

УГЛЕРОД-ГЕЛИЕВАЯ ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА: ТРЕНДЫ РАЗНООБРАЗИЯ И ЕДИНСТВА ГЕНЕЗИСА УГЛЕВОДОРОДНЫХ ФЛЮИДОВ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Б.М. Валяев, И.С. Дрёмин
ИПНГ РАН

Вступление

В современных концепциях эволюции Земли и моделях глобальных геодинамических процессов задействованы разные механизмы мантийно-корового взаимодействия, связанные с рециклингом (переработкой) корового материала. При исследовании мантийных процессов помимо геофизических и петрологических, важное место занимают изотопно-геохимические методы исследования, в особенности при изучении глубинных флюидно-газовых систем. В исследованиях генезиса водно-углекислых флюидов, связанных с магматическими, вулканическими и гидротермальными процессами, широко используется гелиевая (отношение изотопов $^3\text{He}/^4\text{He}$) изотопная система. Легкий изотоп гелия ^3He рассматривается в качестве первичного, вошедшего в состав Земли при ее формировании и до сих пор сохранившегося в недеплетированной части мантии Земли. Его соотношение с коровым радиогенным изотопом гелия ^4He используется в качестве ключевого индикатора для диагностики и дифференциации мантийных и мантийно-коровых тектонических и магматических процессов.

В диагностике генезиса и дифференциации глубинных флюидно-газовых систем совместно с гелиевой изотопной системой используется также углерод-гелиевая изотопно-геохимическая система. В этой второй системе оценивается отношение числа атомов углерода в молекулах его природных газов (CO_2 , CH_4) к числу атомов легкого изотопа (первичного мантийного) гелия – ^3He , то есть показатель $\text{C}/^3\text{He}$.

В статье [1] нами были представлены результаты широкого обобщения углерод-гелиевых изотопно-геохимических данных для метана нефтегазовых месторождений в нефтегазоносных регионах России, Китая, США, Японии, Новой Зеландии и других стран. Данные обобщения отражены на двойной диаграмме (рис. 1). Оси этой диаграммы представлены в изотопно-гелиевой ($^3\text{He}/^4\text{He}$) и углерод-гелиевой изотопно-геохимической ($\text{C}_{\text{CH}_4}/^3\text{He}$) системах. Как следует из диаграммы, нефтегазовые месторождения характеризуются разнообразием значений изотопно-гелиевого отношения (ИГО) $^3\text{He}/^4\text{He}$ в

пределах трех порядков величин и углерод-гелиевого отношения (УГО) $C/{}^3\text{He}$ – в пределах пяти порядков величин.

Как оказалось [1], для шестнадцати регионов вулканической и гидротермальной активности аналогичного рода диаграмма, построенная нами для характерного для них глубинного флюида – углекислоты, имеет близкие интервалы изменения УГО для CO_2 с УГО для CH_4 на диаграмме нефтегазовых месторождений. Генезис углекислоты вулканов, фумарол и гидротерм всеми исследователями связывается с глубинными мантийно-коровыми процессами, с рециклингом корового материала. В нашей интерпретации [1, 22], подобно углекислоте, генезис метана получил близкого рода трактовку. Смена типа дегазации с водно-углекислотной на углеводородную связана с переходом обстановок генерации глубинных флюидов от окислительных к восстановительным при ослаблении магматической активности.

Однако мантийный (магматический) конечный член в современных моделях мантийно-корового смешения (рис. 2) принимается для метана ($C_{\text{CH}_4}/{}^3\text{He}$) как величина, равная 10^6 [4, 8, и др.], в отличие от мантийного члена $C_{\text{CO}_2}/{}^3\text{He}$ для MORB, средняя величина которого равна $2 \cdot 10^9$. В такой интерпретации мантийному (магматическому) метану отводится незначительная или ничтожная роль в формировании нефтегазовых месторождений. Видимо, с этим связано и недостаточно широкое использование в нефтегазовой практике исследований изотопного состава гелия, хотя в методологии изотопно-гелиевых исследований работы российских специалистов были и остаются основополагающими (Б.А. Мамырин, И.Н. Толстихин, В.П. Якуцени, Б.Г. Поляк, Э.М. Прасолов, И.Л. Каменский и др.).

Спектр новых геофизических и геологических данных (включая результаты разбуривания глубоких недр) позволил детализировать связи распространения нефтегазовых месторождений с глубинными разломами и корово-мантийными неоднородностями (аномалиями). Аномальная энергетика и глубинные корни флюидно-нефтяных систем с особой отчетливостью проявились в гигантских масштабах и неравномерностях традиционного и нетрадиционного нефтегазоаккумуляции, в сверхвысоких аномалиях пластовых (флюидных) давлений и температур. Томографические исследования показали, что корни геодинамических процессов, управляющих зарождением и развитием осадочных (нефтегазоносных) бассейнов, располагаются в верхней мантии или прослеживаются глубже вплоть до ядра Земли.

