ионов-люминогенов в пороодообразующих новообразованных плагиоклазах.

Таким образом, плагиоклазы метаморфизованных базальтов печенгского рифтогенного комплекса (маярвинской свиты) и их гомологов (метадолеритов), формирующих интрузивные тела в архейском фундаменте Печенгской структуры, обладают однородными спектрами РЛ. Исключение составляет повышенная интенсивность излучения ионов  $\text{Ce}^{3+}$  в спектрах РЛ плагиоклазов из метабазитов, подвергшихся наложенному зеленосланцевому метаморфизму. Плагиоклазы биотит-плагиоклазовых и гранат-биотит-плагиоклазовых гнейсов с ВГМ отличаются богатым разнообразием качественно различных спектров рентгенолюминесценции. Для первых характерны спектральные регистрограммы с сочетаниями доминирующих полос примесных ионов железа, марганца и свинца (таллия). Для вторых, напротив, существенно полихромные, нередко "безжелезистые", спектры с преобладанием комбинаторных типов с участием доминант ионов церия и собственных дефектов. Признаком гранитизации биотит-плагиоклазовых гнейсов является появление в спектрах новообразованных плагиоклазов комбинаций с меньшим числом полос, выдающихся по интенсивности РЛ, которое предположительно может быть обусловлено геохимическим разделением ионов-люминогенов.

#### 4. Примесные и собственные дефекты кристаллической структуры кварца

Кварц присутствует практически во всех породах разреза СГ-3 и приповерхностных образованиях района ее заложения. Кристаллохимические сведения по кварцу в литературе по СГ-3 не представлены. В метаморфических породах базитового состава содержание кварца не превышает первых процентов, но в главных породах архейских комплексов – гнейсах его количество может достигать 30 % и более. Кроме пороодообразующего, в архейских толщах в составе аплитов-пегматоидных пород присутствует кварц прожилкового типа (*Магматические и метаморфические...*, 1986).

На микроуровне кварц содержит разнообразные фазовые включения. Под электронным микроскопом-микросондом на свежих сколах кварца с разных глубин СГ-3 выявляются кристаллики циркона, апатита, рутила, анатаза, мусковита, монацита, калиевых и натровых полевых шпатов, пирита, халькопирита, гематита, мельчайшие жидкие включения растворенных солей натрия и калия (рис. 6). Присутствуют микронные сфероиды в основном Fe-Ni или Nd-La-Ce-Fe составов (*Лютюев и др.*, 2000). Некоторые из химических элементов, входящих в состав названных минеральных включений, могут в растворенном виде содержаться в решетке кварца. В отличие от многих других минералов, природный макрокристаллический кварц – почти чистое химическое соединение с постоянными физическими свойствами. Содержание различных примесных элементов в его кристаллической решетке обычно не превышает 0.01 %. Возникновение структурных дефектов в кварце вызвано условиями кристаллизации, радиационным фоном вмещающих пород, процессами диффузии и разрушения кристаллической структуры.

В процессе исследования методом ЭПР было проанализировано более 150 мономинеральных протолок кварца, выделенных из различных амфиболитов, биотит-плагиоклазовых, гранат-биотит-плагиоклазовых, гранат-двуслюдяных, двуслюдяных гнейсов и сланцев, пегматитов и кварц-полевошпатовых прожилков разреза СГ-3 (более 80 проб), а также одноименных пород района заложения скважины (70 проб).

Наиболее часто в решетке кварца фиксируются примесные ионы Al, Ge и Ti. Соответствующие им ростовые структурные примесные дефекты появляются в результате изовалентных изоморфных замещений кремния четырехвалентными ионами  $\text{Ge}^{4+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$  или трехвалентными примесными ионами  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ge}^{3+}$ ,  $\text{Ti}^{3+}$  в ассоциации с одновалентными компенсаторами ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$ ...) по схеме гетеровалентного изоморфизма (рис. 7а, б). Простейшие собственные дефекты структуры кварца возникают при наличии вакансий в кислородной и кремниевой подрешетках (рис. 7с, d). Обычно

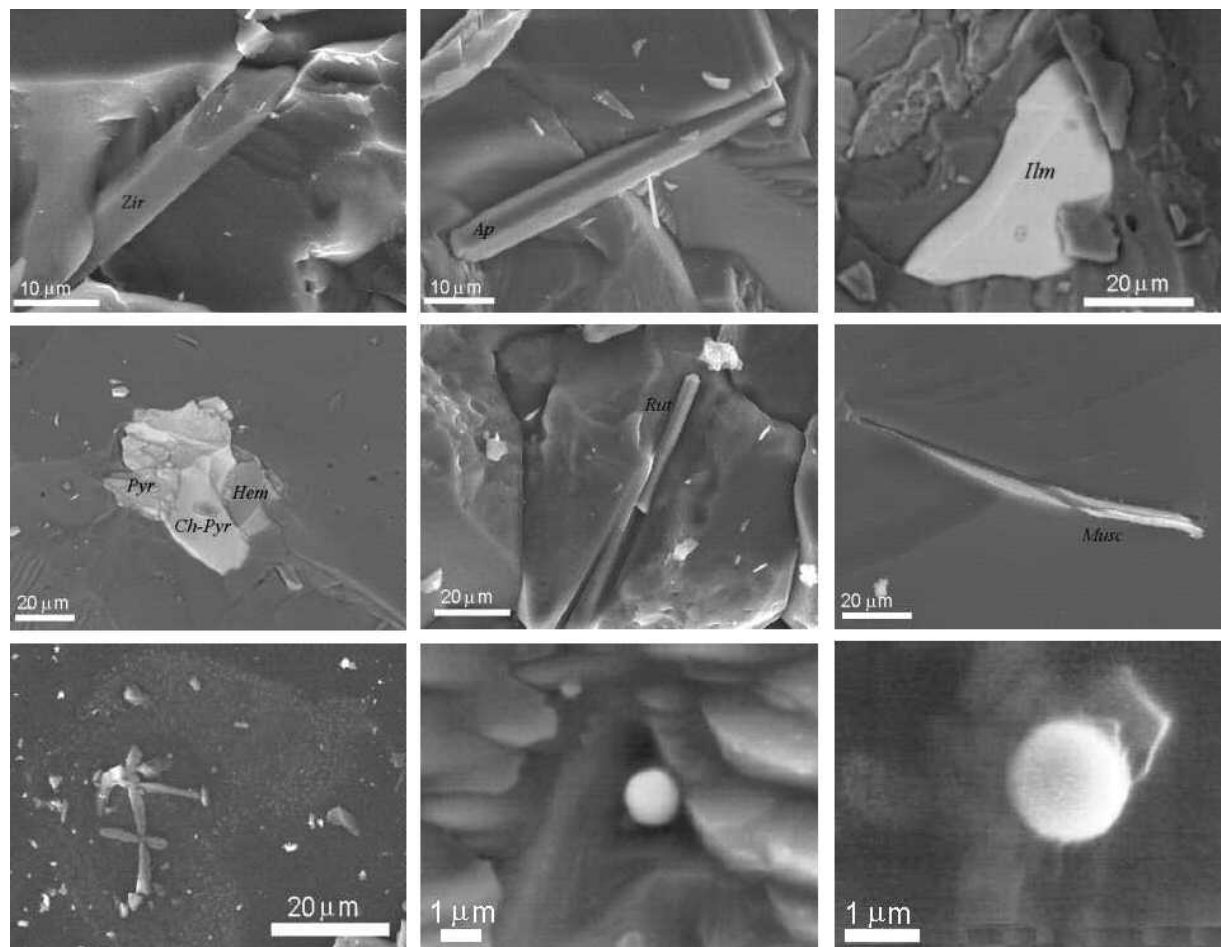
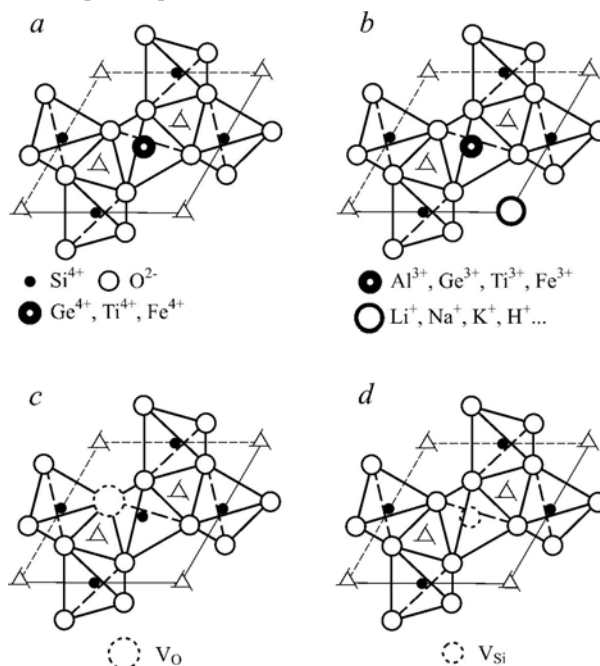


Рис. 6. Минеральные микровключения в кварце пегматоидных прожилков по разрезу СГ-3.

