

## **Изотопно-газовые (He, Ar) характеристики платиноносных горизонтов западной части Панского массива (Кольский полуостров)**

Нивин В.А., Корчагин А.У., Новиков Д.Д., Рундквист Т.В., Субботин В.В.

*Геологический институт Кольского НЦ РАН, Апатиты, Россия*

Изучено распределение изотопов гелия и аргона в породах рудоносных расслоенных горизонтов одного из трех крупных структурных блоков Федорово-Панского базитового интрузива. Извлечение газов осуществлялось как из пород в целом, так и из флюидных микровключений. В результате получены дополнительные подтверждения мантийного источника и сложной эволюции рудно-магматической системы западной части Панского массива. Предполагается, что еще до начала кристаллизации расплавом была потеряна большая часть первичных мантийных летучих компонентов и произошло разбавление магматического флюида приповерхностными палеометеорными водами. Газо-геохимические данные свидетельствуют о неодинаковых условиях формирования платиноносных горизонтов и участии флюидной фазы в концентрировании рудных элементов

### **Введение**

Раннепротерозойский (2501-2447 млн. лет [4, 24]) Федорово-Панский расслоенный базитовый интрузив (ФПИ) в северо-восточной части Балтийского щита признан одним из наиболее перспективных в России объектов на комплексные платинометалльные руды малосульфидного типа [10, 25 и др.]. Западная часть Панского массива является центральным (из трех) структурным блоком (ЗПБ) этого интрузива. Имеющиеся геохимические данные свидетельствуют о мантийном источнике рудно-магматической системы ФПИ [3, 5, 26]. Несмотря на сравнительно хорошую изученность геологии, петрологии и металлогении интрузии, многие вопросы, касающиеся последовательности, механизма и условий формирования рудоносных горизонтов и собственно оруденения, остаются невыясненными. К таким проблемам относится и флюидный режим рудообразования, хотя в генезисе платиноносных мафит-ультрамафитовых комплексов и МПГ-минерализации флюидам отводится важная, часто определяющая, роль [2, 9, 10, 15, 21, 27, 29]. В качестве одного из подходов к решению обозначенных выше вопросов, мы предприняли предварительное изучение изотопного состава гелия и аргона в рифовых зонах ЗПБ. Изотопы благородных газов являются признанными геохимическими трассерами эволюции различных магматических комплексов, большей частью, относительно молодых. Однако в последние 10-15 лет появились примеры успешного их (в основном, гелия) применения в исследованиях докембрийских образований, включая ультрамафит-мафитовые, а также

разновозрастной рудной минерализации [7, 12, 14, 16, 27, 28, 30, 33, 35, 36]. Отличительной чертой настоящей работы является комплексность, заключающаяся в использовании изотопии гелия и аргона, содержащихся как в породах в целом, так и, отдельно, в закрытых микрополостях, преимущественно во флюидных включениях минералов.

### **Геология ЗПБ, методика исследований и изученные образцы**

Западно-Панский блок, подобно двум другим блокам ФПИ, рассматривается как самостоятельная камера магматической кристаллизации Кольской ветви обширного мантийного плюма, функционировавшего в Кольско-Карельской субпровинции Балтийского щита 2500-2000 млн. лет назад [22]. По совокупности имеющихся данных [10, 18, 23, 26 и др.] он сложен преимущественно мелко- и среднезернистыми габброноритами массивной, иногда пятнистой текстуры, местами слабо рассланцованными. В пределах ЗПБ выявлены многочисленные слои и линзообразные тела магнетитовых габбро, а также два расслоенных горизонта – Нижний (НРГ) и Верхний (ВРГ), с которыми связано платинометалльное оруденение.

Нижний расслоенный горизонт, мощностью 50-150 м, представлен габброноритами, норитами, пироксенитами, лейкократовыми габбро и анортозитами. В его пределах установлен Северный риф, содержащий элементы платиновой группы от 2 до 10 г/т, ассоциирующие с сульфидной минерализацией [17]. Риф прослежен по простиранию на 18 км. Мощность оруденения, приуроченного к границе лейкократовых габбро и анортозитов с норитами и габброноритами, изменяется от 20 см до 6 м.

Верхний расслоенный горизонт, мощность которого составляет 300-450 м, также состоит из чередующихся габброноритов, норитов, лейкократовых габбро и анортозитов, но выше по разрезу здесь залегают оливиновые габбронориты, анортозиты и троктолиты. В разрезе ВРГ выявлены два уровня сульфидной минерализации, обогащенных элементами платиновой группы. Оруденение носит прерывистый характер. Наиболее высокие содержания металлов платиновой группы (МПГ), достигающие 40 г/т, приурочены к линзам анортозитов, вытянутым в виде цепочки по простиранию пород в Западно-Панском блоке на десятки километров. Данный уровень оруденения назван Южным рифом.

Сколько-нибудь систематического изучения петрографии флюидных микровключений в породах ЗПБ не проводилось. По нашим фрагментарным наблюдениям это обычно очень мелкие (< 5, а чаще <1 мкм в поперечнике), округлые или несколько вытянутые по форме вакуоли, преимущественно однофазовые, реже жидко-газовые, иногда изолированные, а чаще группирующиеся в кластеры от нескольких до десятков индивидов. Такие включения отмечались в плагиоклазе, апатите, оливине, ортопироксене.

Методика изотопно-газовых измерений была неоднократно опубликована ранее [13, 31, 33]. Здесь же только отметим, что извлечение

редких газов из образцов пород и минералов осуществлялось двумя методами - плавлением в высоковакуумной электропечи и механическим измельчением в вакуумированных стеклянных ампулах. В первом случае экстрагировался газ из всего объема образца, во втором – из закрытых микрополостей, главным образом из флюидных включений (ФВ) в минералах. Вычитая из одного другое, получаем газы, содержащиеся в кристаллической матрице образца. Далее в тексте для обозначения газов, выделенных плавлением и измельчением, при необходимости используются соответствующие подстрочные индексы "общ" и "фв". Изотопный анализ гелия и аргона выполнялся на однокаскадном магнитном масс-спектрометре МИ-1201 в статическом режиме откачки.

Интерпретация полученных данных основывалась на имеющихся оценках изотопных отношений в земных резервуарах:  $^3\text{He}/^4\text{He}$  и  $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$  в атмосфере  $1.4 \cdot 10^{-6}$  и  $2 \cdot 10^{-7}$ , коре  $(1-7) \cdot 10^{-8}$  и  $(2-20) \cdot 10^{-4}$ , верхней  $(1.1 \cdot 10^{-5}$  и  $0.1 - 1)$  и нижней  $(1,8 \cdot 10^{-4}$  и  $0.1-3)$  мантии;  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  в атмосфере - 295,5, в верхней мантии  $\sim 40000$ , в нижней мантии  $\sim 5000-6000$  [6, 32, 37]. При этом, во многом использовались методические наработки и подходы И.Н. Толстихина [31].

Концентрации и соотношения изотопов благородных газов, выделенных из пород в целом (методом плавления) изучены в 22 образцах, а из флюидных включений (измельчением) – в 46 (аргон анализировался только в 21) образцах, отобранных из Верхнего и Нижнего расслоенных рудоносных горизонтов (табл. 1 и 2).

## Результаты и обсуждение

Измеряемый состав гелия и аргона обычно определяется соотношением газов, захваченных при формировании породы, и радиогенных, образующихся *in situ* за все время ее существования. В свою очередь, захваченные газы в магматических породах могут быть результатом смешения в разных пропорциях мантийной, коровой и/или атмосферной компонент.

В газах, выделенных плавлением образцов ЗПБ, выявлены существенные вариации общих концентраций гелия и аргона (0.8 - 19.2 и 0.7 – 124 см<sup>3</sup>/г, соответственно), а также отношений  $^3\text{He}/^4\text{He}$  (1.8 – 32.0) и  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  (1497 – 19634) (табл. 1). В среднем, породы ВРГ, по сравнению с Нижним горизонтом, характеризуются гораздо более высокими  $^3\text{He}/^4\text{He}$  и  $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$  отношениями и долей мантийного гелия и, напротив, низкими содержаниями  $^{40}\text{Ar}$  и отношением  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  (табл. 3).

