УДК 550.361; 550.42; 551.24; 553.7

© Поляк Б.Г., Лаврушин В.Ю., Киквадзе О.Е., Иоффе А.И.

ИЗОТОПЫ ГЕЛИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ФЛЮИДАХ КАВКАЗСКОГО РЕГИОНА

Поляк Б.Г., Лаврушин В.Ю., Киквадзе О.Е., Иоффе А.И.

Геологический институт РАН, Москва

e-mail: polyak@ginras.ru

Суммированы результаты изучения изотопов гелия в подземных флюидах Кавказского региона, отличных по составу макрокомпонентов газовой фазы и тектонической приуроченности. Выявлены закономерности латеральных вариаций отношения ³Не/⁴Не и газогеохимические особенности разных структурных элементов региона.

Ключевые слова: изотопы гелия, подземные флюиды, углекислота, метан, минеральные источники, тепловой поток, тектонические структуры, Кавказ.

The results of He isotope researches in subsurface fluids of the Caucasus region differing in main components of gas phase and tectonic position are summarized. The relationships in lateral variations of ³He/⁴He values were revealed together with gas-geochemical features of different structural units.

Keywords: helium isotopes, subsurface fluids, CO_2 , CH_4 , mineral springs, background conductive heat flow, tectonic units, Caucasus.

Введение

Кавказский сегмент Альпийско-Гималайского подвижного пояса изобилует выходами разнообразных подземных флюидов, отличающихся по спектру и количеству растворенных солей и газов. Последние при разгрузке флюидов на поверхность Земли или даже местами в пластовых условиях образуют свободную фазу, составу которой многие исследователи придают генетический смысл. Этот состав В.И. Вернадский [1,2] считал основой для классификации подземных вод. Такой подход был развит в работах В.В. Иванова ([3] и др.), В.И. Кононова ([4] и др.)] и их последователей. Однако присутствие в подземных флюидах того или иного газа само по себе недостаточно для окончательных выводов о происхождении этих флюидов - во-первых, из-за того, что один и тот же газ может в разных случаях иметь разный генезис, и, во-вторых, потому что традиционная формулировка проблемы формирования подземных вод чересчур широка, объединяя проблемы происхождения самой воды, растворенных в ней газов и солей, в то время как все эти компоненты подземных растворов имеют, как правило, разные источники.

Вместе с тем, установлено [5-7], что тепловые параметры наиболее мощных гидротермальных систем типа Долины Гейзеров на Камчатке, Йеллоустонского парка США и т.п. не могут быть созданы одним лишь фоновым (региональным) кондуктивным тепловым потоком и требуют дополнительного теплового питания. Его могут обеспечить проникающие в недра таких систем глубинные магматические расплавы, или, как думал еще Э. Зюсс [8], ювенильные воды, никогда до этого не поступавшие в подземную гидросферу. Поэтому естественно было ожидать, что продукты вулканической и гидротермальной активности содержат вещественные (геохимические) следы этих теплоносителей.

Однако анализом элементного состава этих продуктов обнаружить такие следы нельзя, поскольку все элементы таблицы Менделеева уже присутствуют в земной коре, и лишь изотопные исследования открывают перспективы решения проблемы. Тем не менее, изучение в гидротермах изотопного состава главных элементов флюидов – водорода, кислорода, углерода, серы – не позволяет доказать присутствие в них ювенильного (мантийного) вещества [9]. Единственным компонентом подземных флюидов, в котором примесь такого вещества устанавливается однозначно, является гелий.

Типы и источники земного гелия Отношение концентраций легкого и тяжелого





Рис. 1. Типы и резервуары гелия в природе (по [10] и др.)

изотопов гелия ${}^{3}\text{He}/{}^{4}\text{He} = R$ в геологических объектах исключительно широко варьирует (рис. 1). Это обусловлено присутствием в земном гелии двух генетически различных компонентов. Один из них – радиогенный, образующийся в результате распада урана и тория и вызванной этим реакции ${}^{6}Li + n = {}^{4}He + {}^{3}H$ с последующим превращением ${}^{3}\text{H} - (\beta) - {}^{3}\text{He}$. Зная в породе (минерале) содержания U, Th и Li, можно вычислить равновесное им значение отношения ³Не/⁴Не. Если оно совпадает с измеренным, то это вне зависимости от величины *R* означает, что в данном образце присутствует только радиогенный гелий. При средних для земной коры содержаниях U, Th и Li равновесное ее веществу отношение R_{KOP} равно $\approx (2 \pm 1) \times 10^{-8}$; его называют каноническим радиогенным, а такой гелий – коровым ([10] и др.)

Если же измеренное в образце значение отношения R больше равновесного, это указывает на присутствие в нем, кроме радиогенного Не, гелия иного происхождения. Это первичный, или первозданный (*primordial*) гелий с $R\sim10^{-4}$, возникший при рождении Вселенной и присутствующий в космическом веществе. Он был захвачен Землей при ее аккреции и до сих пор не полностью ею потерян, несмотря на постоянную диссипацию в околоземное пространство. В объектах, генетически связываемых с дегазацией и диф-