Верхний ряд – кристаллы циркона, апатита и зерно анатаза в пегматитовом кварце с глубины 8443 м (обр. 29073). Средний ряд – полифазное пирит-халькопирит-гематит включение, кристалл рутила и пластинка мусковита в пегматитовом кварце с глубины 11290 м (обр. 41025). Нижний ряд – пленки и кристаллы (Na, K)Cl на поверхности сколов, декорирующие взорвавшиеся при вакуумировании препарата газовой-жидкие включения; самородные Fe и Nd-Fe-La-Ce микронные сфериды в порах и под поверхностью кварца (обр. 41025).

Рис. 7. Структура основных атомных дефектов в кварце:

- a – замещение кремния по схеме изовалентного изоморфизма;
- b – замещение кремния по схеме гетеровалентного изоморфизма;
- c – вакансии кислорода, E-центры;
- d – вакансии кремния, кислородные центры



дефекты этого типа образуются под действием природной ионизирующей радиации и являются эффективными дозиметрами, датчиками радиоактивности вмещающих пород. Наиболее широко для этих целей используются дефекты, связанные с вакансией кислорода, так называемые E-центры.

Из перечисленных примесных ионов спектроскопически активными являются только метастабильные трехвалентные состояния ионов германия, титана. Примесной ион алюминия фиксируется методом ЭПР при потере ионами кислорода примесного тетраэдра одного из электронов, т.е. при замене одновалентного компенсирующего иона положительно заряженной дыркой, локализованной на ионе кислорода. Вакансионные дефекты становятся наблюдаемыми при захвате дополнительных носителей заряда ионами ближайшего окружения. Во всех случаях дефекты являются электронно-дырочными центрами, для перехода которых в парамагнитное состояние требуется перераспределение носителей электрических зарядов в кристалле, которое может быть инициировано ионизирующей радиацией или термическим отжигом.

### 5. Радиационные дефекты структуры кварца, E<sub>1</sub>'-центры

К одним из наиболее изученных радиоскопическими методами дефектных центров в кварце относятся одиночные вакансии кислорода в кремнекислородном тетраэдре, образованные в результате радиационного воздействия на кварц. Парамагнитная форма (E<sub>1</sub>') присуща вакансии с одним захваченным электроном. Время жизни парамагнитной формы в условиях современных поверхностных температур оценивается в сотни миллионов лет. В исходном состоянии исследуемый кварц содержит в основном непарамагнитные формы E<sub>1</sub>'-центров. Для их перевода в парамагнитное состояние был применен термический отжиг образцов на воздухе (300°C, 20 мин.) (Моисеев, 1985; Раков, 1989). Измеренная таким образом концентрация E<sub>1</sub>'-центров является мерой количества в кварце образованных в результате природной радиации равновесных кислородных вакансий.

В результате изучения проб кварца из поверхностных обнажений архейского возраста было установлено, что E<sub>1</sub>'-центры наблюдаются практически во всех образцах, причем содержание этих центров колеблется в пределах 0.04-0.6 ppm (табл. 1). В то же время, E<sub>1</sub>'-центры были зарегистрированы лишь в небольшом количестве проб (10 из 71), отобранных из архейской части разреза скважины в интервале глубин 8-12 км (табл. 2). Эти пробы, в основном, соответствуют породам из толщ с относительно высоким содержанием радиоактивных элементов, профили которых представлены в литературе (Кольская сверхглубокая..., 1998). Таким образом, согласно полученным данным, вакансии кислорода в кварце из архейских пород, находящихся на больших глубинах, в отсутствие высокого радиационного поля нестабильны. Изучение кварца из аркозовых песчаников лучломпольской свиты раннего протерозоя приповерхностных, из обнажений и глубинных показало, что концентрация E<sub>1</sub>'-центров уменьшается с ростом глубины (рис. 8), т.е. происходит залечивание вакансий кислорода в структуре кварца; этот факт обусловлен повышенными P/T условиями формирования пород и/или снижением палеодозы E<sub>1</sub>'-центров.

Таблица 1. Концентрации E<sub>1</sub>'-центров в пробах кварца из архейских пород района заложения СГ-3

Тектонические блоки, AR <sub>2</sub> <sup>1</sup> -AR <sub>2</sub> <sup>2</sup>	Число проб	C, ppm	
		Среднее	Интервал
Зеленокаменный пояс, Каскамско-Шуортинский фрагмент	12	0.16	0.08-0.4
Лиинахамарский	20	0.22	0.05-0.48
Лапландский	5	0.12	0.09-0.16
Суормусский	15	0.20	0.04-0.61
Мурманский	7	0.19	0.05-0.48

Таблица 2. Концентрации E<sub>1</sub>'-центров в пробах кварца из архейских пород разреза СГ-3

Код образца	Глубина, м	C, ppm	Вмещающие породы
27197	8007	0.02	Амфиболит флогопитизированный
31266	8761	следы	Амфиболит
36233	9762	0.05	Биотит-плагиоклазовый гнейс
38431	10352	следы	Амфибол-биотит-плагиоклазовый гнейс
38458-65	10353	0.036	Биотит-плагиоклазовый гнейс
38599	10490	0.24	Аплит в гранат-биотит-плагиоклазовом гнейсе
41850	11541	0.19	Биотит-гранат-плагиоклазовый гнейс
42040	11626	0.17	Биотит-гранат-плагиоклазовый гнейс
42088	11634	0.08	Гранатовый амфиболит
44390	12029	0.09	Метабазит



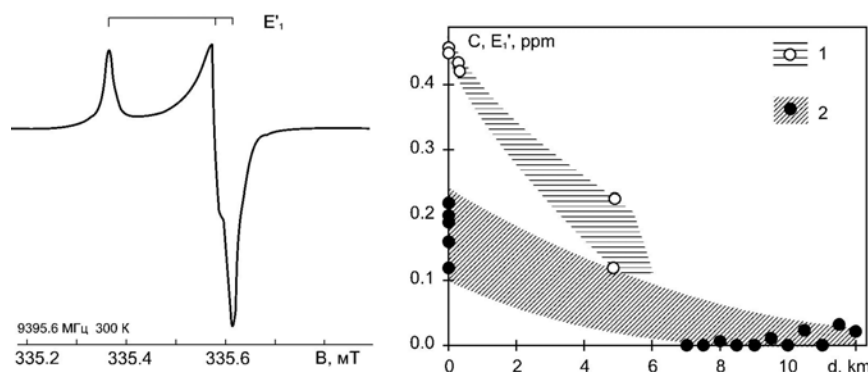


Рис. 8. Спектр ЭПР  $E_1'$ -центров (порошковый препарат кварца), и тенденции изменения их концентраций в кварце аркозовых песчаников лучломпольской свиты (1) и архейских пород в разрезе СГ-3 и в районе заложения скважины (2). Точки, представляющие архейский разрез – средние значения по 500-метровому интервалу

### 6. Структурные примеси алюминия в кварце

Структурные примеси алюминия присутствуют в кварце любого генезиса. Условия образования минерала и процессы метаморфизма оказывают существенное влияние как на концентрацию примесного алюминия, так и на распределение примесей по возможным разновидностям дефектов. Ионы алюминия в кварце занимают кремниевые позиции, а недостающий положительный заряд компенсируется каким-либо щелочным ионом или протоном (Weil, 1984). Алюмощелочные комплексы в результате облучения теряют компенсатор и становятся парамагнитными  $(AlO_4)^0$ -центрами дымчатой окраски кварца (рис. 9). Однако переход в парамагнитную форму возможен только для регулярных алюмощелочных комплексов. Значительная часть алюминия находится в дефектных областях структуры или имеет в качестве компенсатора протон. Для активации таких дефектов необходим предваряющий облучение высокотемпературный отжиг.

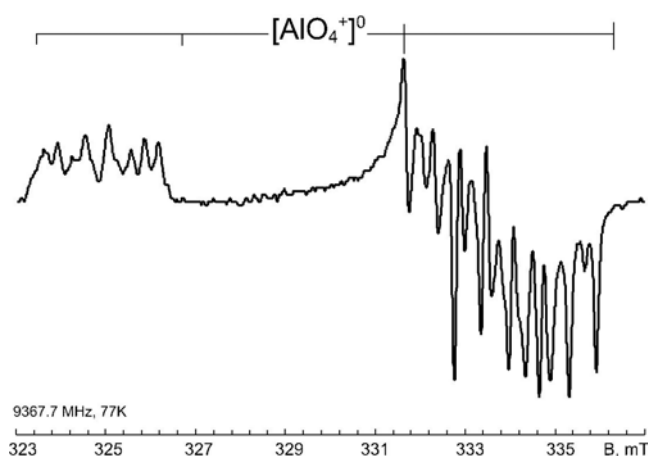


Рис. 9. Спектр ЭПР Al-центров в порошковом препарате облученного кварца (30 Мрад)

Для изучения Al-центров в кварце использована следующая методика. В исходных пробах измеряется содержание центров (C), которое указывает на величину современной природной радиации. Затем образцы облучаются насыщающей дозой  $\gamma$ -лучей в 30 Мрад, обеспечивающей полный переход регулярных алюмощелочных комплексов в парамагнитные Al-центры, их концентрация –  $C_\gamma$ . Отношение  $C/C_\gamma$  – степень облученности кварца; величина этого отношения определяется, прежде всего, современной мощностью потока природной радиации. Это отношение также сильно зависит от средней температуры кварца за время стабильности парамагнитного состояния Al-центров. После этих измерений образец отжигается в течение 1 часа при  $1000^\circ C$  и вновь облучается. Зарегистрированная концентрация ( $C_\gamma^T$ ) характеризует общее количество примесного алюминия в кварце, а отношение ( $C_\gamma^T/C_\gamma$ ) растет с увеличением степени дефектности кварца и его насыщенности ОН-группами. По некоторым данным, это отношение уменьшается с ростом температуры кристаллизации или последующего метаморфизма минерала.

