

## Гранитные пегматиты Кольской сверхглубокой скважины (вертикальная минералого-геохимическая зональность и проблемы генезиса)

В.В. Гордиенко<sup>1</sup>, Вл.Вл. Гордиенко<sup>1</sup>, Г.И. Калиничева<sup>1</sup>,  
Е.А. Ольховая<sup>1</sup>, Е.В. Румянцева<sup>1</sup>, Л.А. Тимохина<sup>1</sup>,  
Д.М. Губерман<sup>2</sup>, Ю.П. Смирнов<sup>2</sup>, А.К. Яковлева<sup>2</sup>, Ю.Н. Яковлев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Геологический факультет С.-Петербургского государственного университета, кафедра геохимии, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> НПЦ "Кольская сверхглубокая", Заполярный

**Аннотация.** В статье приведена общая характеристика гранитных пегматитов, вскрытых Кольской сверхглубокой скважиной (СГ-3), и данные о вариациях состава их сквозных минералов (полевых шпатов, слюд и граната) в зависимости от глубины залегания пегматитов. Статистически достоверно (более 300 мономинеральных проб) обосновано существование вертикальной геохимической зональности жильной системы пегматитов. Эта зональность, имеющая усложненный полиэтажный возвратно-поступательный характер, обусловлена контрастной миграцией химических элементов-индикаторов при свободном перемещении пегматитообразующей среды в пределах геохимических этажей системы. Диапазон такой миграции для системы пегматитов СГ-3 превышает 3 км по вертикали, опровергая бытующее представление о формировании подобных систем "in situ". Вертикальная геохимическая зональность контролируется перепадом давления и температурным градиентом, который оценивается по двухполевошпатовому равновесию в  $25\pm 5^\circ\text{C}/\text{км}$ . Эта величина характеризует тепловой режим Кольского мегаблока в позднеархейскую эпоху, отвечающую начальной стадии формирования Балтийского щита.

**Abstract.** Some aspects have been shown in the paper: a general characteristic of granite pegmatites cut by SG-3 and data on structural variations of their "end-to-end" pegmatite-forming minerals – feldspar, garnet and mica – depending on the depth of pegmatite occurrence. The existence of vertical geochemical zonality (VGZ) of pegmatite vein system (PVS) of KSDB is proved statistically (more than 300 monomineral samples). VGZ, which has complicated polystage reciprocal character, is caused by contrast migration of chemical elements – indicators (CEI) at free moving of pegmatite-forming environment within the geochemical stages of the system. The range of such migration for PVS from SG-3 achieves more than 3 km along the vertical, which has denied the existing idea about formation of similar PVS "in situ". VGZ is controlled by a pressure drop and temperature gradient. The latter is estimated by two-feldspathic equilibrium at  $25\pm 5^\circ\text{C}/\text{km}$ . This feature characterizes thermal conditions of the Kola megablock in the Late Archaean that complies with the initial stage of the Baltic shield formation.

### 1. Введение

Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) дает уникальную возможность для решения многих фундаментальных проблем геологической науки, связанных с глубинными процессами формирования земной коры и отдельных ее объектов (*Кольская сверхглубокая*, 1984; 1998; *Архейский комплекс...*, 1991). Гранитные пегматиты в этом отношении не являются исключением. По керну СГ-3 удастся проследить вариации вещественного состава системы гранитных пегматитов архейского гнейсового комплекса в полном ее объеме без каких-либо пробелов на протяжении более 5.5 км по вертикали. Это позволяет, в свою очередь, выявить главные закономерности миграции химических элементов, присущие завершающему этапу формирования архейского фундамента Кольского мегаблока, расшифровать специфику геологических и физико-химических условий эволюции пегматитообразующих систем, принадлежащих формации максимальных глубин, для которых эти вопросы все еще остаются слабо изученными.

Наиболее эффективным подходом к решению проблемы миграции химических элементов в пегматитовом процессе является изучение пространственной геохимической зональности жильных систем пегматитов, базирующееся на статистически достоверных закономерностях распределения элементов-примесей в породообразующих минералах пегматитов по восстанию их систем (по вертикали или латерали). Такие закономерности детально изучены для формации редкометалльных пегматитов средних глубин (*Поля...*, 1976; *Гордиенко*, 1996; *Редкометалльные...*, 1997) и в меньшей мере – для глубинной формации слюдоносных пегматитов (*Слюдоносные...*, 1976). Общим для систем этих формаций является рост концентрации флюофильных элементов (Rb, Cs, Li, F, Nb, Ta и др.) и снижение

содержания пиррофильных элементов (Ba, Sr, Ca, Ti и др.) по восстанию жильных серий, что обусловлено кристаллизационным фракционированием контрастных групп химических элементов при миграции кристаллизационного остатка во фронтальную зону эволюционирующей в пространстве и времени жильной системы (Гордиенко, 1996). Если такой механизм фракционирования элементов-примесей имеет место и при становлении глубинных пегматитов гнейсовых комплексов архея, то эти закономерности должны проявиться в первую очередь в вертикальной геохимической зональности жильных систем пегматитов СГ-3. Уже начальный этап ее изучения, основанный на анализе всего 45 мономинеральных проб (Гордиенко и др., 2000), показал, что ожидаемая зональность действительно существует, причем она носит сложный возвратно-поступательный характер. Дальнейшие исследования в этом направлении, базирующиеся на многоэлементном анализе более 300 мономинеральных проб, позволят существенно уточнить и детализировать вертикальную геохимическую зональность системы пегматитов СГ-3, а также подойти к решению ряда общих вопросов генезиса глубинных гранитных пегматитов керамической формации, связанных с проявлениями регионального метаморфизма, палингенеза и анатексиса.

## 2. Общая характеристика гранитных пегматитов

Поскольку в обширной литературе по СГ-3 практически отсутствуют сведения о вскрытых ею гранитных пегматитах, целесообразно привести краткую характеристику их локализации и вещественного состава.

**Особенности локализации** гранитных пегматитов СГ-3 заключаются в следующем. Они присутствуют только в породах архейского гнейсового комплекса по всему его разрезу, с глубины 6.8 до 12 км, и полностью отсутствуют в породах нижнепротерозойской Печенгской структуры. Этим определяется геологический архейский возраст жильной системы. Абсолютные датировки изохронным U-Pb-методом по циркону для пегматитов апикальной (6850 м) и придонной (11570-11750 м) частей системы (Чен и др., 1998) оказываются практически одинаковыми, что свидетельствует о возрастном единстве гранитных пегматитов СГ-3 и определяет их позднеархейский абсолютный возраст в  $2740 \pm 14$  млн лет.

Распределяются пегматиты по глубине крайне неравномерно (рис. 1). Чаще они группируются в серии сближенных тел мощностью от 0.2 до 20 м, разделенных промежутками вмещающих гнейсов протяженностью от 1-2 до 50 м. Расстояния между такими сериями широко варьируют (от 100 до 1000 м и более). Каких-либо закономерностей в распределении пегматитовых тел по мощности в пределах жильных серий, как и всей жильной системы, не наблюдается. Реже встречаются одиночные тела пегматитов мощностью от 0.5 до 11 м. Не отмечается какой-либо связи вещественного состава, мощности и частоты встречаемости гранитных пегматитов с вещественным составом вмещающих пород (рис. 1). Характер залегания пегматитовых тел относительно гнейсовидности или полосчатости вмещающих пород (согласное или секущее) ввиду повсеместно разбуренных контактов установить невозможно. Лишь в одном случае достоверно определено секущее положение существенно микроклинового с биотитом пегматита (маломощное тело 3-1 на глубине 7177 м).

**Вещественный состав** гранитных пегматитов СГ-3 характеризуется небольшим разнообразием присутствующих минеральных видов. Это главные породообразующие минералы: кварц (25-35 %), кислый плагиоклаз (20-50 %) и калиевый полевой шпат-микроклин (5-35 %). В отдельных телах эту группу дополняют биотит (до 10 %) и мусковит (до 5-8 %), но в среднем оба этих минерала принадлежат к группе второстепенных по распространенности (не более 1-3 %). Акцессорные минералы (< 0.1 %), среди которых отмечаются гранат-спессартин, цоизит, апатит, хлорит, пирротин, пирит, циркон, рутил, силлиманит, встречаются эпизодически в отдельных жилах, но в целом крайне редко, что также составляет специфику гранитных пегматитов СГ-3.

Вариации содержаний породообразующих минералов в отдельных пегматитовых телах весьма значительны и закономерны, что определяет минералогическую зональность всей жильной системы пегматитов.