Становится вполне очевидным, что значимость (роль) мантийных процессов (глубинной энергетики и глубинных флюидов) в процессах нефтегазообразования и нефтегазонакопления по-прежнему недооценивается. Назрела необходимость в альтернативной интерпретации изотопных данных, накопленных при исследованиях в гелиевой и углерод-гелиевой изотопно-геохимических системах, в согласии с результатами новейших геодинамических и петрологических исследований, а также с материалами по глубинному генезису углеводородных флюидов.

Разнообразие углерод-гелиевых трендов

Обобщенные изотопно-гелиевые и углерод-гелиевые изотопно-геохимические данные отражают разнообразие обстановок генерации углеводородных флюидов и условий формирования нефтегазовых месторождений. Нами были предприняты попытки дальнейших исследований природы этого разнообразия. Уже на сводной диаграмме (рис. 1) проявляются полосы данных (по ряду регионов), которые отражают отчетливую корреляцию параметров (отношений) на осях диаграммы. Эти полосы–тренды сопоставимы с кривыми смешения (mixing curve) в двухкомпонентных моделях смешения кора-мантия на двойных углерод-гелиевых изотопно-геохимических диаграммах для CO₂ глубинных флюидов вулканической и гидротермальной деятельности. Анализ природы этих трендов заслуживает особого внимания.

Наиболее прост построенный нами тренд (рис. 3) для области Хуjiaweizi бассейна Songliao (Восточный Китай). В сущности, он подобен тренду, представленному на рис. 6 из статьи [24]. По мнению авторов этой статьи, в разрезе исследуемой нефтегазоносной области обособляются два интервала: глубинный и приповерхностный. Абиогенная, связанная с магматическими процессами природа углеводородов в вулканогенных отложениях низов разреза подтверждается близмантийными значениями отношения $C_{CH_4}/^3He$ и тяжелым изотопным составом углерода метана ($\delta^{13}C > -30\%$), инверсией изотопного состава углерода алканов ($\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2 > \delta^{13}C_3$). По мнению авторов статьи [24], сильная (strong) корреляция между $C_{CH_4}/^3He$ и $^3He/^4He$ свидетельствует о том, что газы в исследуемой области образованы при смешении между коровым и магматическим конечным членами. Причем, рассматривается не смешение биогенных углеводородов с мантийным гелием. В глубинном интервале метан оказывается магматическим или абиогенным. В статье [24] в подтверждение глубинной природы углеводородов в средней

коре отмечается разуплотненный интервал (линза-body), с которым ассоциируется источник глубинных углеводородов.

Тренд по месторождениям депрессии Dongying бассейна Bohai Bay составлен по материалам статьи [10]. Эта депрессия характеризуется преобладанием нефтяных месторождений, в газах которых чаще встречается CO_2 по отношению к метану. В этой связи основной акцент в статье [10] сделан на выяснение природы CO_2 . На основании данных по изотопному составу углерода (преобладают значения в интервале $\delta^{13}\text{C}$ от -3 до -9‰) и гелия эти авторы приходят к выводу, что наряду с мантийной распространена также углекислота, связанная с разложением карбонатов и преобразованием органического вещества. Углерод-гелиевые данные на двойной диаграмме $\text{C}_{\text{CO}_2}/^3\text{He}-^3\text{He}/^4\text{He}$ не укладываются в двухкомпонентную кривую (тренд) смешения конечных членов (мантийного и корового), и авторы склоняются к трехкомпонентной модели смешения по источникам углерода для CO_2 . По данным статьи этих авторов [10], УГО для метана на построенной нами двойной диаграмме формируют тренд (рис. 4а). Особенностью тренда является его продолжение в область низких значений УГО для CH_4 (до 10^7 и менее), в область (рис. 4б), где главным газовым компонентом, ассоциирующимся с ^3He , становится уже не CH_4 , а CO_2 . При этом отношение $\text{C}_{\text{CO}_2}/^3\text{He}$ характеризуется мантийными (MORB) значениями (в интервале от $6 \cdot 10^8$ до $4 \cdot 10^9$).

Тренд на рис. 5а подобен тренду (рис. 2 в [16]), нами выполнена частичная замена условных обозначений. Этот тренд представляет особый интерес, так как в отличие от трендов по небольшим рифтовым бассейнам Восточного Китая базируется на данных по месторождениям субдукционных зон бассейнов Тайваня, Новой Зеландии, Индонезии, Филиппин, Таиланда, острова Барбадос. По мнению авторов статьи [16], тренд является двухкомпонентной кривой смешения двух конечных членов: корового метана с низким ИГО $^3\text{He}/^4\text{He}$ и магматического компонента с высоким ИГО $^3\text{He}/^4\text{He}$, в котором метан отсутствует или его количества незначительны. При этом «коровый» метан является биогенным или термогенным. Авторы статьи [16] отмечают также, что изменение концентраций и отношений $^4\text{He}/\text{CH}_4$ и $\text{CH}_4/^3\text{He}$ более чем на два порядка величин (в месторождениях Японии по отношению к месторождениям Аляски) свидетельствует о крайней гетерогенности мантийных обстановок по летучести кислорода f_{O_2} , концентрациям гелия и углерода в этих регионах. В статье [16] отмечается различие двухкомпонентных кривых смешения трендов бассейнов Sacramento (Калифорния) и

Green Tuff (Япония). Отметим и тождество субдукционного тренда (рис 2 в [16]) с трендом бассейна Sacramento [15]. В статье [16] также обсуждается двойная диаграмма и тренд для CO_2 (рис. 4 в [16]). Отмечается большой разброс значений УГО для CO_2 , включая крайне низкие значения $1 \cdot 10^7 - 6 \cdot 10^7$. Столь низкие значения УГО для CO_2 авторы связывают с резко различной растворимостью CO_2 и He в базальтовых расплавах и геотермальных флюидах. Однако эти аномалии низких значений на рис. 5б легче и проще объясняются низкими концентрациями CO_2 в этих объектах и сменой главного газового компонента с CO_2 на CH_4 .

