

В. И. КОНОНОВ, Б. А. МАМЫРИН, Б. Г. ПОЛЯК, Л. В. ХАБАРИН  
ИЗОТОПЫ ГЕЛИЯ В ГАЗАХ ГИДРОТЕРМ ИСЛАНДИИ

(Представлено академиком А. В. Пейве 11 VII 1973)

В последние годы выявлено, что отношение изотопов гелия  $\text{He}^3/\text{He}^4$  в разных природных объектах существенно варьирует — от  $n \cdot 10^{-2}$  в некоторых метеоритах до  $n \cdot 10^{-10}$  в уранинитах. Установлено, что в газах стабильных континентальных областей земной коры величина отношения  $\text{He}^3/\text{He}^4$  составляет  $10^{-7} - 10^{-8}$  (1), уменьшаясь в гелиеносных районах, тогда как в фумаролах и гидротермах Восточной вулканической зоны Камчатки оно достигает  $n \cdot 10^{-5}$  (2). Вариации отношения  $\text{He}^3/\text{He}^4$  в земных газах интерпретируются как следствие смешения потоков гелия от трех источников: глублинного (мантийного) гелия с  $\text{He}^3/\text{He}^4 = n \cdot 10^{-5}$ , корового гелия, генерируемого при радиоактивном распаде в «гранитном» слое, с  $\text{He}^3/\text{He}^4 = n \cdot 10^{-8}$  и гелия атмосферы с  $\text{He}^3/\text{He}^4 = 1,4 \cdot 10^{-6}$  (3).

Выяснение содержания изотопов гелия в газах гидротерм Исландии проливает свет на общие закономерности их распределения в литосфере, имеющие кардинальное геохимическое и геофизическое значение, и одновременно дает исключительно интересный материал для расшифровки геологической структуры этого уникального острова.

Изучение геологического строения Исландии тесно связано с решением проблемы развития океанической коры, которая находится сейчас в центре внимания науки о Земле. В этой связи чрезвычайно интересен ответ на вопрос: является ли Исландия, расположенная на оси Срединно-Атлантического хребта, наземным выражением этой океанической структуры (4, 5) или останцем древнего континента (6).

Главнейшей геологической особенностью Исландии является не прекращающийся с конца миоцена интенсивный вулканизм, продукты которого покрывают всю ее территорию и почти целиком слагают ее видимый разрез. По составу среди них резко преобладают базальты, а кислые и средние породы составляют по объему не более 10% (7). В четвертичный период вулканическая активность была приурочена главным образом к пересекающей остров Срединной зоне, в строении которой определяющая роль принадлежит глубоким линейным тектоническим разрывам. Очень интенсивна в Исландии и гидротермальная деятельность (8), выражающаяся в разгрузке на поверхность горячих подземных вод и парогазовых струй, в формировании которых в той или иной степени участвуют глубинные эманации. Аномальная геотермальная активность проявляется в Исландии еще и в высоких значениях кондуктивного глубинного теплового потока (9). Глубинное строение Исландии изучено пока недостаточно. Проведенные исследования показали наличие в разрезе Исландии нескольких сейсмических слоев, считающихся базальтами разного возраста, плотности и степени метаморфизма (10). Уточнение представлений о геологическом строении и особенностях этого региона было задачей Советской комплексной геолого-геофизической экспедиции АН СССР в Исландии (научный руководитель — член-корр. АН СССР В. В. Белоусов).

В ходе работ этой экспедиции в 1971—1972 гг. было проведено широкое опробование парогазовых струй и спонтанных газов термальных источников Исландии. В отобранных пробах газа было определено отношение

$He^3/He^4$  при помощи специального магнитного резонансного масс-спектрометра, разработанного в Ленинградском физико-техническом институте АН СССР (11). Особенностью этой методики является высокая точность определения изотопного отношения, соответствующая при  $He^3/He^4=10^{-7}$  относительной погрешности в 2–3% (при единичном определении). Методика отбора проб и очистки их от химически активных газов исключала попадание в них заметных количеств воздуха, что вместе с высокой точностью масс-спектрометрического анализа дало хорошую повторяемость результатов при анализе проб, отобранных из одного источника даже в разные годы.