**Вертикальная минералогическая зональность** пегматитов в объеме всей системы выглядит следующим образом. По мере уменьшения глубины залегания пегматитовых тел изменяется видовой состав слюд. Биотит, широко распространенный в придонной части системы (до 5-10 % в пегматитах серии 11 и 12 на глубинах 11-12 км), постепенно по ее восстанию сменяется мусковитом, несомненно, развивающимся по биотиту. Как акцессорный минерал мусковит появляется уже на глубине 11.7 км (жила 11-1). В заметном количестве (до 0.5 %) он присутствует в отдельных пегматитовых телах, начиная с глубины 10,5 км, где содержание биотита снижается до 1-2 %. В пегматитах апикальной части всей системы (серии 1 и 2 на глубине 6.8-7 км) содержание мусковита увеличивается до 3-5 %, а биотит практически исчезает. Охарактеризованную закономерность, по-видимому, следует рассматривать как следствие повышения кислотности минералообразующей среды и увеличения концентрации летучих в головной части жильной системы пегматитов по сравнению с придонной ее частью на поздней стадии развития.

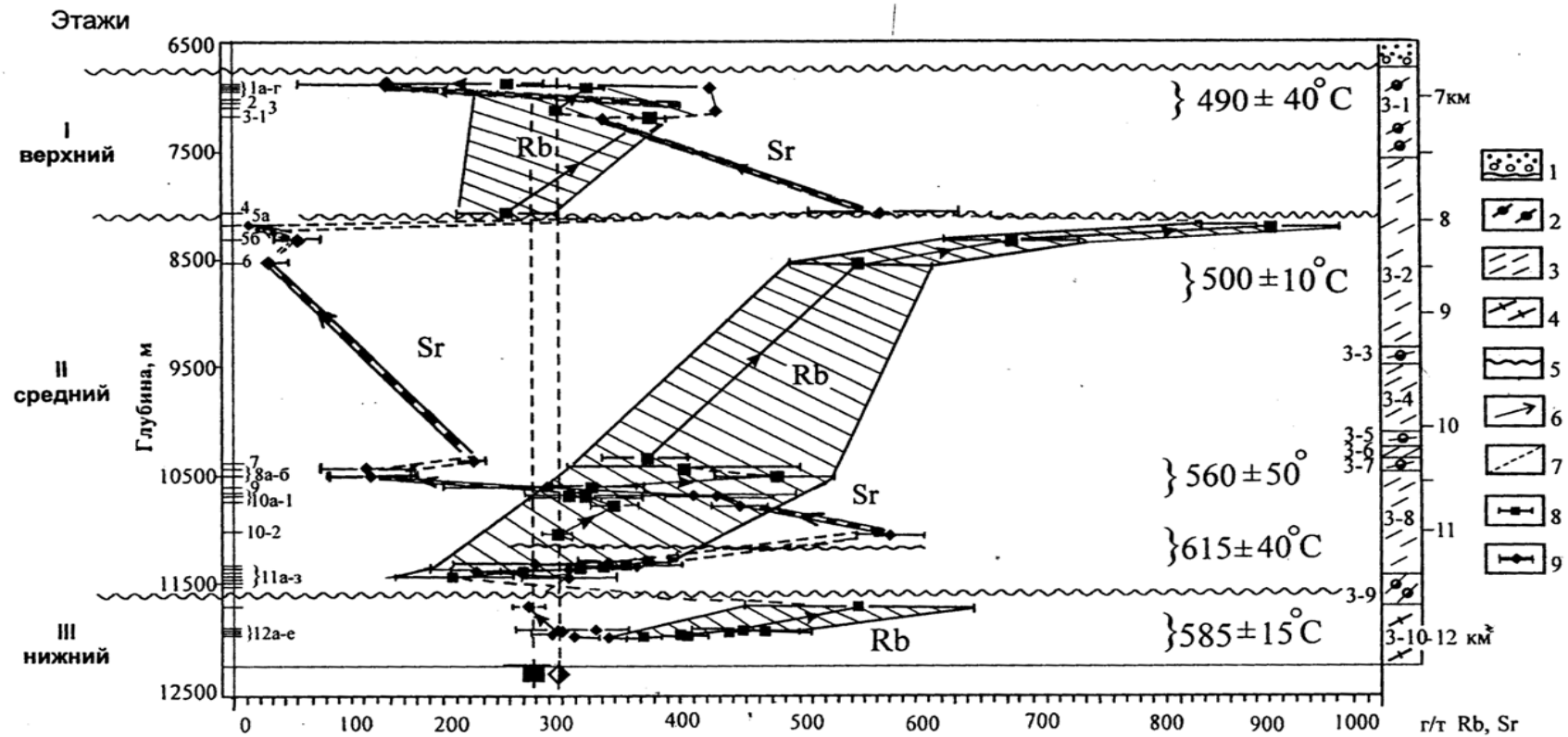


Рис. 1. Схема строения жильной системы гранитных пегматитов СГ-3 и ее вертикальной геохимической зональности.

Зональность системы иллюстрируется вариациями содержаний Rb и Sr в микроклине отдельных пегматитовых тел. В правой колонке дан схематический геологический разрез СГ-3 с указанием индексов толщ архейского гнейсового комплекса (3-1 – 3-10). В левой колонке указаны геохимические этажи системы, индексы жильных серий и положение отдельных пегматитовых тел в разрезе СГ-3. В правой части рисунка приведены температуры двухполевошпатового равновесия для указанных фигурными скобками пегматитовых серий.

Условные обозначения: 1 – конгломераты подошвы нижнепротерозойского комплекса; 2-4 – архейский гнейсовый комплекс: 2 – гнейсы с высокоглиноземистыми минералами (ВГМ), 3 – биотит-плаггиоклазовые гнейсы с высококальциевыми минералами (ВКМ), 4 – гнейсо-граниты-тоналиты с ВКМ; 5 – границы геохимических этажей; 6 – тренды фракционирования Rb и Sr; 7 – переломы трендов фракционирования Rb и Sr на границах геохимических этажей; 8-9 – фигуративные точки содержаний Rb(8) и Sr(9) в микроклине с доверительными интервалами, крупные значки отвечают концентрации Rb и Sr в микроклине материнских гнейсов с ВГМ, подстилающих пегматиты среднего этажа.

Более сложная картина вертикальной минералогической зональности пегматитов обусловлена изменением количественных соотношений между плагиоклазом и микроклином и более отчетливо проявляется в пределах отдельных жильных серий, нежели в объеме всей системы. Наиболее показательна в этом отношении серия 11 (глубина 11.3-11.5 км), состоящая из восьми пегматитовых тел, два из которых, залегающие в самой нижней части серии, представлены биотит-плагиоклазовыми, полностью лишенными микроклина. Выше по разрезу этот тип пегматитов сменяется биотит-двуполевошпатовым, с постепенным увеличением содержания микроклина по восстанию жильной серии. Завершается серия двумя пегматитовыми телами, в которых микроклин резко преобладает над плагиоклазом. Сходная картина увеличения доли микроклина за счет уменьшения содержания плагиоклаза в составе пегматитов по восстанию жильной серии наблюдается как в головной части системы (серия 1, глубина 6.86-6.92 км), так и в придонной ее части (серия 12, глубины – 11.7-12.0 км). Названная закономерность, очень сходная с вертикальной минералогической зональностью жильных систем пегматитов мусковитовой формации (*Слюдоносные...*, 1976), по-видимому, связана с эффектом проявления волны повышения щелочности на ранней стадии формирования системы пегматитов.

**Минералогическая зональность** отдельно взятых пегматитовых тел, обусловленная внутрикамерной дифференциацией, по сравнению с пространственной (вертикальной) зональностью жильных серий, проявлена значительно слабее. Это выражается в том, что в большинстве пегматитовых тел резко преобладающим является один минеральный парагенезис. Как правило, это гранитоподобный среднезернистый кварцево-двуполевошпатовый агрегат порфиридовидной структуры. Изредка в наиболее мощных телах встречаются участки крупнозернистых двуполевошпатовых или микроклиновых агрегатов графической или блоковой структуры в сочетании с мономинеральными выделениями кварца. По структурно-текстурным признакам заметно выделяются пегматиты апикальной части жильной системы (серии 1 и 2), располагающиеся в непосредственной близости от границы архейского гнейсового комплекса с породами нижнепротерозойской Печенгской структуры. Названные пегматиты характеризуются широким развитием полосчатых мелкозернистых кварцево-двуполевошпатовых агрегатов, часто обогащенных мелкочешуйчатым мусковитом-серицитом, которые представляют собой бластомилониты по грубозернистым пегматитовым породам. Не менее часто здесь присутствуют зоны скольжения и рассланцевания, затушевывающие первичные структуры и текстуры пегматитовых тел.

### 3. Вертикальная геохимическая зональность жильной системы гранитных пегматитов СГ-3

Индикаторами пространственной геохимической зональности пегматитовых систем, обусловленной фракционированием химических элементов в процессе направленной кристаллизации минералообразующей среды при ее перемещении в области пониженного давления, могут служить любые сквозные минералы, т.е. присутствующие во всех звеньях (телах) пегматитовой системы. При этом минералы-индикаторы должны иметь достаточную для применяемых методов анализа изоморфную емкость по отношению к элементам-примесям, уровень содержания которых адекватно отражает их концентрацию в системе в соответствии с фундаментальным законом распределения изоморфных микроэлементов. Этим необходимым и достаточным условиям в наибольшей мере отвечают полевые шпаты, в особенности калиевый полевой шпат, представленный в пегматитах СГ-3 максимально упорядоченным микроклином.

