

УДК 550.41:551.2:551.3
DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art1

ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ВЗАИМОСВЯЗИ ИЗОТОПНЫХ ДАННЫХ ПО УГЛЕРОДУ И ГЕЛИЮ

Родкин М.В.^{1,2}

1 – Институт проблем нефти и газа РАН

2 – Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

E-mail: rodkin@mitp.ru

Аннотация. При анализе проблем нефтегенеза часто используется взаимосвязь изотопных отношений гелия $^3\text{He}/^4\text{He}$ и отношение концентраций метана и глубинного изотопа гелия ^3He . Значения $^3\text{He}/^4\text{He}$ характеризуют активность мантии, а отношение $\text{CH}_4/^3\text{He}$ как бы позволяет оценить долю мантийного метана. Совокупность точек $^3\text{He}/^4\text{He}$ и $\text{CH}_4/^3\text{He}$ трактуется как смешение мантийного газа (газа срединно-океанических хребтов) и биогенного газа. Результаты такого анализа часто полагают свидетельством малости доли глубинного газа в месторождениях УВ. Критика такой интерпретации была предложена рядом авторов. При этом было выявлено удивительное постоянство величин наклона линии предполагаемого смешения для весьма разных условий и составов газа. Но получаемый наклон отвечает зависимости $^3\text{He}/^4\text{He}$ и $\text{CH}_4/^3\text{He}$ от концентрации ^3He , и тогда график не несет информации об изучаемом процессе. Отмечается необходимость учета такой погрешности и приводятся иные свидетельства связи метана УВ месторождений с процессами в мантии.

Ключевые слова: изотопия гелия и углерода, региональные и глобальные зависимости, вклад глубинного фактора.

ON THE INTERPRETATION OF THE ISOTOPIC RELATIONSHIP DATA ON CARBON AND HELIUM

Rodkin M.V.^{1,2}

1 – Oil and Gas Research Institute RAS

2 – Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS

E-mail: rodkin@mitp.ru

Abstract. In analyzing the problems of oil and gas, the interrelation of helium isotope ratios $^3\text{He}/^4\text{He}$ and the ratio of concentrations of methane and helium deep isotope ^3He are often used. The $^3\text{He}/^4\text{He}$ values characterize the activity of the mantle, and the ratio $\text{CH}_4/^3\text{He}$ presumably allows to estimate the fraction of a mantle methane. The combination of $^3\text{He}/^4\text{He}$ and

$\text{CH}_4/{}^3\text{He}$ points is interpreted as a mixture of mantle gas (gas from the mid-ocean ridges) and biogenic gas. The results of such an analysis are usually relied us an evidence for the negligible share of deep gas in hydrocarbon fields. A number of authors proposed criticism of this interpretation. At the same time, an amazing constancy of the value of the slope of the proposed mixing line for very different conditions and gas compositions was revealed. However, this slope corresponds to the dependence of ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ and $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$ from the concentration of ${}^3\text{He}$, and then does not carry information about the process under study. It is noted that this circumstance have to be taken into account and other evidence is given of the connection of methane from hydrocarbon deposits with processes in the mantle

Keywords: helium and carbon isotopy, regional and global dependencies, the contribution of the deep factor.

Введение

Несмотря на интенсивные исследования и большую научную и практическую значимость проблемы, механизм образования промышленных скоплений УВ остается неясным. Неясной остается и роль глубинных факторов в процессе нефтидогенеза. Диапазон предложенных вариантов ответа чрезвычайно широк. В рамках классического варианта биогенной осадочно-миграционной теории нефтегенеза, этот процесс обусловлен длительным прогреванием содержащегося в осадочных толщах рассеянного органического вещества (РОВ). В рамках такого подхода определяющую роль играет сохранность нефти и наличие эффективных ловушек для сбора образовавшейся нефти. При этом роль глубинных факторов полагается минимальной. Согласно полярно противоположной модели, крупные УВ скопления являются продуктом их глубинного синтеза, и нефть выносится к поверхности восходящими потоками глубинного флюида. В этой схеме роль глубинных факторов оказывается определяющей.

