

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию **Буйкина Алексея Ивановича**

«Изотопная систематика благородных газов и азота в мантийных породах: влияние геодинамических обстановок»,

представленную на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 - Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Диссертационная работа состоит из двух частей. Первая часть – это усовершенствование методик извлечения газов из породы и подготовки проб для последующего масс-спектрометрического анализа. Геохимическая часть предлагает совокупность результатов измерений изотопного и элементного состава He, Ne и Ar, и, в дополнение – CO₂, H₂O и N₂, извлеченных с помощью предлагаемых методик из магматических пород различных внутриплитных геодинамических обстановок. Результаты получены как для достаточно древних (палеозойских) континентальных проявлений ультраосновного и карбонатитового магматизма Кольского п-ва и Норильского района Сибири, так и для базальтовых стекол Срединно-Атлантического хребта, придонных базальтов в районе острова Буве на юге Атлантики, а также для мантийных ксенолитов архипелага Фернандо де Норонья вблизи берегов Бразилии.

Диссертация, кроме Введения и Заключения, содержит 8 глав и 379 ссылок в списке литературы.

Введение дает общие сведения о работе: цели, актуальность, новизну, практическую значимость, защищаемые положения, апробацию работы.

Глава 1 – это достаточно детальный обзор современного состояния проблем, связанных с исследованиями структуры и состава мантии Земли (геофизические и геохимические данные), а также основные сведения об элементной и изотопной геохимии мантийных благородных газов (He, Ne, Ar). Особое внимание уделяется мантийной неоднородности и ее возможных причинах, включая контаминацию глубокой мантии субдуцированным материалом. Рассматриваются отдельно и подробно основные геодинамические обстановки: срединно-океанические хребты, океанические внутриплитные острова, включая «горячие точки», континентальные проявления ультраосновного и карбонатитового магматизма. Дается сводка по изотопной геохимии благородных газов для каждой из геодинамических обстановок. В отдельный раздел вынесен обзорный материал по геохимии и изотопии азота в мантии.

Несколько замечаний скорее редакционного характера.

Стр. 16. *«Частичное плавление вещества субдуцирующей коры (на глубине ~150 км) приводит к потере летучих и переносу несовместимых элементов в континентальную кору и литосферу».* Я не понял это соображение. Да, континентальная кора над континентальными дугами есть, но над островными дугами ее нет, есть океаническая.

Стр. 18. Хотелось бы видеть расшифровку термина «термохимические скопления».

Стр. 53. Откуда вулканисты в юго-восточных США? Чуть подробнее.

Рассуждения о $3\text{He}/4\text{He}$ и $4\text{He}/3\text{He}$. Выбор нужно было бы обосновать другими словами, потому что в тексте эти отношения меняются бессистемно.

В этой главе нет обзора, хотя бы краткого, о CO_2 и воде в мантии различных обстановок, хотя эти компоненты анализируются и используются далее в работе.

Глава 2. Методология. Здесь приводятся рассуждения о выборе минералов для выделения газов («подходящий геологический материал»), а также подробное описание метода вакуумного ступенчатого дробления породы и методов изотопного анализа. Отдельно рассказывается об усовершенствовании автором системы пробоподготовки с соответствующим патентом, а также об изобретенном автором устройстве ввода проб воды в пиролизатор для дальнейшего изотопного анализа, также запатентованного.

Я не специалист в этих вопросах, поэтому замечаний к этому разделу у меня нет. Есть вопрос, почему в качестве «подходящего» материала автор не рассматривает оливин.

Глава 3 о проблеме образования радиогенных и нуклеогенных благородных газов в древних породах написана достаточно убедительно. В этой главе в качестве примера используются данные по пробам пироксенита и карбонатов из Кольского штока Себлявр. Результаты комплексного изучения этого массива приведены в следующей главе.

Наиболее информативной, на мой взгляд, оказались итоговая трехизотопная неоновая диаграмма, согласно которой, начиная с некоторого числа ударов, точки составов уходят от линий смещения в сторону коровых значений (нуклеогенного компонента неона). Отдельно рассматривается случай пироксенита, существенно измененного с высоким общим содержанием калия. Показано, что накопленный радиогенный аргон высвобождается из самой мелкой фракции (высокое число ударов), за счет чего резко падает отношение $4\text{He}/\text{Ar}^*$. Достаточно неопределенные данные получены для пары аргон – азот в измененном пироксените.