**Микроклин** способен принимать в структурную позицию К разнообразные химические элементы-индикаторы. С одной стороны, это Rb, Cs, Pb, проявляющие флюофильные свойства и накапливающиеся во фронтальной части пегматитовой системы. С другой стороны, это Ca, Sr, Ba, обладающие пиррофильными свойствами, содержание которых во фронтальной части системы, напротив, уменьшается. Соотношение концентраций флюофильных и пиррофильных химических элементов в микроклине наиболее рельефно отражает степень фракционирования пегматитовой системы в любой ее точке, являясь максимально чувствительным признаком пространственной геохимической зональности системы. Для иллюстрации ее характерных особенностей выбраны вариации содержания флюофильного Rb и пиррофильного Sr в микроклине (см. рис. 1). На этой схеме отчетливо видны антибатное распределение Sr и Rb и сложный характер трендов изменения концентрации этих элементов в микроклине по восстанию системы пегматитов. Тренды распадаются на несколько отрезков (этажей), в пределах которых тренд по каждому химическому элементу имеет единообразное направление по восстанию системы: характеризует либо рост содержания элемента (Rb), либо его снижение (Sr). На границе этажей направления трендов изменяются на противоположные, причем такие переломы являются статистически значимыми с учетом дисперсии этих признаков в соседних точках опробования системы. Для статистической оценки достоверности цифровых данных и сопоставления степени их информативности по большому числу химических элементов предлагается использовать два следующих признака: устойчивость тренда и его контрастность.

Устойчивость тренда (A) определяется абсолютным значением парного коэффициента корреляции ( $r$ ) между содержанием химического элемента в минерале и глубиной залегания объекта

опробования. Поскольку этот параметр является мерой надежности связи между составом минерала-индикатора и его местонахождением в пегматитовой системе, устойчивость тренда (А) является его важнейшей статистической характеристикой. Контрастность тренда (В) определяется величиной отношения между максимальным и минимальным содержанием химического элемента в минерале-индикаторе и характеризует степень его фракционирования в рамках рассматриваемой системы.

Для оценки совокупного вклада многих химических элементов в пространственную геохимическую зональность пегматитовой системы, независимо от их числа при сопоставлении различных минералов, предлагается использовать мультипликативный показатель зональности ( $Mz$ ). Его величина определяется следующим выражением:  $Mz = \Sigma(A^2B)/n$ , где  $A$  – статистически значимая устойчивость тренда,  $B$  – контрастность тренда фракционирования каждого из химических элементов;  $n$  – число химических элементов. Учитывая различную протяженность (по вертикали или латерали) сравниваемых систем, для их корректного сопоставления целесообразно использовать удельное значение мультипликативного показателя зональности:  $Mz' = Mz/L$ , где  $L$  – протяженность системы в км.

Таблица 1. Вариации состава микроклина пегматитов по глубине СГ-3, и значения параметров вертикальной геохимической зональности (А и В) по этажам жильной системы

Этаж	Индекс жилы	Отметка глубин, м	Протяженность, м	n	Содержание элементов в г/т, CaO в мас.%					
					Rb	Sr	Ba	Pb	CaO	Rb/Sr
I верхний	1-А	6865	20	10	240/30	135/80	360/170	73/20	0.4/0.2	1.78
	1-Г	6918	8.5	1	310	413	2200	200	0.7	0.75
	3	7110	3.9	1	282	423	1100	28	0.9	0.67
	3-1	7177	0.2	1	363	320	1000	52	0.11	1.13
	4	8070.6	0.6	3	235/37	568/60	2430/300	110/55	0.6/0.05	0.41
II средний	5-А	8183	11.2	4	903/70	14/10	21/16	58/13	0.17/0.04	64.50
	5-Б	8311	3.3	4	680/63	57/20	240/120	50/18	0.21/0.07	11.93
	6	8528	6.7	4	543/60	32/18	90/50	95/17	0.2/0.1	16.97
	7	10354	1.7	3	357/40	208/10	770/180	43/1	0.11/0.01	1.72
	8-А	10430	10	3	392/114	116/40	330/160	24/7	0.44/0.18	3.38
	8-Б	10493	6.2	3	470/50	120/20	290/160	70/15		
	9	10596	5.21	7	310/40	270/90	1830/125	60/18	0.25/0.15	1.15
	10-А	10671	2.6	3	290/50	400/45	1530/250	21/4	0.43/0.18	0.73
	10-Б	10681	1.6	6	305/30	420/50	1770/400	23/6	0.33/0.18	0.73
	10-1	10772	2.6	6	330/20	440/25	2110/500	22/7	0.35/0.12	0.75
	10-2	11043	3	2	280/4	570/30	1300/100	20/2	0.53/0.47	0.49
	11-А	11292	8.3	8	360/20	325/30	2300/140	34/5	0.32/0.07	1.11
	11-Б	11317	1.6	4	340/55	260/70	1420/80	25/15	0.6/0.4	1.31
	11-В	11339	5.2	9	320/50	350/90	3470/680	75/20	0.38/0.12	0.91
	11-Г	11362	2.7	5	300/80	290/20	2540/900	23/3	0.36/0.17	1.03
11-Д	11382	1.7	1	250	210	540	40	1.15	1.19	
11-Е	11436	5.3	5	190/50	290/40	3900/1000	27/10	0.32/0.22	0.66	
III нижний	11-1	11705	8.5	2	544/100	254/10	3400/280		0.225/0.07	2.14
	12-А	11924	1.4	7	442/50	280/25	2000/1270	45/20	0.41/0.3	1.58
	12-Б	11933	2.1	4	460/40	284/40	2550/640	40/15	0.15/0.07	1.62
	12-В	11944	14.8	10	430/30	314/30	1940/520	48/12	0.2/0.06	1.37
	12-Г	11962	8.9	3	388/20	275/20	2050/350	42/3	0.26/0.14	1.41
	12-Д	11978	3.3	5	394/20	294/30	1720/180	42/5	0.15/0.04	1.34
	12-Е	11992	1.8	1	356	325	2800	29	0.56	1.10
Гнейсы с ВГМ, 9-я толща		11560	300	1	260	280	4000	150	0.8	0.93
					Значения параметров $A$ (над чертой) и $B$ (под чертой)					
I	1А-4	6865-8070.6	1205.6	5	- 0.34	<b>0.755/4.2</b>	0.619	- 0.014	0.053	- 0.643
II	5А-11Е	8183-11436	3253	18	- <b>0.9/4.8</b>	<b>0.71/40.7</b>	<b>0.678/186</b>	- <b>0.52/5.5</b>	<b>0.503/5.8</b>	<b>-0.744/157</b>
	11А-11Е	11292-11436	144	6	- <b>0.487/1.9</b>	- 0.334	0.309	- 0.159	0.139	- <b>0.677/2</b>
III	11-1-12Е	11705-11992	287	7	- <b>0.925/1.5</b>	<b>0.732/1.3</b>	- <b>0.72/2</b>	- 0.159	0.23	- <b>0.943/2</b>
I-III	1А- 12Е	6865-11992	5127	29	- <b>0.108/4.75</b>	0.112	<b>0.49/186</b>	- <b>0.687/5.5</b>	- 0.13	- <b>0.295/157</b>

Примечания: Здесь и далее в табл. 1 – 5:

1. В верхней части таблицы над чертой – среднее арифметическое, под чертой – стандартное отклонение.
2. Содержание химических элементов определены инструментальными методами анализа РСФА и ЭКСА.
3. Жирным шрифтом выделены величины, значимые для 95 % уровня надежности.
4. Пустые места означают отсутствие данных.

В табл. 1 приведены данные по распределению всех изученных химических элементов в микроклине по вертикали жильной системы пегматитов СГ-3 и указаны значения параметров  $A$  и  $B$  по отдельным жильным сериям и этажам системы. Они показывают, что границы геохимических этажей системы выделяются не только по переломам трендов фракционирования Rb и Sr (см. рис. 1), но и по всем другим химическим элементам. Это подтверждает справедливость вывода о полиэтажности жильной системы пегматитов СГ-3 и надежность определения границ этажей по вариациям состава микроклина. Подчеркнем, что для всей изученной системы пегматитов, независимо от ее геохимических этажей, только Pb и Ba в микроклине являются статистически значимыми универсальными индикаторами сквозной вертикальной геохимической зональности системы.