Согласно результатам измерений, естественные парамагнитные формы Al-дефектов для кварца из пород архейских толщ в разрезе СГ-3 нехарактерны, отношение концентраций  $C/C_\gamma$  близко к нулевому значению (рис. 10). Небольшое естественное содержание  $(AlO_4)^0$ -центров, как правило, отмечаются в кварце, в котором присутствует также радиационные  $E_1'$ -центры. Напротив, кварц из поверхностных обнажений района заложения скважины содержит  $(AlO_4)^0$ -центры во многих случаях почти в максимально возможных концентрациях ( $C \approx C_\gamma$ ), что свидетельствует об относительно высоком радиоактивном фоне вмещающих пород.

Содержание алюмощелочных комплексов, оцененное как  $C_\gamma$ , в кварце из керна СГ-3 колеблется в широких пределах: от 5 до 130 ppm. Полная концентрация примесей алюминия ( $C_\gamma^T$ ) имеет эту же верхнюю границу, но не опускается ниже 10 ppm. При этом в среднем около 70 % примесного алюминия (соответствует значению  $C_\gamma^T/C_\gamma \approx 1.5$ ) находится в решетке кварца в виде алюмощелочных комплексов. В

единичных случаях в кварце верхних архейских толщ эта доля опускается до 20 % ( $C_{\gamma}^T/C_{\gamma} \approx 5$ ). Основные типы вмещающих пород по разрезу СГ-3 по концентрациям примесного алюминия почти не отличаются (табл. 3). Некоторая дифференциация отмечается лишь внутри разновидностей гнейсов. Кварц их гранитизированных разновидностей в среднем несколько обеднен по общему количеству структурного алюминия и вкладу алюмощелочных комплексов. Максимальные концентрации примесного алюминия наблюдались в прожилковом кварце.

На диаграмме зависимости величины отношения  $C_{\gamma}^T/C_{\gamma}$  от полной концентрации примесного алюминия (см. рис. 10) фигуративные точки, соответствующие кварцу архейских пород в разрезе СГ-3, распадаются на две отдельные области:

- 1) с относительно низкой концентрацией структурного алюминия и малым вкладом щелочной разновидности ( $C_{\gamma}^T \gg C_{\gamma}$ );
- 2) с широким диапазоном изменчивости концентраций алюминия, представленного, в основном, алюмощелочными комплексами ( $C_{\gamma}^T \approx C_{\gamma}$ ).

Первая область характерна для кварца различных пород, главным образом, из верхней архейской части разреза СГ-3, вторая – из нижней. Кварц из пород гомологов на поверхности имеет устойчиво большие концентрации структурного алюминия с разнообразным вкладом алюмощелочных комплексов (табл. 4). Первой области вариаций концентрационных характеристик кварца из пород разреза СГ-3 соответствует кварц из поверхностных пород позднеархейского зеленокаменного пояса, второй – кварц из пород инфракрустальных архейских комплексов обрамления Печенгской структуры, приуроченных к Лапландскому и Лиинахамарскому блокам.

Таблица 3. Концентрационные характеристики примесных дефектов в кварце архейских пород в разрезе СГ-3

Вмещающая порода	Al-центры				Ge/Li-центры		Ti/Li-центры	
	<i>n</i>	$C_{\gamma}$ , ppm	$C_{\gamma}^T$ , ppm	$C_{\gamma}^T/C_{\gamma}$	<i>n</i>	<i>C</i> , ppm	<i>n</i>	<i>C</i> , ppm
Метабазиты (амфиболиты)	21	<u>7-39</u> 26	<u>18-44</u> 32	<u>1-3</u> 1.3	19	<u>0-0.04</u> 0.024	20	<u>0-0.8</u> 0.28
Гнейсы, в том числе:	39	<u>7-61</u> 28	<u>16-68</u> 37	<u>1-4.9</u> 1.6	36	<u>0-0.18</u> 0.05	35	<u>0-0.93</u> 0.15
серые	17	<u>11-47</u> 30	<u>22-50</u> 35	<u>1-2.3</u> 1.3	16	<u>0.03-0.07</u> 0.05	15	<u>0-0.6</u> 0.2
с примесью ВГМ	12	<u>8-61</u> 37	<u>19-68</u> 47	<u>1-4.9</u> 1.6	10	<u>0.02-0.2</u> 0.09	10	<u>0-0.93</u> 0.24
гранитизированные	10	<u>7-31</u> 14	<u>16-40</u> 28	<u>1.2-3.4</u> 2.1	10	<u>0-0.05</u> 0.02	10	<u>не обн.</u>
Прожилковый кварц пегматоидов и аплитов	22	<u>5-134</u> 34	<u>10-134</u> 45	<u>1-3.2</u> 1.5	23	<u>0-0.2</u> 0.08	23	<u>0-1.0</u> 0.3

Примечание: над чертой – диапазон вариаций, под чертой – среднее значение; *n* – число проб.

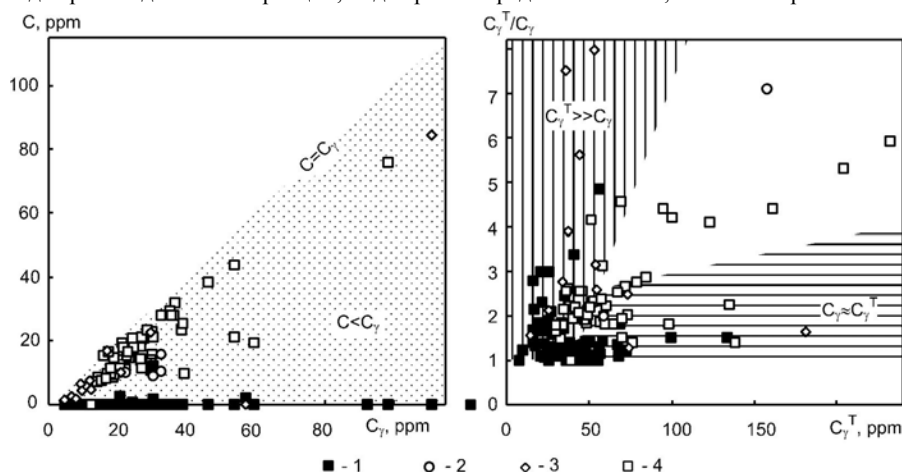


Рис. 10. Концентрации Al-центров в породообразующем кварце из пород различных комплексов района заложения СГ-3 и архейской части разреза скважины:

1 – кварц архейских пород в разрезе СГ-3; 2 – кварц из протерозойских пород Печенгской структуры; 3 – кварц из пород позднеархейского зеленокаменного пояса; 4 – кварц из пород инфракрустальных архейских комплексов в районе заложения СГ-3. *C* – естественное содержание центров;  $C_{\gamma}$  – концентрация центров после лабораторного облучения дозой 30 Мрад;  $C_{\gamma}^T$  – концентрация центров после отжига (1300 К) и повторного облучения

Таблица 4. Концентрации парамагнитных центров в кварце из пород района заложения СГ-3

