

УДК 552.32

ИЗОТОПЫ ГЕЛИЯ И АРГОНА В СТЕКЛАХ КРАТЕРА ЭЛЬГЫГЫТГЫН И ИХ ПРОИСХОЖДЕНИЕ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЧУКОТКА, РОССИЯ)

© 2014 г. Член-корреспондент РАН В. Г. Сахно, Э. М. Прасолов

Поступило 06.08.2013 г.

DOI: 10.7868/S0869565214030220

Изучение благородных газов, в частности гелия и аргона, в магматических породах представляет фундаментальный интерес в вопросах происхождения и эволюции вещества Земли.

Согласно общепринятым представлениям, планеты Солнечной системы и Солнце формировались путем акреции ледяных водно-водородных планетоземалей в быстровращающемся небулярном диске с последующим расслоением на железо-силикатные и силикатные оболочки, в состав которых входили и флюидные компоненты — гелий и водород. Огромный запас флюидов гелия и водорода в ядре и обеспечил эндогенное развитие Земли [1, 10].

Изотопы благородных газов и гелия как продукта горения водорода возникают в процессе ядерного синтеза, и их соотношения меняются в результате радиоактивного распада и ядерных реакций.

Распространенность этих газов и их изотопов в твердом веществе Земли можно установить с помощью современных инструментальных методов исследования, что дает возможность решать широкий круг генетических вопросов эндогенной активности Земли.

Особую ценность в решении этой задачи имеют значения измерений изотопов гелия и аргона. Это позволяет надежно идентифицировать вклад изотопов гелия и аргона при решении вопроса о генерации расплавов эндогенным процессом либо при космическом ударе.

Проблема происхождения кратера Эльгыгытгын и стекол обсуждается не одно десятилетие с разных позиций: удара космического тела либо эндогенного взрыва глубинных газов. Находки минералов в стеклах с планарными структурами и

высокобарических фаз кремнезема (коэсита, стишовита) некоторые исследователи однозначно предполагают связывать происхождение этих компонентов с ударом метеорита [5].

Существуют и другие мнения, которые на основе детальных геологических, петрологических исследований, изотопного датирования по цирконам (U-SHRIMP) и изохронным Re—Os-определениям показывают неоднородность (мгновенность) генерации расплавов, что позволяет считать их производными эндогенных процессов [2, 3].

Открытие значительного избытка легкого изотопа гелия (^3He) в гидротермах Исландии, породах Срединно-Океанических хребтов, “горячих точек” и трубок взрыва (кимберлитовых и др.) показало возможность дегазации Земли в процессе эволюции мантии [1, 8, 9] и мантийной природы флюидов (гелия, аргона и др.) как “трассеров”, определяющих участие этих флюидов в генерации мантийных и мантийно-коровых расплавов.

Для решения генезиса стекол кратера Эльгыгытгын было проведено комплексное изучение образцов стекол, собранных во впадине Эльгыгытгын и за ее пределами [2, 3, 6].

Впадина Эльгыгытгын расположена в центральной части Верхне-Анадырского поднятия, почти изометричной формы, размер около 17 км. На его склонах берут начало крупные реки: Энмываам, Юрумкувеем, Анадырь, впадающие в бассейн Тихого океана. На северном склоне поднятия известны истоки рек Чауна, Паляваама и др., впадающих в Северный Ледовитый океан. Впадина окружена цепью гор с превышением отдельных вершин над днищем более 400 м. Кратер расположен в центре впадины с некоторым смещением к востоку (рис. 1). Анадырское поднятие слагают комплексы ранне-позднемиоценовых вулканических пород, среди которых преобладают риолит-дацитовые игнибриты, относящиеся к высокофлюидонасыщенным пирокластическим породам. На внутренних склонах впадины обнажаются эффузивно-пирокластические вулканы, относящиеся к пыкарваамской, воронинской, коэкувунской, эргываамской свитам, возраст которых да-

Дальневосточный геологический институт
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Владивосток
Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского,
Санкт-Петербург