Из рис. 1 и 2 видно, что в Исландии величины  $He^3/He^4$  повсюду на 2–3 порядка превышают значения, свойственные континентальным участкам земной коры (1, 12). Это указывает на отсутствие континентального «гранитного» слоя в коре Исландии и, тем самым, на родство ее структурам океанического дна.

Это подтверждается и характером зависимости между величиной отношения  $He^3/He^4$  и общим содержанием гелия в проанализированных газах (рис. 1). В отличие от континентальных газопроявлений, характеризуемых кривой *n*, построенной по данным работы (1), исландские газы дают противоположный наклон графика (кривая *a*), что указывает на их мантийное происхождение. Действительно, поскольку всегда есть возможность подмешивания к изучаемым газам атмосферного гелия (кривая *b*), влияние этого должно быть тем заметнее, чем меньше в данном газопроявлении доля глубинного гелия. И так как атмосферное отношение  $He^3/He^4$  ниже мантийного и выше, чем в континентальной коре, то графики рассматриваемой зависимости для мантийных (океанических) и коровых (континентальных) газопроявлений должны иметь противоположный наклон.

Наблюдающийся «вулканический» порядок отношения  $He^3/He^4$  на всей территории острова, а не только в пределах Срединной неовулканической зоны говорит о том, что в этом геологическом регионе зона поступления к поверхности Земли глубинных эманаций значительно превосходит по площади область излияния магматических расплавов.

На общем фоне высоких значений рассматриваемого отношения заметны вариации второго порядка (рис. 2). Их не удается полностью согласовать с распределением современной вулканической активности, но они могут быть связаны с другими особенностями глубинной структуры Исландии. При этом обращает на себя внимание совпадение простираний зоны максимальных значений  $He^3/He^4$  ( $>2 \cdot 10^{-5}$ ) и системы срединно-океанического хребта, протягивающегося как южнее, так и севернее Исландии. Вместе с тем, не исключено, что снижение величины  $He^3/He^4$  в северном участке неовулканической зоны по сравнению с южными связано с более интенсивной циркуляцией инфильтрационных вод, привносящих на глубину атмосферный гелий.

Поля корреляции значений  $He^3/He^4$  не совпадают и с общей зональностью газового состава термоявлений Исландии, выраженной в приуро-

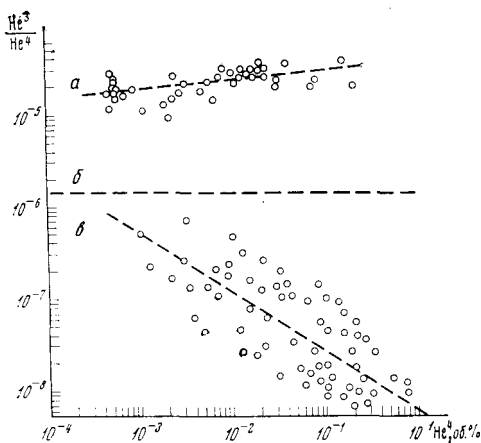


Рис. 1. Зависимость отношения  $He^3/He^4$  от концентрации гелия в газе пробы. *a* — для гелия гидротерм Исландии; *в* — для гелия континентальных газопроявлений и различных водопунктов; *б* — значение отношения  $He^3/He^4$  для гелия атмосферы