ференциацией мантии, - газах действующих вулканов, океанических базальтах, ультраосновных ксенолитах и т.п. - встречены значения $R_{\rm MAH} \sim 10^{-5}$, показывающие, что ~10% такого гелия все еще составляет первичный компонент, хотя остальной гелий уже чисто радиогенный. В породах и минералах из-за особенностей их состава, структуры и происхождения величина *R* широко варьирует. Но из них гелий постоянно «убегает» в омывающие флюиды [11]. Там его изотопный состав осредняется в соответствии с вкладами из всех его источников и становится квазистационарной региональной меткой. При его изучении следует, однако, иметь в виду, что глубинные газы могут контаминироваться атмосферными (при смешении восходящих потоков флюидов с приповерхностными инфильтрационными водами, насыщенными воздухом, в котором $R_{\rm ATM} = 1.4 \times 10^{-6}$, или непосредственно - из-за некачественного отбора проб). Поэтому в измеренные значения R_{изм} следует вводить соответствующую поправку по общепринятым формулам (см. [12,13] и др.):

$$R_{\mu c n p} = [R_{\mu 3M} ({}^{4}He/{}^{20}Ne)_{\mu 3M} - R_{a TM} ({}^{4}He/{}^{20}Ne)_{a TM}] / [({}^{4}He/{}^{20}Ne)_{\mu 2M} - ({}^{4}He/{}^{20}Ne)_{a TM}].$$

Без учета этой поправки значение $R_{_{\rm H3M}} > R_{_{\rm KOP}}$ может быть ошибочно принято за признак примеси в таком гелии мантийного компонента.





Легенда: 1 – Скифская плита; 2 – Предкавказские передовые прогибы (ИК – Индоло-Кубанский, ТК – Терско-Каспийский); 3 – ороген Большого Кавказа (За – фланги, Зб – осевая зона); 4 – ороген Малого Кавказа;



5 – район КМВ; 6 – Кахетия; красные звезды – вулканы Эльбрус (Э) и Казбек (К)

Рис. 3. Флюктуации отношения ³Не/⁴Не, измеренного в газах месторождения Кизил-Дере, южный Дагестан (по [32]). Среднее значение R_{изм}=3.9×10⁻⁸, дисперсия s=0.3

Региональные особенности изотопного состава гелия на Кавказе

В Кавказском регионе исследования изотопов гелия в подземных флюидах начались раньше, чем в большинстве районов мира [14]. С конца 1980-х годов по настоящее время состав гелия в регионе изучается сотрудниками лаборатории тепломассопереноса Геологического института РАН. Результаты этих работ изложены во многих публикациях, в том числе в работах [15-25] и др. Они используются в данной статье вместе с изотопно-гелиевыми данными, полученными другими исследователями [26-30]. Всего в регионе проведено 422 измерения отношения ³He/⁴He=R в 262 пунктах. Значения R варьируют от 0.91×10⁻⁸ (в эманациях грязевого вулкана Чушка на Таманском полуострове) до (0.87-0.88)×10⁻⁵ (в газах источников Джилысу в центральном сегменте Большого Кавказа и Анкаван на Малом Кавказе, соответственно). Пункты отбора проб для определения изотопного состава гелия в газах региона показаны на рис. 2. В некоторых пунктах измерения R произ-





Рис. 4. Соотношение концентраций ³Не и ⁴Не в газах разных тектонических единиц (по [10] и др.). 1 – дорифейская Восточно-Европейская платформа; 2 – участки платформы, активизированные в палеозое (Донбасс, Днепрово-Донецкая впадина, Припятский прогиб); 3 – байкалиды (Тимано-Печорский регион); 4 – герциниды (Скифская плита); 5-6 – герциниды, активизированные в кайнозое: Большой Кавказ (5), Центральный Французский массив (6); 7 – вулканические районы Италии; 8 – Исландия

водились неоднократно. В газах источников Гильяр и Хзан-Ор южного Дагестана значения $R_{_{\rm H3M}}$ до 1978 г. и в 1980-х годах оказались одинаковыми и равными 5.3×10⁻⁸ [14,19,28]. На расположенном там же сульфидном месторождении Кизил-Дере в 1976 г. из одной из скважин, выводящей термальную воду, за 50 дней было взято 11 проб, давших также почти одинаковые результаты (рис. 3). Столь же постоянны значения $R_{_{\rm H3M}}$ в грязевых вулканах Тамани, где они отвечают коровому радиогенному гелию [21], и Кахетии (Восточной Грузии), где они указывают на примесь мантийного компонента [23]. В других местах относительные расхождения повторных измерений бывают и больше, но практически всегда оказываются в пределах того же порядка величины (см. [19]).

Постоянство величин *R* в одних и тех же пунктах, наблюдающееся на Кавказе, отмечается во многих районах мира – в Байкальской рифтовой зоне, Курило-Камчатском регионе, на Тянь-Шане, в Исландии, Мексике, Италии, Новой Зеландии, США и др. Оно показывает, что значения *R* в разных пунктах не связаны с флюктуациями изотопного состава гелия во времени, а отражают его латеральные (региональные, тектоногенные) различия.

Эти различия хорошо видны при сравне-

гелия в подземных флюидах. При очень широком разбросе концентраций каждого из них в пределах одного и того же крупного структурного элемента земной коры отношение этих концентраций, т.е. значение *R* в его газах остается практически одинаковым, коррелируя, в общем, с возрастом складчатости или тектономагматической активизации (рис. 4). Такая упорядоченность распределения значений отношения *R* аналогична той, что ранее была установлена в распределении плотности q фонового кондуктивного (глубинного) теплового потока ([33-37] и др.) и показана на рис. 5. Естественно, что между R и q тоже была найдена статистически достоверная положительная корреляционная связь. Она проявляется как в масштабах целых континентов (рис. 6), так и на более ограниченных участках, например, в Южных Апеннинах (рис. 7) или Байкальском рифте [42]. Однако в локальных (частных) значениях обоих параметров, например, в величинах *R* и *q* в одной и той же скважине, такой корреляции ожидать не следует. Измеренный в конкретной скважине кондуктивный теплопоток в той или иной мере отличается от глубинного из-за действия так называемых приповерхностных искажающих факторов. Этими факторами яв-