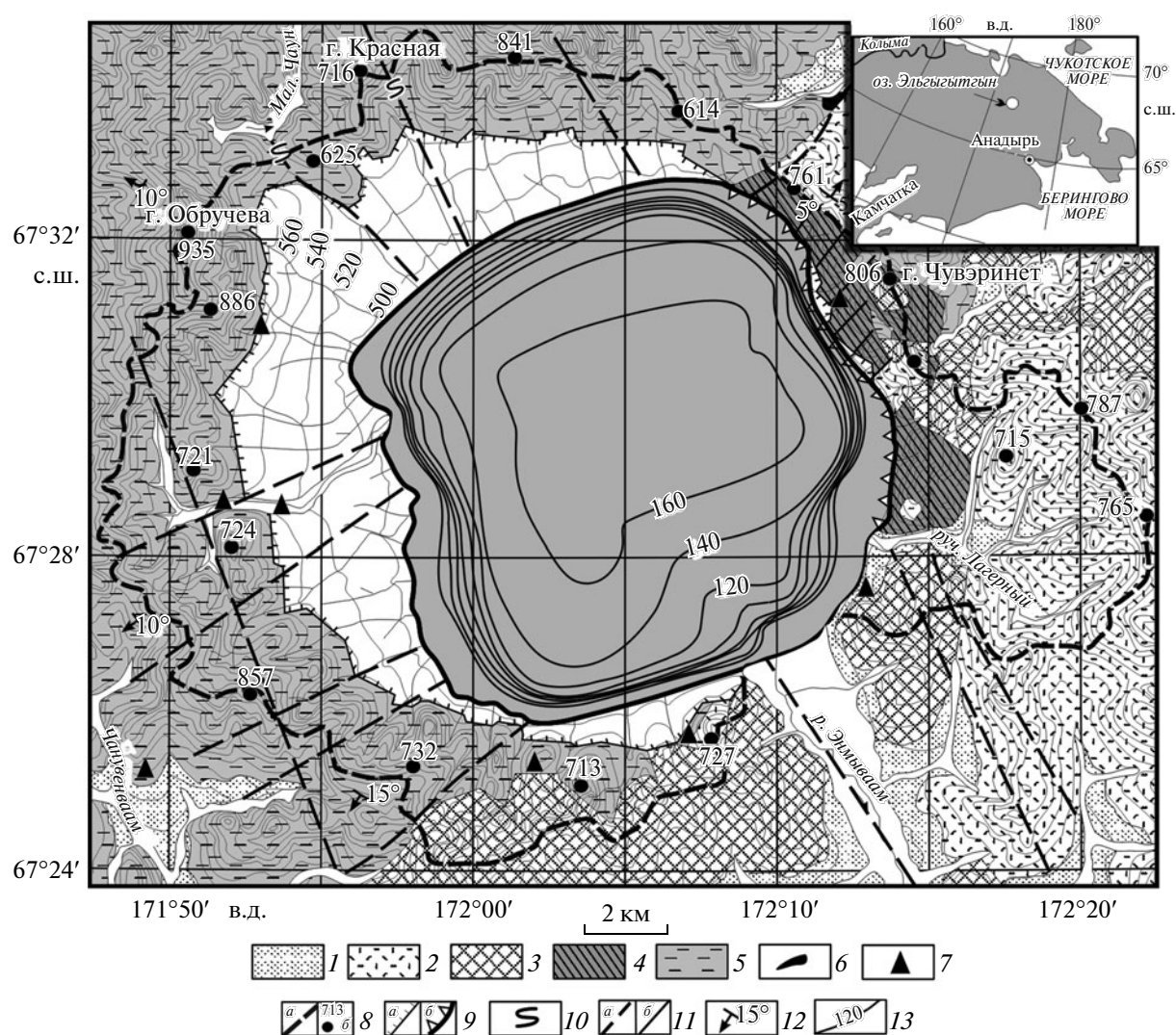


Рис. 1. Схема геологического строения впадины и кратера оз. Эльгыгытгын [3].

1 – поймы речных долин; 2 – эргываамская свита; 3 – коэввунская свита; 4 – воронинская свита; 5 – пыкарваамская свита; 6 – штоки, силы, дайки основных субвулканических пород; 7 – находки стекол (брекчий, бомбочки и др.); 8 – водоразделы рек Северного Ледовитого и Тихого океанов (а), основные вершины (б); 9 – граница дна впадины: перекрытые делювиальными речными отложениями (а) и скальные обрывы (б); 10 – перехваты речных долин (на северном водоразделе); 11 – разломы: трансрегиональные (а), локального типа: зоны смещения, сбросы и т.д. (б); 12 – направление и угол наклона покровов игнимбритовых толщ на внешней стороне горного обрамления впадины; 13 – изогипсы глубины озера.