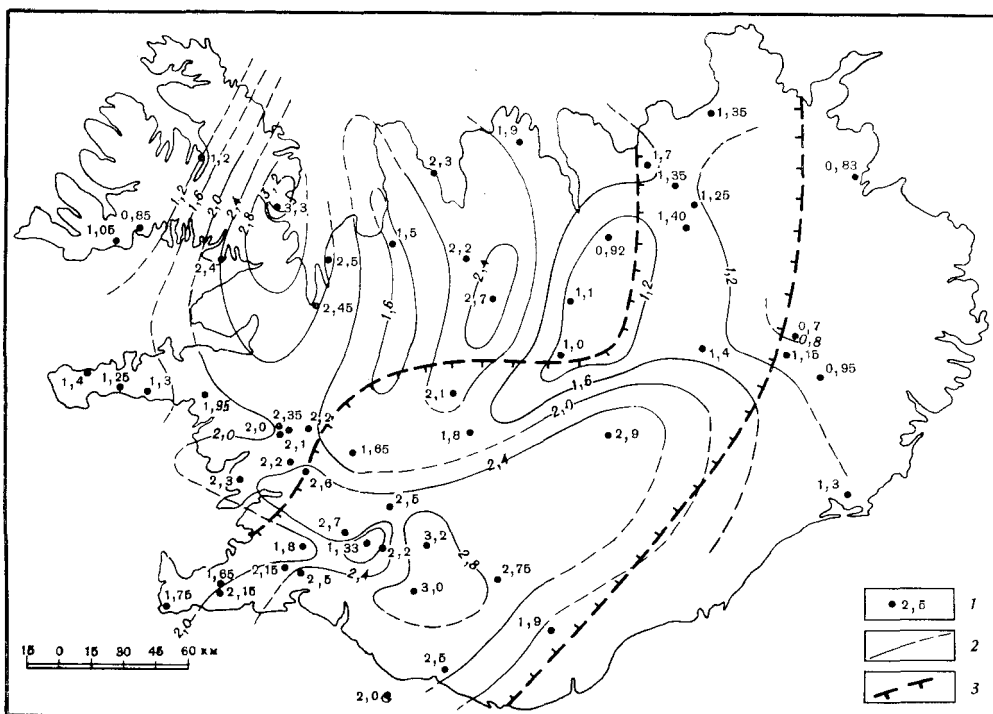


Рис. 2. Величины отношения  $\text{He}^3/\text{He}^4$  в газах гидротерм Исландии. 1 — пункт отбора проб и величина отношения  $(\text{He}^3/\text{He}^4) \cdot 10^5$ ; 2 — изолинии величины отношения  $\text{He}^3/\text{He}^4$ ; 3 — границы Срединной неовулканической зоны

ченности к Срединной неовулканической зоне очень высокотемпературных гидротерм, в газовом составе которых важную (иногда главную) роль играет водород, в распространении на периферии этой зоны терм, содержащих азот и углекислоту, и развитии на остальной территории, сложенной дочетвертичными породами, менее горячих азотных терм (<sup>13</sup>). Последние широко распространены в областях новейшей тектонической активности, и считалось, что они всегда формируются в результате циркуляции инфльтрационных вод в условиях повышенного регионального геотермического фона без подмешивания глубинных эманаций. Однако наблюдаемая величина  $\text{He}^3/\text{He}^4$  в азотных термах Исландии свидетельствует о том, что здесь такое подмешивание все же имеет место.

Установленное распределение изотопов гелия в гидротермах Исландии хорошо согласуется с полученными ранее данными (<sup>14</sup>) по другому вулканическому региону — Курило-Камчатскому, где величина  $\text{He}^3/\text{He}^4$  в гидротермах варьирует в пределах  $(0,5-1,4) \cdot 10^{-5}$ . Но на Камчатке столь высокие значения свойственны только газам Восточной вулканической зоны и некоторых районов современной гидротермальной деятельности в Среднем хребте, тогда как в газопроявлениях Западной Камчатки (Тваямская, Соболевская и другие площади), удаленных от оси Восточной вулканической зоны на 50–100 км, отношение  $\text{He}^3/\text{He}^4$  резко снижается — до  $0,6 \cdot 10^{-6}$  (<sup>14</sup>).

Такое распределение изотопов гелия в термальных газах вулканических районов хорошо подтверждает вывод (<sup>2, 14, 15</sup>) о наличии в мантии Земли первичного гелия, захваченного при ее образовании, с изотопным отношением  $\text{He}^3/\text{He}^4 = 3 \cdot 10^{-4}$  (<sup>16</sup>). Доля этого гелия в веществе мантии по отношению к радиогенному с величиной  $\text{He}^3/\text{He}^4 = 10^{-7}-10^{-8}$  может быть оценена по наиболее высокому значению  $\text{He}^3/\text{He}^4$  в природных глубинных

газах, установленному в настоящей работе ( $3 \cdot 10^{-5}$ ), — она составляет примерно 10%.