Прямая, довольно тесная взаимосвязь концентраций обоих изотопов гелия, более слабая, но все же значимая положительная корреляция  $^3\text{He}$  и  $^3\text{He}/^4\text{He}$  (рис. 1) и отсутствие таковой в паре  $^4\text{He} - ^3\text{He}/^4\text{He}$ , позволяют пред-

Таблица 1.

**Концентрации и отношения изотопов благородных газов, выделенных плавлением, в породах рудоносных горизонтов Панского массива.**

Образец	Порода	${}^4\text{He}$ , $10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ , $10^{-8}$	${}^{40}\text{Ar}$ , $10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$
<b>Верхний расслоенный горизонт</b>					
ЮК-48	Троктолит	0.8	7.9	44.4	2233
ЮК-70	Габбронорит оливиновый	10.3	32.0	13.7	3525
04-110	Габбронорит оливинсодержащий	1.4	11.3	13.0	2715
ЮК-46	Габбро оливиновое	5.2	18.9	25.0	3102
03-96	Габбро кварцевое	19.2	11.6	42.7	6016
ЮС-3а	Анортозит	4.0	3.7	25.5	3716
ЮС-4а	То же	7.0	9.4	46.8	7556
<b>Нижний расслоенный горизонт</b>					
28-90	Норит	6.2	5.9	17.7	2777
41-90	То же	5.9	13.8	35.0	4920
119-90	- « -	7.3	12.6	17.8	4478
622	- « -	6.5	3.2	14.0	2206
84-1500	Габбронорит	2.2	23.5	10.7	2640
612	То же	11.9	5.8	16.8	3303
613	- « -	14.4	3.4	19.2	1990
122-90	- « -	5.9	5.3	79.3	19634
25-100	- « -	7.8	5.2	39.1	10908
25-250	- « -	5.6	5.2	39.4	10231
124-90	Габбро	9.6	16.0	280	17020
620	То же	6.7	5.4	35.8	4650
625	- « -	2.4	7.7	45.0	8080
МА-29Е	- « -	10.8	1.8	15.5	1497
25-200	Габбро кварцевое	4.6	2.2	124	14139

**Примечание.** Масс-спектрометрические измерения выполнены И.Л. Каменским или под его техническим руководством.

полагать, что в общем балансе гелия преобладает захваченная компонента и что изотопное отношение в большей мере определяется количеством легкого изотопа. На графиках в упомянутых координатах наблюдаются некоторые различия в расположении фигуративных точек образцов ВРГ и НРГ. Диаграмма  $(U+0.24\text{Th})/{}^3\text{He} - {}^4\text{He}/{}^3\text{He}$  (рис. 2) свидетельствует о существенной и неодинаковой потере рассматриваемыми образцами радиогенного гелия, который должен был накопиться после формирования пород. Если бы таких потерь не было, точки располагались бы на эволюционной линии, соответствующей возрасту интрузива. Аналогичная диаграмма, только в линейном масштабе, по образцам с наиболее низкими  ${}^4\text{He}/{}^3\text{He}$  значениями позволяет приблизительно оценить начальное изотопное отношение в захваченном гелии, равное  $(1-2) \times 10^6$ . Поскольку мантийное происхождение родительских расплавов сомнений, по-видимому, не вызы-

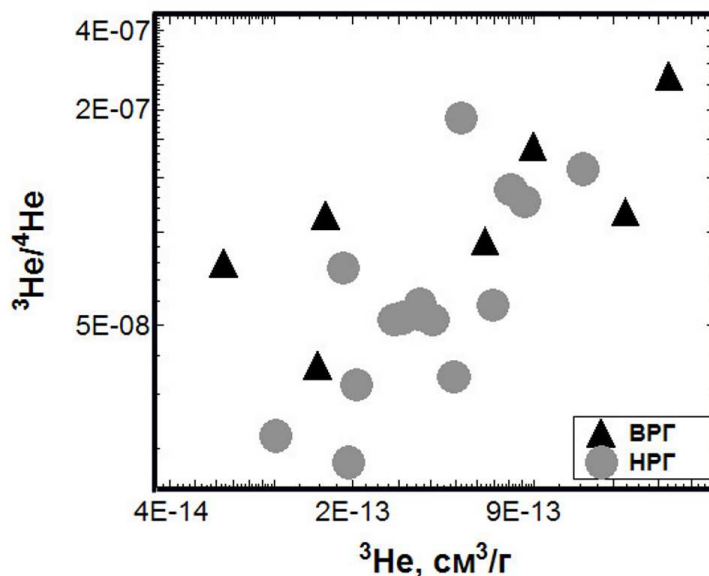


Рис. 1. Изотопы гелия в газах, выделенных плавлением образцов.

Здесь и далее ВРГ и НРГ – Верхний и Нижний расслоенный горизонты, соответственно.

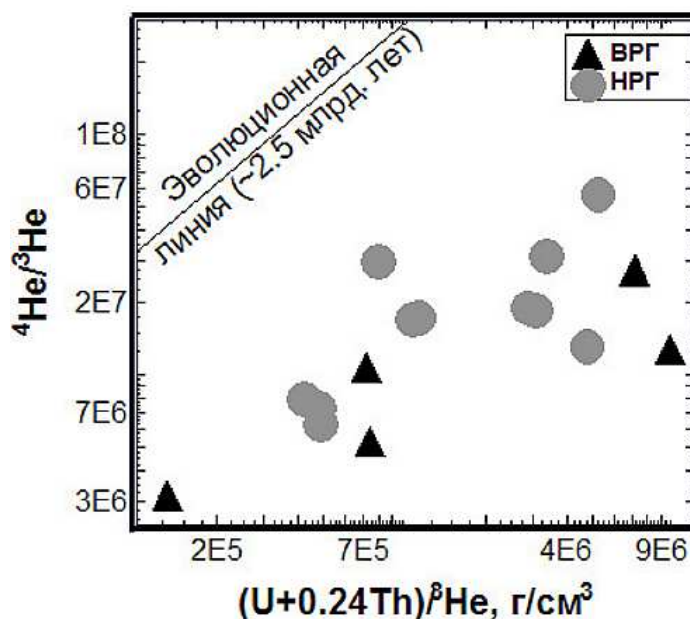


Рис. 2. Соотношения содержаний изотопов гелия и радиоактивных элементов.

ваит [5], полученная оценка предполагает разбавление первичного мантийного флюида коровыми компонентами еще до начала кристаллизации расплава. Сопоставление измеренных концентраций обоих изотопов гелия и рассчитанных [34] исходя из содержания U, Th и Li и возраста интрузива, показало, что породы действительно потеряли подавляющую часть новообразованного радиогенного гелия. Сохранность  $^4\text{He}$  составляет в сред-

Таблица 2.

#### Изотопный состав гелия и аргона во флюидных включениях

Образец	Порода	$^4\text{He}$ , $10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$ , $10^{-8}$	$^{40}\text{Ar}$ , $10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
<b>Верхний расслоенный горизонт</b>					
ЮК-148-1	Пироксенит	8.89	12.1	5.6	5757
ЮК-48	Троктолит	0.05	56.4	Не опр.	Не опр.
ЮК-40	Габбронорит	0.36	23.1	То же	То же
ЮК-45	То же	1.99	30.5	- « -	- « -
ЮК-47	- « -	1.04	29.1	- « -	- « -
ЮК-70	- « -	3.46	31.7	- « -	- « -
ЮК-76	- « -	2.67	14.4	4.78	3863
ЮК-32а	Лейкогаббро	0.22	39.8	Не опр.	Не опр.
ЮК-46	То же	0.27	35.8	То же	То же
ЮС-1г	- « -	0.13	17.2	- « -	- « -
ЮС-1а	Анортозит	0.34	17.9	- « -	- « -
ЮС-1д	То же	0.37	8.5	- « -	- « -
ЮС-2а	- « -	2.86	16.1	- « -	- « -
ЮС-3а	- « -	0.66	17.9	- « -	- « -
ЮС-4а	- « -	1.14	18.6	- « -	- « -
ЮС-7	- « -	0.93	16.6	- « -	- « -
<b>Нижний расслоенный горизонт</b>					
Ма-Х	Пироксенит	0.43	8.5	3.5	1690
17	Норит	0.49	8.2	3.4	1780
611	То же	0.59	8.3	Не опр.	Не опр.
622	- « -	0.14	2.0	То же	То же
28-90	- « -	0.13	35.7	2.3	709
33-90	- « -	0.94	8.8	1.6	1451
41-90	- « -	0.06	41.8	3.9	1294
43-90	- « -	0.33	13.2	2.3	3041
44-90	- « -	5.09	11.5	2	1869
119-90	- « -	0.83	21.8	3.3	5079
612	Габбронорит	3.39	15.0	Не опр.	Не опр.
613	То же	0.54	12.0	То же	То же
649	- « -	0.06	15.1	2.6	552
122-90	- « -	0.14	36.4	10.3	8228
130-8	- « -	1.74	32.5	1.4	653
620	Габбро	0.41	8.0	Не опр.	Не опр.
625	То же	0.28	15.2	То же	То же
627	- « -	0.32	5.1	- « -	- « -
629	- « -	0.15	8.5	- « -	- « -
630	- « -	0.08	4.8	- « -	- « -
634	- « -	1.42	14.0	- « -	- « -
42-90	- « -	0.25	5.8	3.8	5770
Ма-29е	- « -	2.19	9.0	2	1794
Ки-16/6	Габбро-пегматит	2.29	7.9	Не опр.	Не опр.
499	Метагаббро	1.39	17.2	5.8	2053

Таблица 2 (Окончание).