тирован U–Pb-методом. На внешних склонах поднятия в его основании обнажаются более древние вулканы, не известные внутри впадины: лавовые и пирокластические риодацит-дацитовые породы угаткынской и каленьмуваамской свит.

Возраст вулканических комплексов Верхне-Анадырского купольного поднятия датирован по цирконам (SHRIMP) U–Pb-методом. Формирование всего комплекса вулканических пород, включая палеогеновые базальты, более 50 млн лет.

Кратер, находящийся в пределах кольцевой депрессии, изометричной формы, диаметром 12–14 км, глубиной 175 м, с подводными склонами до 45°–50° (рис. 1). Он заполнен водой, на его дне бурением, проведенным со льда весной 2009 г., были вскрыты осадки позднеплиоцен–голоценового возраста и мощная пачка брекчий вулканических пород в основании, которые относятся главным образом к воронинской свите. Бурением не обнаружены стекловатые образования (тагамиты) в придонных горизонтах, как предполагалось, исходя из импактной природы кратера [5].

Таблица 1. Петрохимический (мас. %), микроэлементный (г/т) составы представительных стекол и вулканических пород кальдеры Эльгыгытгын (Центральная Чукотка)

Компонент	O-1454/1а	O-1454/1в	O-1454/1д	O-1454/2а	O-1454/2ж	O-1454/7	O-1454/5	O-1454/4	O-1388/5	O-1395/10	O-1396/4
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	68.42	69.56	69.49	64.81	64.95	69.79	69.74	70.31	72.08	63.45	50.41
TiO ₂	0.42	0.38	0.42	0.52	0.40	0.37	0.36	0.28	0.19	0.61	1.22
Al ₂ O ₃	15.58	14.93	15.00	17.04	16.25	15.39	15.23	11.26	14.04	15.03	17.64
Fe ₂ O ₃	1.41	1.73	1.97	2.00	1.43	1.12	1.39	0.86	1.54	3.70	5.75
FeO	1.62	1.18	1.00	1.65	2.45	2.29	1.94	1.53	0.58	1.70	3.34
MnO	0.08	0.03	0.02	0.07	0.06	0.07	0.05	0.08	0.12	0.11	0.19
MgO	1.04	0.71	0.82	1.27	1.17	0.76	1.21	0.29	0.67	1.21	3.68
CaO	2.94	2.53	2.27	3.68	3.05	2.90	2.94	4.40	1.38	3.12	7.89
Na ₂ O	3.54	3.66	3.30	3.33	3.76	3.07	2.73	2.23	3.95	3.54	3.00
K ₂ O	3.88	3.86	3.76	3.24	3.41	4.17	3.84	4.20	3.50	5.09	1.93
P ₂ O ₅	0.12	0.11	0.15	0.17	0.18	0.03	0.07	0.2	0.07	0.23	0.61
H ₂ O ⁻	—	0.11	0.22	0.14	0.53	0.03	0.06	0.31	0.18	0.88	0.51
П.п.п	0.73	1.35	1.65	1.81	1.17	0.44	0.21	4.38	1.44	1.74	3.98
Сумма	100.78	100.14	100.07	99.73	99.41	100.40	99.77	110.25	99.74	100.41	99.85