Вмещающие породы	n	Ge/Li	[TiO <sub>4</sub> /R <sup>+</sup> ] <sup>0</sup> , а.у.		[AlO <sub>4</sub> ] <sup>0</sup> , ppm			E <sub>1</sub> ,
		ppm	Li	H	C	C <sub>γ</sub>	C <sub>γ</sub> <sup>d</sup>	ppm
<i>Печенгская палеорифтовая структура</i>								
Песчаники	2	0	0	0	10-15	32-33	40-44	0.45-0.46
<i>Реликты инфракристалльных пород в зоне глубинного разлома на северном фланге Печенгской структуры</i>								
Bt-Qtz-Fsp пегматит	1	0.14	0	0	8.9	30	59	0.18
Gr-Bt-Pl гнейс	1	0.01	0	0	10	22	160	не опр.
<i>Зеленокаменный пояс южного обрамления Печенгской структуры</i>								
(Ky, St)-Gr-Bt-Pl гнейсы	3	0	0	0	6-80	9-110	15-180	0.13-0.3
Амфиболиты	9	0-0.01	0	0	0-13	5-57	34-74	0.08-0.1
Метагаббро	1	0-0.01	0	0	2.7	6.7	54	0.1
Amph-Pl гнейс	1	0-0.01	0	0	10	21	54	не опр.
<i>Лапландский блок</i>								
Амфиболиты	2	0-0.04	0	0	9-12	17-20	38-50	0.09-0.12
2Px-Amph-Pl гранулит	1	0	1.0	0.5	21	54	98	0.12
Gr-Bt-Pl гранулиты	2	0	0.9-1.0	0.3-1.1	10-20	40-60	130-230	0.13-0.16
<i>Лишнахамарский блок</i>								
Gr-Bt-Pl гранулиты	10	0-0.06	0-0.2	0-0.2	10-30	19-40	30-240	0.14-0.35
2Px-Amph-Pl гранулиты	6	0-0.27	0-2.8	0	8-25	14-140	30-155	0.06-0.13
Гнейсы	7	0	0	0	10-20	18-30	60-100	0.17-0.48
Метагаббро	1	0	0	0	75	98	140	0.45
Qtz-Fsp прожилок	1	0	0	0	23	30	40	0.15
Магнетит-силикатная порода	1	0	0	0	7	14	36	0.05
<i>Суормусский блок</i>								
(Kord-Gr)-Bt-Pl гранулиты	7	0	0	0	0-44	12-54	30-80	0.12-0.6
Qtz-Fsp прожилок	1	0	0	0	28	33	60	0.32
Амфиболит	8	0	0	0	8-40	17-46	30-70	0.04-0.38
<i>Титовский фрагмент Мурманского блока</i>								
Амфиболит	1	0.02	0	0	19	24	47	0.05
Amph-Bt-Pl гранодиорит	1	0	0	0	15	22	52	0.14
2-Px-Amph-Pl гранулиты	6	0	0	0	7-30	15-35	40-70	0.07-0.48
Qtz-Fsp пегматит	1	0	0	0	15	23	49	0.19

Примечание: Bt-Qtz-Fsp – биотит-кварц-полевошпатовый; Gr-Bt-Pl – гранат-биотит-плагиоклазовый; (Ky, St) – Gt-Bt-Pl – (кианит, ставролит) – гранат-биотит-плагиоклазовый; Amph-Pl – амфибол-плагиоклазовый; 2Px-Amph-Pl – двупироксен-амфибол-плагиоклазовый; Qtz-Fsp – кварц полевошпатовый; (Kord-Gr)-Bt-Pl – (кордиерит, гранат) – биотит плагиоклазовый; Amph-Bt-Pl – амфибол-биотит-плагиоклазовый.

## 7. Изоморфные ионы германия в решетке кварца

Более отчетливая дифференциация пород разреза СГ-3 и гомологов на поверхности проявляется по уровням концентрирования в кварце структурных примесей германия и титана (Lutoev et al., 2000; 2001; Котова, 2000). Германий принадлежит к числу весьма рассеянных элементов. Биотит-плагиоклазовые гнейсы, роговообманковые разности амфиболитов и гранитоиды, слагающие большую часть архейского разреза СГ-3, характеризуются приблизительно постоянным содержанием германия (около 0.5 ppm) (Кольская сверхглубокая..., 1984). Относительно высокая концентрация элемента (0.75-1.0 ppm) выявлена в железистых амфиболитах, максимальная – в актинолитовых сланцах (в среднем 1.8 ppm).

Ионы германия в четырехвалентном, как, по-видимому, и в двухвалентном (Weil, 1984), состоянии могут изоморфно замещать кремний в структуре силикатов. При радиационном воздействии на германийсодержащий кварц образуются разнообразные стабильные парамагнитные центры типа Ge<sup>3+</sup>, различающиеся формой компенсации недостающего положительного заряда. В природном кварце германиевые центры встречаются редко, их присутствие обусловлено спецификой сопутствующей рудной минерализации по кварцсодержащим породам. Примесной германий в кристаллической решетке кварца, в отличие от других примесных элементов, занимает наиболее совершенные участки структуры и является весьма консервативным к различным воздействиям на минерал. Поэтому германиевые центры могут быть своеобразной меткой однофациальных кварцсодержащих пород, претерпевших различные стадии метаморфизма (Лютеев и др., 2000а).

Наиболее распространены в природном кварце щелочные разновидности германиевых центров. В породообразующем кварце около 80 % концентрации всего изоморфного германия приходится на центры с ионом лития в качестве компенсатора (Раков, 1997). Две парамагнитные разновидности Ge/Li-центров отличаются расположением компенсирующего иона в одной из двух возможных междоузельных позиций (рис. 11). Активация центров осуществлялась нами  $\gamma$ -облучением дозой около  $5 \cdot 10^5$  рад. При такой дозе примерно 80 % Ge/Li-центров переходят в парамагнитное состояние (Раков, 1998).

Ни в одной из проб породообразующего кварца, выделенных из метаморфизованных осадочных пород раннепротерозойского комплекса, примесный германий не обнаружен. Наличие примесей германия не отмечается также и в жильном кварце метабазальтов заполярной свиты (образец с глубины 4115 м разреза СГ-3). Вероятно, что для кристаллической решетки кварца осадочно-вулканогенных пород Печенгского рифтогенного комплекса эта примесь нехарактерна. В подавляющем большинстве образцов кварца, выделенных из пород архейской части разреза СГ-3, масштабы изоморфизма примесей германия достаточны для уверенной регистрации соответствующих парамагнитных центров методом ЭПР. Содержания Ge/Li-центров в кварце архейских толщ СГ-3 достигают 0.2 ppm (см. табл. 3). Обычная для кварца любого генезиса прямая корреляция между концентрациями Al- и Ge/Li-центров в данном случае проявляется лишь в рамках однотипных пород.

При однородных фоновых содержаниях элементов-примесей германия в разных породах архейской части разреза СГ-3 обнаруживаются четкие значимые различия концентраций Ge/Li-центров в кварце амфиболитов и гнейсов, принадлежащих различным структурно-формационным комплексам (см. табл. 3).

Кристаллическая решетка кварца амфиболитов разреза СГ-3 имеет устойчиво низкую концентрацию Ge/Li-центров (рис. 12а), слабо варьирующуюся в зависимости от глубины залегания этих пород в разрезе скважины. С учетом данных по элементам-примесям в амфиболитах (Кольская сверхглубокая..., 1984), пренебрежимо малая часть германия (не более 4 %) может быть отнесена к форме структурной примеси в кристаллической решетке кварца. Среднее содержание Ge/Li-центров ( $C_{cp}$ ) по выборке из 19 образцов, довольно равномерно представляющих разрез СГ-3 в интервале глубин 8000-11800 м, не превышает 0.03 ppm ( $\sigma = 0.01$  ppm).

Концентрация германиевых центров в кристаллической структуре кварца, выделенного из различных гнейсов разреза СГ-3, варьирует в относительно широком диапазоне ( $n = 36$ ,  $C_{cp} = 0.05$ ,  $\sigma = 0.04$  ppm) (рис. 12б). Несмотря на одинаковое содержание германия в химическом составе этих пород, устанавливаются качественные различия концентраций германиевых центров в кварце серых биотит-плагиоклазовых гнейсов,

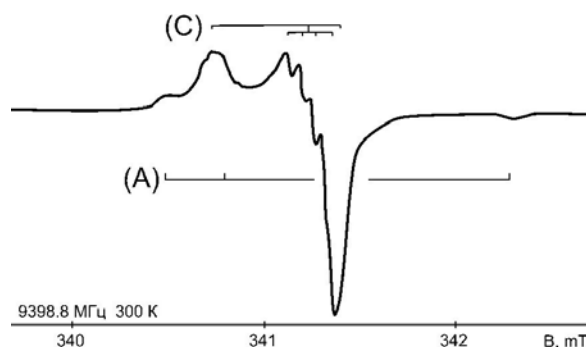


Рис. 11. Спектр ЭПР Ge/Li-центров в порошковом препарате облученного кварца (0.5 Мрад).