нии содержаний легкого и тяжелого изотопов

Науки о Земле



Рис. 5. Связь плотности кондуктивного теплового потока с возрастом тектоно-магматической активности (TMA) в континентальной коре: (a) – по [33]; (б) – кружки по [33]; ромбы по [34];треугольники по [35]; (в) – по [36]; (г) – по [37]



Рис. 6. Корреляция изотопного состава гелия в подземных флюидах и фонового кондуктивного теплового потока. А – частные значения *R* в подземных газах СССР и Исландии [38], значения *q* по [39]; Б – парные средние значения в тектонических провинциях Северной Евразии [40]

ляются рельеф дневной поверхности, климатические вариации температуры, теплофизическая неоднородность интервала измерений, конвективный теплоперенос подземными водами и т.п. Все эти факторы никак не влияют на изотопный состав гелия в подземных флюидах, вскрываемых данной скважиной; этот состав, т.е. величина *R* является фоновой характеристикой региона исследований, а не узко локального его пункта.

Выявление корреляционной связи *R* и *q* побудило использовать ее для оценки фонового (глубинного) теплового потока. Прогно-

стические ее возможности были проверены специальным исследованием Богемского массива [43]. В дальнейшем они были подтверждены и использованы М.Д. Хуторским, С.В. Лысак, А.Д. Дучковым и их сотрудниками при изучении теплового потока, соответственно, в Монголии, Прибайкалье, Восточном Тянь-Шане, Туве. Поэтому изотопный состав гелия в подземных флюидах, определяя ориентировочно фоновый тепловой поток, качественно характеризует геодинамическую обстановку в регионах, где измерения теплового потока были редки или вовсе отсутствуют, а другие





Рис. 7. Корреляция кондуктивного теплопотока и изотопного состава гелия в термах южной Италии [41]

геофизические исследования вообще не проводились.

С этой целью рассмотрим латеральные вариации изотопного состава гелия в газах Кавказского региона. Такие вариации численных геопараметров (типа $R, q, \Delta g$ и т.п.), частные значения которых определяются в отдельных географических пунктах, обычно отображают изолиниями. Форма этих изолиний далеко не всегда отражает латеральные неоднородности параметра, обусловленные геологически. Более объективно отображение латеральных вариаций *R* и т.п. путем их сглаживания методом скользящего окна или другими формальными процедурами. Одной из них является определение средних значений параметра в равноразмерных квадрантах координатной сетки - «метод лоскутного одеяла».

На рис. 8 приведена такая карта Кавказского региона с примыкающей частью Анатолии, построенная для квадрантов размером 1°×1°. Она демонстрирует хорошее согласие 2D-изображения вариаций отношения ³He/⁴He с тектоническим районированием региона. Наименьшие его средние величины, равные или очень близкие к каноническому радиогенному коровому значению, отличают предкавказские краевые прогибы – Индоло-Кубанский и Терско-Каспийский. Значительно выше они в мегантиклинории Большого Кавказа, где в гелии источников ясно видна примесь мантийного компонента. При этом средние значения R особенно велики в центральном сегменте мегантиклинория, охваченном плиоцен-четвертичным вулканизмом. В прилегающем антиклинории Малого Кавказа средние значения в некоторых $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ – квадрантах даже немного выше, чем на Большом Кавказе.

Построенная карта отражает в каждом квадранте цветом среднюю величину R_{cp} , а плотностью штриховки – разброс его частных значений, выраженный отношением s/R_{cp} (где $s=\sqrt{s^2}$ – величина дисперсии) и тем самым ориентировочно характеризует достоверность оценки R_{cp} . Строже точность этой оценки при нормальном распределении R вычисляется по формуле $\Delta R_{cp} = \pm 1.96s/\sqrt{n}$, где n – число наблюдений. Такая формальная оценка более или менее условна, так как при малом числе измерений R в данном квадранте интервал $\pm \Delta R_{cp}$ будет тем более узким, чем ближе результаты частных определений R, т.е.,



Рис. 8. Латеральные вариации осредненных по квадрантам 1°×1° значений отношения ³He/⁴He в газах Кавказского региона. Тектоническое районирование, согласно рис. 2. Красные звезды – вулканы Эльбрус (Э) и Казбек (К)

Таблица 1

| Тектоническая структура | Число измерений R, n | Дисперсия <i>R</i> , s | $R_{cp} \pm 1.96 \times s/\sqrt{n}$ |
|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| Скифская плита | 25 | 9.1 | 10.9 ± 3.6 |
| Предкавказские краевые прогибы | 60 | 4.8 | 6.1 ± 1.2 |
| Кавминводская седловина | 32 | 16 | 72.5 ± 5.6 |
| Ороген Большого Кавказа | | | |
| фланги | 97 | 56 | 53.9 ± 11.1 |
| осевая зона | 122 | 186 | 285 ± 33 |
| Ороген Малого Кавказа | 41 | 209 | 306 ± 64 |

Статистики распределения значений отношения ³Не/⁴Не=*R* в газах Кавказского региона

чем меньше дисперсия в анализируемой выборке. Тем не менее, в масштабе выбранной координатной сетки такая карта характеризует латеральные вариации R более объективно, чем произвольное разбиение исследуемой территории на подрайоны.

Но при совмещении результатов изучения изотопного состава гелия в газах крупного региона и его тектонического районирования, т.е. при группировке частных значений R в однородные выборки по принадлежности к той или иной структурно-тектонической единице, можно в этих единицах определить величины $R_{\rm cp}$ тоже достаточно объективно. Результаты такого подхода применительно к Кавказскому региону суммированы в таблице 1.