Образец	Порода	$^4\text{He}$ , $10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$ , $10^{-8}$	$^{40}\text{Ar}$ , $10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
<b>Нижний расслоенный горизонт</b>					
Ки-11/2	Амфиболит	0.34	12.5	7.2	4250
123-90	Лейкогаббро	0.51	26.9	28	12500
124-90	То же	0.75	19.4	17	62034
170-90	- « -	0.75	18.6	28	15147
Ки-10/16	Анортозит	1.19	17.5	24.3	6605

**Примечание.** Результаты анализов исправлены на средние значения холостых опытов ( $\text{нсм}^3/\text{опыт}$ ):  $^4\text{He} = 1.1 \cdot 10^{-8}$ ,  $^3\text{He} = 1.28 \cdot 10^{-14}$ . Масс-спектрометрические измерения осуществлялись И.Л. Каменским (или под его техническим руководством), а извлечение газов из пород – С.В. Икорским.

Таблица 3.

**Средние значения изотопно-газовых характеристик в породах расслоенных горизонтов**

Горизонт	N	$^4\text{He}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$	$^{40}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^4\text{He}/^{40}\text{Ar}^*$	$^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$	$\text{He}_m$	$\text{Ar}_a$
		$10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	$10^{-8}$	$10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$					
<b>Для пород в целом</b>									
ВРГ	7	6,8	20,0	30,1	4120	0,3	2,1	1	8,0
НРГ	15	7,2	7,8	52,6	7230	0,4	0,8	0,5	7,8
<b>Во флюидных включениях</b>									
ВРГ	16(2)	1,6	24,1	5,2	4810	1,1	7,1	1,8	6,4
НРГ	30(19)	0,9	14,3	8,0	7180	0,5	1,2	1,1	16

**Примечание.** N - количество образцов (в скобках – с данными по аргону, если другое число); \* - радиогенные изотопы;  $\text{He}_m$  и  $\text{Ar}_a$  – оценки, соответственно, долей мантийной компоненты гелия и атмосферной – аргона.

нем всего 3%, тогда как  $^3\text{He}$  – около 90 %, а в некоторых образцах обнаруживается избыток легкого изотопа (рис. 3).

В изотопном составе аргона картина совершенно иная. Здесь не наблюдается корреляции между концентрациями обоих изотопов, а также  $^{36}\text{Ar}$  и  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ , и величина отношения  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  определяется, главным образом, изменяющимися количествами радиогенного изотопа (рис. 4). Анализ К-Аг системы показал, что большинство пород потеряли от 10 до 70 % радиогенного аргона, однако в некоторых образцах обнаруживается его избыток, достигающий 4-кратной величины от расчетной концентрации. Породы НРГ лучше сохранили  $^{40}\text{Ar}^*$  по сравнению с ВРГ. Оцененная величина начального  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  отношения в захваченном флюиде, составившая 1000 – 3000, предполагает контаминацию флюидной фазы атмосферным аргоном на ранних этапах формирования Западно-Панского массива.

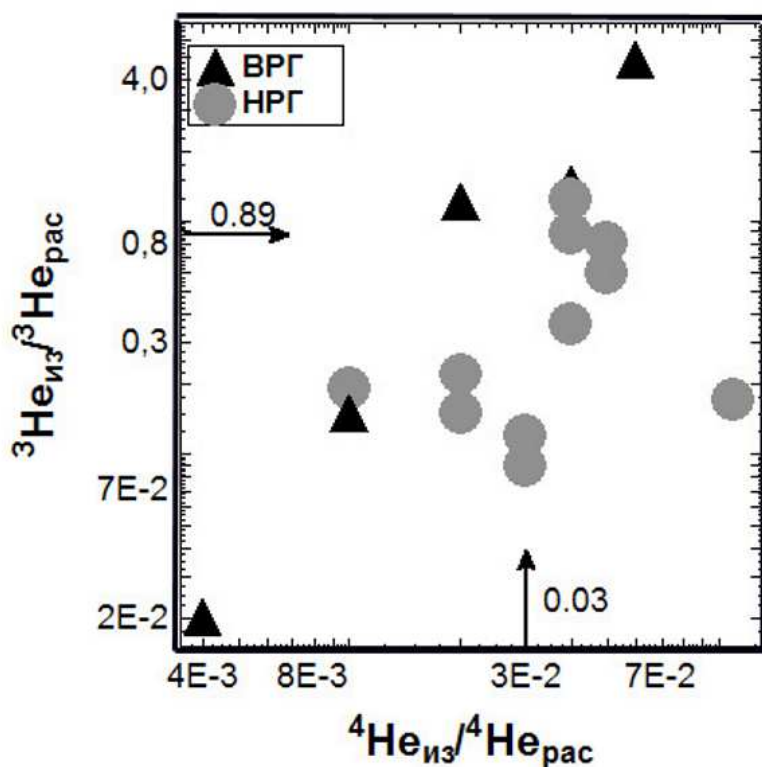


Рис. 3. Сопоставление измеренных («из») и рассчитанных («рас») концентраций изотопов гелия.

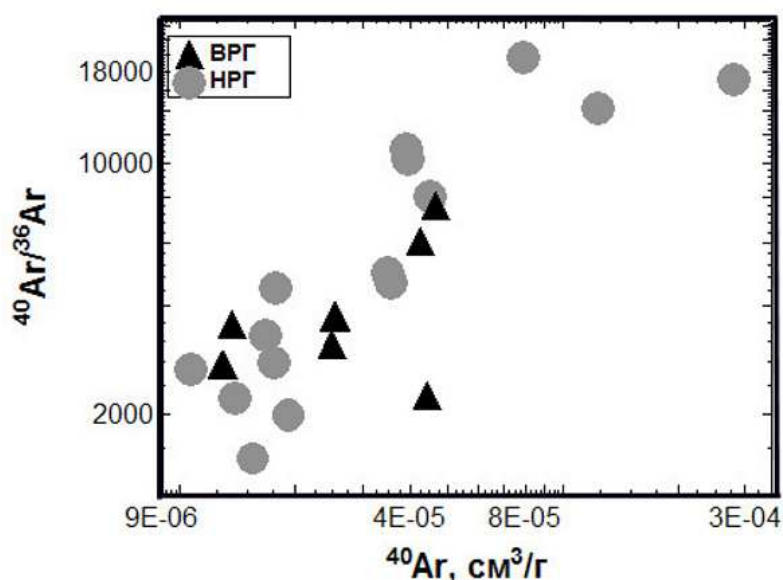


Рис. 4. Соотношение изотопов аргона в породах в целом.