Часто полагают, что соотношение доли глубинных и приповерхностных компонент УВ может быть оценено на основе изотопных данных, как предполагается, позволяющих разделить вещество на приповерхностное и глубинное, исходя из изотопных меток мантийных и приповерхностных биогенных УВ. Результаты такого сопоставления (рис. 1, см. приложение) обычно трактуются как указание на ничтожно малую долю глубинной компоненты в промышленных скоплениях УВ [1–4 и др.]. Заметим, что в [4] эта зависимость приведена в несколько иных координатах, и различие двух ее ветвей (см. обсуждение ниже) специально подчеркнуто.

Иная интерпретация той же эмпирически выявляемой зависимости (см. рис. 1) дается в серии работ [5–9 и др.]. В этих работах были указаны ряд некорректностей в распространенной трактовке изотопных соотношений гелия и углерода и выявлена [6–9] удивительная степень единообразия характера соотношения изотопного отношения гелия $^3\text{He}/^4\text{He}$ и отношения концентраций углерода и глубинного изотопа гелия $\text{C}/^3\text{He}$ в различных природных обстановках (газы УВ месторождений и грязевых вулканов, вулканические газы). Подчеркнем, что при этом рассматривались варианты содержания углерода и в виде CH_4 , и в виде CO_2 . Далее будет предложен новый подход к интерпретации этих важных результатов.

Принятые трактовки интерпретации изотопных данных и их критика

Анализ изотопных соотношений в большинстве случаев базируется на исследовании соотношения величин концентраций $\text{CH}_4/^3\text{He}$ и отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$, где второе отношение традиционно характеризует степень активности мантии. Соотношение же $\text{CH}_4/^3\text{He}$ кажется естественным использовать как характеристику отношения концентраций углерода метана и заведомо мантийной ^3He компоненты.

Типично получаемое эмпирическое соотношение и его обычная интерпретация представлены на рис. 1. Это соотношение и в более ранних [1–3], и в самых недавних работах [4] обычно трактуется как результат смешения глубинного (мантийного) и приповерхностного биогенного метана. При этом принимается, что мантийный конечный член характеризуется значениями $^3\text{He}/^4\text{He} = 6.2 \text{ Ra}$ (Ra – нормирующая компонента, отвечающая отношению изотопов гелия в атмосфере) и $\text{CH}_4/^3\text{He} = 1.1 \cdot 10^6$, типичными для мантийных газов зон срединно-океанических хребтов. Биогенный приповерхностный конечный член принимается равным $^3\text{He}/^4\text{He} = 0.01 \text{ Ra}$ и $\text{CH}_4/^3\text{He} = 3 \cdot 10^{13}$, что типично для спокойных тектонических условий ($^3\text{He}/^4\text{He} = 0.01 \text{ Ra}$) и для приповерхностного биогенного метана с отношением концентраций $\text{CH}_4/^3\text{He} = 3 \cdot 10^{13}$. При этом полагается, что на основе такого подхода можно оценить долю глубинного метана в образцах, в частности, в месторождениях УВ. Такая доля полагается равной 100% для конечного члена, отвечающего газам срединно-океанических хребтов, и убывающей до 0.1 части на миллион (0.1 ppm) и менее для типичных биогенных газов. Данные по газам различных УВ месторождений обычно располагаются между этими крайними значениями, что как бы позволяет оценить долю присутствия в них мантийного метана (см. рис. 1). Соответствующие метки показаны на рис. 1. Такая схема оценки приводит к выводу о

пренебрежимо малой доле глубинного метана в большинстве месторождений УВ. Отсюда заключается, что глубинный вклад в более тяжелые УВ тем более ничтожен.

Отмечавшаяся в [7–10] погрешность описанной трактовки состоит в отождествлении возможного глубинного компонента УВ месторождений с условиями срединно-океанических хребтов. Такая трактовка сильно и неоправданно сжимает возможную вариабельность понятия «глубинные углеводороды». Действительно, в обстановках срединно-океанических хребтов месторождений УВ не обнаружено, концентрации метана относительно малы и носят случайный характер. В этих условиях развиты преимущественно углекислые газы. Важнее, однако, то, что глубинная нижнекоревая компонента УВ может быть исходно биогенной, попавшей в нижнюю кору или в верхнюю мантию в результате надвиговых деформаций (в частности, через рециклинг корового материала через зону субдукции). Такие УВ, оказавшиеся затем в приповерхностных горизонтах, по своему изотопному составу будут биогенными (несущими соответствующую изотопную метку), но с тектонических позиций – глубинными.