Небольшой бассейн Taranaki, площадью 100000 км² на западном побережье Северного острова Новой Зеландии, характеризуется присутствием значительных концентраций CO_2 в нефтяных и газовых месторождениях. На двойной углерод-гелиевой диаграмме, построенной нами (рис. 6), тренд корреляции для метана проявляется ярко. В статье [11] эта диаграмма не рассматривается и ее авторы не обсуждают двух- и трехкомпонентные модели смешения. Генезис углеводородов и углекислоты они связывают с термическими преобразованиями органического вещества. Лишь для месторождений Maui и Paritutu с высоким и преобладающим содержанием CO_2 в газах и высокими ИГО, достигающими соответственно 3,8 R_a и 4,8 R_a авторы допускают привнесение гелия и, возможно, CO_2 из мантии или магматических очагов, с которыми связаны проявления андезитового вулканизма.

На углерод-гелиевой изотопно-геохимической диаграмме (рис. 7а) представлен тренд УГО $\text{C}_{\text{CH}_4}/^3\text{He}$ для метана нефтегазовых месторождений Японии. В сущности, он совпадает с полосой УГО для суммы углеродистых газов $\text{C}_{\text{CH}_4+\text{CO}_2}/^3\text{He}$ (рис. 7б из [23]), поскольку концентрации CO_2 в месторождениях Японии, в основном, незначительны. Как следует из подписи к рис. 7б в полосе (тренде) оказываются месторождения в вулканокластических осадочных породах (резервуарах) региона Green Tuff, тогда как более низкие значения УГО оказываются характерными для преддуговых и задуговых бассейнов Японии. Авторы статьи [23] отмечают, что для вулканокластических резервуаров ИГО (до $9,37 \cdot 10^{-6}$) и УГО близки к мантийным. В итоге метан более глубокого резервуара «Green Tuff» отнесен к магматическому типу (наиболее интенсивно вулканизм проявился в среднем миоцене). В осадочных комплексах на меньших глубинах разнообразие изотопного состава углерода и гелия в метане объясняется смешением двух его разновидностей – магматического и биохимического конечных членов.

Последний из рассматриваемых нами трендов занимает особое положение (рис. 8). В отличие от всех остальных, в нем суммированы данные не по нефтегазовым месторождениям, а по сквозным разгрузкам углеводородов (в основном, метана) в атмосферу и морские воды. Этот тренд базируется на диаграмме, опубликованной В.Ю. Лаврушиным в монографии [4], а ранее – в статье [14]. Отметим, что в полосу-тренд для CH_4 на углерод-гелиевой изотопно-геохимической диаграмме (рис. 8), составленной В.Ю. Лаврушиным по данным пяти грязевулканических регионов, гармонично вошли добавленные нами данные по грязевым вулканам еще пяти регионов [7, 12–13, 17, 21], включая дельту р. Нил (Египет). В интерпретации В.Ю. Лаврушина «мантийная составляющая не вносит ощутимого вещественного вклада в формирование грязевулканических флюидов и вообще скоплений углеводородов» [4, с. 220] и «Флюиды грязевых вулканов имеют коровое происхождение, генетически связанное с осадочным циклом преобразования органического вещества» [4, с. 245]. Для подтверждения этих выводов используется «универсальная» нормированная по мантийному (магматическому) CH_4 кривая смешения (рис. 2 из [8]). Однако в статье [8] отмечается, что значение конечного магматического члена может и отличаться от значения 10^6 . Согласно [23], близкие к средним значениям $\text{C}/^3\text{He} = 2 \cdot 10^9$ в мантийном резервуаре характерны и для УГО CH_4 вулканического резервуара Green Tuff.

Тренды мантийно-корового взаимодействия

Рассмотренные нами тренды совмещены на рис. 9. Материалы, использованные при их построении, заимствованы из разных опубликованных работ. Авторы этих работ дали свою трактовку и видение природы метана, углеводородных газов и флюидов в рамках интерпретации имевшихся геологических, геофизических и изотопно-геохимических данных, с акцентом на изотопию гелия и углерод-гелиевые соотношения. Их построения разнообразны, в определенной мере противоречивы; возможность и необходимость дополнительного анализа данных и альтернативных построений очевидны.