Эта глава является как бы обоснованием техники эксперимента, с помощью которой получены основные данные работы автора. Предложен метод «отбраковки» результатов, показывающих наличие накопленных радиогенных 4He и 40Ar , а также нуклеогенного неона.

Замечания к главе. Я не нашел в тексте главы рассуждений о возрасте или интервале

возрастов магматических пород различного состава, для которых учет накопленных радиогенных изотопов и ^{21}Ne имеет существенное значение. Да, зная возраст породы и содержание калия, урана и тория, можно оценить накопление аргона и гелия. И для разных содержаний будут разные «критические» возрасты, когда этот учет необходим. Но ясных критериев для такого подхода в этой главе я не увидел. Кроме того, в этой главе начинается некая чехарда с единицами измерения, продолжающаяся в тексте до самого конца. Имеется в виду единицы количества газов. Если для благородных газов это везде $\text{см}^3/\text{г}$, то для CO_2 , азота и водорода единицы произвольно меняются от нг (наногرامмов), к ppb (скорее всего, весовые) и до $\text{см}^3/\text{г}$. В газовой геохимии (и химии) приняты объемные (мольные) единицы для газов и, соответственно, отношения объемов (молей). Когда для разных газов единицы разные (весовые и объемные), начинается путаница в индикаторных отношениях. Дополнительно, некая трудность в восприятии данных возникает, когда азот рассматривается автором в виде атома N, да еще в граммах или ppb, а не молекулы N_2 в $\text{см}^3/\text{г}$.

И явная незамеченная ошибка на рис. 3.7. На оси ^{40}Ar шкала доходит до 1000 $\text{см}^3/\text{г}$ (литр/грамм).

Глава 4 является как бы проверкой предложенного подхода ступенчатого дробления к исследованию источников и эволюции флюидной фазы пород комплекса Себлявр на Кольском полуострове. Проверкой, поскольку этот массив уже был объектом нескольких исследований в недалеком прошлом, включая работы Марти с соавторами и Толстихина с соавторами. Данные, полученные автором, с учетом коррекции (отбраковки точек с использованием графического подхода) практически совпали с данными предыдущих работ, т.е. проверка метода оказалась успешной. Автор подтвердил плюмовую природу флюидов комплекса ($^4\text{He}/^3\text{He} \sim 30\,000$, $\sim ^{23}\text{Ra}$), линию смешения на трехизотопной неоновой диаграмме, близкую к линии Реюньона, а также экстраполированное по неону отношение $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ около 4500.

Автор в этой главе подчеркнул также, что метод ступенчатого дробления позволяет использовать один образец для получения нескольких точек составов выделенного газа, т.е. 2-3 образца позволяют построить линию смешения с атмосферными компонентами с достаточным для экстраполяции числом точек.

На графике рис. 4.6 здесь впервые появляется конечный член под названием clay (глина). Что это такое автор не объясняет, считая это, по-видимому, очевидным. Я не понял, что это за состав. Откуда эта глина? Это представитель спелней коры?

Еще одно замечание к этой главе. В выводах автор упоминает работы Rizzo, который применяет одноступенчатое дробление. Но Андреа Риццо работает главным образом с современными (четвертичными) породами, где не надо думать о радиогенных добавках.

Глава 5 о флюидной фазе пород Гулигинского комплекса. Главу начинает исчерпывающий обзор по геологии, геохронологии и геохимии комплекса. Здесь автор применяет свою методику и получает первые результаты по изотопии и содержаниях благородных газов, а также других компонентов флюидов (CO_2 , H_2O) в карбонатитах и ультраосновных породах различного состава. Карбонатиты сравниваются с ультраосновными породами, и проводится детальная систематика полученных данных, помогающая построить некую модель эволюции комплекса, в частности, по свойствам флюидной фазы карбонатитов. Кроме того, показано, что основным источником мантийных компонентов Гулигинского комплекса служит литосферная мантия под этой частью полярной Сибири, со своими изотопными характеристиками благородных газов. Признаки «плюма» отсутствуют. Большое внимание также уделяется проблеме коровой и атмосферной контаминации и участия в формировании флюидной фазы палеогидротермальных флюидов (изотопно-легкий водород воды).