Be	2.41	2.05	2.18	2.11	1.92	2.32	2.73	1.09	1.09	2.83	—
Sc	15.35	11.15	10.69	10.51	12.64	13.32	18.25	—	—	12.93	21.6
V	52.38	48.13	38.99	60.15	43.01	37.10	38.39	13.82	13.82	106.9	274
Cr	7.5	6.3	5.0	10.05	6.07	31.37	46.0	10.61	10.61	8.2	1572
Co	5.03	4.7	3.67	6.09	4.9	3.60	6.24	2.50	2.50	7.25	27.2
Ni	7.29	6.9	9.83	4.91	3.93	2.60	32.44	6.12	6.12	18.93	35.1
Cu	12.0	11.4	13.7	3.03	5.09	2.22	29.6	4.06	4.06	10.98	95.5
Zn	59.1	51.3	58.4	57.82	49.3	42.65	38.9	36.71	36.71	77.0	96.7
Ga	21.90	20.2	19.25	19.48	17.8	18.74	19.36	11.53	11.53	19.78	21.1
Ge	—	—	—	—	—	—	—	1.22	1.22	—	1.49
Rb	167.7	159.3	162.4	126.3	148.3	154.3	158.3	99.89	199.89	184.9	31.9
Sr	341.4	337.9	329.6	379.4	219.0	219.3	247.7	184.07	184.07	620.7	943.0
Y	24.44	23.5	20.47	22.911	22.44	30.32	35.4	12.01	12.01	21.15	2.6
Zr	193.9	210.1	220.7	—	93.0	—	241.2	87.56	87.56	185.80	169.0
Nb	9.61	6.78	8.48	—	7.63	—	10.67	4.11	4.11	8.66	10.0
Cs	6.15	5.61	6.09	4.42	6.71	7.76	6.34	0.65	0.65	1.93	0.42
Ba	998.1	893.5	1001.1	856.60	970.0	906.5	1025.0	1206.7	1206.0	1105.0	822
La	32.62	34.6	30.10	29.46	30.84	38.49	37.21	21.56	21.56	27.5	30.0
Ce	70.48	67.3	66.13	61.02	63.57	80.30	79.9	40.12	40.12	57.38	65.7
Pr	6.38	6.56	6.44	6.82	6.49	8.39	9.01	3.28	3.28	6.25	9.22
Nd	28.52	27.3	25.05	25.58	24.88	33.90	35.37	15.16	15.16	25.61	36.6
Sm	510	4.92	4.13	4.92	5.00	6.34	6.85	2.88	2.88	4.45	8.47
Eu	1.03	1.09	0.89	0.80	1.56	0.61	1.16	0.69	0.69	1.31	2.29
Gd	4.83	4.71	3.93	4.89	8.78	6.03	5.69	4.60	4.60	4.54	7.11
Tb	0.65	0.71	0.56	0.77	0.82	0.89	0.95	0.40	0.40	0.59	0.80
Dy	4.26	4.20	3.67	3.91	3.53	5.14	6.06	1.81	1.82	3.84	4.15
Ho	0.85	0.93	0.59	0.86	0.72	1.09	1.19	0.51	0.51	0.73	0.80
Er	2.48	2.30	2.22	2.26	2.29	3.27	2.69	1.42	1.42	2.13	2.13
Tm	0.39	0.41	0.34	0.39	0.34	0.48	0.53	0.22	0.22	0.30	0.30
Yb	2.52	2.30	2.28	—	2.52	—	3.43	1.65	1.65	2.09	2.10
Lu	0.39	0.37	0.39	0.36	0.35	0.46	0.53	0.20	0.20	0.33	0.29
Hf	5.71	4.91	6.13	—	—	—	6.61	2.58	2.58	5.00	4.1
Ta	0.60	0.61	0.62	—	0.46	—	0.63	0.33	0.33	0.47	<0.3
Pb	17.76	17.93	18.47	17.31	16.3	13.75	16.55	16.54	16.54	11.95	7.82
Th	13.48	13.51	14.08	11.64	10.63	13.83	13.26	6.71	6.71	8.42	2.22
U	3.75	3.91	4.05	3.46	3.21	3.90	3.30	2.35	2.35	2.29	0.77