Что представляется неожиданным на сводном рисунке с трендами (рис. 9)? Прежде всего, это – удивительная упорядоченность трендов между собой, учитывая разнообразие регионов, по которым они построены. Не менее удивительна и упорядоченность внутри каждого из трендов, если учесть, что тренд по зонам субдукции включает шесть регионов, а тренд по грязевым вулканам – десять регионов. Линии трендов фиксируют в каждом из них корреляцию между CH_4 , ^4He и ^3He . Очевидно, что корреляция между столь разными

по генезису компонентами должна быть «организована» каким-то одним фактором. Для данных по вулканам и гидротермам тренды CO_2 на двойной углерод-гелиевой диаграмме получили объяснение в рамках модели смешения мантийного (или магматического) и корового конечных членов (носителей CO_2 и гелия с разным изотопным составом). В этих трактовках и модели роль «организующего» фактора отводилась глубинным процессам (магматизму), включавшим переработку (рециклинг) корового вещества. То есть, «смешение» конечных членов источников (корового и мантийного) углерода образующейся CO_2 происходило под контролем тех же магматических процессов, в которые привносился или в которых мобилизовывался гелий (мантийный и коровый) разного изотопного состава.

В приложении к генезису метана и углеводородных флюидов модель смешения неизбежно должна давать сбои. Предполагается отдельный генезис компонентов конечных членов с последующим их смешением при формировании залежей и месторождений. Для месторождений Японии и бассейна Songliao в трактовках авторов статей [23–24] участие в смешении магматического (абиогенного) метана аргументировано, но вторым конечным членом («коровым») привносится термогенный или биохимический метан. Для месторождений зон субдукции [16] в коровом конечном члене радиогенный ^4He поступает вместе с биохимическим и термогенным метаном, а привнесение мантийного ^3He с продуктами магматизма не сопровождается существенным привнесением метана. В трактовке В.Ю. Лаврушина и др. [14], как и в построениях для бассейна Taranaki, абиогенный (мантийный, магматический) метан, в сущности, отсутствует, а мантийная (метаморфогенная) углекислота может вносить [11] вклад лишь при наиболее высоких значениях ИГО ($^3\text{He}/^4\text{He}$).

Выявившаяся на рис. 9 упорядоченность трендов может быть объяснена с развиваемых нами позиций, если в качестве «организующего» фактора принять геодинамические режимы, контролирующие мантийно-коровое взаимодействие с переработкой (рециклингом) корового и мантийного вещества. Привлечение рециклинга корового и мантийного (особенно, литосферного) материала позволяет объяснить корреляцию изменения соотношений $^3\text{He}/^4\text{He}$ и $\text{CH}_4/^3\text{He}$ по простиранию трендов. «Смешение» источников вещества происходит, но в процессах, характеризующихся интенсивной флюидизацией при незначительной степени плавления; не в магматических, а во флюидизированных очагах с преобладанием метасоматических процессов,

иницированных, видимо, потоками водорода [5–6, 3]. Предлагаемая нами модель мантийно-корового взаимодействия, в сущности, в другом плане рассматривалась многими исследователями [9, 18–20] в моделях трехкомпонентного смешения, в построениях по углекислоте вулканических и гидротермальных процессов.

Мантийно-коровое взаимодействие и инверсия состава углеродистых газов

Выполненное нами обобщение данных в углерод-гелиевой изотопно-геохимической системе позволило выявить довольно неожиданную близость интервалов изменения ИГО и УГО для CO_2 вулканов и гидротерм, и для метана нефтегазовых месторождений, и грязевулканических флюидов. Как показано нами ранее [1–2], изотопные поля на двойной углерод-гелиевой диаграмме для двух типов глубинной дегазации (CO_2 – CH_4) во многом совмещены, перекрываются. Углерод-гелиевые тренды, рассматриваемые в нашей статье, демонстрируют переходы от одного типа дегазации (CH_4) к другому (CO_2). Эти переходы происходят при достижении максимальных значений ИГО $^3\text{He}/^4\text{He}$ для нижних концов каждого из трендов. Количество CO_2 достигает в низах трендов для месторождений бассейнов: Songliao – 93,1%; Bohai Bay – 99,41%, зон субдукции – 71,9%, грязевых вулканов – 74,4%; Taikanaki – 74,5%; Японии – 74%. Наиболее ярко эта тенденция проявляется для месторождений бассейна Bohai Bay (рис. 4а, б). На рис. 4б отчетливо проявляется еще одна тенденция: смена главного компонента газовой фазы от CH_4 к CO_2 в низах тренда ведет к уменьшению УГО для CH_4 до значений менее 10^8 и даже менее 10^6 , связанному со снижением концентрации CH_4 . При этом природа метана не изменилась, он остался продуктом мантийно-корового взаимодействия. Но принципиально изменился характер мантийно-корового взаимодействия: восстановительные условия сменились окислительными. В таких условиях ожидать от флюидов, генерированных в окислительных условиях (обстановки магматизма и вулканизма), ощутимого углеводородного вклада в формирование нефтегазовых месторождений не приходится. В статье [23] приведены результаты расчетов, показывающих сдвиг в генерации магматических углеродистых газов (к CH_4 или к CO_2) в зависимости от температур, давления $P_{\text{H}_2\text{O}}$, летучести кислорода f_{O_2} . Последняя связана с буферирующими минеральными ассоциациями.