Это интересный и содержательный текст, представляющий важные результаты, но в нем, как раз сконцентрирована та самая чехарда в единицах концентраций (содержаний), о которой я упоминал выше.

Таблица 5.3: C и N в нг (нанограммах). Таблица 5.4: C в см³/г. Таблица 5.5: вода в см³/г. Это пар или жидкая вода? Таблица 5.6: CO₂ и N в ppb (вес?).

Пример моего пересчета мольного отношения N₂/Ar. Таблица 5.3, первый образец, суммарный выход. N = 65 нг, 40Ar 301x10⁻⁸ см³/г. Азот, N₂, 65/28 = 2.3 нмоль = 2.3 x 10⁻⁹ моль/3 г пироксена. Умножаем на 22.4 л STP/моль, получаем

$$\text{N}_2 = 52 \times 10^{-9} \text{ л/3 г} = 17 \times 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$$

$$\text{Аргон } 300 \times 10^{-8} = 3 \times 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$$

$$\text{N}_2/\text{Ar} = 17/3 = 5.7$$

Таких отношений в природе практически не бывает, только, если в каких-то архейских гранитах. Если это результат опыта, нужно его объяснить, поскольку этот результат годится для статьи в Nature. Остальные отношения для других проб низковаты, < 100, укладываются в атмосферный интервал, но существенно ниже, чем для коровых газов с органоманным азотом. Другими словами, если бы все единицы были одинаковы, таких ошибок или «открытий» можно было избежать. Это надо учесть, если этот материал будет готовиться к публикациям (монография?).

Рис. 5.18 показывает хорошую корреляцию между изотопным составом аргона и водорода воды. Максимальные 40/36 (~ 2600) соответствуют $\delta\text{D} \sim -50\text{‰}$. Значит ли это, что при экстраполированном 40/36 около 6000 мантийная вода будет иметь δD близкое к нулю? Так получается, если экстраполировать полученный тренд.

Глава 6: САХ и Буве. Это переход от континентальной обстановки с палеозойским магматизмом к молодым срединным хребтам океанического дна и океаническим островам (MORB=>OIB). Для САХ, к сожалению, не удалось проанализировать изотопный состав He и Ne, но тем не менее, получены интересные данные, в том числе с методической точки зрения (например, утяжеление изотопного состава CO₂ с ростом числа ударов). В первом разделе (САХ) автор для своих построений использует элементные отношения флюидных компонентов и изотопный состав аргона в комбинации с другими компонентами, такими, как концентрации и изотопный состав CO₂ и азота, содержание хлора, калия и MgO в закалочных стеклах базальтов. Автор назвал такой подход «пионерским». В этом разделе достаточно много предполагаемых механизмов дегазации, контаминации, смешения, дифференциации и фракционирования. Основная проблема автора была объяснить близкие к атмосферным изотопные отношения аргона в некоторых пробах. Одна из моделей предполагает комбинацию дегазации и взаимодействия базальтов с гидротермальным флюидом. Каким образом происходит это взаимодействие, остается неясным.

Второй раздел этой главы посвящен детальному исследованию тройного сочленения Буве, где сложная геолого-тектоническая обстановка включает рифтовые зоны и океанический остров. Здесь автор использовал весь возможный набор элементных и изотопных данных (He, Ne, Ar, N, C). Автор подтвердил данные Курца 1998 г, что некоторые базальтовые стекла содержат гелий с плюмовыми характеристиками ($> 10 \text{ Ra}$) и подтвердил это своими данными по изотопам неона, где на трехизотопной диаграмме видно, что имеется два ясно выраженных тренда смешения: «морбовский» и «плюмовый». Причем, плюмовый идет по тренду о. Кергелен. Лучше на этот тренд ложатся составы базальтов ЮЗИХ (юго-западный Индийский хребет). Здесь также наблюдается значительный разброс точек на других графиках, который автор объясняет различными причинами – в основном это дегазация, добавка атмосферных и органогенных (океанических?) компонентов.