**Плагиоклаз**, состав которого варьирует в жильной системе пегматитов СГ-3 от альбита (№ 2-8) до олигоклаза (№№ 25-30), по распространенности превосходит микроклин, но по информативности как минерал-индикатор вертикальной геохимической зональности несколько уступает ему из-за более низкой изоморфной емкости по отношению к Rb и Ba. Аналитические данные по вариациям состава плагиоклаза в зависимости от глубины залегания пегматитовых тел приведены в табл. 2. В целом они хорошо согласуются с вариациями состава сосуществующего микроклина, дополняя и уточняя картину вертикальной геохимической зональности системы. Особо следует отметить индикаторную роль видообразующего Ca в плагиоклазе, как типичного пиротфильного элемента, содержание которого по восстанию системы неуклонно уменьшается как в объеме отдельных жильных серий, так и во всей системе пегматитов, несмотря на существование переломов в тренде фракционирования Ca на границе геохимических этажей (рис. 2).

**Биотит**, присутствующий далеко не во всех пегматитовых телах, играет ограниченную роль как минерал-индикатор для всей системы. Однако он имеет ряд преимуществ перед полевыми шпатами при анализе вертикальной геохимической зональности отдельных жильных серий и геохимических этажей системы. Благодаря разнообразию структурных позиций кристаллической решетки, биотит обладает гораздо более широким набором химических элементов-индикаторов. Он включает не только кристаллохимические аналоги K, но и обширную группу элементов, занимающих структурную позицию Fe: Ti, Sc, Cr, Co, Ni, V, Mn, Zn, Ga, Be, а также F – как один из наиболее подвижных компонентов пегматитообразующих систем. Согласно приведенным аналитическим данным (табл. 3), все разнообразие химических элементов в биотите (как примесных, так и видообразующих) четко подразделяется на две группы – флюотфильную и пиротфильную. Первую группу составляют следующие химические элементы, перечисленные в порядке уменьшения устойчивости параметра  $A$ : Rb, F, Zn, Mn, Nb, Sn, содержание которых по восстанию системы пегматитов увеличивается. Ко второй группе относятся Sc, Cr, Ni, V, Co, Ba и Ti, а также видообразующий Mg.

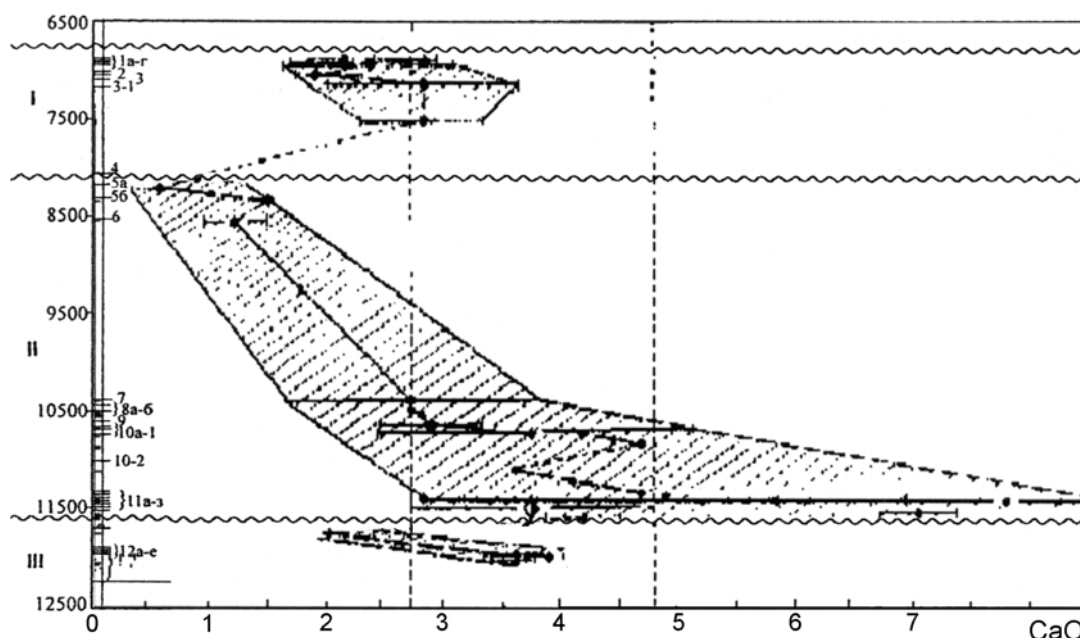


Рис. 2. Вариации содержания CaO в плагиоклазе по вертикали жильной системы пегматитов СГ-3. Условные обозначения аналогичны таковым на рис. 1. Крупный значок показывает среднее значение и доверительный интервал содержания CaO в плагиоклазах архейского гнейсового комплекса СГ-3.

**Мусковит**, значительно уступающий по распространенности не только полевым шпатам, но и биотиту, играет важную роль как индикатор вертикальной геохимической зональности пегматитов лишь в апикальной части системы, где устойчивость индикаторных признаков других минералов заметно снижается. Вероятно, из-за недостаточного объема аналитических данных по элементам-примесям в мусковите (табл. 4) только содержание Mn здесь имеет статистически значимую тенденцию к увеличению по восстанию системы. Противоположная тенденция, также статистически значимая, свойственная химическим элементам с пиррофильными свойствами, проявляется в распределении видообразующих элементов – Fe, Mg, Ti и Si. Уместно отметить, что эта особенность состава мусковита сохраняется в полном объеме системы пегматитов СГ-3.

**Гранат**, несмотря на малую распространенность в пегматитах СГ-3, также проявляет в своем макросоставе свойства индикатора вертикальной геохимической зональности пегматитовой системы (табл. 5). В гранате роль флюофильного элемента выполняет Mn (спессартиновый минерал), тогда как Ca и Mg выступают как пиррофильные элементы. Подчеркнем, что, несмотря на небольшой объем аналитических данных, характеризующих два верхних этажа системы пегматитов СГ-3 (всего 10 проб), граница между ними прекрасно выделяется переломами трендов фракционирования видообразующих химических элементов, повторяя их распределение по восстанию системы в других минералах – Ca в плагиоклазе, а Mn и Mg – в слюдах.

Таблица 2. Вариации состава пегматитов по глубине СГ-3, и значения параметров вертикальной геохимической зональности (А и В) по этажам жильной системы

Этаж	Индекс жилы	Отметка глубин, м	Протяженность, м	n	Содержание элементов в г/т, CaO в мас.%					
					Rb	Sr	Ba	Pb	CaO	Rb/Sr
I верхний	1-А	6865	18.0	4	24/13	164/62		16/10	2.13/0.3	0.146
	1-Б	6882	8.4	2	33/2	517/20	50/10	39/2	2.81/0.12	0.064
	1-В	6907	13.1	2	7/5	310/40		287.5/3.5	0.9	0.67
	1-Г	6918	8.5	4	4.5/0.9	340/170		22/14	2.35/0.8	0.013
	2-В	7023	4.6	2	16/3	320/100	260/10	32/17	1.9/0.8	0.050
	3	7110	3.9	2	14/12	605/20		37/10	2.8/0.6	0.023
II средний	5-А	8183	11.2	4	82/25	17/12	11/2	13.5/4	0.57/0.18	4.824
	5-Б	8311	3.3	1	44	110	24	10	1.5	0.4
	6	8528	6.7	4	71/23	42/17	20/7	18/2	1.2/0.2	1.69
	7	10354	1.7	4	20/10	310/30	70/10	35/27	2.7/1.3	0.065
	8-А	10430	10.0	1	46	136	70	10	2.7	0.338
	8-Б	10493	6.2	4	26/9	120/40	90/20	36/30	2.8/0.5	0.217
	9	10596	5.21	3	12/9	400/8	70/10	42/13	2.9/0.6	0.03
	10-А	10671	2.6	5	21/10	430/60	150/50	10/4	3.74/1.5	0.049
	10-Б	10681	1.6	6	22/12	540/40	330/170	8/3	4.18/0.5	0.041
	10-1	10772	2.6	1	20	500	200	6	4.7	0.04
	10-2	11043	3.0	1	58	320	270	8	3.6	0.181
	11-А	11292	8.3	1	38	344	120	30	4.7	0.11
	11-Б	11317	1.6	3	30	370/20	350/15	6	4.9	0.081
	11-В	11339	5.2	2	27/10	540/20	300/50	30/10	2.8	0.069
	11-Д	11382	1.7	2	13/10	490/100	56/26	38/20	7.8/1	0.027
	11-Ж	11436	5.3	6	6.5/1.5	655/70	92/40	20/7	7.1/0.4	0.01
11-З	11551	2.0	9	7.8/7	820/130	310/160	28/9	4.2/0.7	0.01	
III нижний	11-1	11705	8.5	2	84	470	70	40	2	0.179
	12-А	11924	1.4	2	30/28	570/120	165/50	20/13	3.6/0.3	0.053
	12-Б	11933	2.1	4	22/1	400/24	140/80	70/24	3.7/0.5	0.055
	12-В	11944	14.8	2	28/15	364/2	70/10	22/6	3.9/0.9	0.077
	12-Д	11978	3.3	1	11	315	34	22	3.6	0.035
	12-Е	11992	1.8	2	15/9	430/60	100/30	19/2	3.5/0.4	0.035
	Гнейс с ВГМ	11560	300	5	5.5/3	640/40	190/70	50/30	3.65/1.2	0.009
	Гнейс с ВКМ	11985	550	1	8	335	140	15	1.7	0.024
					Значения параметров А (над чертой) и В (под чертой)					
I	1А-3	6865-7110	245	6	- 0.28	0.59		0.52	0.24	- 0.47
II	5А-11-3	8183-11551	3368	17	- <b>0.73</b> /13.0	<b>0.79</b> /48.0	<b>0.61</b> /32.0	0.25	<b>0.78</b> /14.0	- <b>0.72</b> /48.2
	11А-11Е	11292-11551	259	6	- <b>0.91</b> /5.8	<b>0.96</b> /2.4		0.09	0.2	- <b>0.9</b> /8.1
III	11-1-12Е	11705-11992	287	7	- <b>0.925</b> /1.5	<b>0.732</b> /1.3	- <b>0.72</b> /2	- 0.29	<b>0.92</b> /2.0	- <b>0.98</b> /5.1
I-III	1А 12Е	6865-11992	5127	30	- <b>0.108</b> /4.75	0.112	<b>0.49</b> /186	0.12	<b>0.58</b> /14.0	