Показаны линии двух разновидностей центров, формирующие сложный контур сигнала ЭПР

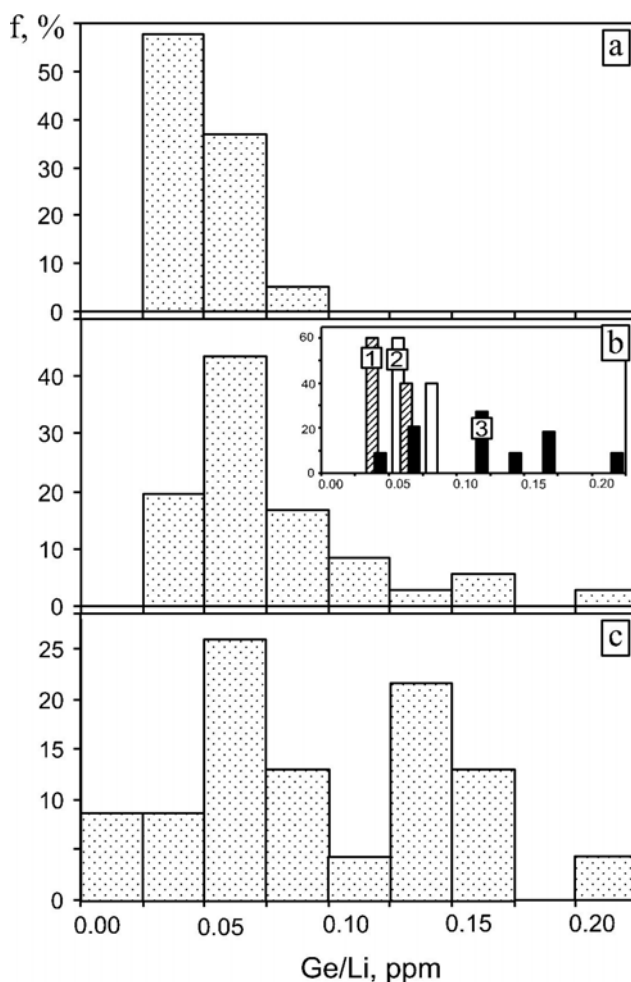


Рис. 12. Распределение концентраций Ge/Li-центров в кварце из разных типов вмещающих пород в разрезе СГ-3:  
 а – метабазиты, амфиболиты;  
 б – гнейсы гранитизированные (1), биотит-плагиоклазовые (2), с примесью ВГМ (3);  
 с – кварц-полевошпатовые прожилки, пегматиты

гнейсов и сланцев с примесью ВГМ, а также их гранитизированных разновидностей (рис. 12b, врезка).

В среднем около 20 % этого германия приходится на изоморфные замещения в кристаллической решетке кварца гнейсов и сланцев с примесью ВГМ. Концентрации Ge/Li-центров в кварце этих пород, вскрытых СГ-3 на различных глубинах, характеризуются широким разбросом – от следов до максимальных значений ( $n = 10$ ,  $C_{cp} = 0.09$ ,  $\sigma = 0.05$  ppm), что, по-видимому, свидетельствует о гетерогенности рассматриваемых пород. Наиболее низкие концентрации Ge/Li-центров отмечены в кристаллической решетке кварца из гранат-двуслюдяных сланцев в первой глиноземистой толще архейской части разреза СГ-3, а наиболее высокие характерны для кварца из гранат-биотит-плагиоклазовых гнейсов, вскрытых скважиной на глубинах более 9456 м.

Распределение концентраций Ge/Li-центров в кварце биотит-плагиоклазовых гнейсов и сланцев описывается узким одномодальным интервалом значений (рис. 12b), приходящимся на область минимальных концентраций германия в кварце биотит-плагиоклазовых гнейсов с ВГМ ( $n = 16$ ,  $C_{cp} = 0.05$ ,  $\sigma = 0.01$  ppm). На кристаллическую решетку кварца можно отнести около 10 % валового содержания германия в данных породах. Минимальные концентрации германиевых центров, составляющие в среднем всего около 3-4 % от валового содержания германия в породе, наблюдаются в кварце гранитизированных разновидностей гнейсов ( $n = 10$ ,  $C_{cp} = 0.02$ ,  $\sigma = 0.02$  ppm). Однако кварц, входящий в состав аплитовидных и пегматоидных прожилков интенсивно гранитизированных гнейсов, характеризуется сильной неоднородностью концентраций германиевых центров ( $n = 23$ ,  $C_{cp} = 0.08$ ,  $\sigma = 0.05$  ppm) (рис. 12c). Высокое содержание Ge/Li-центров присуще кварцу из пегматоидных образований в нижней части разреза СГ-3 (глубина более 9.5 км), породообразующий кварц которых также характеризуется повышенными концентрациями Ge/Li-центров. Кварц, выделенный из кварц-полевошпатовых прожилков, как и породообразующий кварц гнейсов и сланцев верхней части архейского разреза, имеет низкое содержание структурных примесей германия.

Таким образом, соотношения между концентрациями германия в кварце биотит-плагиоклазовых гнейсов, аплитовидных и пегматоидных прожилков зон гранитизации позволяют заключить, что процессы гранитизации докембрийских гнейсов разреза СГ-3 имели изохимический характер по отношению к германию, но обуславливали его перераспределение между парагенетическими минеральными фазами и накопление в кварце пегматоидных и аплитовидных образований.

В кварце из приповерхностных гомологов Ge-центры встречаются редко. Относительно высокие концентрации Ge/Li-центров, свойственные также кварцу из пород нижней части разреза СГ-3 (глубина более 9456 м), установлены только в кристаллической структуре кварца из чарнокитизированных двупироксен-амфибол-плагиоклазовых кристаллических сланцев, гранат-биотит-плагиоклазовых и кордиерит-гранат-биотит-плагиоклазовых гнейсов (табл. 4) Лиинахамарского блока.

## 8. Изоморфные ионы титана в решетке кварца

Титан не относится к типично рассеянным элементам, но часто фиксируется в минералах, в том числе в кварце. Содержание титана в породах архейского комплекса в разрезе СГ-3 колеблется от 0.1 до 2.2 мас. % в пересчете на  $TiO_2$  (Кольская сверхглубокая..., 1984). Наибольшие его концентрации характерны для железистых амфиболитов (в среднем 1.6-2.2 мас. %), в других типах амфиболитов они значительно ниже (0.1-2.2 мас. %). В целом минимальные содержания титана определены в гранитоидах (0.1-0.3 мас. %). В различного типа биотит-плагиоклазовых гнейсах концентрация  $TiO_2$  составляет 0.3-0.7 мас. %. Наибольшее содержание титана – в биотит-плагиоклазовых гнейсах с примесью ВГМ. Основными минеральными формами титана в пределах архейского комплекса СГ-3 являются сфен, ильменит и рутил (Кольская сверхглубокая..., 1998). В зернах кварца, как уже отмечалось, титан представлен микрокристаллами рутила и анатаза.

Титан может содержаться в кварце также в виде растворенной структурной примеси, изовалентно замещая атомы кремния:  $Si^{4+} \rightarrow Ti^{4+}$ . В четырехвалентной форме ионы титана непарамагнитны, но под воздействием  $\gamma$ -облучения они могут перейти в трехвалентное парамагнитное состояние, из которых наиболее распространены в природном кварце

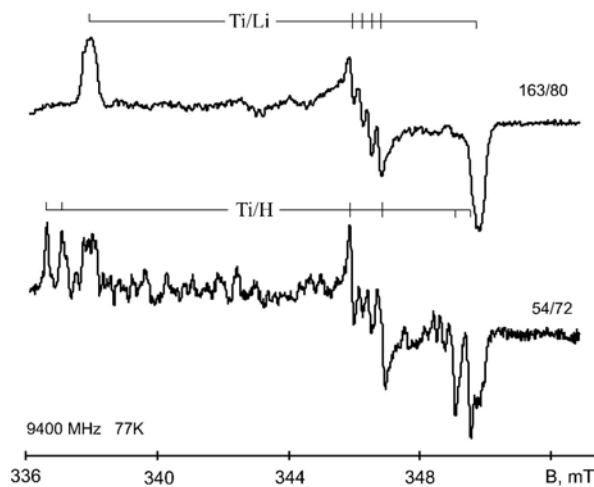


Рис. 13. Спектры ЭПР двух разновидностей Ti-центров в порошковых препаратах облученного кварца из пород района заложения СГ-3

литиевые и протонные разновидности – Ti/Li и Ti/H-центры (рис. 13). Для их активации нами использовано, как и в случае Ge-центров,  $\gamma$ -облучение дозой около  $5 \cdot 10^5$  рад. В отличие от Ge-центров, парамагнитные титановые центры проявляются в спектрах ЭПР только при низких температурах, что обеспечивает раздельную регистрацию этих двух типов примесных центров.

Ti-центры с Li-компенсатором были обнаружены почти во всех изученных образцах из нижней архейской части разреза СГ-3 (9.5-12 км), но не наблюдались в кварце верхних архейских толщ (6.8-9.5 км). Центры с протонным компенсатором в кварце пород архейской части разреза СГ-3 не обнаружены. Петрологическая специфичность распределения титановых центров в кварце несколько иная, чем у германиевых центров (табл. 3). Вариации концентраций Ti/Li-центров в кварце амфиболитов, гнейсов и пегматоидных образований лежат в примерно равных диапазонах. В отличие от германиевых центров, кварц гнейсов в среднем содержит в два раза меньше титановых центров, чем кварц из амфиболитов. По разновидностям гнейсовых пород титановые центры в кварце распределяются аналогично германиевым центрам. Титаном несколько обогащены гнейсы с примесью ВГМ, в кварце из гранитизированных разновидностей гнейсов, характеризующихся минимальным содержанием германиевых центров, титановые центры вообще не обнаружены.