Положение изученных образцов на графике  ${}^{36}\text{Ar}/{}^3\text{He} - {}^4\text{He}/{}^3\text{He}$  (рис. 5), где также нанесены оценочные поля изотопного состава газов субконтинентальной мантии, земной коры и метеорных вод с растворенным воздухом, подтверждают предположения о мантийном источнике и утрате породами большей части первичного флюида, преобладании коровой состав-



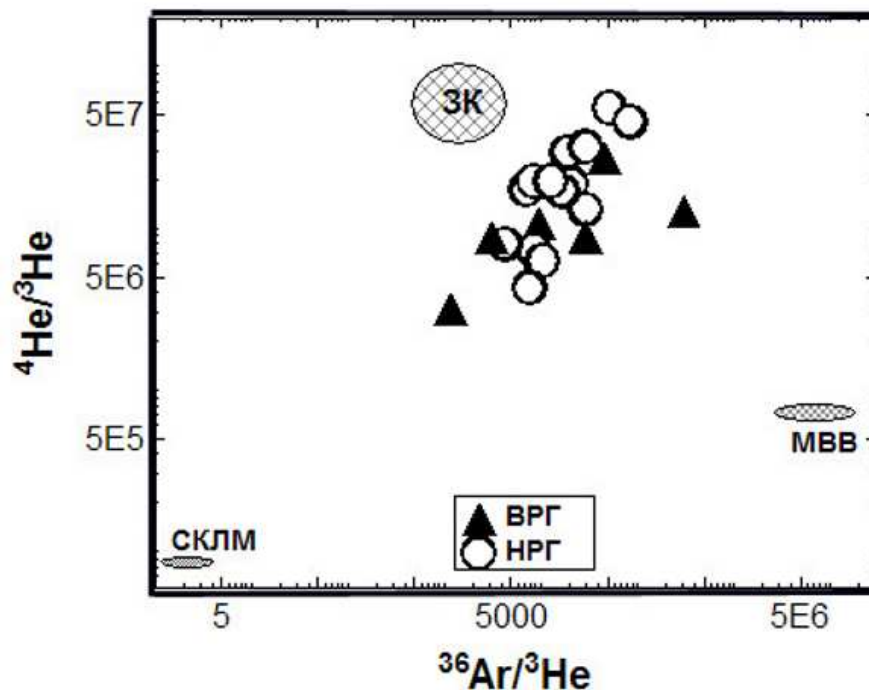


Рис. 5. Взаимосвязь отношений  ${}^3\text{He}/{}^{36}\text{Ar}$  и  ${}^4\text{He}/{}^3\text{He}$  в газах, выделенных плавлением.

ЗК – земная кора, СКЛМ – субконтинентальная литосферная мантия, МВВ – метеорные воды с растворенным воздухом.

ляющей, включающей продуцированные *in situ* радиогенные газы, и заметном вкладе атмосферной компоненты во флюидную фазу.

Из флюидных включений пород ЗПБ извлекается 10-15 %  ${}^4\text{He}$ , 25-40 %  ${}^3\text{He}$ , около 12 %  ${}^{40}\text{Ar}$  и 25 %  ${}^{36}\text{Ar}$  от общего их количества. Эта форма газов характеризуется несколько большим разбросом  ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$  и  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  изотопных отношений и более высокими, в среднем, значениями последнего (табл. 2). Тесная взаимосвязь обоих изотопов гелия (рис. 6) и почти перпендикулярный эволюционной линии тренд образцов на графике с координатами  $(\text{U}+0.24\text{Th})/{}^3\text{He} - {}^4\text{He}/{}^3\text{He}$  (аналогичном рис. 2), являются подтверждением уже известных, например [31], наблюдений о незначительном влиянии образовавшихся *in situ* радиогенных компонентов на состав газов во флюидных включениях. В среднем, во ФВ пород Верхнего горизонта, по сравнению с НРГ, выше  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  (рис. 7),  ${}^3\text{He}/{}^{36}\text{Ar}$  и  ${}^4\text{He}/{}^{40}\text{Ar}^*$  отношения, концентрация  ${}^4\text{He}$ , относительное содержание мантийного гелия и более низкие концентрация  ${}^{40}\text{Ar}$ , доля атмосферного аргона и отношение  ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$  (табл. 3). Положение образцов с изотопно-газовыми характеристиками ФВ на аналогичной рисунку 5 диаграмме  ${}^{36}\text{Ar}/{}^3\text{He} - {}^4\text{He}/{}^3\text{He}$  (не приводится) отражает, как и можно было ожидать, большой вклад метеорных вод в состав этого флюида по сравнению с газами, захваченными кристаллической матрицей пород.

При сопоставлении изотопного состава гелия разных форм нахождения, обнаруживается их взаимосвязь в НРГ и отсутствие таковой в ВРГ, что

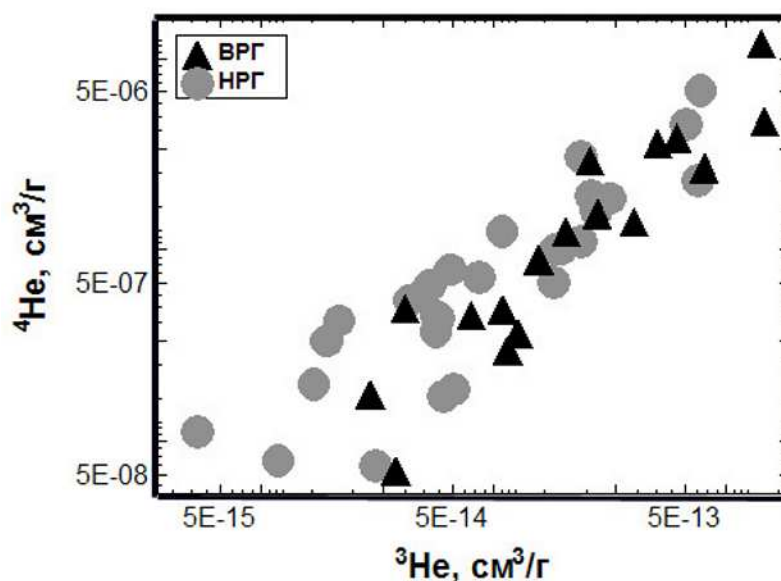


Рис. 6. Корреляция концентраций изотопов гелия во флюидных включениях.

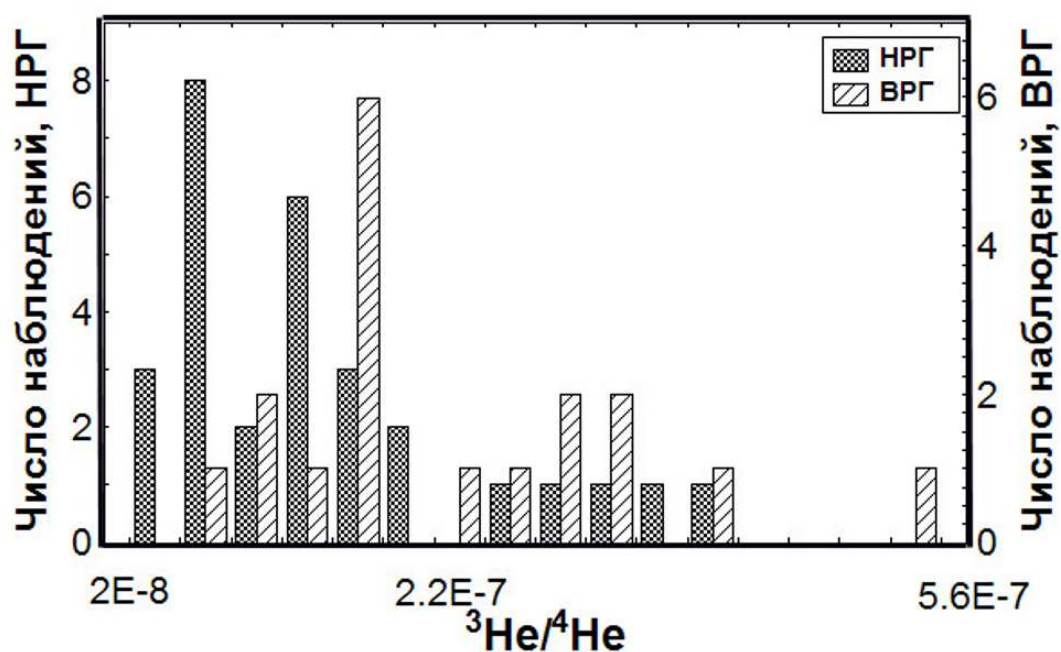


Рис. 7. Распределение отношения  $(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{фв}}$  в породах расслоенных горизонтов.

может быть следствием (а) большего в последнем случае временного и температурного разрыва между захватом газов в кристаллическую матрицу и флюидные включения и (б) формирования части ФВ на постмагматическом этапе.