Выводы. 1. Высокое изотопное отношение  $\text{He}^3/\text{He}^4$  на всей территории Исландии близко по величине к мантийному и свидетельствует об отсутствии в разрезе ее коры сколько-нибудь существенного континентального «гранитного» слоя. 2. Установлено принципиальное различие в характере зависимости между величиной  $\text{He}^3/\text{He}^4$  и общим содержанием гелия для «мантийных» и «коровых» газопровывлений. 3. Детальное исследование распределения величин отношения  $\text{He}^3/\text{He}^4$  на территории Исландии указывает на наличие зоны его повышенных значений, связывающей подводные участки океанического хребта, но лишь частично совпадающей со Срединной неовулканической зоной. 4. Распределение величин отношения  $\text{He}^3/\text{He}^4$  в гидротермах Исландии не совпадает с их общей газовой зональностью, что, по-видимому, связано с разной глубиной генерации соответствующих флюидов. 5. Совпадение аномально больших величин отношения  $\text{He}^3/\text{He}^4$  в вулканических газах Исландии и Камчатки свидетельствует о глобальном характере описанного явления.

Авторы выражают свою глубокую благодарность Л. Г. Бенкевичу, проведшему очистку гелия от химически активных газов для большинства проб, а также И. Л. Каменскому, проделавшему эту операцию для нескольких проб, и В. П. Щербак, выполнившей определения содержания гелия и неона. Авторы благодарны М. Ю. Артемьеву, принимавшему участие в масс-спектрометрическом анализе.

Геологический институт  
Академии наук СССР  
Москва

Поступило  
25 VI 1973

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе  
Академии наук СССР  
Ленинград

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> И. Л. Каменский, В. П. Якуцени и др., Геохимия, № 8, 914 (1971). <sup>2</sup> Б. А. Мамырин, И. Н. Толстихин и др., ДАН, т. 184, 1197 (1969). <sup>3</sup> Б. А. Мамырин, Г. С. Ануфриев и др., Геохимия, № 6, 721 (1970). <sup>4</sup> С. Тораринссон, В кн. Система рифтов Земли, М., 1970. <sup>5</sup> Р. Н. Ward, G. Palmason, C. H. Drake, J. Geophys. Res., v. 74, № 2 (1969). <sup>6</sup> Ю. М. Шейнманн, Очерки глубинной геологии, 1968. <sup>7</sup> S. Thorarinsson, Geologische Rundschau, v. 57, 1967. <sup>8</sup> G. Bodvarsson, Physical Characteristics of Natural Heat Resources in Iceland (Proc. U. N. Conf. New Sources Energy), Rome, 1961. <sup>9</sup> G. Palmason, Iceland and Mid-oceanic Ridges, Reykjavik, 1967. <sup>10</sup> G. Palmason, Crystal Structure of Iceland from Explosion Seismology, Reykjavik, 1971. <sup>11</sup> Б. А. Мамырин, Б. Н. Шустров и др., ЖТФ, т. 42, № 12, 2577 (1972). <sup>12</sup> Э. К. Герлинг, Б. А. Мамырин и др., Геохимия, № 10, 1209 (1971). <sup>13</sup> В. И. Кононов, Б. Г. Поляк, ДАН, т. 214, № 1 (1974). <sup>14</sup> И. Н. Толстихин, Б. А. Мамырин и др., Очерки современной геохимии и аналитической химии, Сборн. к 75-летию А. П. Виноградова, «Наука», 1972, стр. 405. <sup>15</sup> Б. А. Мамырин, И. Н. Толстихин и др., Геохимия, № 11, 1396 (1972). <sup>16</sup> Ю. А. Шуколоков, Л. К. Левский, Геохимия и космохимия изотопов благородных газов, М., 1972, стр. 257.