В кварце из поверхностных образований района заложения скважины примесные титановые центры встречаются относительно редко. Ti/Li-центры были обнаружены лишь в восьми пробах кварца, их содержание колеблется от 0.2 до 2.8 у.е. (табл. 4). В четырех из этих проб помимо Ti/Li-центров присутствуют также Ti/H-центры. Диапазон вариации концентрации протонной разновидности титановых центров составил 0.3-1.1 у.е. В литературе имеются сведения о том, что с ростом температуры образования природного кварца происходит понижение протонной доли титановых центров относительно их литиевой разновидности (Раков и др., 1991). Кроме того, термическое воздействие на кварц вызывает разрушение Ti/H-центров и практически не меняет концентрацию Ti/Li-центров. Таким образом, отсутствие Ti/H-центров в кварце из погребенных архейских толщ (9.5-12 км), по-видимому, связано с длительным пребыванием вмещающих пород в условиях повышенных температур и давлений, в результате чего кварц обедняется ОН-группами.

### 9. Распределение структурных дефектов в минералах пород архейской части разреза СГ-3

В отличие от люминесцентных характеристик полевых шпатов, изменение концентраций парамагнитных центров в кварце по разрезу архейской части СГ-3 имеет сложный характер, обусловленный как "фактором глубинности", так и структурно-формационной спецификой толщ, служащей основой для выделения поверхностных пород-гомологов. Рядом исследователей (Кольская *сверхглубокая...*, 1984; 1998) диафторированные гнейсы разреза СГ-3 подразделены на пять ритмов, каждый из которых состоит из двух толщ: верхней (I, III, V, VII, IX толщи), сложенной биотит-плагиоклазовыми гнейсами с примесью ВГМ (граната, ставролита, силлиманита, кианита, андалузита), и нижней (II, IV, VI, VIII, X толщи), сложенной биотит-плагиоклазовыми гнейсами либо биотит-амфибол-плагиоклазовыми гнейсами, в которых встречаются ортит и эпидот. Однако такое расчленение носит условный характер, поскольку "стратифицированность гнейсовых образований разреза СГ-3 неотчетлива, и резкие стратиграфические контакты между выделенными толщами отсутствуют" (Кольская *сверхглубокая...*, 1984). В структурно-формационной модели архейского фундамента Печенгской рифтогенной структуры по разрезу СГ-3 были выделены следующие комплексы пород (Виноградова и др., 2000):

- 1) зеленокаменный структурно-формационный комплекс (6842-8250 м), коррелируемый с позднеархейскими прогрессивно-метаморфизованными вулканогенно-осадочными толщами зеленокаменного пояса южного обрамления Печенгской рифтогенной структуры (Каскамско-Шуортинский фрагмент);
- 2) интенсивно диафторированный и дислоцированный гнейсо-гранулитовый инфракрустальный структурно-формационный комплекс, включающий амфиболит-гнейсовую (8250-9456 м) и гранулит-гнейсовую (9456-12262 м) ассоциации пород, соответствующие полиметаморфическим образованиям северо-восточного и юго-западного обрамления Печенгской структуры.

На рис. 14 представлены профили распределения характеристик примесных центров в кварце по архейской части разреза СГ-3 в представлении названных принципов его расчленения. Кроме уже отмеченной общей тенденции снижения концентрации вакансионных дефектов в кварце с ростом глубины залегания пород, прослеживаемой от поверхности и до забоя скважины, достаточно четко проявляется тенденция уменьшения содержания ОН-групп в кварце к нижним частям разреза. Контрастно она выражается в отсутствии в решетке кварца архейских пород титановых центров с водородным компенсатором, присутствующих в приповерхностном кварце. С этим также связано постепенное увеличение вклада алюмощелочных дефектов в кварце с ростом глубины залегания вмещающих пород. Разброс значений отношения  $C^T/C_s$  с глубиной уменьшается, а само отношение стремится к постоянной величине, близкой к единице, соответствующей исключительно алюмощелочной специализации примесного алюминия. Другие разновидности алюминиевых дефектов, в том числе и алюмоводородные, с ростом глубины исчезают из структуры кварца.

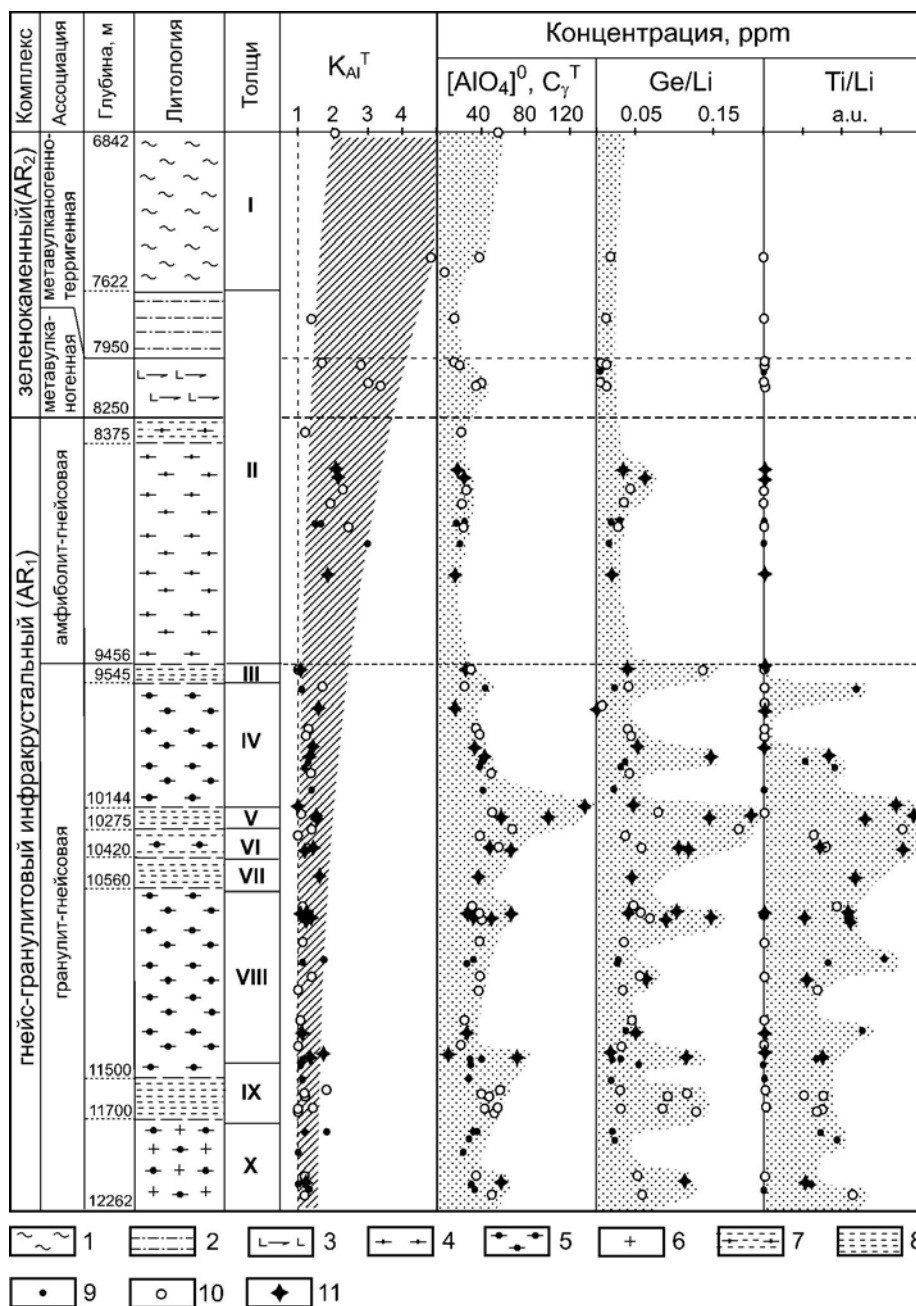


Рис. 14. Распределение структурных примесей в кварце из пород архейской части разреза СГ-3: 1-3 – зеленокаменный комплекс (AR<sub>2</sub>): 1 – мусковит-биотит-плагиоклазовые гнейсы и сланцы с ВГМ; 2 – мусковит-биотит-плагиоклазовые гнейсы; 3 – куммингтонитовые амфиболиты, амфиболиты, биотит-амфибол-плагиоклазовые сланцы; 4-6 – инфракрустальный гнейсогранулитовый комплекс (AR<sub>1</sub>): 4 – биотит-плагиоклазовые, амфибол-биотит-плагиоклазовые гнейсы и амфиболиты; 5 – биотит-плагиоклазовые, гранат-биотит-плагиоклазовые, силлиманит-гранат-плагиоклазовые гнейсы и гранулиты, двупироксен-амфибол-плагиоклазовые гранулиты; 6 – гранат-биотит-плагиоклазовые, биотит-плагиоклазовые, двупироксен-амфибол-плагиоклазовые гранулиты, гранитизированные с развитием кинцититов, чарнокитов, плагиогранитов, гранодиоритов; 7 – зона катаклаза биотит-плагиоклазовых гнейсов на границе инфракрустального и зеленокаменного комплексов; 8 – зоны субгоризонтальной трещиноватости, бластомилонитизации пород с обилием зеркал скольжения, складок волочения, стрессовой минерализации; 9-11 – результаты измерений: 9 – породообразующий кварц из метабазитов (амфиболитов); 10 – породообразующий кварц биотит-плагиоклазовых гнейсов; 11 – кварц-полевошпатовые жилы.  $K_{Al}^T = C_{\gamma}^T/C_{\gamma}$  – коэффициент активации Al-центров отжигом при 1300К.