Заметим, что и чисто формально, график на рис. 1 не отвечает классической схеме простого смешения двух конечных членов. Этот график даже очень грубо не может рассматриваться как прямолинейный. Он явным образом состоит из двух ветвей, одна отвечает наклонной ветви графика, другая – субвертикальной. Особенно четко это видно на позднейших, более полных подборках данных, как, например, в работе [4]. Во второй субвертикальной ветви нормированное ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ (R/Ra) изотопное отношение гелия практически постоянно (изменяясь примерно в диапазоне 5–8), а отношения концентраций $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$ малы, не зависят от гелиевого отношения и изменяются в пределах до 4 порядков величины и даже более. При этом значения гелиевого отношения отвечают активизированной мантии с проявлениями вулканизма, а малые и сильно варьирующие отношения $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$, по-видимому, отвечают чисто случайным притокам метана.

Большой интерес традиционно привлекает наклонная ветвь графика. Как видно на рис. 1, наклонная ветвь соотношения $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$ и ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ отвечает тенденции противонаправленного изменения обоих этих отношений примерно на 3 порядка величины. Далее будет предложена новая интерпретация происхождения этой ветви графика. Решающим обстоятельством для появления такой интерпретации послужили

собранные и представленные в цикле работ [6–9 и др.] данные по различным регионам и типам газов.

В работах [6–9] приведены многочисленные графики, аналогичные рис. 1, но для разных ситуаций – для метана различных УВ месторождений, грязевых вулканов и даже для углекислых газов, когда вместо CH_4 рассматривались концентрации CO_2 . Во всех этих случаях наблюдался единообразный характер изменения, аналогичный наклонной ветви соотношения ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ (R/R_a) и $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$ на рис. 1. На рис. 2 представлен набор таких зависимостей для случая метана УВ месторождений. Легко видеть почти постоянство угла наклона соотношения ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ (R/R_a) и $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$ при существенно различном среднем уровне отношения концентраций $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$. Обсудим эти два важных эмпирических наблюдения.

Прежде всего отметим, что единообразие величин наклона эмпирических соотношений ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ (R/R_a) и $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$ может и не иметь непосредственно геологического (геохимического) смысла, а являться формальным следствием того, что сопоставляются значения ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ и $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$, где и в правую, и в левую части соотношения входят концентрации ${}^3\text{He}$; то есть, как бы исходно можно ожидать появления обратно пропорциональной зависимости $y = 1/x$. Явного проявления такой зависимости следует ожидать, если диапазон изменения концентраций ${}^3\text{He}$ достаточно велик, вернее, не существенно меньше диапазона изменений концентраций ${}^4\text{He}$ и CH_4 . В этом случае систематические изменения ${}^3\text{He}$ будут превалировать и определять общий характер облака точек « ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$, $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$ ». Так и имеет место в действительности: при относительно стабильном значении отношения ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ значения концентрации ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ по отдельности могут меняться в разных пробах на 3–4 порядка величины и даже более [6, 9]. Как видно на рис. 1, 2, теоретически ожидаемый в этом случае наклон облака точек с тангенсом $\beta = -1$ хорошо согласуется с эмпирически получаемыми наклонами кривых, аппроксимирующих соответствующие облака точек. Завершая обсуждение этого наблюдения отметим, что широкий (иногда до 4 порядков величины и даже более) диапазон изменения в соседних пробах концентраций ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, при существенно более стабильном (в данной тектонической провинции) значении отношения ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$, по-видимому, порождается тем, что смешение изотопов гелия происходит на значительной глубине в земной коре, а концентрации ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ в подземных газах связаны с вариациями проницаемости верхних горизонтов земной коры для потоков

гелия. Сильная связь концентраций гелия с положением разломов отмечалась многими авторами.