Приведенные в таблице 1 данные подтверждают выводы, сделанные из анализа карты, показанной на рис. 8. Минимальными значениями *R*, близкими к каноническому радиогенному, отличаются газы передовых прогибов, повышенными (примесью мантийного компонента) – газы орогена Большого Кавказа, а максимальными – его осевая зона и ороген Малого Кавказа на участках, охваченных плиоцен-четвертичным вулканизмом. Подчеркнем проявившиеся при таком подходе отличие Скифской плиты (без учета Кавминводской седловины) как от краевых прогибов, так и от орогена Большого Кавказа, а также сходство флангов последнего с районом Кавказских Минеральных Вод (КМВ).

В связи с этим напомним, что продолжение изотопно-гелиевой аномалии вокруг Эльбруса на север, в район КМВ и далее на Ставропольский свод, уже отмечалось в работе [24]. В ней было показано, что эта аномалия не может быть следствием поступления мантийного гелия в подземные воды только через



Науки о Земле



Рис. 9. Распределение величин отношения ³Не/⁴Не в газах вдоль простирания Большого Кавказа. Условные обозначения: 1 – предкавказские прогибы (ИКп – Индоло-Кубанский, ТКп – Терско-Каспийский); 2 – Нижне-Куринская впадина (НКв); 3 – Кахетия; 4 – Минераловодская седловина (район КМВ); 5 – мегантиклинорий Большого Кавказа (5а – фланги, 5б – осевая зона); 6 – мегантиклинорий Малого Кавказа

центральный вулканический канал Эльбруса, так что она обеспечивается привносом такого гелия из других магматических резервуаров. О существовании последних свидетельствуют лакколиты Пятигорья с возрастом 7.8-8.2 млн. лет [44] и повышение до 80 мВт/м² и более значений q на Ставропольском своде [45]. Последнее давно приписывалось влиянию глубинного магматизма, ареал которого считался значительно превосходящим площадь его поверхностных проявлений [33]. Совпадение геотермической и изотопной аномалий в этом районе Северного Кавказа подтверждает корреляцию теплового потока в континентальной коре с составом гелия в подземных флюидах [38,40].

Отраженные на рис. 8 и в таблице 1 региональные отличия значений отношения ³He/⁴He в разных структурных элементах исследуемого региона наглядно проявлены и на профиле вдоль простирания орогена Большого Кавказа (рис. 9). На этом профиле, помимо различий, описанных выше, в центральном сегменте орогена ясно видны два относительно разобщенных максимума значений отношения ³He/⁴He – Эльбрусский и Казбекский. На том же уровне, что в центральном сегменте Большого Кавказа, лежат и фигуративные точки газов Малого Кавказа, подчеркивая

сходство флюидного режима в этих районах, охваченных N-Q, вулканизмом. Это сходство еще заметнее, чем на рис. 8, при сравнении газов Большого Кавказа и Минераловодской седловины. В газах Кавказских Минеральных Вод, как и большинства источников Большого Кавказа, господствует углекислота, и многие исследователи считают ее чисто магматогенной. В этой связи стоит напомнить, что один из крупнейших отечественных гидрогеологов А.М. Овчинников, исследовавший и Кавказ, писал: «...Углекислые воды нельзя рассматривать только как результат современных процессов, так как СО, образуется и... при термометаморфизме горных пород... Связь углекислых терм с магматическими процессами... значительно сложнее, чем ее обычно представляют... Далека от истины идея «ювенильных» вод, которая была высказана Э.Зюссом в 1902 г. и которая еще до наших дней господствует в представлениях многих ...» [46, стр. 118-119].

Следует обратить внимание на близость фигуративных точек юго-восточной периклинали мегантиклинория Большого Кавказа (источники Хнов, Рычал-су, Гильяр и др.) и Терско-Каспийского прогиба в районе 48° в.д. Низкие значения *R* в этих пунктах говорят об отсутствии здесь молодого магматизма и,

Науки о Земле



Рис. 10. Соотношение измеренных отношений ³He/⁴He и ⁴He/²⁰Ne в газах Кавказского региона. Кривые на рисунках – линии смешения гелия из разных резервуаров по [10] и др.: ATM – атмосфера (³He/⁴He = 1.4×10⁻⁶, ⁴He/²⁰Ne≈0.3), кора (³He/⁴He = (1-3)×10⁻⁸, MORB (³He/⁴He ≈ 1.2×10⁻⁵), плюмы из нижней мантии (plumes, ³He/⁴He ≈ 5×10⁻⁵). А – структурные единицы: 1 – предкавказские прогибы; 2 – Кахетия; 3 – Минераловодская седловина (район КМВ); мегантиклинорий Большого Кавказа – 4 (осевая зона), 5 (фланги). Б – преобладающие (>50 % об.) компоненты газовой фазы: 1 – CO₂; 2 – CH₄; 3 – N₂; 4 – нет данных

вероятно, отражают генерацию газов в альпийской молассе, которая на окраине прогиба перекрыта надвинутым северным крылом Большого Кавказа (см. [47, рис.1]). С другой стороны, некоторые точки, характеризующие грязевые вулканы и углеводородные месторождения Нижне-Куринской межгорной впадины, лежат выше уровня значений ³He/⁴He в предкавказских прогибах. Но это нельзя считать признаком подмешивания мантийного гелия, так как эти точки, в отличие от остальных, отвечают измеренным значениям $R_{_{\rm ИЗМ}}$, не исправленным на влияние контаминации воздухом, которая преувеличивает оценку R. Рассмотрим эти оценки в газах разного состава.