Любопытные результаты получены при сопоставлении содержаний кристаллизационной воды в единичных пробах триоктаэдрических слюд из амфиболитов архейского комплекса СГ-3 и их аналогов на поверхности (Nikitina et al., 2000). Оказалось, что в слюдах архейской части разреза СГ-3 заметно большее количество кристаллизационной воды по сравнению с поверхностными породами, т.е. имеет место ситуация, обратная выявленной нами в кварце. Ассоциации с протонным компенсатором как структурных примесей титана, так и алюминия неустойчивы в решетке кварца при высоких температурах и замещаются щелочным компенсатором. В лабораторных условиях эти реакции эффективно протекают в кварце при температурах выше точки  $\alpha$ - $\beta$ -перехода (580°C), значительно больших, чем температуры на глубинах залегания архейских пород разреза СГ-3. Наблюдаемая природная нестабильность данных дефектов при относительно низких температурах, конечно, связана с фактом геологически длительного пребывания кварца в условиях умеренных температур. В режиме поверхностных температур эти дефекты в кварце остаются стабильными на протяжении того же геологического периода.

Общая картина вариаций примесных дефектов кварца плохо следует ритмостратиграфическому подразделению архейского разреза СГ-3 на десять толщ. Кварц толщ I и II (интервал глубин 6842-9456 м) оказывается сильно обедненным структурными примесями германия, титан в этом кварце вообще не регистрируется, хотя в аналогичных подразделениях на больших глубинах концентрации той и другой примеси в кварце достигают больших значений. С другой стороны, эта особенность распределения примесей в кварце соответствует выделению толщ I и части II в зеленокаменный структурно-формационный комплекс (интервал глубин 6842-8250 м). Предполагаемые гомологичные породы зеленокаменного пояса южного обрамления Печенгской рифтогенной структуры также характеризуются низкими концентрациями примесных ионов германия и титана (табл. 4). Следующая по разрезу амфиболит-гнейсовая ассоциация пород инфракрустального комплекса ( $AR_1$ ), охватывающая нижнюю часть толщи II, также представлена кварцем с низким содержанием структурных примесей, за исключением кварца из области, примыкающей к зоне катаклаза биотит-плагиоклазовых гнейсов на границе инфракрустального и зеленокаменного комплексов. Здесь отмечаются небольшие аномалии в концентрации в кварце алюминия и германия.

Остальная часть разреза (интервал 9456-12262 м), подразделенная на толщи III-X или выделенная как гранулит-гнейсовая ассоциация пород инфракрустального комплекса, характеризуется крайне неравномерным содержанием примесей, главным образом, германия и титана в кварце, причем концентрации этих элементов нескоррелированы. Скачки в содержании этих примесей кварца часто, но далеко не всегда, располагаются у границ или попадают в зоны субгоризонтальной трещиноватости, бластомилонитизации пород с обилием зеркал скольжения, складок волочения, стрессовой минерализации, интерпретируемые другими авторами как теригенные толщи биотит-плагиоклазовых гнейсов с примесью ВГМ. В этих областях максимальных значений достигают и концентрации в кварце примесных ионов алюминия. Данные аномалии, возможно, связаны с перераспределением примесей в кварце в результате процессов гранитизации. Аналогичный процесс, по данным изучения РЛ, затрагивает и плагиоклаз. Различия в характере изменения концентраций германиевых и титановых центров по глубине обусловлены, по-видимому, лучшей сохранностью в кварце примесей германия, поскольку они, в отличие от других структурных примесей, локализованы в наиболее совершенных участках кристаллической решетки кварца (Раков, 1998). Во всяком случае, в кварце гранитизированных разновидностей гнейсов примеси германия присутствуют, хотя и в несколько пониженной концентрации, а примеси титана отсутствуют.

На основе петрологического анализа (Vinogradova, 1998; Виноградова и др., 2000) породы интервала глубин 6842-8450 м соотнесены с двуслюдяными и гранат-двуслюдяными сланцами позднеархейского зеленокаменного пояса Бьернватн-Алларечка, а образования, залегающие в интервале глубин 8450-9456 м – с биотит-плагиоклазовыми гнейсами и амфиболитами амфиболит-гнейсовой ассоциации инфракрустального комплекса, слагающими Суормусский, Ровенский и Аллареченский блоки архейского обрамления Печенгской структуры. Кварц из данных поверхностных пород, как и соответствующий им в разрезе СГ-3, обладает низкими концентрациями структурных примесей титана и германия (табл. 4).

Одновременно высокие концентрации Ge/Li- и Ti/Li-центров, свойственные кварцу из пород нижней части разреза СГ-3 (9456-12262 м), установлены только в кристаллической структуре кварца из чарнокитизированных двупироксен-амфибол-плагиоклазовых кристаллических сланцев, гранат-биотит-плагиоклазовых и кордиерит-гранат-биотит-плагиоклазовых гнейсов (табл. 4) Лиинахамарского блока, как это и следует из структурно-формационной модели архейской части разреза СГ-3. Таким образом, полученные данные по структурным примесям в кварце в общем согласуются с предположенной корреляцией интенсивно диафорированных образований архейской части разреза СГ-3 и района ее



заложения и являются дополнительным критерием, свидетельствующим о том, что в геологическом строении фундамента Печенгской рифтогенной структуры участвуют породы зеленокаменного и инфракрустального комплексов.

## 10. Заключение

Сравнительный анализ структурных и спектроскопических особенностей породообразующих минералов из пород по разрезу СГ-3 и из гомологичных образований в обрамлении Печенгской структуры позволил получить ряд новых результатов, касающихся специфики погребенных архейских толщ и построения корреляционных взаимоотношений между глубинными и поверхностными образованиями.

Изучение плагиоклазов из метаморфических пород разреза СГ-3 обнаружило широко варьирующие по составу спектры РЛ, представленные суперпозицией полос изоморфных примесных ионов  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Ce^{3+}$ ,  $Pb^{2+}$  (и/или  $Ti^{+}$ ) и собственных кислородных центров  $O^*$  в кремне- и алюмокислородных тетраэдрах. При использовании типизации спектров РЛ плагиоклазов, основанной на выделении главных (доминирующих) спектральных полос, выявлены статистические связи между спектральными составами РЛ плагиоклазов и их принадлежностью к типам пород.

Выявлены ранговые корреляционные связи между качественным составом спектров РЛ плагиоклазов и петрогенетическими характеристиками вмещающих пород. Признаком гранитизации биотит-плагиоклазовых гнейсов является монохромность спектров РЛ у новообразованных плагиоклазов, которая предположительно обусловлена геохимическим разделением ионов-люминогенов. Показано, что плагиоклазы метаморфизованных базальтов печенгского рифтогенного комплекса (маярвинской свиты) и их гомологов (метадолеритов), формирующих интрузивные тела в архейском фундаменте Печенгской структуры, обладают однородными спектрами РЛ. Ретроградный зеленосланцевый метаморфизм метабазитов сопровождается увеличением вклада ионов  $Ce^{3+}$  в спектры РЛ породообразующего плагиоклаза.

Оценена зависимость системы примесных Al-, Ge-, Ti-центров и собственных структурных дефектов в кварце по разрезу СГ-3 от глубины залегания и петрогенеза вмещающих докембрийских пород, проявляющаяся в концентрационных сдвигах (вакансионные дефекты), перераспределении дефектов по структурным позициям (литиевые и протонные разновидности Ti-центров, Al-центры в регулярных и "дефектных" позициях).

В распределении примесных дефектов в кварце по архейской части разреза СГ-3 выделяются область низких концентраций ионов Ge и Ti, соответствующая зеленокаменному структурно-формационному комплексу (6842-8250 м), и область высоких содержаний этих ионов, приуроченная к гнейсогранулитовому инфракрустальному структурно-формационному комплексу (8250-12262 м). Выделяемые в составе последней амфиболит-гнейсовая (8250-9456 м) и гранулит-гнейсовая (9456-12262 м) ассоциации пород контрастно различаются наличием примесного титана исключительно в кварце гранулит-гнейсовой части разреза. Кварц предполагаемых гомологичных образований на поверхности, соответствующих глубинным структурно-формационным комплексам и ассоциациям пород, характеризуется аналогичным распределением данных примесных ионов.

Зоны субгоризонтальной трещиноватости, blastomилонитизации пород, интерпретируемые также как толщи биотит-плагиоклазовых гнейсов с примесью ВГМ, характеризуются аномально высоким содержанием примесных ионов Al, Ge и Ti в кварце, что, возможно, является следствием перераспределения примесей в результате процессов гранитизации, переноса примесей в более поздний пегматитовый кварц за счет кварца зон гранитизации. Аналогичный процесс, по данным изучения РЛ, затрагивает и плагиоклаз.