Перейдем к обсуждению второго вопроса – о существенно различном уровне отношения концентраций $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$ в разных нефтегазоносных провинциях. Как видно на рис. 2, это соотношение сильно и систематически уменьшается при переходе от наиболее молодых зон субдукции к более старым и далее к месторождениям УВ в тектонически стабильных блоках земной коры. Такая тенденция вряд ли может быть случайной (даже и при относительно случайной подборке данных по немногим регионам). Собственно, получается, что при одинаковой степени активности мантии (задаваемой, в среднем, концентрацией глубинного изотопа гелия ${}^3\text{He}$), концентрации метана с увеличением возраста провинции (и, видимо, возраста месторождения УВ) значительно уменьшаются. Мы затрудняемся предложить окончательное объяснение этому важному эмпирическому наблюдению. В качестве рабочей гипотезы можно предположить, что с увеличением возраста месторождения происходит прогрессирующая потеря наиболее легких летучих УВ, конкретно метана.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что давно ставшее привычным утверждение, что анализ эмпирической связи отношений ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ и $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$ позволяет охарактеризовать состав УВ месторождений в плане соотношения доли глубинных и приповерхностных УВ, оказывается более чем спорным. Причем спорным не только в плане величины этого отношения (как уже ранее указывалось в [5, 7–9 и др.]), но также и в плане качественного выявления существования связи состава УВ и мантийных процессов. Ситуация оказывается более сложной, и чтобы выявить такую связь сначала необходимо исключить роль сильной изменчивости концентрации ${}^3\text{He}$.

Примером, демонстрирующим, тем не менее, существование связи между составом метана УВ месторождений и активностью мантии, может являться слабая, но статистически значимая корреляция ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ и изотопного состава углерода метана $\delta^{13}\text{C}$ (рис. 3). Единообразная регрессия между этими характеристиками была обнаружена для трех рассмотренных областей: провинции Зеленых Туфов Японии, Калифорнии и для севера Западной Сибири. Не ясно, однако, как можно использовать это соотношение для количественной оценки доли глубинной и приповерхностной компоненты в месторождениях УВ.

Заключение

Данные по изотопии углерода и гелия не позволяют в настоящее время оценить долю глубинной (нижнекоревой или верхнемантийной) компоненты в составе УВ месторождений. Показано, что обычно используемое для этой цели соотношение $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$ и ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ не позволяет оценить величину вклада глубинной компоненты не только на количественном уровне, ввиду некорректного выбора конечного глубинного члена смешения [5–9], но также и на качественном уровне.

Наличие связи между активностью мантии (характеризуемой изотопным отношением гелия ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$) и изотопным составом метана ($\delta^{13}\text{C}$) продемонстрировано существованием корреляции между этими характеристиками в трех исследованных молодых УВ провинциях. Не ясно, однако, можно ли таким путем оценить вклад глубинной компоненты количественно, а не только показать ее присутствие на качественном уровне.

Критерием разделения приповерхностных и глубинных УВ является для нас тектоническое положение соответствующих блоков земной коры – источников УВ. УВ, образованные на основе вещества РОВ, но в результате погружения толщ осадков в зонах надвига (в частности, в зонах субдукции) на уровень средней и нижней коры или в верхнюю мантию полагаются глубинными.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Энергетика, динамика и дегазация Земли, теоретические и экспериментальные основы инновационных сейсмоакустических технологий исследования геологической среды и контроля за объектами нефтегазодобычи», № АААА-А16-116021510125-7).

ЛИТЕРАТУРА

1. Jenden P., Hilton D., Kaplan I., Craig H. Abiogenic hydrocarbons and mantle helium in oil and gas fields // The Future of Energy Gases. U.S. Geological Survey Professional Paper. 1993. Vol. 1570. P. 31–56.
2. Poreda R.J., Jeffrey A.W.A., Kaplan I.R., Craig H. Magmatic helium in subductionzone natural gases // Chemical Geology. 1988. Vol. 71. P. 199–210.
3. Pinti D.L., Marty B. Noble gases in oil and gas fields: origins and processes // Fluids and Basin Evolution. Miner. Ass. Canada Short Course. 2000. Vol. 28. P. 160–196.

4. *Tolstikhin I.N., Ballentine C.J., Polyak B.G., Prasolov E.M., Kikvadze O.E.* The noble gas isotope record of hydrocarbon field formation time scales // *Chemical Geology*. 2017. Vol. 471. P. 141–152.

5. *Родкин М.В.* Рециклинг углерода в зонах субдукции и роль процессов рециклинга в образовании месторождений УВ в преддуговых и задуговых бассейнах // *Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений*. М.: ГЕОС, 2002. С. 221–253.