Изотопный состав гелия и макрокомпоненты газовой фазы подземных флюидов Судя по положению фигуративных точек на рис. 9, вклад мантийного гелия в газовой фазе подземных флюидов Кавказского региона в большинстве проб совершенно очевиден. Не менее наглядно это проявляется в сравнении измеренных в пробах величин отношений ³He/⁴He и ⁴He/²⁰Ne (рис. 10). На рисунках 10А и 10Б нижняя пара кривых представляет графики смешения атмосферного гелия с коровым (каноническим радиогенным), в котором





Рис. 11. Соотношение изотопного состава и концентрации гелия в газах Кавказского региона. Условные обозначения: 1 – предкавказские прогибы; 2 – Кахетия; 3 – Минераловодская седловина (район КМВ); мегантиклинорий Большого Кавказа – 4 (осевая зона), 5 (фланги);

красный квадрат – резервуар MORB (${}^{3}\text{He}/{}^{4}\text{He} \approx 1.2 \times 10^{-5}$); голубой ромб – ATM (${}^{3}\text{He}/{}^{4}\text{He} = 1.4 \times 10^{-6}$; [He] = 5.24 ppm). Кривые – линии смешения He из разных резервуаров (в коре ${}^{3}\text{He}/{}^{4}\text{He} = (1-3) \times 10^{-8}$)

 $R=(2\pm1)\times10^{-8}$, а верхняя – с мантийным, причем одна из них характеризует участие газов из резервуара MORB (Mid Oceanic Ridge Basalts), т.е. базальтов срединно-океанических хребтов, а самая верхняя – из еще более глубоких недр, т.е. нижней мантии (mantle plumes, см. [48]).

На рис. 10,А фигуративные точки характеризуют разные структурные элементы Кавказского региона. На нем, как и на рис. 9, видно, что вклад мантийного гелия максимален в газах осевой зоны Большого Кавказа и ниже на флангах орогена, что газы орогена сходны с разгружающимися севернее его (на Минераловодской седловине) и южнее (в кахетинском участке Средне-Куринской впадины) и что фигуративные точки краевых прогибов и юго-восточной периклинали Большого Кавказа тяготеют к области смешения «кора–атмосфера».

На рис. 10,Б фигуративные точки дифференцированы по доминирующему компоненту газовой фазы, составляющему в ней более 50% об. Дефицит данных по азотным газам не позволяет усмотреть в распределении характеризующих их фигуративных точек никакой упорядоченности. Точки же, отвечающие метановым и углекислым газам, явно обособляются. Их распределение при

этом практически точно повторяет картину, проявленную на рис. 10А. Большинство точек метановых газов расположено в нижней части диаграммы, отвечая предкавказским прогибам и Нижне-Куринской впадине. Некоторые лежат несколько выше, возможно, из-за обогащения пород коллекторов литием [49]. От них заметно отличаются метановые эманации грязевых вулканов Кахетии (Восточной Грузии), в которых встречаются даже значения $R > R_{atm}$ (из чего, однако, вовсе не следует вывод о мантийном происхождении самого метана). В углекислых газах и экстремальные, и среднее значения *R* существенно выше, чем в метановых, однозначно указывая на вклад мантийного гелия. Но, как и в кахетинских грязевулканических эманациях, это отнюдь не доказывает мантийное происхождение газа-носителя, а лишь указывает на возможность наличия в нем некоторой доли мантийной составляюшей.

Выяснить эту возможность помогает сопоставление изотопного состава гелия с его концентрацией в исследуемых газах. На рис. 11 в расположении фигуративных точек виден их широкий разброс как по вертикали, так и по горизонтали. Вертикальный разброс точек на этой диаграмме отвечает представлению о смешении двух конечных членов: корового

Науки о Земле



Рис. 12. Соотношение отношений ³He/⁴He и CH₄/³He в газах Кавказского региона.
Условные обозначения: 1 – предкавказские прогибы; 2 – Нижне-Куринская впадина; 3 – Скифская плита;
4 – Кахетия; 5 – Минераловодская седловина (район КМВ); мегантиклинорий Большого Кавказа – 5 (осевая зона),
6 (фланги); кривая – модельная линия смешения резервуаров по [51]; черный квадрат – «кора» (CH₄/³He = 3×10¹³, ³He/⁴He = 1.4×10⁻⁸); красный ромб – «островодужная мантия» (CH₄/³He = 1.1×10⁶, ³He/⁴He = 8.7×10⁻⁶)

гелия с низким *R* и мантийного газа с высоким *R* и малой концентрацией гелия. Последняя в резервуаре MORB оценивается в 97±30 ppm при *R*=1.15×10⁻⁵ и CO₂/³He=(0.9±0.2)×10⁹ [50]. Но горизонтальная дисперсия точек на этой диаграмме обусловлена другими причинами [19].

Одна из них – фракционирование гелия и других газов в системе газ-вода из-за их разной растворимости. Смещение фигуративных точек вправо от тренда смешения мантийного и корового членов отражает обогащение газовой фазы подземных флюидов плохо растворимым гелием. Смещение же точек влево может быть связано с тем, что исследуемые флюиды ранее уже частично дегазировались с преимущественной потерей гелия. В обоих случаях изотопный состав гелия останется неизменным. Такое фракционирование кажется наиболее вероятной причиной больших колебаний [Не] в газах Кавказских Минеральных Вод при однообразных величинах *R*.