Выше приведенные данные показывают, что современный изотопный состав благородных газов в изученных породах обусловлен степенью дегазации расплава, неодинаковыми концентрациями захваченных изотопов и их сохранностью, содержанием радиоактивных элементов, генерацией и потерями радиогенных изотопов. Захваченная флюидная составляющая этих

пород представляет собой смесь мантийных, атмосферных и коровых компонентов. Полученные газо-геохимические характеристики ЗПБ вполне соответствуют существующим представлениям о его формировании в гипабиссальных условиях и неодновременности кристаллизации [11, 18]. Основные потери мантийного гелия и разбавление глубинного флюида коровым, в котором, по-видимому, преобладали сравнительно молодые на тот момент палеометеорные воды, имели место еще на стадии расплава.

Неодинаковое распределение изотопов He и Ar в породах Нижнего и Верхнего расслоенных горизонтов согласуются с предположениями о различиях в механизме их формирования [19, 20]. Нижний горизонт представляется продуктом интегрального действия нескольких факторов и процессов, главным из которых является инъекция новой порции толеитовой магмы, близкой по составу к исходному расплаву интрузива, в более эволюционированный внутрикамерный остаточный расплав. Важное влияние на облик НРГ оказали прерывистый характер магматической кристаллизации, посткумулусная мобилизация и постмагматическая кристаллизация погребенной жидкости анортозитовых кумулатов. Образование ВРГ также обусловлено, вероятно, неоднократным притоком в магматическую камеру свежих порций расплава, но гораздо более примитивного по сравнению с внутрикамерным, оливинового толеита. Изотопно-газовые особенности рудоносных горизонтов могут служить подтверждением большей степени дегазации расплава, более длительной и сложной эволюции НРГ в условиях большей закрытости системы.

Многие из образцов, имеющих изотопно-газовые характеристики, были проанализированы также на содержание рудных элементов. При статистической обработке совокупных данных обнаруживаются взаимосвязи разной силы и направленности между распределением изотопов благородных газов и рудогенных компонентов. Из-за ограниченного количества и разрозненности отобранных образцов в пределах рифовых зон, интерпретация большинства этих связей носит предварительный характер, однако существенные различия поведения рассматриваемых показателей в породах Верхнего и Нижнего расслоенных горизонтов представляются очевидными.

Если брать газы, выделенные плавлением, намечается, преимущественно в НРГ, положительная корреляция концентраций МПГ как по отдельности, так и суммарной, с одной стороны и содержания  $^3\text{He}$  и величины отношений  $^3\text{He}/^4\text{He}$  (рис. 8),  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  (рис. 9) и, отчасти,  $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$  – с другой стороны. В породах ВРГ эти связи слабее или вовсе не обнаруживаются, поскольку некоторые образцы здесь характеризуются высокими значениями изотопных параметров при низких содержаниях платиноидов.

Распределение изотопов газов во флюидных включениях также связано с концентрациями рудных компонентов в породах, при этом различия рифо-

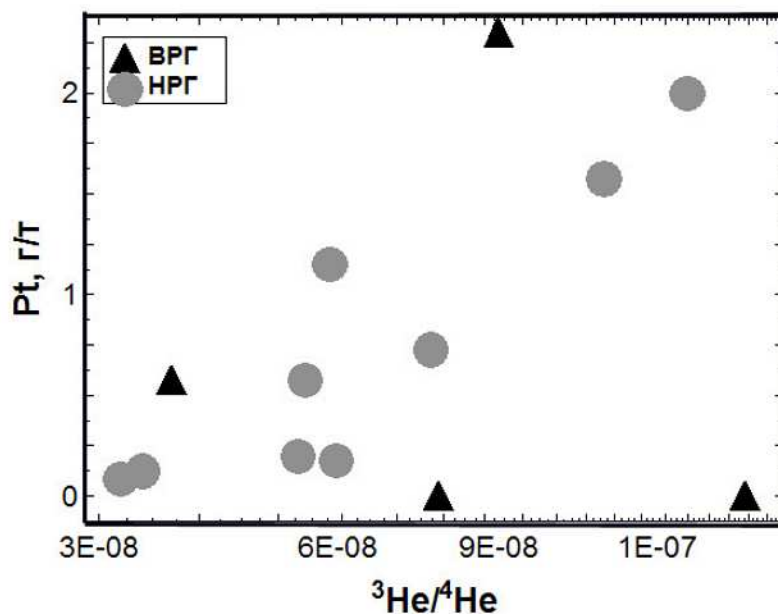


Рис. 8. Соотношение  $(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{общ}}$  и содержания платины.

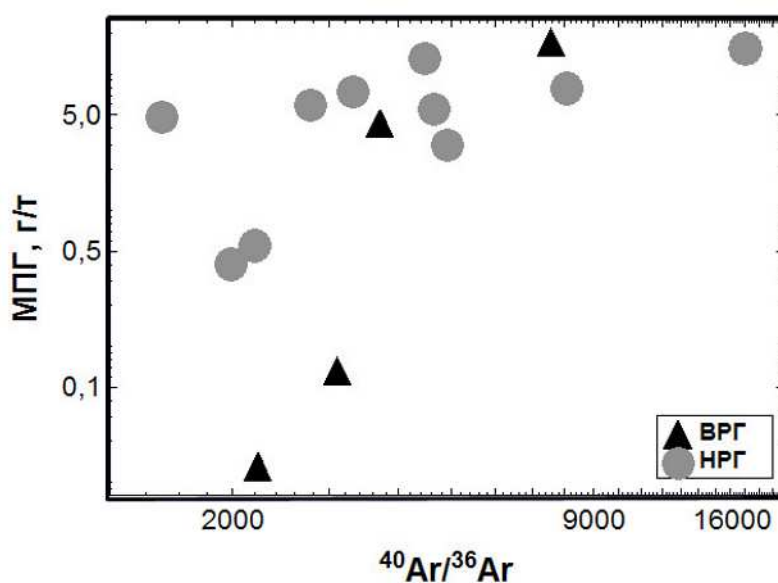


Рис. 9. Взаимосвязь  $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{общ}}$  и суммарного содержания МПП.

вых зон проявляются сильнее. Например, при положительной корреляции между  $^3\text{He}/^4\text{He}$  и суммой МПП,  $^3\text{He}$  и Pt (рис. 10),  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ,  $^3\text{He}/^4\text{He}$  и Pt в НРГ, в породах ВРГ в первых двух случаях намечаются обратные зависимости, а в последнем связь не обнаруживается.

Вариации изотопных характеристик сопоставлялись с такими известными геохимическими показателями, как отношения Cu/Ni и Pd/Pt. Увеличение того и другого обычно считается признаком большей дифференциации расплава [8, 18]. В то же время предполагается уменьшение Pd/Pt отношения с нарастанием роли постмагматических процессов [9]. В изученных породах, особенно НРГ, обнаруживаются положительные связи

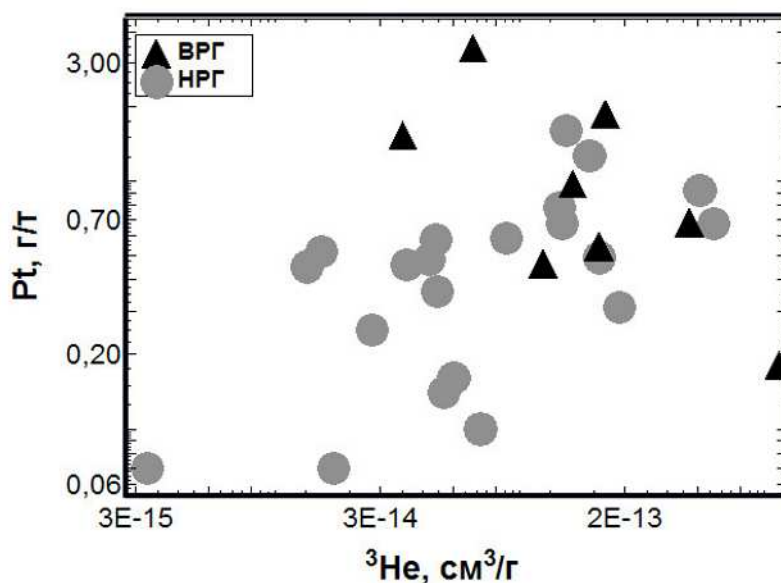


Рис. 10. Связь концентраций платины в породах и легкого изотопа гелия в ФВ.