6. *Валяев Б.М., Дрёмин И.С.* Природа процессов нефтегазообразования и нефтегазонакопления: углеводородные флюиды и первичный гелий // *Георесурсы, геоэнергетика, геополитика*. 2014. Вып. 2(10). 25 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (Дата обращения 14.11.2018).

7. *Валяев Б.М., Дрёмин И.С.* Углерод-гелиевая изотопно-геохимическая система: тренды разнообразия и единства генезиса углеводородных флюидов и месторождений // *Георесурсы, геоэнергетика, геополитика*. 2015. Вып. 1(11). 25 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (Дата обращения 14.11.2018).

8. *Валяев Б.М., Дрёмин И.С.* Изотопно-гелиевые показатели геодинамических обстановок процессов нефтегазообразования и нефтегазонакопления // *Георесурсы, геоэнергетика, геополитика*. 2016. Вып. 1(13). 15 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (Дата обращения 14.11.2018).

9. *Валяев Б.М., Дрёмин И.С.* Глубинные источники углеводородов грязевых вулканов и нефтегазовых месторождений. *Георесурсы, геоэнергетика, геополитика*. 2016. Вып. 3(15). 18 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (Дата обращения 14.11.2018).

10. *Родкин М.В., Рукавишникова Т.А.* Очаг нефтеобразования как неравновесная динамическая система – модель и сопоставление с эмпирическими данными // *Геология нефти и газа*. 2015. № 3. С. 63–68.