Другая возможная причина горизонтальной дисперсии фигуративных точек на рис. 11 – изменение концентраций макрокомпонентов газовой фазы, генерирующихся или расходующихся в коре (например, в результате трансформации рассеянного органического вещества или разложения/осаждения карбонатов). При этом ни изотопный состав гелия, ни его общее содержание во флюиде не изменяются, но в случае расхода (потери) макрокомпонентов соответствующие фигуративные точки окажутся правее теоретического тренда смешения мантийного и корового членов, а при добавке таких компонентов во флюиды - левее. Последнее ясно проявляется в положении на рис. 11 фигуративных точек как метановых, так и углекислых газов: и те, и другие почти все лежат левее тренда смешения. При этом фигуративные точки метановых газов нефтегазоносных структурных элементов лежат внутри или вблизи области канонических радиогенных значений ³Не/⁴Не, наглядно отражая коровый генезис СН₄. Содержание СО₂ в углекислых газах тоже оказалось более или менее избыточным по сравнению с ее концентрацией, отвечающей теоретическому тренду смешения. Это



Рис. 13. Грязевой вулкан Дашгил, Нижне-Куринская впадина (Азербайджан)

подтверждает правоту взглядов А.М. Овчинникова, процитированных выше. Доля мантийного компонента в общем количестве CO₂, судя по положению фигуративных точек относительно тренда смешения, гораздо меньше 100% – как правило, ниже 10%, а в большинстве случаев менее 1%.

К аналогичному выводу о резко подчиненной доле мантийного компонента в метане приводит предложенное в работе [51] определение отношения СН₄/³Не в газах с разным изотопным составом гелия. Результаты такого нормирования показаны на рис. 12. Из них следует, что в углекислых газах орогена Большого Кавказа доля мантийного компонента в метане не превышает 0.01% его общего количества. В метановых же газах Кахетии она колеблется в диапазоне 0.01-0.0001% [CH₄]_{общ}, как и на Скифской плите, а в нефтегазоносных предкавказских прогибах и Нижне-Куринской впадине опускается еще ниже, сопровождаясь близким к каноническому коровому радиогенным гелием. На рис. 13 виден образованный горящим метаном факел над одной из сальз азербайджанского грязевого вулкана Дашгил. В сопутствующем гелии отношение ³He/⁴He равно 5.8×10⁻⁸ [30], практически совпадая с каноническим коровым радиогенным значением.

В свете этих данных нельзя поддержать разделяемое некоторыми исследователями

представление о мантийном (абиогенном) происхождении месторождений углеводородов. Вместе с тем, такие данные не исключают в принципе присутствия углеводородов в «мантийном конечном члене», что отражено на рис. 12, а равно и возможности поступления в продукты деструкции органического вещества гелия с повышенным значением ³He/⁴He в молодых вулканогенно-осадочных отложениях, как это имеет место в «бассейне зеленых туфов» на японском о. Хонсю [52] и в других подобных ситуациях.

Предположения о мантийном генезисе углеводородных месторождений родственны упомянутым выше взглядам о существовании «ювенильных» вод и СО₂ и распространенным представлениям о «газовом дыхании Земли», или автономном потоке летучих (водорода, углекислоты и т.п.) из мантии. Однако последним в корне противоречит отмеченная ранее положительная корреляция изотопного состава гелия в подземных флюидах с фоновым кондуктивным тепловым потоком [38]. Эта корреляция отражает совместный вынос к поверхности Земли гелия, обогащенного ³Не, и глубинного тепла, т.е. тепломассопоток из недр. Его материальную природу вскрыла обнаруженная в Италии связь изотопных составов гелия и стронция в продуктах вулканической и гидротермальной деятельности отрицательная корреляция величин ³He/⁴He в



Рис. 14. Корреляция ³He/⁴He и ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в термах и вулканитах Италии. (А) – по [53], (Б) – по [54]

газах гидротерм и ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в вулканитах, распространенных вблизи этих гидротерм [53]. Подтвержденная там позже [54] и показанная на рис. 14, эта зависимость отражает процесс смешения мантийной и коровой компонент. Эта зависимость отчетливо проявляется и в других районах мира [55], указывая на перенос летучего Не и литофильного Sr из мантии в кору общим агентом – силикатным веществом.

Заключение

Исследование Кавказского региона позволяет заключить, что изотопный состав гелия в подземных флюидах подчеркивает, с одной стороны, их геохимическую специфику, отраженную в составе сопутствующих газов, а с другой – геотектоническую специфику вмещающих структур, обусловленную разновозрастной и разномасштабной тектономагматической активностью, связанной с внедрением в кору мантийного вещества.

Поэтому изучение в подземных флюидах изотопов гелия – универсальный ключ для решения кардинальных проблем в разных науках о Земле. В геохимии это позволяет идентифицировать резервуары (источники) вещества. В геофизике оно проливает свет на природу фонового кондуктивного теплового потока. В тектонике величина *R* служит индикатором активности геологической среды и специфической характеристикой конкретных геодинамических обстановок.

Работа поддержана Программой №8 фундаментальных исследований ОНЗ РАН «Взаимодействия геосфер: геофизические поля и массоперенос» и грантом РФФИ № 11-05-00590.