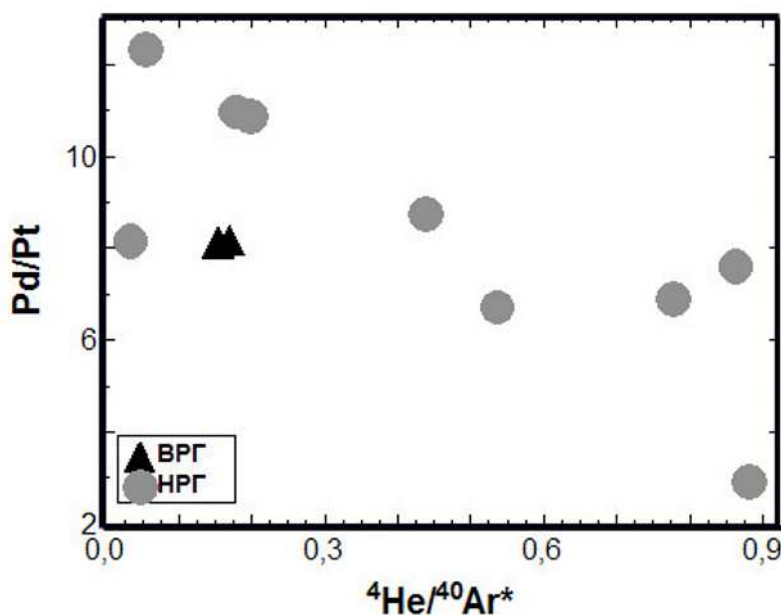


Рис. 11. Отрицательная корреляция отношений  $(^4\text{He}/^{40}\text{Ar}^*)_{\text{общ}}$  и Pd/Pt.

$(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{общ}}$  и  $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{общ}}$  с величиной Cu/Ni, а второго из них – и с Pd/Pt отношениями, что, возможно, обусловлено фракционированием родительских, для радиогенных изотопов газов, элементов по мере эволюции расплава: снижением концентраций U и Th и, напротив, накоплением калия. Такое предположение согласуется с наблюдаемой отрицательной корреляцией  $(^4\text{He}/^{40}\text{Ar}^*)_{\text{общ}}$  и Pd/Pt отношений (рис. 11) и доли атмосферного аргона с величиной отношений Cu/Ni и Pd/Pt (рис. 12). Последние зависимости могут, кроме того, свидетельствовать об относительной закрытости системы на постмагматических стадиях формирования Нижнего расслоенного горизонта. Связи изотопов He и Ar во флюидных включениях с

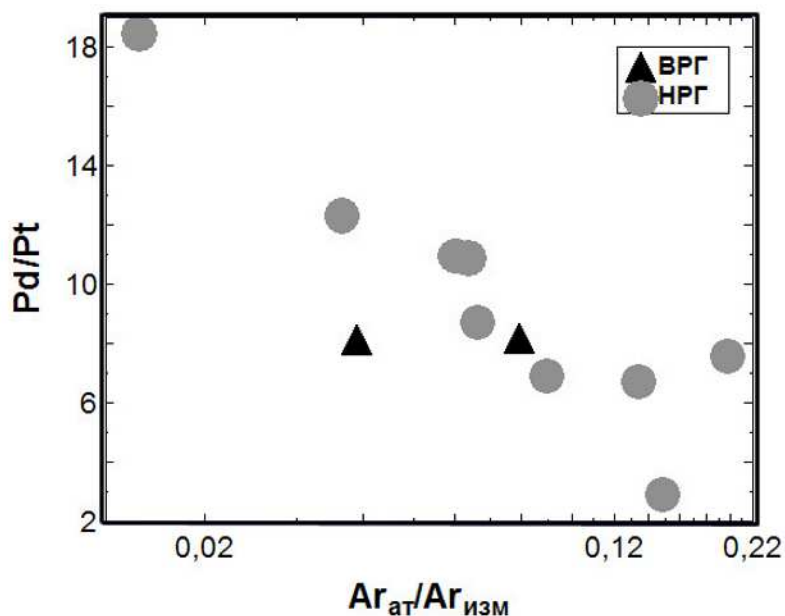


Рис. 12. Увеличение Pd/Pt отношения с уменьшением доли атмосферного аргона в газах, выделенных плавлением.

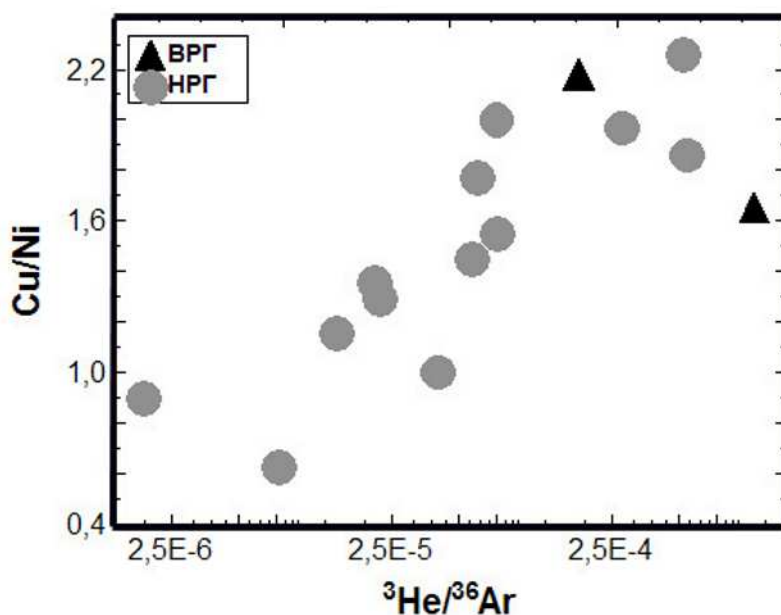


Рис. 13. Положительная корреляция ( ${}^3He/{}^{36}Ar$ )<sub>фв</sub> и Cu/Ni отношений.

индикаторными отношениями рудных элементов часто имеют противоположную направленность. Так, для  ${}^3He/{}^{36}Ar$  и Cu/Ni (рис. 13),  ${}^{36}Ar$  и Pd/Pt наблюдаются положительные корреляции, а для  ${}^3He/{}^{36}Ar$  и Pd/Pt (рис. 14),  ${}^{36}Ar$  и Cu/Ni - отрицательные. Рудоносные горизонты в данном случае можно сравнить только по изотопам гелия, поскольку мало данных по аргону в ВРГ. Например, при позитивной взаимосвязи в парах  ${}^3He/{}^4He$  - Cu/Ni,  ${}^3He$  - Cu/Ni,  ${}^3He/{}^4He$  - Pd/Pt в НРГ, для первой в породах ВРГ связь обратная, а для остальных отсутствует. И, наоборот,  ${}^3He$  и Pd/Pt прямо связаны в ВРГ и

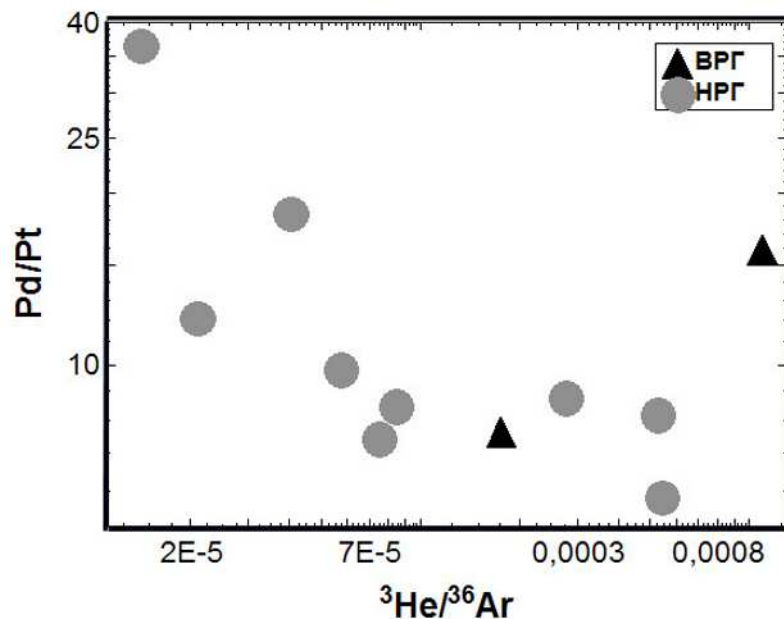


Рис. 14. Взаимосвязь  $(^3\text{He}/^{36}\text{Ar})_{\text{фв}}$  и отношения палладия к платине.