Таблица 3. Вариации состава биотита пегматитов по глубине СГ-3, и значения параметров вертикальной геохимической зональности (А и В) по этажам жильной системы

Этаж	Индекс жилы	Отметка глубин, м	Протяженность, м	n	Содержание элементов в г/т, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO в мас. %									
					Rb	Mn	F	Zn	Li	Sc	Ni	Cr	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
I верхний	1-Б	6885	8.40	2	768	2686/870	2000	407					25.15/0.9	9.94
	1-Г	6918	8.50	2	728	1736/470	4200	643/6	285	9	190	20	24.8/0.2	9.88/0.5
	2-В	7045	4.60	2	665/90	980/250	5600	430	235	22	230	147	25.05/0.6	9.95
	3	7110	3.90	3		1760/120							20.5/1	10.8/0.4
	3-1	7177	0.20	2		1130/50							28.1/1.2	6.53/0.24
	4	8071	0.60	1		2650							27.9	9.92
II средний	5-А	8183	11.20	2	1640/175	7680/540	4480	605/7	130/20	22/4			30.3/2.1	3.94/0.3
	5-Б	8311	3.30	1	1200	4400	1990	523	80	24	23	1	33	3.3
	6	8528	6.70	2	1960/170	4180/120	1100	1000	92	11	26	25	32.6/4.8	5.3/1.1
	7	10354	1.70	2	946/110	3950/400	1600/380	430/10	180	27	80	50	25.2/1.5	
	8-А	10430	10.00	2		2800			330/20	40/4	68/10	80/5	29.6	8.35
	8-В	10478	0.50	1	852	812	2700	232						
	8-Г	10493	6.20	1	643	3440	3800	183	130	46	130	360	29.6/0.2	7.15/0.1
	9	10596	5.21	3	924/60	2300/460	2750	373/94	150	23	157	584	26.8/1.6	8.5/0.8
	10-А	10671	2.60	4	1010/75	2380/620	2900	550/30	190	38	155/50	185/80	28.7/0.4	7.11/0.1
	10-Б	10681	1.60	2	913/135	2980/560	2650	620/180	376/10	14	24/10	37/28	27.5/2.3	10.4
	10-1	10772	2.60	3	953	2870/350	3100	504	264/12	12	37/23	60/5	28.5/2.6	7.7/0.05
	11-А	11292	8.30	2	1163	1980/115	3300	460	246	25/3	45/20	30/10	27.7/0.2	7.46
	11-Б	11317	1.60	2	1130/70	1680/736	2900/140	400/70	277/5	22/12	110/90	40/5	22.6/2.6	11.5
	11-В	11339	5.20	4	980/130	1270/700	2830/590	324/32	160/100	27/23	120/50	40/10	23.9/3.8	8.8/1.6
	11-Г	11362	2.70	1	816	1566	3200	345	260/80	30/10	110/40	26/4	25.5	9.7
11-Е	11436	5.30	2	660/50	1122/930	2350/1500	235/60	144/20	44/35	130	90/40	25.4/0.5	9.8/0.4	
11-Ж	11488	2.20	1	560	430	1400	227	80	40/15	120/100	50/60	24.7	9.7	
11-З	11551	2.00	7	420/60	944/240	1540/160	234/30	70/6	44/3	300/250	450/90	23.4/0.6	9.94/0.5	
III нижний	11-1	11705	8.50	3	1130/65	3640/750		863/150	270/40	35/4	87	30/15	29.8/3.5	7.12/0.5
	12-А	11924	1.40	3	1590/250	3180/1000	3500/100	480/20	560	27	46/10	60/10	28/3.4	7.4/0.1
	12-Б	11933	2.10	2	1575/45	3340/400	3750/500	480/26	510	61	65/12		26.8/1	7.3/0.25
	12-В	11944	14.80	7	1370/90	2450/140	3370/300	430/26	460	45/14	50/24	52/12	26.1/1.1	7.3/0.3
	12-Г	11962	8.90	2	1200/170	1990/280	3200/1400	430/40	336/60	32/6	47/12	40/15	25.2/1.1	10.3/0.5
	12-Д	11978	3.30	3	1265/20	2090/140	3100/600	440/20	460/10	40/6	52/16	100	24.4/0.8	7.7/0.3
	12-Е	11992	1.80	1	1240	1910	2500	446	430/30	40/10	50/20	100	23.6	7.35
Гнейсы с ВГМ, 1-9 толщи		6800-11660	4860,00	5	370/190	1270/290	1500/650	270/60	210/80	44/10	240/40	480/50	19/0.6	10.8/0.6
Гнейсы с ВКМ, 2-10 толщи		7800-12260	4460,00	5	450/80	2100/330	1510/80	440/140	250/90	18/7	123/80	130/40	20.2/1.03	10.5/0.9
Гнейсы с ВГМ, 9-я толща		11560	360,00	1	550	1160	2000	370	125	40	240	570	18.4	11.1
Гнейсы с ВКМ, 10 толща		11985	600,00	1	550	2270	1400	440	250	30	100	100	20.6	10.3



						Значения параметров <i>A</i> (над чертой) и <i>B</i> (под чертой)									
I	1Б-4	6885-8070.6	1185.60	7	-0.978/1.15	-0.017	0.893/0.36	-0.249							
II	5А-113	8183-11551	3368.00	18	-0.765/4.7	-0.858/17.9	0.305	-0.746/5.5	0.096	-0.742/7.4	0.389	-0.230	-0.832/1.31	0.885/3.1	
	11А-113	11292-11551	259.00	7	-0.976/2.8	-0.842/4.6	-0.931/2.4	-0.897/2.0	-0.665	0.938/6.9	0.850/6.5	0.891/17	-0.312	0.262	
III	11-1-12Е	11705-11992	287.00	7	-0.869/1.33	-0.762/4.0	-0.911/1.5	-0.613	0.673	0.112	0.812/3.9	0.467	-0.871/1.26	0.293	
I-III	1Б-12Е	6885-11992	5107.00	32	0.055	-0.208	-0.181	0.717/5.5	0.121	-0.261	-0.179	-0.070	-0.165	0.086	

Таблица 4. Вариации состава мусковита пегматитов по глубине СГ-3, и значения параметров вертикальной геохимической зональности (*A* и *B*) по этажам жильной системы