ПРИЛОЖЕНИЕ

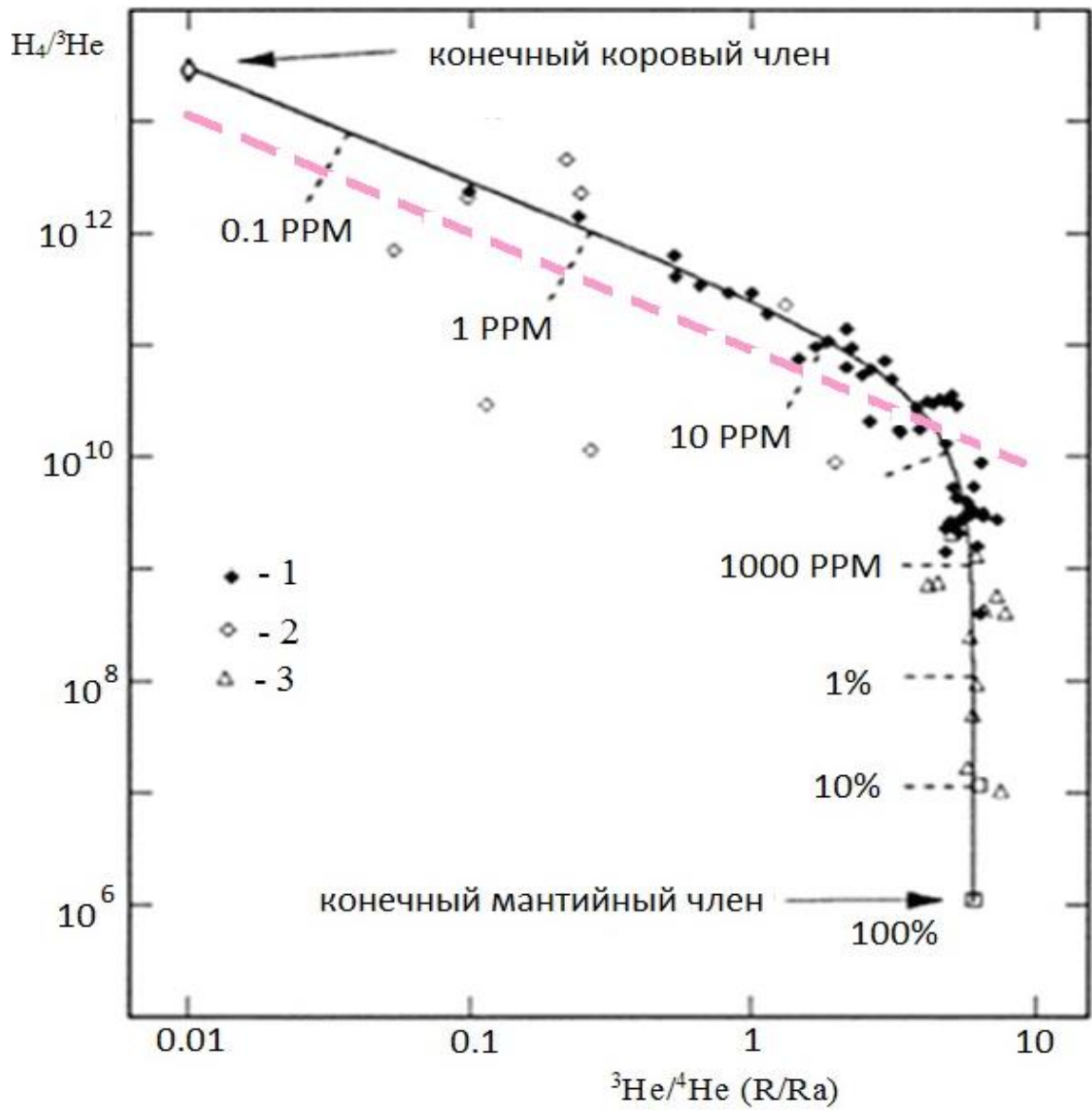


Рис. 1. Доминирующая модель смешения метана корового и мантийного источников [1, 8]: 1 – регион Green Tuff (Япония), 2 – другие зоны субдукции, 3 – Камчатка; пунктирной прямой показан наклон соотношения $y=1/x$