Список литературы

- Вернадский В.И. О классификации природных газов // Природные газы (сб. 2), М.–Л.: Союзгеолразведка, 1931, с. 10.
- 2. Вернадский В.И. О классификации и химическом составе природных вод // Природа, 1929, № 9, 735-758 [Избр. соч., т. IV, кн. 2, Москва, изд-во АН СССР, 1960, 591-606].
- Иванов В.В. Основные закономерности распространения и формирования термальных вод Дальнего Востока СССР // Вопросы формирования и распространения минеральных вод в СССР. М.: ЦНИИКиФ Минздрав СССР, 1960, 171-262.
- 4. Кононов В.И. Геохимия термальных вод областей современного вулканизма. М.: Наука, 1983, 212 с.
- 5. Аверьев В.В. О соотношении между гидротермальной и вулканической деятельностью // М-лы ко 2-му Всесоюзн. Вулканол. совещанию, Петропавловск-Камчатский, Дальневост. кн. изд-во, с. 251.
- 6. Vakin E.A., Polak B.G., Sugrobov V.M., Erlikh E.N., Beloussov V.I., Pilipenko G.F. Recent hydrothermal systems of the Kamtchatka // Geothermics, 1970, sp. iss 2, 1116-1132.
- Кононов В.И., Поляк Б.Г. Современная гидротермальная деятельность и особенности вулканизма Исландии // «Гидротермальный процесс в областях тектономагматической активности», М.: Наука, 1977, 21-31.
- 8. Suess E. Über heisse Quellen // Verhandlungen Gesel. Deutsch. Naturforsch. U.Aertzte, Leipzig, 1902, Bd/71(5), 133-151.
- 9. Кононов В.И., Поляк Б.Г. Проблема выявления ювенильной компоненты в современных гидротермальных системах // Геохимия, 1982, № 2, 163-177.
- 10. Мамырин Б.А., Толстихин И.Н. Изотопы гелия в природе. М.: Энергоиздат, 1981, 222 с.
- 11. Герлинг Э.К. Миграция гелия из минералов и пород // Тр. Радиевого ин-та им. В.Г.Хлопина АН СССР, 1957, т. 6, 64-87.
- Nagao K., Takaoka N., Matsubayashi O. Isotopic Anomalies of Rare Gases in the Nigorikawa geothermal area, Hokkaido, Japan // Earth Planet. Sci. Lett., 1979, vol. 44. no. 1, 82-90.
- 13. Giggenbach W., Sano Y., and Wakita H. Isotopic Composition of Helium and CO₂ and CH₄ Contents in Gases Produced along the New Zealand Part of a Convergent Plate Boundary // Geochim. Cosmochim. Acta, 1993, vol. 5, 3427-3455.
- 14. Матвеева Э.С., Толстихин И.Н., Якуцени В.П. Изотопно-гелиевый критерий происхождения газов и выявления зон неотектогенеза (на примере Кавказа) // Геохимия, 1978, № 3, 307-317.
- Поляк Б.Г., Каменский И.Л., Прасолов Э.М., Чешко А.Л., Барабанов Л.Н. Изотопы гелия в термоминеральных водах Приэльбрусья: ареал новейшего магматизма // XIV Симп. по геохимии изотопов, 19-21 окт. 1995, М.: изд. ГЕОХИ РАН., 1995, 165-166.
- 16. Поляк Б.Г., Лаврушин В.Ю., Каменский И.Л. Прасолов Э.М., Ильин В.А. Изотопы гелия в газах грязевых вулканов Тамани // Доклады РАН, 1996, т. 349, № 2, 249-252.
- 17. Поляк Б.Г., Каменский И.Л., Прасолов Э.М., Чешко А.Л., Барабанов Л.Н., Буачидзе Г.И. Изотопы гелия в газах Северного Кавказа: следы разгрузки тепломассопотока из мантии // Геохимия, 1998, № 4, 383-397.
- 18. Поляк Б.Г., Лаврушин В.Ю., Ингуаджиато С., Киквадзе О.Е. Изотопы гелия в газах минеральных вод Западного Кавказа // Литология и полезн. иск., 2011, № 6, 555-567.
- Polyak B.G., Tolstikhin I.N., Kamenskii I.N., Yakovlev L.E., Marty B., Cheshko A.L. Helium isotopes, tectonics and heat flow in the Northern Caucasus // Geochim. Cosmochim. Acta, 2000, vol. 64, No. 11, 1925-1944.
- Polyak B.G., Lavrushin V.Yu., Kamensky I.L. Mantle helium traces in the Elbrus–Kazbek sector of the Greater Caucasus and adjacent areas // Chemical Geology, 2009, 266, 57-66.
- 21. Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г., Прасолов Э.М., Каменский И.Л. Источники вещества в продуктах грязевого вулканизма (по изотопным, геохимическим и геологическим данным) // Литология и полезн. ископ., 1996, № 6, 625-647.
- 22. Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г., Стрижов В.П., Италиано Ф., Риццо А. Изотопно-гелиевый ареал Казбекского вулканического центра // Доклады РАН, 2007, т. 414, № 2, 239-242.
- 23. Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г., Покровский Б.Г., Копп М.Л., Буачидзе Г.И., Каменский И.Л. Изотопно-геохимические особенности грязевых вулканов Восточной Грузии // Литология и полезн. иск., 2009, № 2, 183-197.
- 24. Яковлев Л.Е., Поляк Б.Г. Природа изотопно-гелиевой аномалии в Северном Приэльбрусье // Вулканол. и сейсмология, 1997, № 6, 3-14.
- 25. Kikvadze O.E., Lavrushin V.Yu., Pokrovskii B.G., Polyak B.G. Gases from mud volcanoes of western and central Caucasus // Geofluids, 2010, vol. 10, 486-496.
- Алиев Ад. А., Кабулова А.Я. Изотопы гелия в газах грязевых вулканов Азербайджана // ДАН АзССР, 1980, XXXVI, 3, 52-56.
- 27. Якубов А.А., Григорьянц Б.В., Алиев А.Д. и др. Грязевой вулканизм Советского Союза и его связь с нефтегазоносностью. Баку: ЭЛМ, 1980, 165 с.
- 28. Газалиев И.М., Прасолов Э.М. О мантийной составляющей газовых струй Дагестана по изотопным данным // Докл. АН СССР, 1988, т. 298, № 5, 1218-1221.
- 29. Буачидзе Г.И., Мхеидзе Б.С. Природные газы Грузии. Тбилиси: Мецниереба, 1989, 155 с.