Примечание. 1–7 – стекла: 1, 2 – брекчиевые, 3 – пемзовидные, 4 – шлаковидные, 6, 7 – стекловатые бомбочки; 8–11 – вулканические породы впадины Эльгыгытгын: 8 – риолито-дацит, воронинская свита, 9 – риолит, эргывьяамская свита, 10 – дацит, пыкарваамская свита, 11 – базальт, козквуньская свита. Петрогенные окислы определяли в химической лаборатории ДВГИ ДВО РАН (аналитики Л.И. Алексеева, Ж.А. Шека, В.Н. Каминская). Определения содержания микро- и редкоземельных элементов выполнены методом ICP-MS (г. Иркутск, СибГЕОХИ, аналитик Г.П. Сандиминова).

Таблица 2. Гелий и неон в газовой-жидких включениях из стекол кратера Эльгыгытгын (Центральная Чукотка)

№ пробы	He · 10 ⁻⁶ , см ³ /г	³ He/ ⁴ He · 10 ⁻⁶ , измеренное	⁴ He/ ²⁰ Ne, измеренное	³ He/ ⁴ He · 10 ⁻⁶ корр.	R _A корр.	He _m /He, %	⁴ He/ ⁴⁰ Ar _r
O-1454/1a	0.38	1.45	6.2	1.45	1.04	12	76
O-1454/1в	0.073	1.44	1.2	1.46	1.04	12	1.7
O-1454/1д	0.053	1.49	1.2	1.52	1.09	13	8.8
O-1454/2a	0.060	1.45	7.0	1.45	1.04	12	6.7
O-1454/2ж	0.40	1.41	20	1.41	1.01	12	18
O-1454/7	0.085	1.47	3.4	1.47	1.05	12	2.8

Примечание. Газы выделяли посредством дробления образцов в вакууме. ³He/⁴He · 10⁻⁶ корр. – значение изотопного отношения, скорректированное на воздушную компоненту гелия, рассчитанную по соотношению ⁴He/²⁰Ne, т.е. изотопный состав “глубинного” гелия; R_A – скорректированное отношение изотопов гелия, деленное на таковое в атмосферном гелии (1.4 · 10⁻⁶); He_m/He – доля мантийного гелия, рассчитанная для значений ³He/⁴He в верхней мантии 1.2 · 10⁻⁵ и 2 · 10⁻⁸ в земной коре; Ar_r – радиоактивный Ar.

Таблица 3. Аргон в газовой-жидких включениях из стекол кратера Эльгыгытгын (Центральная Чукотка)

№ пробы	Ar · 10 ⁻⁶ , см ³ /г	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	Ar _a /Ar, %	Ar _r /Ar, %	⁴⁰ Ar _r · 10 ⁻⁶ , см ³ /г
O-1454/1a	0.52	298	99.0	1.0	0.005
O-1454/1в	1.59	303	97.4	2.6	0.042
O-1454/1д	0.32	302	98.0	2.0	0.006
O-1454/2a	0.20	310	95.3	4.7	0.009
O-1454/2ж	1.0	302	97.8	2.2	0.022
O-1454/7	0.80	307	96.2	3.8	0.030

Примечания. Газы выделяли посредством дробления образцов в вакууме. В пробах доля воздушного аргона рассчитывается по результатам изотопного анализа аргона: Ar_r (%) = (⁴⁰Ar/³⁶Ar)_{атм}/(⁴⁰Ar/³⁶Ar) пробы × 100; доля радиогенного аргона рассчитывается так: Ar_r (%) = 100 – Ar_a (%); определение гелия и аргона на приборе Micromass 5400 (Англия), Ar_a – атмосферный Ar; Ar_r – радиогенный (глубинный) Ar.

Стекловатые брекчи, шлаковидные, пемзоподобные обломки, а также стекловатые бомбы с характерными текстурами и трещинками, образуемыми при воздушном полете, были обнаружены на внутренних и внешних склонах впадины Эльгыгытгын, а также в плиоценовых осадках в 22–25 км за ее пределами [4]. Все обломки стекол, брекчий и другие фациальные разности были отобраны для изучения и проведения комплекса петрогеохимических, изотопных, геохронологических исследований [2, 3].

Химический и микро-редкоземельный состав стекол наиболее представительных типов, а также вулканических пород впадины дан в табл. 1, где видно, что все они относятся к дацитам и риолитам. Более основных разностей в составе стекол не было найдено, несмотря на то что в пределах впадины и ее окружении известны базальты, андезит-базальты и андезиты [2, 3].

Определение изотопов гелия и аргона проводили в центре изотопных исследований ВСЕГЕИ по методике, разработанной Э.М. Прасоловым.

Результаты этих исследований представлены в табл. 2, 3.

Из анализа этих данных можно сделать следующие выводы:

Соблюдаются близкие отношения ³He/⁴He в стеклах различных текстурных и фациальных типов (стекловатых бомб, шлаковидных стекол, пемз и т.д.) независимо от концентрации гелия, агрегатного состава и места сбора проб.

Величины отношений ³He/⁴He вполне сопоставимы с данными по глубинным включениям (лерцолитового состава) островов Атлантического, Тихого, Индийского океанов [13, 1], флогопитовым включениям в кимберлитах Ю. Америки [11] и рифтовых зон (Африка, Исландия и др.).

Поступление первичного гелия из мантии можно связывать с глубинными разломами либо трубками (кимберлитовыми) и другими взрывными кольцевыми структурами глубокого заложения. Высокие ³He/⁴He отмечены для “горячих точек” (Гавайи, вулкан Лохи и др.), превышающие эти значения на порядок и больше и не зависят от его концентрации в расплаве или газовой-жидких включениях в минералах, а возможные различия обусловлены контаминацией атмосферным гелием [12].