Как видно из рис. 1 и рис. 9, для глубинных (мантийно-коровых) углеводородных флюидов, участвующих в формировании нефтегазовых месторождений, характерны значения УГО ($C_{\text{CH}_4}/^3\text{He}$) более $3 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$. В этой связи следует еще раз отметить, что

использование в качестве конечного мантийного (магматического) для CH_4 члена значения УГО Японского вулкана Usu с величиной $\leq 10^6$ на «универсальной» кривой смешения (рис. 2) ведет к занижению масштабов участия глубинных мантийно-коровых углеводородных флюидов (метана) в формировании нефтегазовых месторождений более чем на три порядка величин, то есть, такое использование неправомерно. Это заключение наглядно подтверждают материалы по гидротермальным газам Японии. В составе данных газов главными компонентами являются либо CO_2 , либо N_2 . В связи с низкими концентрациями метана (до 0,016%) УГО для CH_4 в углекислых и азотных газах падает ниже значения 10^6 .

Выводы

1. Разнообразие генезиса углеводородных флюидов и месторождений проявляется в изменчивости изотопно-гелиевого отношения ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ в пределах трех порядков величин и в изменчивости углерод-гелиевого отношения $\text{C}_{\text{CH}_4}/{}^3\text{He}$ – в пределах пяти порядков величин (на соответствующей двойной углерод-гелиевой изотопно-геохимической диаграмме).

2. В разнообразии полос данных и линий трендов на диаграмме $\text{C}_{\text{CH}_4}/{}^3\text{He} - {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ отражается также разнообразие геодинамических и структурно-тектонических обстановок мантийно-корового взаимодействия с преобразованием рециклируемого гетерогенного корового и мантийного вещества.

3. Упорядоченное распределение разных по генезису компонентов (CH_4 , ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$) в полосах-трендах труднодостижимо в ходе смешения этих компонентов как продуктов различных процессов и обстановок. Такое распределение достигается, видимо, при энергетическом воздействии единого глубинного (эндогенного) фактора, роль которого может быть отведена водороду ядра Земли.

4. Для метана как главного газового компонента в нефтегазовых месторождениях и глубинных (мантийно-коровых) флюидах отношение числа атомов $\text{C}_{\text{CH}_4}/{}^3\text{He}$ *превышает* значение 10^8 , варьируя в интервале величин $10^8 - 10^{13}$.

5. В рамках построений по генезису нефтегазовых месторождений суммарное поле отношений $\text{C}_{\text{CH}_4}/{}^3\text{He} - {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ на двойной диаграмме не аппроксимируется в целом «универсальной» двухкомпонентной кривой в моделях мантийно-корового смешения. При изучении генезиса углеводородных флюидов и месторождений перспективным

представляется использование мультитрендовых моделей рециклинга с переработкой вещества при мантийно-коровом взаимодействии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 14-05-00869.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Валяев Б.М., Дрёмин И.С.* Природа процессов нефтегазообразования и нефтегазонакопления: углеводородные флюиды и первичный гелий // Электрон. науч. журн. «Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика», 2014. Вып. 2 (10). 25 с.). – Режим доступа: www.oilgasjournal.ru
2. *Валяев Б.М., Дрёмин И.С.* Региональные неравномерности распространения скоплений и ресурсов углеводородов (геодинамические и изотопно-геохимические аспекты) // Геология морей и океанов: Материалы XX Междунар. конф. (школы). М.: ГЕОС, 2013. Т. 2. С. 25–28.
3. *Готтих Р.П., Писоцкий Б.И.* Глубинные восстановленные флюидные системы в процессах нефтеобразования и нефтенакпления // Фундаментальные проблемы геологии и геохимии нефти и газа и развития нефтегазового комплекса России. М.: ГЕОС, 2007. С. 55–65.
4. *Лаврушин В.И.* Подземные флюиды большого Кавказа и его обрамления. М.: ГЕОС, 2012. 348 с.
5. *Летников Ф.А.* Синергетические аспекты проблемы образования глубинной нефти // Электрон. науч. журн. «Глубинная нефть», 2013. Том 1, № 6. С. 790–810. – Режим доступа: journal.deeroil.ru
6. *Маракушев А.А., Маракушев С.А.* Образование нефтяных и газовых месторождений // Литология и полезные ископаемые. 2008. № 5. С. 505–521.
7. *Baciu C., Caracausiu A., Etiop G., Italiano F.* Mud volcanoes and methane seeps in Romania: main features and gas flux // Annals of geophysics. 2007. Vol. 50, № 4. P. 501–511.
8. *Jenden P.D., Hilton D.R., Kaplan J.R., 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.
9. *Halldórsson S.A., Hilton D.R., Troll V.R., Fischer T.P.* Resolving volatile sources along the western Sunda arc, Indonesia // Chemical Geology. 2013. Vol. 239. P. 263–282.
10. *Liuping Zhang, Aiguo Wang, Zhijun Jin.* Origins and fates of CO₂ in the Dongying Depression of the Bohai Bay Basin // Energy exploration & exploitation. 2011. Vol. 29, № 3. P. 291–314.
11. *Lyon G.L., Giggenbach W.F., Sano Y.* Variations in the Chemical and Isotopic Composition of Taranaki Gases and Their Possible Causes // New Zealand Petroleum Conference Proceedings, 1996. Vol. 10. P. 171–178.
12. *Mazzini A., Etiop G., Svensen H.* A new hydrothermal scenario for the 2006 Lusi eruption, Indonesia. Insight from gas geochemistry // Earth and planetary science letters. 2012. Vol. 317–318. P. 305–318.