Проведенные исследования показывают, что примесные структурные дефекты в породообразующем кварце могут служить генетической меткой метаморфических пород докембрийских структурно-формационных комплексов и являются одним из критериев для типизации и корреляции глубоко преобразованных толщ раннего докембрия, вскрытых СГ-3. Созданы рабочие базы данных по спектроскопическим характеристикам минералов, на основе которых возможны реинтерпретация архейской части разреза СГ-3, верификация и выявление гомологичных пород, располагающихся в настоящее время на разных гипсометрических уровнях.

**Благодарности.** Авторы благодарят сотрудников Геологического института Кольского научного центра РАН П.К. Скуфына и С.В. Икорского за предоставленные образцы для исследований и плодотворное сотрудничество. Особую благодарность авторы выражают академику Н.П. Юшкину, инициировавшему данную работу, за ценные замечания, советы, предоставленные возможности ее обсуждения в Институте геологии Коми НЦ РАН и на различных научных мероприятиях.

Работа выполнена в рамках Проекта 408 МПГК ЮНЕСКО при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты 99-05-64957, 02-05-64747.

## Литература

- Homologues of rocks in the Kola Superdeep Borehole (KSDB) and on surface. *Eds F.P. Mitrofanov, V.R.Vetrin, Proc. Workshop, Apatity, 50 p.*, 1998.
- Lehmann G.** Spectroscopy of feldspars. *Reviews in mineralogy. Feldspars and feld-spathoid. Ed. W.L. Brown, p.121-162, 1984.*
- Lutoev V.P., Vinogradova N.P., Glukhov Yu.V., Kotova Ye.N.** Rank correlation between the spectroscopic properties of rock-forming leucocratic minerals and Precambrian host-rock types from KSDB section. The results of the study of the deep substance and physical processes in the Kola Superdeep borehole section down to a depth of 12261 m. *Apatity, p.17-19, 2000.*
- Lutoev V.P., Vinogradova N.P., Kotova Ye.N.** Structural defects in quartz from the Archean metamorphic complexes in the Kola Superdeep Borehole section. *Abstracts of "Mineralogy and spectroscopy: 4th European conference", Paris, France. Bull.Liaison S.F.M.C., v.13, p.89, 2001.*
- Marfunin A.S.** Spectroscopy, luminescence and radiation centers in minerals. *Springer-Verlag, Berlin, 352 p.*, 1979.
- Nikitina L.P., Yakovleva A.K., Yakovlev Yu.N., Ovchinnikov N.O., Babushkina M.S., Yugova A.L., Goilo E.A.** The real structure of trioctahedral micas from the Archean complex Amphibolites in the KSDB. The results of the study of the deep substance and physical processes in the Kola Superdeep Borehole section down to a depth of 12261 m. *Apatity, p.33-38, 2000.*
- Vinogradova N.P.** Correlation of Archean rocks in the section of the Kola Superdeep Borehole and on the surface in the drill site area. Homologues of rocks in the Kola Superdeep Borehole (KSDB) and on surface. *Proc. Workshop, Apatity, p.31-32, 1998.*
- Vinogradova N.P., Smirnov Yu.P.** Early Proterozoic metabasites in the Archean basement of the Pechenga riftogenic structure (from the Kola Superdeep Borehole section). The results of the study of the deep substance and physical processes in the Kola Superdeep borehole section down to a depth of 12261 m. *Apatity, p.66-69, 2000.*
- Walker G.** Mineralogical application of luminescence techniques. *In: F.J.Berry and D.J.Vaughan eds. Chemical Bonding and Spectroscopy in Mineral Chemistry. Chamman and Hall, London, p.103, 1985.*
- Weil J.A.** A preview of electron spin spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz. *Phys. Chem. Minerals, v.10, p.149-165, 1984.*
- Борозновская Н.Н.** Особенности рентгенолюминесценции полевых шпатов как показатели их генезиса. *ЗВМО, № 1, с.110-119, 1989.*
- Борозновская Н.Н., Коноваленко С.И.** Рентгенолюминесценция полевых шпатов из пегматитов различной формационной принадлежности (на примере Енисейского кряжа). *Минералогия, геохимия и полезные ископаемые Сибири, Томск, вып.1, с.212-219, 1990.*
- Виноградова Н.П., Егоров А.С., Смирнов Ю.П., Лютоев В.П.** Тектоническое строение архейского фундамента Печенгской рифтогенной структуры (по разрезу Кольской сверхглубокой скважины). *Доклады РАН, т.374, № 3, с.362-365, 2000.*
- Виноградова Н.П., Сангаджиев М.М.** Структурный типоморфизм плагиоклазов метавулкаников тундровой серии (Кольский полуостров). Информационные материалы XI Всесоюзного совещания по рентгенографии минерального сырья. Миасс. 10-15 июня 1989. *Свердловск, изд-во УрО АН СССР, т.1, с.91, 1989.*
- Глухов Ю.В., Лютоев В.П., Виноградова Н.П.** Дифференциация метаморфических пород разреза Кольской сверхглубокой скважины по данным рентгенолюминесценции породообразующих плагиоклазов. Геология европейского севера России. *Тр. Ин-та геологии Коми науч. центра УрО РАН, Сыктывкар, сб.5, вып.108, с.82-93, 2002.*
- Горобец Б.С.** Спектры люминесценции минералов. *Методические рекомендации Научного совета по методам минералогических исследований при ВИМСе Мингео СССР, М., ВИМС, 154 с., 1981.*
- Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. *М., МФ "Технонефтегаз", 260 с., 1998.*
- Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины. Под ред. Е.Е. Козловского. *М., Недра, 490 с., 1984.*
- Концентрационные измерения электронно-дырочных центров в кварце методом ЭПР. *Методическая инструкция, М., изд-во ВИМС, 23 с., 1986.*
- Котова Е.Н.** Тi-центры в кварце глубинных и поверхностных пород района заложения Кольской сверхглубокой скважины. Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента. *Материалы 9-й научной конференции Института геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, с.80-84, 2000.*

- Леснов Ф.П., Щербакова М.Я., Истомин В.Е.** Спектры ЭПР  $Fe^{3+}$  в основных плагиоклазах их типизация и петрогенетическое значение. *Геология и геофизика*, № 10, с.139-145, 1980.
- Лютюев В.П., Виноградова Н.П., Глухов Ю.В.** Проблема корреляции метаморфических пород разреза Кольской сверхглубокой скважины и района ее заложения. Рентгенолюминесценция породообразующих плагиоклазов. *Труды Института геологии Коми научного центра УрО РАН*, вып.103, с.32-42, 1999а.
- Лютюев В.П., Виноградова Н.П., Котова Е.Н.** Германиевые центры в кварце как критерий корреляции метаморфических толщ архейского фундамента Печенгской структуры (по разрезу Кольской сверхглубокой скважины). *Сыктывкарский минералогический сборник № 29, Сыктывкар, Тр. Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН*, вып.106, с.76-92, 2000а.
- Лютюев В.П., Глухов Ю.В., Виноградова Н.П.** Двоичная кодировка – вариант типизации поликомпонентных спектров люминесценции. *Вестник института геологии Коми НЦ УрО РАН*, № 8, с.4-6, 1999б.
- Лютюев В.П., Филлипов В.Н., Котова Е.Н.** Редкоземельные микросфероиды в жильном кварце архейских комплексов Кольской сверхглубокой скважины (КСГС). Ультрадисперсное состояние минерального вещества. *Сыктывкар, Геопринт*, с.90-95, 2000б.
- Магматические и метаморфические комплексы пород Кольской сверхглубокой скважины. *М-во геологии СССР, ВСЕГЕИ, Л., Недра*, 228 с., 1986.
- Моисеев Б.М.** Природные радиационные процессы в минералах. *М., Недра*, 174 с., 1985.
- Морошкин В.В., Горобец Б.С., Бушев А.Г.** Поисковое и генетическое значение люминесценции микроклина и плагиоклазов из слюдоносных мусковитовых пегматитов. *Известия Академии наук СССР, серия геологическая*, № 10, с.87-91, 1987.
- Раков Л.Т.** Генетическое и поисковое значение структурных дефектов в кварце месторождений полезных ископаемых. *Минеральное сырье*, № 1, с.75-84, 1997.
- Раков Л.Т.** Поведение парамагнитных дефектов при термическом отжиге кварца. *Кристаллография*, т.34, № 1, с.260-262, 1989.
- Раков Л.Т.** Исследование процесса накопления низкодозных парамагнитных центров в кварце. *Геохимия*, № 4, с.422-425, 1998.
- Раков Л.Т., Кувшинова К.А., Моисеев Б.М., Плескова М.А., Кандинов М.Н.** Типоморфное значение однотипных центров в кварце. *Докл. АН СССР*, т.317, № 1, с.181-185, 1991.