В структуре “горячих точек” с высоким соотношением $^3\text{He}/^4\text{He}$ источником первичных газов являются глубинные резервуары, которые фиксируются геофизической томографией [13, 14].

Анализ результатов определения изотопов гелия и аргона в стеклах кальдеры Эльгыгытгын выявляет удивительную стабильность отношений гелия ($1.46 \cdot 10^{-6}$) с отклонением не более 3%, а соответственно, вклад гелия мантии 12–13%. Быстрое смешение мантийного и корового гелия в поверхностных условиях не могли бы обеспечить столь высокую изотопно-гелевую гомогенность. Можно полагать, что формирование флюидов длительное время осуществлялось в сравнительно глубоких резервуарах. Последующее взаимодействие “мантийно-корового” флюида с близкповерхностной системой вод и газов осуществляло сравнительно большие вариации содержания воздушного и радиогенного аргона, что, возможно, отражает различные уровни генерации стекол.

В исследованных палеофлюидах, в данном случае газовой-жидких включениях в стеклах, выделены два типа аргона: воздушный и радиогенный, получивший название “избыточного” [1]. Первый попадает во флюид в составе вод, второй образуется в составе материнских пород. Отношение изотопов аргона в современной атмосфере равно постоянной величине 295.5 и оно не изменялось на протяжении всего фанерозоя, а в наших пробах доля радиогенного аргона больше этой постоянной, что, возможно, связано с распадом ^{40}K материнской породы еще до образования расплава. Учитывая данные определения изохронного возраста стекол Re–Os-методом, можно полагать, что в данном случае это отражает разные уровни генерации расплава. Следовательно, свидетельство о внеземном происхождении стекол не подтверждается. Изотопные составы гелия, отчасти аргона, отвергают такой генезис. Учитывается и характер распределения элементов группы платиноидов [2], который показывает отсутствие линейной корреляции ЭПГ с кобальтом, никелем и хромом, а также в парных корреляциях между кобальтом и никелем, никелем и хромом [3]. Наличие же линейных зависимостей

в таких парных корреляциях позволяет достоверно определять присутствие внеземного вещества даже при его относительно низкой концентрации [15].

Этот факт и приведенные выше данные по изотопам гелия и аргона в стеклах свидетельствуют об отсутствии контаминации пород кратера Эльгыгытгын внеземным веществом и в большей степени подтверждают эндогенное их происхождение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН, Президиума ДВО РАН, проект № 12-1-П4-08.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толстихин И.Н. Изотопная геохимия гелия, аргона и редких газов. // Под ред. Ю.Д. Пушкарева. Л.: Наука, 1986, 200 с.
2. Сахно В.Г., Крымский З.Ш. // ДАН. 2012. Т. 446. № 4. С. 427–431.
3. Сахно В.Г., Крымский З.Ш., Глушкова О.Ю. // ДАН. 2011. Т. 441. № 6. С. 780–787.
4. Белый В.Ф. // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 36–55.
5. Импактилы / Под ред. А.А. Маракушева. М.: Изд-во МГУ, 1981. 240 с.
6. Sakhno V.G. In: Interdiscipl. Workshop. “The Earth Expansion Evidence”. Erice, 2012. P. 465–478.
7. Koeberl C. In: Treatise of Geochemistry. N.Y.: Elsevier, 2007. V. 1. P. 1.28.1–1.28.52.
8. Clarke W.B., Beg M.A., Craig H. // Earth and Planet. Sci. Lett. 1969. V. 6. P. 213–220.
9. Прасолов Э.М., Верховский А.Б., Поляев Б.Г. // Геохимия. 1982. № 12. С. 1691–1703.
10. Маракушев А.А., Грановский Л.Б., Зиновьева Н.Г. и др. Космическая петрология. М.: Наука, 2003, 390 с.
11. Kaneoka L., Takaoka N. // Science. 1980. V. 208. № 4450. P. 1366–1368.
12. Rison W., Craig H. // Earth and Planet. Sci. Lett. 1983. V. 66. № 12. P. 407–426.
13. Lupton J.E., Welss R.F., Craig H. // Nature. 1977. V. 266. № 5599. P. 2440–2446.
14. Fukao Y. // Science. 1992. V. 258. № 4450. P. 625–630.
15. Tagle R., Hecht L. // Meteoritics and Planet. Sci. 2006. V. 41. № 11. P. 1721–1735.