Этаж	Индекс жилы	Отметка глубин, м	Протяженность, м	<i>n</i>	Содержание элементов в г/т, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, TiO <sub>2</sub> в мас. %										
					Rb	Mn	Nb	F	Be	V	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO		
I верхний	1-А	6865	20	4	312/83	310/124	150/15	570/280	2/0.2	10/4	0.1/0.01	2.14/0.3	0.756/0.1		
	1-Б	6885	8.4	1							0.29	1.5	1.12		
	1-В	6898	13.1	1	189	145	190	640	1.5	15		1.53			
	1-Г	6918	8.5	3	340/40	120/20	17	620/85	2.9/1	50/5	0.16/0.03	1.8/0.7	1.33/0.4		
	2-Б	7023	3.9	1	228	140	120	500				1.72			
	2-В	7045	4.6	2	180	85	17		0.8/0.3	80	0.02	1.52	0.79		
	3	7110	3.9	3		80					0.31	0.88/0.1	0.98/0.2		
	3-1	7177	0.2	2							0.36/0.18	3.4/0.2	1.86/0.1		
II средний	4	8071	0.6	4							0.23	5.4/0.9	1.86/0.7		
	5-А	8183	11.2	3	1260/110	380/130	160/40	1120/96	9/1.2	17/10	0.01	5.3/0.8	0.76/0.1		
	5-Б	8311	3.3	1	930	440	150	500	8	12	0.14	5.65/0.8	0.81		
	6	8528	6.7	2		125					0.34	4.7/0.3	0.57/0.1		
	8-Г	10493	6.2	8	500/50	120/20	86	560/140	1.7/0.5	12/4	0.49/0.26	1.92/0.3	0.8/0.1		
	9	10596	5.21	2		205/90					0.72/0.2	4.1/0.4	1.4/0.4		
	10-А	10671	2.6	3		100					0.6/0.5	6.6/0.3	0.96/0.4		
	10-Б	10681	1.6	2							1.14/0.33	6.6/0.8	1.85/0.2		
	10-1	10772	2.6	3		360/250					1.23/0.53	7/0.4	1.4/0.5		
	11-А	11292	8.3	1							1.4	5.2	1.87		
	11-Б	11317	1.6	1		410					1.31	4.7	2.11		
III	11-В	11339	5.2	1		530					1.97	4	1.61		
	11-Г	11362	2.7	1		550					0.68	4.58	1.87		
	11-Е	11436	5.3	1		590					0.16	5	1.06		
	11-1	11705	8.5	2		75/10					0.83/0.08	4.56/0.5	1.56/0.2		
						Значения параметров <i>A</i> (над чертой) и <i>B</i> (под чертой)									
I	1А-4	6865-8071	1206	11	-0.518	-0.798/3.9	-0.144	-0.736/2.2	0.570	0.955/2.3	0.197	0.875/3.9	0.675/2.5		
II	5А-10-1	8183-11436	2589	24	-0.868/2.93	-0.588	-0.959/5.2	-0.849/6.9	-0.999/6.0	0.946/3.3	0.838/14.0	0.062	0.689		
I-III	1А-11-1	6865-11704	4938	37	0.420	0.334	-0.728	0.167	0.142	0.117	0.714	0.652	0.438/3.7		

Примечание к табл. 3 и 4: 2. Содержание химических элементов определено инструментальными методами анализа РСФА и ЭКСА, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgO – микрозондовым методом.

Таблица 5. Вариации состава граната пегматитов по глубине СГ-3, и значения параметров вертикальной геохимической зональности (А и В) по этажам жильной системы

Этаж	Индекс жилы	Отметка глубин, м	Протяженность, м	n	Содержание компонентов, мас.%			
					Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO
I верхний	1-А	6865	20	4	28.4/2	13.3/2.6	1.21/0.22	0,98/0,2
	2-В	7043	4.6	1	25	16.4	1.74	1,25
	3	7110	3.9	1	27.3	10.9	1.84	1,32
II средний	5-А	8183	11.2	1	27.9	14.3	0.24	0,3
	6	8528	6.7	1	27.4	13.6	0.89	0,37
	11-Е	11436	5.3	1	29	9.5	1.62	1,43
	11-3	11551	2.0	2	32.9/0.4	3.32/0.19	3.75/0.05	1,11/0,16
Гнейсы с ВГМ		11560	300	4	34.9/1.5	2.35/0.6	3.5/0.3	1.33/1.05
Значения параметров А (над чертой) и В (под чертой)								
I	1А-3	245	6865-7110	5	- 0.547	- 0.186	<b>0.993</b>	<b>0.997/11.6</b>
II	5А-11-3	3368	8183-11551	18	0.772	- <b>0.877/4.3</b>	<b>0.828/1.52</b>	<b>0.965/4.8</b>
I—II	1А-11-3	4686	6865-11551	6	<b>0.765/1.32</b>	- <b>0.789/5</b>	0.535/14.8	0.193

Примечания: 1. Курсивом выделены данные Н.Е. Козлова и др. (2001). 2. Содержание компонентов определено микронзондовым методом.

Таблица 6. Мультипликативные показатели (общие Mz и удельные Mz/L) вертикальной геохимической зональности жильной системы пегматитов СГ-3

Этаж	Протяженность, км	Жильная серия	Минерал	Химический элемент-индикатор	Mz	Mz/L
I	1.206	1А-4	КПШ	(-)Sr,Ba	2.5	2.07
		1А-4	Бт	(+)Rb,F	1.7	1.38
		1А-4	Мск	(+)Rb,F,Al(+);(-)Fe,V,Mg,Si	1.5	1.3
		1А-3	Гр	(-)Mg,Ca	1.4	4.52
		5А-11-Е	КПШ	(+)Rb,Pb;(-)Sr,Ba,Ca	23	6.92
II	3.37	5А-11-3	Пл	(+)Rb;(-)Sr,Ba,Ca	15	4.4
		11-3-5А	Бт	(+)Rb,Mn,Sn,Nb,Zn,Sc,Fe;(-)Mg,Ti,Si	4.2	1.25
		5А-11-Е	Мск	(+)Be;(-)Ti,Mg	7.9	0.75
		5А-11-3	Гр	(+)Mn;(-)Ca,Mg	6	1.84
	0.144	11-А-11Е	КПШ	(+)Rb;(-)Ba	2.9	20
		11А-11-3	Пл	(+)Rb;(-)Ca	3.5	24.3
		11А-11-3	Бт	(+)Rb,Mn,F,Nb,Zn,Li;(-)Ba,V,Sc,Ni,Cr,Co	3.5	13.4
III	0.29	11-1-12Е	КПШ	(+)Rb,Ba;(-)Sr	1.1	3.8
		11-1-12Е	Пл	(+)Rb;(-)Ca	4.6	15.9
		11-1-12Е	Бт	(+)Rb,Mn,F,Fe;(-)V,Ni,Co	1.5	5.19
I-III	5.13	1А-12Е	КПШ	(+)Pb;(-)Ba	23	4.5
		1А-12Е	Пл	(-)Ca,Sr	3.1	0.56
		1А-12Е	Бт	(+)Al,Sn;(-)Zn,Ti,V	1.4	0.27
I-II	3.62	1А-11-1	Мск	(+)Nb,Al;(-)Fe,Ti,Mg,Si	2.7	0.73
		1А-11-3	Гр	(+)Mn;(-)Fe	1.9	0.58

Примечание: КПШ – микроклин, Пл – плагиоклаз, Бт – биотит, Мск – мусковит, Гр – гранат.

Совокупность аналитических данных по всем минералам-индикаторам и химическим элементам пегматитовой системы СГ-3 (табл. 1-5) с учетом статистической значимости трендов фракционирования последних и их мультипликативных показателей (табл. 6) свидетельствует о несомненном существовании вертикальной геохимической зональности пегматитовой системы, которая носит полиэтажный возвратно-поступательный характер. В результате жильная система пегматитов расчленяется на три геохимических этажа, которые однозначно выделяются по переломам трендов фракционирования практически всех химических элементов. По минералого-геохимическим признакам, положению этажей в разрезе СГ-3 и их протяженности выявляются индивидуальные особенности каждого этажа.

**Верхний (I) этаж**, протяженностью более 1200 м, располагающийся в гнейсах с ВГМ 1-ой толщи и частично в биотит-плагиоклазовых гнейсах с ВКМ 2-ой толщи (рис. 1), является неполным. Его апикальная часть, по-видимому, была уничтожена эрозией в процессе формирования Печенгской раннепротерозойской структуры. Судя по низкому содержанию флюофильных и высокому – пиррофильных химических элементов во всех минералах-индикаторах, сохранилась лишь придонная часть этажа, притом сильно тектонизированная, вероятно, из-за близости контакта с породами раннепротерозойского комплекса. В результате вертикальная зональность этажа оказалась серьезно нарушенной, в особенности в отношении легкоподвижных флюофильных химических элементов, в первую очередь Rb. Здесь он

потерял свою значимость как элемент-индикатор в микроклине. В то же время менее подвижный пиррофильный Sr сохранил свою роль элемента-индикатора в обоих полевых шпатах (табл. 6).

**Нижний (III) этаж**, протяженностью около 300 м, залегающий практически целиком в пределах 10-й толщи тоналитовых гнейсов с ВКМ архейского комплекса СГ-3, по-видимому, также является неполным. Скважина вскрывает только его апикальную часть, о чем можно судить по относительно высоким содержаниям группы флюофильных элементов в полевых шпатах и биотите. Вертикальная геохимическая зональность в нижнем этаже системы выражена весьма ярко, на что указывает очень высокая устойчивость трендов фракционирования Rb во всех минералах-индикаторах и Ca в плагиоклазе.

**Средний (II) этаж** системы пегматитов, имеющий наибольшую протяженность по вертикали (более 3350 м) и охватывающий большую часть вскрытого СГ-3 разреза архейского гнейсового комплекса, является максимально полным. Поэтому особенности его геохимической зональности с генетической точки зрения представляют особый интерес. Подчеркнем, что, хотя этот этаж состоит из нескольких обособленных жильных серий, тренды его вертикальной геохимической зональности по наиболее информативным химическим элементам всех минералов-индикаторов имеют весьма высокие значения устойчивости (А) (табл. 6). В сочетании с максимальной степенью фракционирования химических элементов в системе (В), они определяют и очень высокие мультипликативные показатели вертикальной геохимической зональности этажа (Мz).