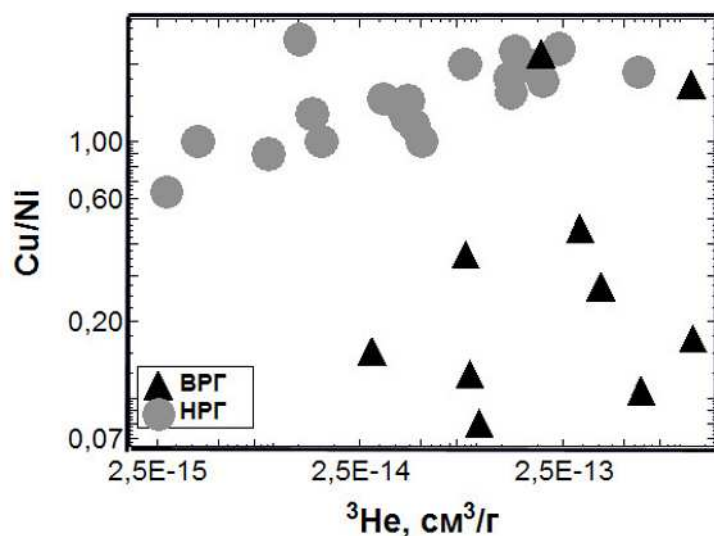


Рис. 15. Разный характер распределения  $^3\text{He}_{\text{фв}}$  и отношения  $\text{Cu}/\text{Ni}$  в породах расслоенных горизонтов.

не коррелируются в НРГ (рис. 16).

Особенности взаимосвязей изотопно-газовых характеристик с содержаниями рудных элементов и отношениями  $\text{Cu}/\text{Ni}$  и  $\text{Pd}/\text{Pt}$  свидетельствуют о важной роли флюидной фазы в формировании рудной минерализации. При этом рудоотложение в НРГ, по-видимому, происходило в относительно равновесных условиях и связано с автотаморфическими процессами, тогда как оруденение ВРГ может быть в значительной степени наложенным, образовавшимся в результате поступления в систему рудоносного постмагматического флюида. Не очень сильная статистическая



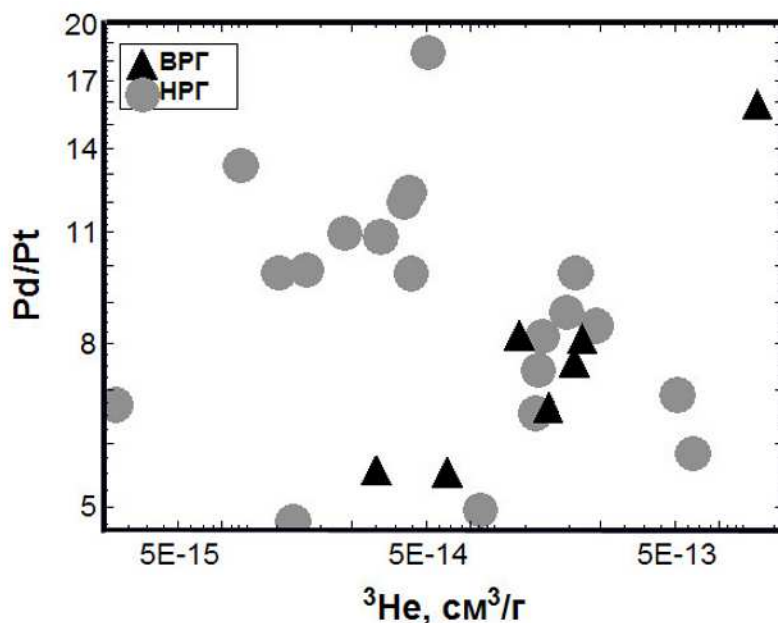


Рис. 16. Соотношения  $^3\text{He}_{\text{фв}}$  и Pd/Pt.

связь газовых и рудогенных компонентов в породах рифовых зон Западно-Панского блока, возможно, объясняется тем, что, как и на других месторождениях МПГ [1, 2, 15, 16], максимумы летучих могут не совпадать с пиками оруденения, а образуют ореолы вокруг рифов.

Более определенный ответ на данный вопрос предполагается получить при дальнейшем совместном изучении распределения благородных газов и рудной минерализации в полных разрезах через расслоенные горизонты.

### Заключительные замечания

Благородные газы пород Западной части Панского массива являются главным образом захваченными. Большая часть их радиогенных изотопов, особенно гелия, образовавшаяся *in situ* после консолидации массива, не сохранилась. Захваченный флюид представляет собой смесь преобладающей коровой и подчиненных мантийной и атмосферной составляющих. Гипабиссальные условия становления массива предопределили основные потери первичных мантийных летучих компонентов и преимущественное разбавление магматического флюида приповерхностными палеометеорными водами еще на докристаллизационном этапе.

Особенности изотопного состава гелия и аргона подтверждают имеющиеся петрологические данные о различных условиях образования Верхнего и Нижнего расслоенных горизонтов. Формирование последнего происходило из более дегазированного расплава и его более полной дифференциации при большей изоляции магматической субкамеры.

Платинометальное оруденение формировалось при участии флюидной фазы. При этом рудные металлы в большей степени связаны с мантийными, а не коровыми летучими компонентами. Возможны различия в генезисе



Верхнего и Нижнего рифов. Образование первого из них могло происходить в более неравновесных условиях сравнительно открытой системы и при большей роли постмагматических флюидов.

Комбинированное изучение изотопного состава параллельно гелия и аргона в образцах пород и минералов в целом и флюидных включениях является перспективным подходом не только для идентификации источника вещества и геодинамических построений в масштабе региона или крупного комплекса, но и для разработки газо-геохимических индикаторов условий образования и критериев рудоносности геологических объектов более высоких порядков (массивов, блоков, горизонтов).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 03-05-64257.*

### **Благодарности**

Авторы благодарны И.Л. Каменскому за непосредственное выполнение и методическое руководство масс-спектрометрическими измерениями изотопного состава газов, С.В. Икорскому за участие и помощь в экстракции газов из флюидных включений пород по разработанной им методике, Р.М. Латыпову, предоставившему часть образцов для исследований, И.Н. Толстихину за консультации по методике интерпретации изотопно-газовых характеристик и Ф.П. Митрофанову за критическое прочтение рукописи и полезные замечания.

### **Литература**

1. **Аплов В.С., Додина Д.А.** Новые возможности термобарогеохимии при установлении локализации горизонта малосульфидного платинометального оруденения // Сб. «Платина России». – М.: АОЗТ «Геоинформмарк», 1995.-Т. II. Кн. 1.
2. **Аплов В.С., Додина Т.С.** Флюидно-геохимическая модель уникального Талнахского платиносодержащего месторождения // Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов в XXI веке (минералогия, генезис, технология, аналитика). М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999. – Т. IV. – С. 100-120.
3. **Балабонин Н.Л., Митрофанов Ф.П., Субботин В.В., Корчагин А.У., Войтеховский Ю.Л., Волошина З.М., Пахомовский Я.А., Петров В.П.** Минералы платиновых металлов – индикаторы эволюции рудоконцентрирующих процессов // Крупные и уникальные месторождения редких и благородных металлов. С.-Петербург, 1998. С. 271-281.
4. **Баянова Т.Б., Митрофанов Ф.П., Корчагин А.У., Павличенко Л.В.** Возраст габброноритов Нижнего расслоенного горизонта (рифа) Федорово-Панского массива (Кольский полуостров) // Докл. АН (Россия), 1994. – Т. 337, № 1. С. 95-97.
5. **Богомолв Е.С., Гусева В.Ф., Турченко С.И.** Мантийное происхождение мафитовой расслоенной интрузии Панских тундр: изотопные Sm-Nd и Rb-Sr свидетельства // Геохимия, 2002.- № 9.- С. 946-951.
6. **Верховский А.Б., Шуколюков Ю.А.** Элементное и изотопное фракционирование благородных газов в природе. М.: Наука, 1991. – 294 с.
7. **Ветрин В.Р., Каменский И.Л., Икорский С.В.** Мантийный флюид в протерозойских гранитоидах: изотопы He и Ar в породах и минералах лицко-арагубского диорит-гранитного комплекса, Кольский полуостров // Петрология, 2002. Т. 10, № 3. С. 270-282.