- 30. Дадашев Ф.Г., Джафаров С.А., Кабулова А.Я., Алекперов Э.Ф. Влияние геологических условий на изменение соотношения изотопов гелия в природных газах Азербайджана // Известия НАН Азербайджана, Науки о Земле, 2008, № 3, 3-11.
- Тектоническое районирование Большого Кавказа (Н.В. Короновский, 1995), http://geo.web.ru/ dynamo/ Caucasus/ Tectonic/rionskaya.html
- 32. Прасолов Е.М. Изотопная геохимия и происхождение природных газов. Ленинград, Недра, 1990. 283 с.
- 33. Поляк Б.Г., Смирнов Я.Б. Связь глубинного теплового потока с тектоническим строением континентов // Геотектоника, 1968, № 4, 3-19.
- Cermak V. Heat flow investigation in Czechoslovakia // Geoelectric and Geothermal Studies (A. Adam Ed.), 1976, Akad. Kiado, Budapest, 414-424.
- 35. Kutas R.I., Lubimova E.A., Smirnov Ya. B. Heat flow map of the European part of the USSR and its geological and geophysical interpretation // Geoelectric and Geothermal Studies (A. Adam Ed.), 1976, Akad. Kiado, Budapest, 443-449.
- 36. Sclater J., Jaupart C., Galson D. The heat flow through oceanic and continental crust and heat losses from the Earth // Review Geophys. and Space Phys., 1980, vol. 18. 269-311.
- 37. Vitorello I. Pollack H. On the variation of continental heat flow with age and thermal evolution of continents // Journ. Geophys. Res., 1980, vol. 85, 983-995.
- 38. Поляк Б.Г., Толстихин И.Н., Якуцени В.П. Изотопный состав гелия и тепловой поток геохимический и геофизический аспекты тектогенеза // Геотектоника, 1979, № 5, 3-23.
- Смирнов Я.Б. Тепловое поле территории СССР (пояснительная записка к картам теплового потока и глубинных температур в м-бе 1: 10 000 000), М.: ГУГК, 1980, 150 с.
- 40. Поляк Б.Г. Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры. М.: Наука, 1988, 192 с.
- Italiano F., Martelli M., Martinelli G., Nuccio P.M. Geochemical evidence of melt intrusions along lithospheric faults of the Southern Apennines, Italy: geodynamic and seismogenic implications // Journ. Geophys. Res., 2000, vol. 105, No. B6. 13569-13578.
- 42. Поляк Б.Г. Изотопы гелия в подземных флюидах Байкальского рифта и его обрамления (к геодинамике континентального рифтогенеза) // Российский журнал наук о Земле, 2000, т. 2, № 2. 109-136.
- 43. Поляк Б.Г., Прасолов Э.М., Чермак В. Мантийный гелий в «ювенильных» флюидах и природа геотермической аномалии Рудных гор // Доклады АН СССР, 1982, т. 263, № 3. 701-705.
- 44. Поль И.Р., Хесс Ю.С., Кобер Б., Борсук А.М. Происхождение и петрогенезис миоценовых трахириолитов (А-тип) из северной части Большого Кавказа // «Магматизм рифтов и складчатых поясов», М.: Наука, 1993, 109-124.
- 45. Geothermal Atlas of Europe (E. Hurtig Ed.-in-Chief), Potsdam: GeoForshungsZentrum., 1992.
- 46. Овчинников А.М. Гидрогеохимия. М.: Недра, 1970. 198 с.
- Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., Gorshkov A. The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision // Tectonophysics, 1989, vol. 161, 1-21.
- 48. Morgan W.J. Convection plumes in the lower mantle // Nature, 1971, v. 230, 42-43.
- Loosli H. H., Lehman B. E., Gautschi A., and Tolstikhin I. N. Helium isotopes in rocks, minerals, and related groundwaters // In: Proc. 8th Int. Symp. on Water-Rock Interaction (ed. Y. K. Kharaka and O. V. Chudaev), Balkema, Rotterdam, 1995, 31-34.
- 50. Marty B., Tolstikhin I.N. CO, fluxes from mid-ocean ridges, arcs and plumes. Chem. Geol., 1998, vol. 145, 233-248.
- 51. Jenden P.D., Hilton D.R., Kaplan I.R., Craig H. Abiogenic Hydrocarbons and mantle helium in oil and gas fields // In: The Future of Energy gases (Ed. D.G.Howell), U.S. Geol. Surv. Profess. Paper 157D, 1993, 31-56.
- 52. Sano Y., Tominaga T., Nakamura Y., and Wakita H. ³He/⁴He ratios of methane-rich natural gases in Japan // Geochem. J., 1982, vol. 16, 237-245.
- 53. Поляк Б.Г., Прасолов Э.М., Буачидзе Г.И., Кононов В.И., Мамырин Б.А., Суровцева Л.И., Хабарин Л.И., Юденич В.С. Изотопный состав Не и Аг в термальных флюидах Альпийско-Апеннинского региона и его связь с вулканизмом // Доклады АН СССР, 1979, т.247, 1220-1225.
- Parello F., Allard P., D'Alessandro W., Federico C., Jean-Baptiste P., Catani O.: Isotope geochemistry of the Pantelleria volcanic fluids, Sicily Channel rift: a mantle volatile end-member for volcanism in Southern Europe // Earth Planet. Sci. Lett., 2000., 180 (3/4), 325-339.
- 55. Поляк Б.Г. Природа массопотока из мантии в свете геотермических и изотопно-гелиевых данных // М-лы Всероссийского симпозиума «Флюидные потоки в земной коре и мантии» (26-28 февраля 2002 г., Москва) М.: изд. ИГЕМ РАН, 2002, 32-37.