В то же время удельные мультипликативные показатели его зональности (Мz') сопоставимы с таковыми для верхнего и особенно нижнего этажей всей жильной системы пегматитов СГ-3. Это говорит о том, что уровень фракционирования химических элементов при формировании системы пегматитов в первую очередь определяется протяженностью перемещения пегматитообразующей среды по вертикали от материнского источника. Полученные геохимические данные позволяют вполне определенно назвать этот источник. Им являются интенсивно перекристаллизованные высокоглиноземистые гнейсы 9-й толщи, подстилающие и заключающие в себе жильную серию 11. Пегматиты придонной части этой серии отличаются от всех других пегматитов системы СГ-3 самым низким содержанием флюофильных и наиболее высокой концентрацией пиррофильных химических элементов во всех минералах-индикаторах, т.е. их состав максимально приближен к составу тех же минералов вмещающих гнейсов. Эту особенность пегматитов жильной серии 11 (рис. 3) можно рассматривать как свидетельство зарождения пегматитообразующей системы среднего этажа за счет экстракции из подстилающих пород легкоподвижной пегматитообразующей субстанции. При таком процессе состав начальных продуктов кристаллизации должен быть в соответствии с коэффициентом распределения флюофильных элементов ( $k < 1$ ) и пиррофильных элементов ( $k > 1$ ) либо обеднен первыми и обогащен вторыми, либо очень сходен с составом тех же фаз в исходном субстрате. Именно эта картина и наблюдается в пегматитах придонной части рассматриваемой жильной серии. Дальнейшая эволюция системы осуществлялась путем свободного перемещения пегматитообразующей среды по ее восстанию, сопровождаясь кристаллизационным фракционированием химических элементов. Свидетельством этого и служит наличие вертикальной геохимической зональности системы пегматитов СГ-3. Судя по протяженности среднего этажа жильной системы СГ-3, перемещение пегматитообразующего вещества по вертикали при его начальной экстракции из вмещающих пород может быть весьма значительным (более 3-х км). Поэтому бытующее представление об образовании "in situ" глубинных пегматитов керамической формации, к каковой принадлежат пегматиты СГ-3, следует пересмотреть как несоответствующее полученным геологическим и минералого-геохимическим данным.

Особую важность в генетическом и методическом аспектах представляет анализ вариаций распределения некоторых химических элементов – Rb, Sr, Ba и Pb – между сосуществующими минералами: микроклином, плагиоклазом и биотитом (табл. 7). Ранее было показано, что распределение Pb между сосуществующими полевыми шпатами служит геотермометром, не зависящим от давления (Гордиенко, Пономарева, 1992). Полученные этим методом оценки температуры двухполевошпатового равновесия в полном объеме жильной системы пегматитов СГ-3 указывают на прямую связь температуры с глубиной их залегания ( $r = 0.94$ ), которая практически не зависит от границ геохимических этажей системы. Это, в свою очередь, свидетельствует о закономерном уменьшении температуры формирования пегматитов по восстанию жильной системы пегматитов, что является одной из возможных причин, обуславливающих ее вертикальную геохимическую зональность. По данным о тепловом режиме формирования системы пегматитов СГ-3 можно судить о температурном градиенте, отвечающем начальной стадии платформенного этапа существования Кольского региона в позднем архее. Согласно полученным минералого-геохимическим данным, он составлял  $25 \pm 5^\circ\text{C}/\text{км}$ . Практически таким же он остается и сейчас!

Полученные оценки температуры двухполевошпатового равновесия в пегматитах СГ-3 позволяют провести анализ зависимости коэффициентов распределения вышеназванных химических элементов в сосуществующих минералах не только от температуры, но и от глубины (давления) на основе расчетов силы

корреляционной связи между названными признаками. Он показывает (табл. 7), что распределение Rb между микроклином и плагиоклазом, варьирующее довольно значительно (коэффициент вариации  $V = 31\%$ ), мало зависит от глубины ( $r = 0.65$ ) и еще меньше – от температуры ( $r = 0.41$ ), тогда как распределение Rb между микроклином и биотитом, несмотря на низкий коэффициент вариации ( $V = 14\%$ ), имеет очень сильную связь с глубиной ( $r = -0.98$ ) и более слабую, но значимую связь с температурой ( $r = -0.87$ ). Тем самым, отношение  $C_{кпш}^{Rb} / C_{Бт}^{Rb}$ , вероятно, может быть использовано, как геобарометр. Распределение Sr между микроклином и плагиоклазом, отличающееся очень большой стабильностью ( $V = 7.7\%$ ), не зависит ни от глубины, ни от температуры и может служить показателем равновесного состояния двухполюсоватовой системы.

Распределение Ba между парами микроклин/плагиоклаз и микроклин/биотит, которое и в том, и в другом случае сдвинуто в сторону микроклина, имеет повышенную вариабельность ( $V = 86$  и  $V = 70\%$ , соответственно) и очень высокую связь с глубиной ( $r = 0.97$  и  $r = 0.99$  соответственно), причем в паре микроклин/биотит распределение Ba не зависит от температуры ( $r = 0.08$ ), что делает его особенно привлекательным для использования в качестве геобарометра.

Таблица 7. Вариации значений коэффициента распределения  $K$  химических элементов между сосуществующими минералами пегматитов в зависимости от глубины их залегания в разрезе СГ-3, и оценка температуры полевошпатового равновесия по Pb-геотермометру

Этаж	Индекс жилы	Глубина, м	$n$	Значения коэффициента $K$						$T, ^\circ C$
				Rb		Sr	Ba		Pb	
				КПШ/ПЛ	КПШ/Бт	КПШ/ПЛ	КПШ/ПЛ	КПШ/Бт	КПШ/ПЛ	
I	1-А	6865	1	10		0.823			4.56	506
	1-Г	6918	1	69	0.42				9.1	447
	<b>1</b>	<b>6916</b>	<b>2</b>						<b>6.8</b>	<b>480</b>
II	5-А	8183	1	11	0.55	0.82	1.91		4.3	511
	6	8528	1	7.65	0.277	0.76	0.22		5.28	494
	<b>5</b> <b>6</b>	<b>8355</b>	<b>2</b>	<b>9.33</b>	<b>0.414</b>	<b>0.79</b>	<b>1.07</b>		<b>4.79</b>	<b>503</b>
	7	10354	1	17.9	0.377	0.67	11	1.28	1.23	617
	8-А	10430	1	8.52		0.85	4.71		2.4	560
	8-Б	10493	1	18.1		0.88	4.1		7	470
	9	10596	1	25.8	0.335	0.68	26.1	1.83	1.43	613
	<b>7</b> <b>9</b>	<b>10468</b>	<b>4</b>	<b>17.6</b>	<b>0.356</b>	<b>0.77</b>	<b>11.5</b>	<b>1.56</b>	<b>3.02</b>	<b>565</b>
	10-А	10671	1	13.8	0.287	0.93	30.6	1.39	2.1	572
	10-Б	10681	1	13.9	0.334	0.78	5.36	3.07	2.88	545
	10_1	10772	1	16.5	0.346	0.88	10.6	5.55	3.67	524
	<b>10</b>	<b>10708</b>	<b>3</b>	<b>14.7</b>	<b>0.322</b>	<b>0.863</b>	<b>15.5</b>	<b>3.34</b>	<b>2.88</b>	<b>547</b>
	<b>7</b> <b>10</b>	<b>10699</b>	<b>7</b>	<b>16.4</b>	<b>0.336</b>	<b>0.810</b>	<b>13.2</b>	<b>2.62</b>	<b>2.96</b>	<b>557</b>
	11-А	11292	1	9.47	0.31	0.94	19.2	3.83	1.13	624
	11-Б	11317	1	8.95	0.301	0.76	11.8	2.96	0.83	650
	11-В	11339	1	11.9	0.327	0.65	11.6	7.71	2.5	557
	11-Г	11362	1					5.64		
11-Д	11382	1	19.2		0.43	9.64		1.05	630	
11-Е	11436	1		0.288			13			
<b>11</b>	<b>11422</b>	<b>6</b>	<b>12.4</b>	<b>0.307</b>	<b>0.7</b>	<b>13.1</b>	<b>6.63</b>	<b>1.4</b>	<b>615</b>	
III	11_1	11705	1	6.48		0.54	48.5			
	12-А	11924	1	14.7	0.278	0.49	12.1	4	2.25	566
	12-Б	11933	1	20.9	0.292	0.71	18.2	7.8	1.67	591
	12-В	11944	1	15.4	0.314	0.86	27.7	13.9	2.18	569
	12-Г	11962	1		0.323			14.6		
	12-Д	11978	1	35.8	0.311	0.93	50.6	3.19	1.91	580
	12-Е	11992	1	23.7	0.287	0.76	28	3.5	1.52	600
<b>12</b>	<b>11958</b>	<b>7</b>	<b>19.5</b>	<b>0.30</b>	<b>0.72</b>	<b>30.9</b>	<b>7.83</b>	<b>1.91</b>	<b>581</b>	
<i>Коэффициенты корреляции значений <math>K</math></i>										
А	по глубине		31	0.391	-0.510	-0.206	0.612	0.601	-0.626	0.570
	по температуре			0.195	-0.239	-0.327	0.395	-0.157	-0.952	
В	по глубине		7	0.649	-0.978	-0.002	0.968	0.993	0.916	0.936
	по температуре			0.410	-0.869	-0.024	0.782	0.084		
<i>Коэффициенты вариации (<math>V, \%</math>) значений <math>K</math></i>										
А			31	75.5	11.8	16.8	80.4	70.0	62.5	13.6
В			7	24.6	11.0	7.7	21.1	61.4	54.2	8.3

Примечания: 1. Жирным шрифтом выделены средние значения  $K$  для отмеченных объектов. 2. Расчет по частным (А) и средним (В) значениям коэффициента  $K$ .