8. **Гончаров Ю.В., Карпов С.М.** Некоторые особенности связи родий-платино-палладиевого и сульфидного никелево-медного оруденения в нижней расслоенной серии Панского массива (Кольский полуостров) // Геология и генезис месторождений платиновых металлов. М.: Наука, 1994.- С. 107-110.
9. **Дистлер В.В., Служеникин С.Ф., Кабри Л.Дж. и др.** Платиновые руды Норильских расслоенных интрузивов: соотношение магматического и флюидного концентрирования благородных металлов // Геология рудных месторождений. 1999. Т. 41. № 3.
10. **Додин Д.А., Чернышов Н.М., Яцкевич Б.А.** Платинометальные месторождения России. СПб.: Наука, 2000. – 755 с.
11. **Докучаева В.С.** Петрология и условия рудообразования в Федорово-Панском интрузиве // Геология и генезис месторождений платиновых металлов. М.: Наука, 1994. С. 87-100.
12. **Икорский С.В., Каменский И.Л., Смирнов Ю.П.** Изотопы гелия в разрезе Кольской сверхглубокой скважины // Докл. АН (Россия), 1994. – Т. 335, № 1. С. 84-87.
13. **Икорский С.В., Каменский И.Л.** Метод дробления горных пород и минералов в стеклянных ампулах при изотопных исследованиях благородных газов // XV Симпозиум по геохимии изотопов, 24-27 ноября 1998 г., Москва. Тезисы докладов.- М., 1998.- С. 115.
14. **Казанов О.В., Прасолов Э.М., Токарев И.В.** Флюидный режим формирования платинометальной минерализации массива Луккулайсваара по данным изотопного состава аргона и гелия // XVI симпозиум по геохимии изотопов имени акад. А.П. Виноградова, 20-23 ноября 2001 г., Москва. Тезисы докладов. М., 2001. С. 92-93.
15. **Конников Э.Г., Неручев С.С., Прасолов Э.М., Кислов Е.В., Орсов Д.А.** Флюидный режим формирования малосульфидной благороднометалльной минерализации Довыренского дунит-троктолит-габбрового массива // Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов в XXI веке (минералогия, генезис, технология, аналитика). М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999. – Т. IV. – С. 169-176.
16. **Конников Э.Г., Прасолов Э.М., Токарев И.В., Кислов Е.В., Орсов Д.А.** Изотопы Ag и He из пород Довыренского мафит-ультрамафитового массива // Геология и геофизика, 2002. Т. 43. № 6. С. 543-552.
17. **Корчагин А.У., Бакушкин Е.М., Виноградов Л.А., Карпов С.М., Медников А.И.** Геологическое строение нижней краевой зоны массива Панских тундр и ее платинометальное оруденение // Геология и генезис месторождений платиновых металлов. М.: Наука, 1994.-С. 100-106.
18. **Латыпов Р.М., Чистякова С.Ю.** Механизм дифференциации расслоенного интрузива Западно-Панских тундр. – Апатиты: изд. Кольского НЦ РАН, 2000.- 315 с.
19. **Латыпов Р.М., Митрофанов Ф.П., Алапиеви Т.Т., Кауконен Р.Дж.** Петрология верхнего расслоенного горизонта интрузива Западно-Панских тундр // Геология и геофизика. 1999а. Т. 40. № 10.
20. **Латыпов Р.М., Митрофанов Ф.П., Алапиеви Т.Т., Халкоахо Т.А.А.** Петрология нижнего расслоенного горизонта интрузива Западно-Панских тундр, Кольский полуостров // Петрология, 1999б. – Т. 7.- № 5. – С. 509-538.
21. **Летников Ф.А.** Сверхглубинные флюидные системы Земли и проблемы рудогенеза // Геология рудных месторождений, 2001. – Т. 43, № 4. – С. 291-307.
22. **Митрофанов Ф.П.** Плюмовые процессы с позиций общей и региональной геологии // Тектоника и геодинамика континентальной литосферы. Материалы XXXVI тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2003. С. 60-62.
23. **Митрофанов Ф.П., Балабонин Н.Л., Корчагин А.У.** Металлогения Кольского пояса расслоенных ультрамафит-мафитовых интрузий // Отечественная геология.- 1995.- № 6.- С. 37-41.
24. **Митрофанов Ф.П., Балабонин Н.Л., Баянова Т.Б., Корчагин А.У., Латыпов Р.М., Грицай А.Л., Субботин В.В.** Основные результаты исследований Кольской платинометальной провинции // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. М.: ИГЕМ, 1997.-С. 286-288.

25. **Митрофанов Ф.П., Балабонин Н.Л., Баянова Т.Б., Корчагин А.У., Латыпов Р.М., Осокин А.С., Субботин В.В., Карпов С.М., Нерадовский Ю.Н.** Кольская платинометальная провинция: новые данные // Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999.- Т.IV.- С.43-52.
26. **Митрофанов Ф.П., Корчагин А.У., Балабонин Н.Л., Гончаров Ю.В., Карпов С.М., Субботин В.В., Припачкин П.В.** Основные результаты исследований платинометальной рудоносности расслоенного ультрамафит-мафитового интрузива Федорово-Панских тундр // Геология и полезные ископаемые Кольского полуострова. Т.2. – Изд. МУП «Полиграф», 2002.- С. 4-12.
27. **Неручев С.С., Прасолов Э.М.** Флюидно-геохимическая модель платиноидных месторождений, связанных с трапповым магматизмом // Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов. Т. II. Кн. 1. М.: Геоинформмарк, 1995. С. 94-101.
28. **Нивин В.А., Икорский С.В.** Особенности формирования Ловозерских редкометальных месторождений (Кольский полуостров) по изотопно-газовым (He, Ar) данным // Глубинный магматизм, магматические источники и проблемы плюмов. Труды II Международного Семинара. Иркутск-Владивосток, 2002. С. 214-235.
29. **Рябов В.В.** Флюидный режим траппового магматизма и рудообразования (петрологический аспект). Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 10.
30. **Толстихин И.Н., Докучаева В.С., Каменский И.Л.** Ювенильный гелий в древних породах. Гелий, аргон, уран и калий в Мончегорском плутоне (Кольский полуостров)// Геохимия, 1991.- N 8.- С. 1146-1158.
31. **Толстихин И.Н., Каменский И.Л., Марти Б. и др.** Идентификация вещества нижнементийного плюма в девонских щелочно-ультраосновных-карбонатитовых комплексах Кольского полуострова на основании изучения изотопии благородных газов и радиоактивных элементов / Препр.- Апатиты-Нанси-Брюссель, 1999.- 97 с. (на русском и английском языках).
32. **Burnard P.G., Hu R., Turner G. and Bi X.W.** Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan province, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(10), p. 1595-1604.
33. **Kamensky I.L., Tolstikhin I.N., and Vetrin V.R.** Juvenile helium in ancient rocks: I.  $^3\text{He}$  excess in amphiboles from 2.8 Ga charnokite series: Crust-mantle fluid intracrustal magmatic process // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990.- Vol. 54, pp. 3115-3122.
34. **Mamyrin B.A. and Tolstikhin I.N.** Helium isotopes in nature. Elsevier: 1984.- 267 p.
35. **Stuart F.M., Burnard P.G., Taylor R.P., Turner G.** Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W-Mo mineralization, South Korea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995. Vol. 59. No. 22, pp. 4663-4673.
36. **Tolstikhin I.N., Dokuchaeva V.S., Kamensky I.L., Amelin Yu.V.** Juvenile he-kium in ancient rocks: II. U-He, K-Ar, Sm-Nd, and Rb-Sr systematics in the Monche Pluton.  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios frozen in uranium-free ultramafic rocks// *Geochimica et Cosmochimica Acta*.- 1992.- Vol.56.- P. 987-999.
37. **Tolstikhin I.N., Marty B.** The evolution of terrestrial volatiles: a view from helium, neon, argon and nitrogen isotope modeling. *Chemical Geology*, 1998, V. 147, p. 27-52.