13. *Motyka R.J., Poreda R.J., Jeffrey A.W.A.* Geochemistry, isotopic composition and origin of fluids emanating from mud volcanoes in the Copper River basin, Alaska // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1989. Vol. 53, № 1. P. 29–41.
14. *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. Vol. 266. P. 57–66.
15. *Poreda R.J., Jenden P.D., Kaplan I.R., Craig H.* Mantle helium in Sacramento basin natural gas wells // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1986. Vol. 50. P. 2847–2853.
16. *Poreda R.J., Jeffrey A.W.A., Kaplan I.R., Craig H.* Magmatic helium in subduction-zone natural gases // *Chemical Geology*. 1988. Vol. 71. P. 199–210.
17. *Prinzhofer A., Deville E.* Origins of hydrocarbon gas seeping out from offshore mud volcanoes in the Nile delta // *Tectonophysics*. 2012. 10 p.
18. *Ray M.C., Hilton D.R., Munoz J. et al.* The effects of volatile recycling, degassing and crustal contamination on the helium and carbon geochemistry of hydrothermal fluids from the Southern Volcanic Zone of Chile // *Chemical Geology*. 2009. Vol. 266. P. 38–49.
19. *Sano Y., Marty B.* Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs // *Chemical Geology*. 1995. Vol. 119. P. 265–274.
20. *Snyder Gl., Poreda R., Hunt A., Fehn U.* Regional variations in volatile composition: isotopic evidence for carbonate recycling in the Central American volcanic arc // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2001. Vol. 2. 25 p.
21. *Tsanao Frank Yang, Sheng-Rong Song, Yue-Gau Chen, Cheng-Hong Chen, Tsung-Kuei Liu.* Geochemical precursors of fluid samples before and after 1999 earthquake swarms in SW Taiwan // National Taiwan University. 2012. 10 p.
22. *Valyaev B., Dremmin I.* Recycling of crustal matter and the processes of mantle-crust interaction in the genesis of hydrocarbon fluids // Book of abstracts of International Conference on Gas Geochemistry 2013. Patras, Greece, 1–7 September 2013. [Patras, Greece], 2013. P. 32.
23. *Wakita H., Sano Y., Urabe A., Nakamura Y.* Origin of methane-rich natural gases in Japan: formation of gas fields due to large scale submarine volcanism. *Applied Geochemistry*. 1990. Vol. 5, № 3. P. 263–278.
24. *Zhijun Jin, Liupung Zhang, Yang Wang, Yongqiang Cui, Katherine Milla.* Using carbon, hydrogen and helium isotopes to unravel the origin of hydrocarbons in the Wujiaweizi area of the Songliao Basin, China // *Episodes*. 2009. Vol. 32, № 3. P. 167–176.