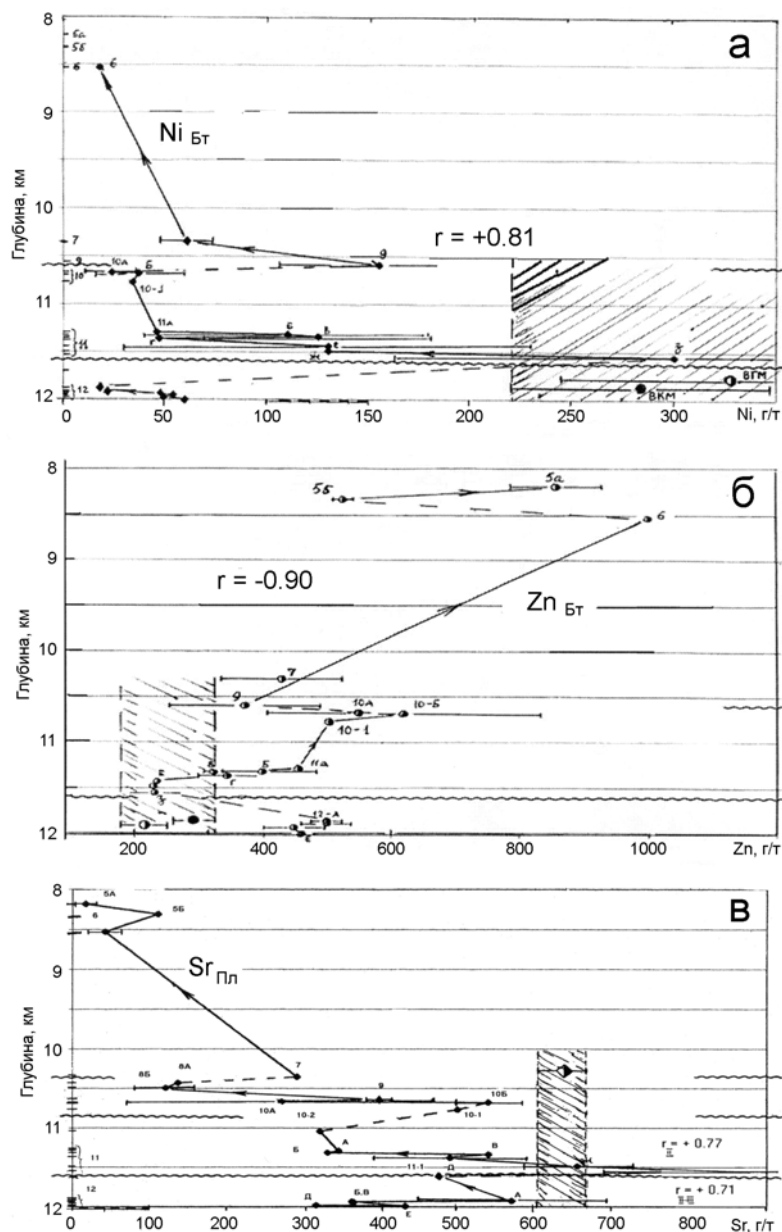


Рис 3. Вариации содержания наиболее информативных химических элементов в биотите (а, б) и плагиоклазе (в), иллюстрирующие вертикальную геохимическую зональность среднего и нижнего этажей системы пегматитов СГ-3.

Штриховкой показан дополнительный интервал содержания химических элементов в минералах гнейсового комплекса. Условные обозначения те же, что и на рис. 1.

#### 4. Выводы

1) На основе статистического анализа вариаций состава сквозных минералов пегматитов, вскрытых Кольской сверхглубокой скважиной, детализирована ранее выявленная нами вертикальная геохимическая зональность этой жильной системы. Она обусловлена свободной миграцией химических элементов-индикаторов по восстанию системы пегматитов СГ-3 и имеет полиэтажный возвратно-поступательный характер. Границы геохимических этажей однозначно определяются по переломам трендов фракционирования многих химических элементов, которые фиксируют существование в системе пегматитов СГ-3 трех самостоятельных этажей.

2) Средний, наиболее полный этаж системы, протяженностью по вертикали в 3.3 км, характеризуется максимальной устойчивостью и контрастностью геохимических трендов фракционирования, что заставляет пересмотреть бытующее представление о формировании пегматитовых систем подобного типа "in situ". Для пегматитов этого этажа по минералогическим данным удалось установить материнский источник, каковым являются мигматизированные высокоглиноземистые гнейсы толщи 9 гнейсового комплекса.

3) Коэффициенты распределения ряда химических элементов между сосуществующими минералами пегматитов выступают как показатели равновесности парагенезиса (Sr в полевых шпатах), его глубинности (Ba в микроклине и биотите) и температуры (Pb в полевых шпатах). Последний в качестве Pb-

двухполевошпатового геотермометра, не зависящего от давления, использован для количественной оценки температурного режима формирования пегматитовой системы СГ-3. Расчетные данные указывают на тесную связь вертикальной геохимической зональности с закономерным уменьшением температуры двухполевошпатового равновесия по ее восстанию, т.е. на ее температурную зональность. Последняя оценивается градиентом  $25 \pm 5^\circ\text{C}/\text{км}$ , который можно рассматривать как оценку теплового режима Кольского мегаблока в позднеархейскую эпоху становления фундамента Балтийского щита.

**Благодарности.** Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам Геологического института Кольского НЦ РАН, академику *Ф.П. Митрофанову* за неоценимую помощь в организации экспедиционных работ и интерес, проявленный к нашим исследованиям, а также *В.Р. Ветрину* за дополнительно предоставленный каменный материал и полезную критику.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 01-03-65238, 03-05-65150.

## Литература

- Архейский комплекс в разрезе СГ-3. Под ред. Митрофанова Ф.П. *Апатиты, КНЦ РАН*, 185 с., 1991.
- Гордиенко В.В., Пономарева Н.И.** Распределение свинца между сосуществующими калиевым полевым шпатом и плагиоклазом как двухполевошпатовый геотермометр. *ДАН*, т.338, № 2, с.205-206, 1992.
- Гордиенко В.В.** Гранитные пегматиты. *СПб, СпбГУ*, 272 с., 1996.
- Гордиенко В.В., Румянцев Е.В., Смирнов Ю.П.** О вертикальной геохимической зональности жильной системы гранитных пегматитов архейского гнейсового комплекса Кольской сверхглубокой скважины СГ-3. Результаты изучения глубинного вещества и физических процессов в разрезе Кольской сверхглубокой скважины до глубины 12261 м. *Апатиты, Полиграф*, 170 с., 2000.
- Козлов Н.Е., Мартынов Е.В., Козлова Н.Е., Иванов А.Н.** Петрогеохимическое обоснование обнаружения гомологов архейских пород разреза Кольской СГ-3 на поверхности (методологический аспект). *Геохимия*, № 6, с.601-611, 2001.
- Кольская сверхглубокая. Под ред. Козловского Е.А. *М., Недра*, 490 с., 1984.
- Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследования. Под ред. Орлова В.П., Лаверова Н.П. *М., МФ "Технонефтегаз"*, 260 с., 1998.
- Поля редкометалльных гранитных пегматитов. Под ред. Овчинникова Л.Н., Кузьменко М.В. *М., Наука*, 332 с., 1976.
- Редкометалльные пегматиты. Под ред. Загорского В.Е., Макагон В.В., Шмакина Б.М. *Новосибирск, Наука*, 285 с., 1997.
- Слюдоносные пегматиты Северной Карелии (геология, минералогия, геохимия и генезис). Под ред. Гордиенко В.В., Леоновой В.А. *Л., Недра*, 367 с., 1976.
- Чен Я.Д., Кроу Т.Е., Ветрин В.Р., Митрофанов Ф.П.** U-Pb геохронология пород архейской части разреза Кольской сверхглубокой скважины. В кн.: *Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследования. М., МФ "Технонефтегаз"*, 260 с., 1998.