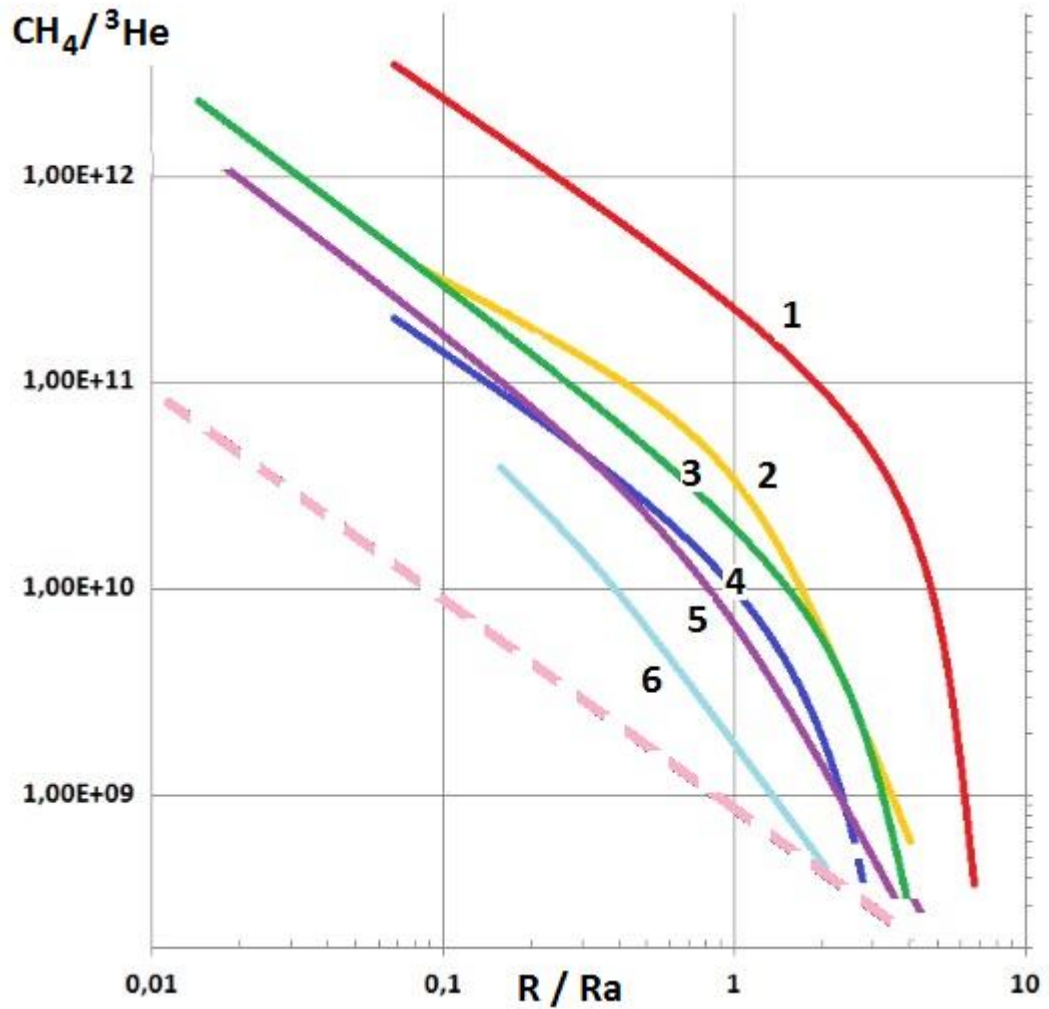


Рис. 2. Тренды мантийно-корового взаимодействия различных нефтегазоносных и грязевулканических регионов и групп регионов ([7] с добавлениями): 1 – нефтегазовые месторождения Японии, 2 – нефтегазовые месторождения Новой Зеландии, 3 – нефтегазовые месторождения Калифорнии, 4–6 – различные бассейны Китая, Бразилии и Западной Сибири; пунктирной прямой показан наклон с тангенсом угла равным -1

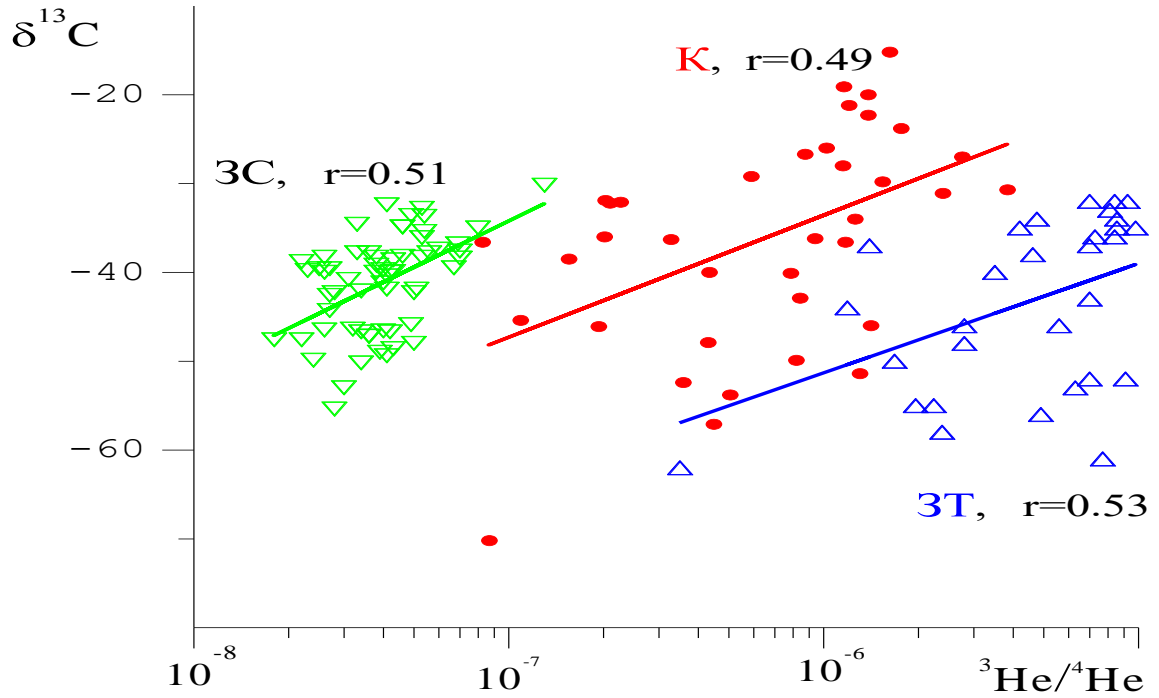


Рис. 3. Зависимость между углеродом метана и гелием (по их изотопным соотношениям) для месторождений газа провинции зеленых туфов в Японии (ЗТ), Калифорнии (К) и севера Западной Сибири (ЗС); даны значения коэффициентов корреляции [10]