ПРИЛОЖЕНИЕ

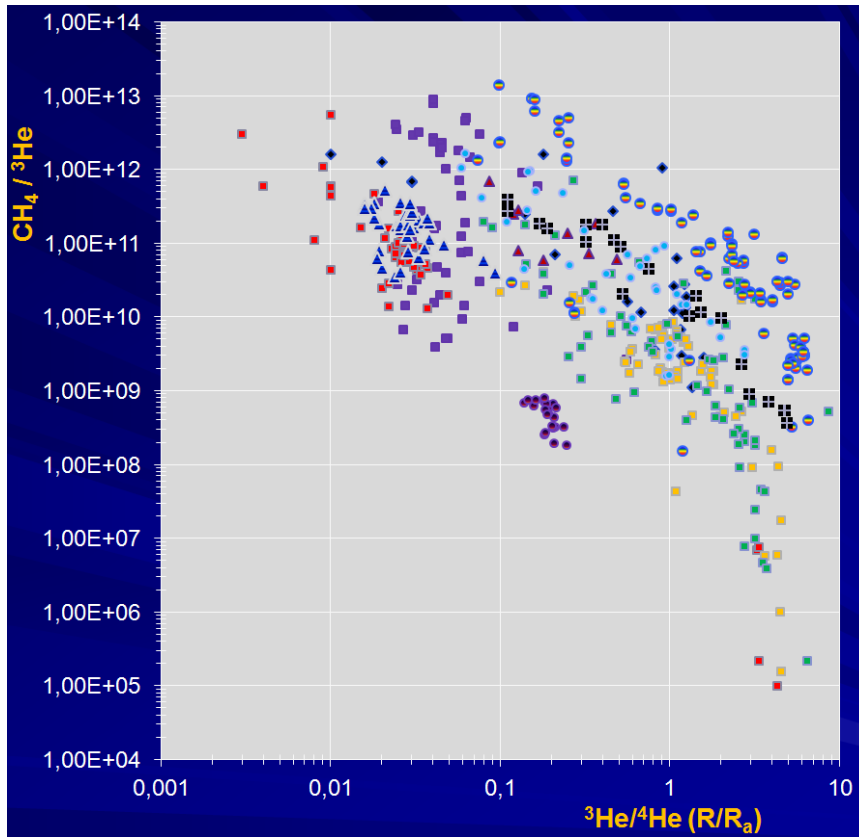













Рис. 1. Суммарная диаграмма соотношений в изотопно-геохимической углерод-гелиевой ($\text{CH}_4/{}^3\text{He}$) и изотопно-гелиевой (${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$) системах для метана месторождений нефтегазоносных бассейнов различных регионов (Valyaev, Dremin, 2014)

Использованные данные: Прасолов, 1990; Ballentine et al., 2002; Dai JinXing et al., 2008; Jenden et al., 1988; Jenden et al., 1993; Liu Quanyou et al., 2008; Lyon et al., 1996; Ni Yunyan et al., 2009; Poreda et al., 1986; Prinzhofer et al., 2010; Quanyou Liu et al., 2012; Sano et al., 1982; Wakita, Sano, 1983; Wakita et al., 1990; Yuenian Zhu et al., 2000; Zhijun Jin et al., 2009

Условные обозначения:  – месторождение Portiguar (Бразилия);  – нефтегазоносный регион Tarim (Китай);  – нефтегазоносные регионы Ordos, Sichuan (Китай);  – нефтегазоносный регион Songliao (Китай);  – нефтегазоносный регион Bohai Bay (Китай);  – нефтегазоносный регион Yinggehai (Китай);  – нефтегазовые месторождения Японии;  – нефтегазовые месторождения Новой Зеландии;  – нефтегазовые месторождения Западной Сибири;  – нефтегазовые месторождения Калифорнии (США);  – нефтегазовые месторождения Канзаса, Оклахомы, Техаса (США)