Несколько замечаний, тоже, скорее, вопросов. На рис. 6.23 и 6.24 хорошо бы иметь разные символы для разных структур. На рис. 6.29 на осях обозначен Ne_{corr} , т.е. скорректированный на воздушный неон. Я не помню, чтобы видел выше по тексту, как это делается. Допустим, $20/21 = 9.9 \pm 0.2$, $21/22 = 0.030 \pm 0.005$, сколько будет неатмосферного неона и, соответственно, 21 и 22? He/Ne – это и доля воздуха; сколько фракционирования и сколько воздуха?

Глава 7: ксенолиты архипелага Фернандо де Норонья. Здесь главной задачей было показать, что это бывшая «горячая точка», поскольку прямых данных ($3\text{He}/4\text{He}$ и неоновая трехизотопная диаграмма) до этого не было. Действительно, гелий оказался плюмовым ($16-23\text{Ra}$), а на неоновой диаграмме точки легли на тренд Кергелена. Точно так же подтвердился

еще один индикатор – изотопный состав азота ($\sim +5\%$). Экстраполяция $40\text{Ar}/36\text{Ar}$ $20/21=12.5$ дала высокое значение 7455 (на рис. 7.6 опечатка, вместо $40\text{Ar}/36\text{Ar}$ вставлено $21\text{Ne}/22\text{Ne}$).

Глава 8: заключительная, соображения автора по поводу азота и аргона в магматических породах, атмосферной контаминации, участия материала погруженных субдуцированных плит в глубокую мантию и проявления этого материала в горячих точках, в мантийных плюмах. Здесь можно было бы обратить внимание автора на работы, которые оценивают баланс магматических летучих в зонах субдукции. Еще Staudacher T. and Allegre C. (1988) /Recycling of oceanic crust and sediments: the noble gas subduction barrier. Earth Planet. Sci. Lett. 89, 173–183/ убеждали, что практически все благородные газы уходят из плиты через мантийный клин в вулканы, т.е. с глубин 100-150 км, и дальше не погружаются. Для азота мы с Фишером (Fischer, 2008 и Taran, 2009) оценили коэффициент OUT/IN для азота величиной около 1 (у Фишера 1, у меня 0.9), т.е. для азота тоже барьер (IN – входит в мантийный клин вместе с плитой; OUT – выходит через вулканы и гидротермальные системы). Оценки есть разные, дискуссия продолжается. Возможно, что новое открытие Labidi et al. $\delta^{15}\text{N}$ - ^{15}N (в N_2) позволит приблизиться к решению. ^{15}N в N_2 воздуха на 20‰ отличается от любого другого азота и может быть надежным индикатором именно воздушного азота. Только надо научиться мерить эти clumped изотопы.

Общий вывод

В целом диссертация А.И. Буйкина представляет собой исследование, выполненное на высоком профессиональном уровне, не только в смысле применения высокоточной современной аппаратуры, но также и в смысле вполне успешных попыток формулировать и решать имеющиеся к настоящему времени сложные проблемы геохимии магматических летучих и геодинамики. Полученные в диссертации результаты можно квалифицировать как научное достижение в области изотопной геохимии мантийных летучих и как решение важной научной проблемы, связанной с интерпретацией влияния геодинамических обстановок на изотопную систематику благородных газов и азота. Актуальность работы не вызывает сомнений, как в смысле постановки и решения сложных задач мантийной геодинамики, так и из соображений о возобновлении и развитии подобных исследований в отечественной науке. Результаты работы опубликованы в отечественных (рекомендуемых ВАК) и зарубежных журналах (28 статей), результаты работы представлялись на отечественных и зарубежных конференциях. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.6.4 – «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых», а именно, пунктам 13, 14, 15 и 20.

Несмотря на сделанные замечания, большая часть которых имеет редакционный характер и не затрагивает сути работы, а часть имеет дискуссионный характер, считаю, что содержание диссертации полностью соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, установленным пп. 9–14 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» в действующей редакции (вместе с «Положением о присуждении ученых степеней»), а ее автор, Алексей Иванович Буйкин, заслуживает искомой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 - Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Таран Юрий Александрович,
доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
лаборатория постмагматических процессов.
683023, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа Б.И., 9
yuri.taran@gmail.com +7 984-169-61-09

Я, Таран Юрий Александрович, автор отзыва, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

« 18 » мая 2026 г.



Таран Ю.А.

заверяю.

Зав. ОК ИВС ДВО РАН

В.В. Мамин

Сведения об официальном оппоненте

Я, Таран Юрий Александрович, даю свое согласие выступить в качестве официального оппонента по диссертации Буйкина Алексея Ивановича «ИЗОТОПНАЯ СИСТЕМАТИКА БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ И АЗОТА В МАНТИЙНЫХ ПОРОДАХ: ВЛИЯНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК», представленную на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 - минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

О себе сообщаю:

Фамилия, имя, отчество: Таран Юрий Александрович

Учёная степень: доктор геолого-минералогических наук

Шифр и наименование специальности, по которой защищена диссертация:

04.00.02, геохимия

Учёное звание: без звания

Полное и сокращенное название организации: Институт Вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН)

Должность, структурное подразделение: Главный научный сотрудник, Лаборатория постмагматических процессов

Адрес организации: 683023 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9

Телефон: 8 984 1696109

e-mail: yuri.taran@gmail.com

Научные работы по специальности оппонируемой диссертации

Taran Ю.А. Геохимия геотермальных газов. М. Наука, 1988

Taran Y.A., Hedenquist J.W., Korzhinsky M.A., Tkachenko S.I., Shmulovich K.I. Geochemistry of magmatic gases from Kudryavy volcano, Iturup, Kuril Islands. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.59, 1749-1761, 1995.

Taran Y.A., Inguaggiato S., Varley N.B., Capasso G., Favara R. Helium and carbon isotopes in thermal waters of the Jalisco Block, Mexico. *Geofísica Int.*, 41, 459-466 (2002)

Inguaggiato S., Taran Y.A., Grasa F., Varley N.R., Capasso G. Nitrogen isotopes in thermal fluids of a fore-arc region – Jalisco Block, México. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* - 5, n12, Q12003 (2004)

Taran Y.A. Geochemistry of volcanic and hydrothermal fluids and volatile budget of the Kamchatka-Kurils subduction zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 1067-1094, 2009

Taran Y.A. N₂, Ar and He as a tool for discriminating sources of volcanic gases. Example for Vulcano, Italy. *Bull. Volcanol.*, 73 (4), 410-423, 2011

Zelenski M., Taran Y. Geochemistry of volcanic and geothermal gases of Mutnovsky volcano, Kamchatka: evidence for mantle, slab and atmosphere contribution to fluids of a typical arc volcano. *Bull. Volcanol.*, 73(4), 373-394, 2011

Taran Y., Ryabinin G.V., Pokrovsky B.G., Malik N., Cienfuegos E. Methane-rich thermal and mineral waters of the Avachinsky Depression, Kamchatka. *Applied Geochemistry*, 145, 105414, 2022.

Peiffer L., Collard N., Inguaggiato C., Olguín-Martínez M.G., Taran Y., Wanner C. Water-rock exchange of Sr isotopes evaluated through a reactive transport model: Application to the El Chichón hydrothermal system. *Chemical Geology*, 613, 121149, 2022.

Taran Yu.A., Savelyev D.P., Palyanova G.A., Pokrovskii B.G. Alkali Waters of the Ultrabasic Massif of Mount Soldatskaya, Kamchatka: Chemical and Isotopic Compositions, Mineralogy, and ¹⁴C Age of Travertines. *Doklady Earth Sciences*, 510, 262-268, 2023.

Malik N.A., Taran Yu.A., Svirid I.Yu., Tskhovrebova A.R. Nizhne-Shchapinsky Thermal Springs, Kamchatka, as an Example of Magnesium Carbon Dioxide Waters. *Russian Journal of Pacific Geology*, 18, S28-S43, 2024.

Taran Y., Kalacheva E., Savelyev D., Pokrovskii B., Bujakaite M. Hyperalkaline waters and travertines of the ophiolite complex of Mt. Soldatskaya, Kamchatsky Mys Peninsula, Kamchatka, Russia. *Geochemical Journal*, 58(3), 127-137, 2024.

Fukagawa M, Volynets A, Sumino H, Churikova T, Pevzner M & Taran Y. Origin of Magmatism of the Sredinny Range, Kamchatka, Constrained by Noble Gas Isotopes. Goldschmidt conf. 2021

 Ю.А. Таран



Тарасова Ю.А.

ЗАВЕРЯЮ.

Зав. ОК ИВиС ДВО РАН

С ДВО РАН В. М. Мамин Е. В.
09.04.2016