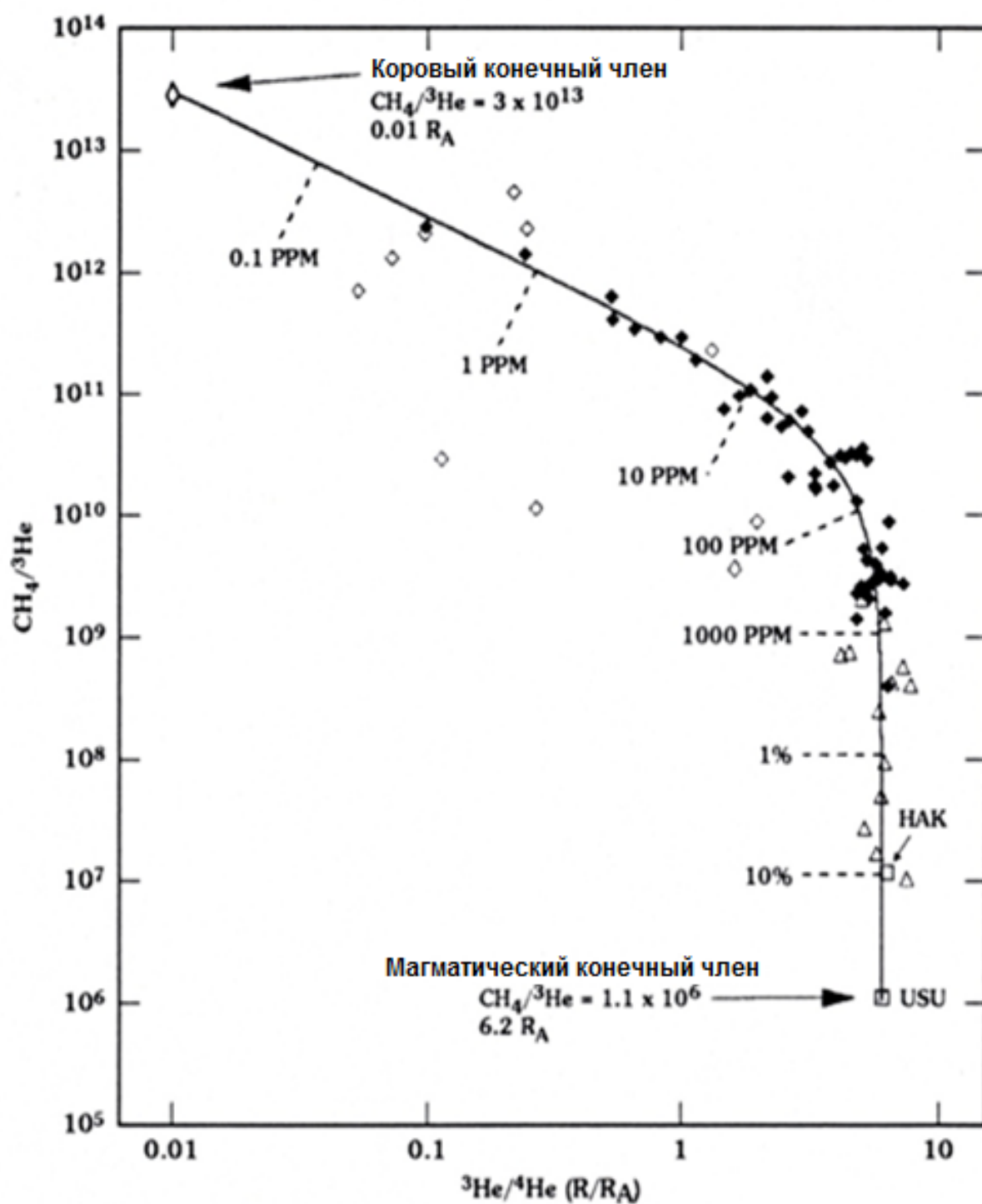


Рис. 2. Модель смешения для гелия и метана в природных газах Японии (Jenden et al., 1993; с изменениями по Н. Craig and Y. Horibe)

Условные обозначения:

◆ – Регион Green Tuff (Япония); ◇ – другие области; △ – полуостров Камчатка

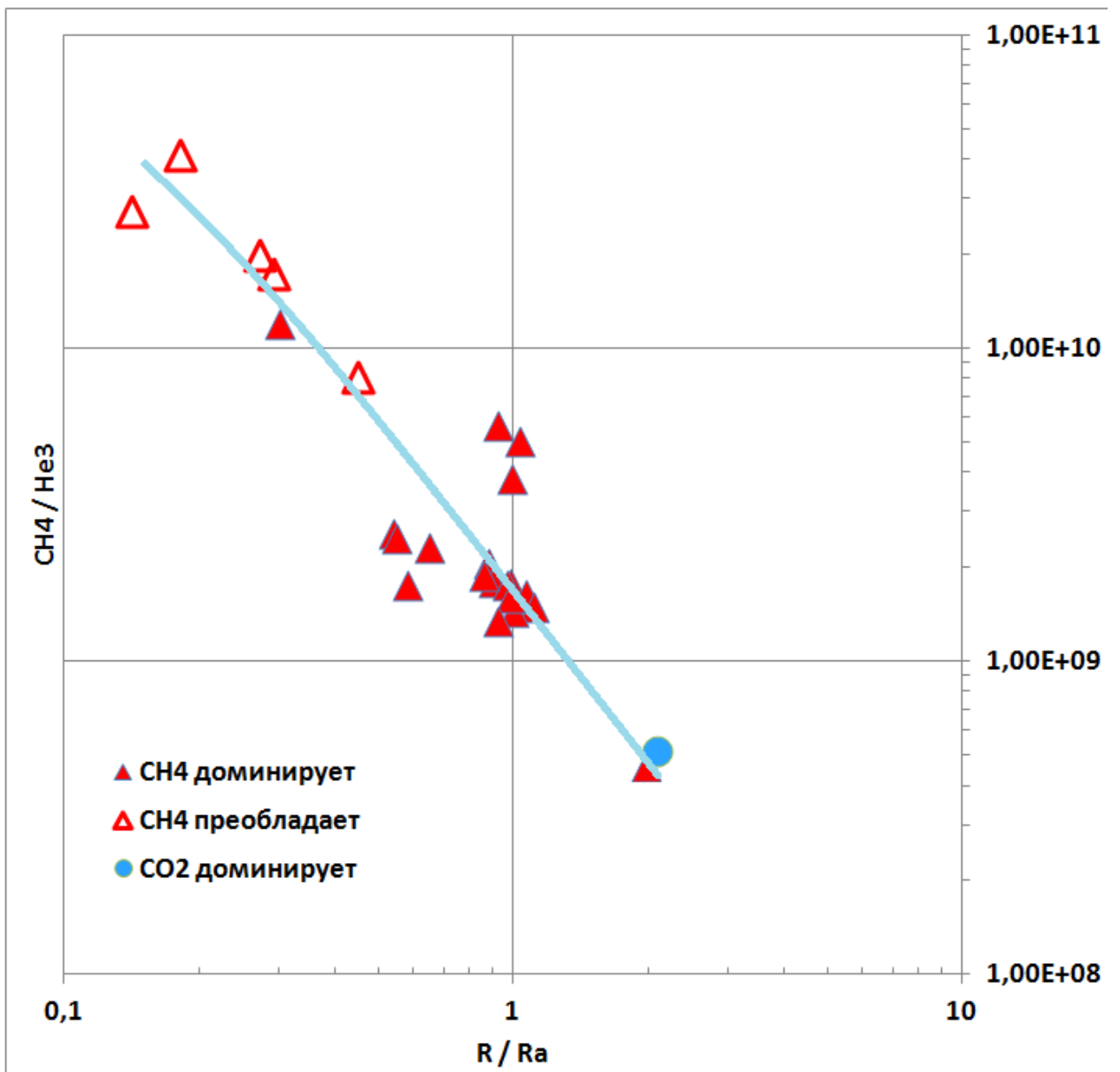


Рис. 3. Тренд мантийно-корового взаимодействия (нефтегазовые месторождения бассейна Songliao, Китай)

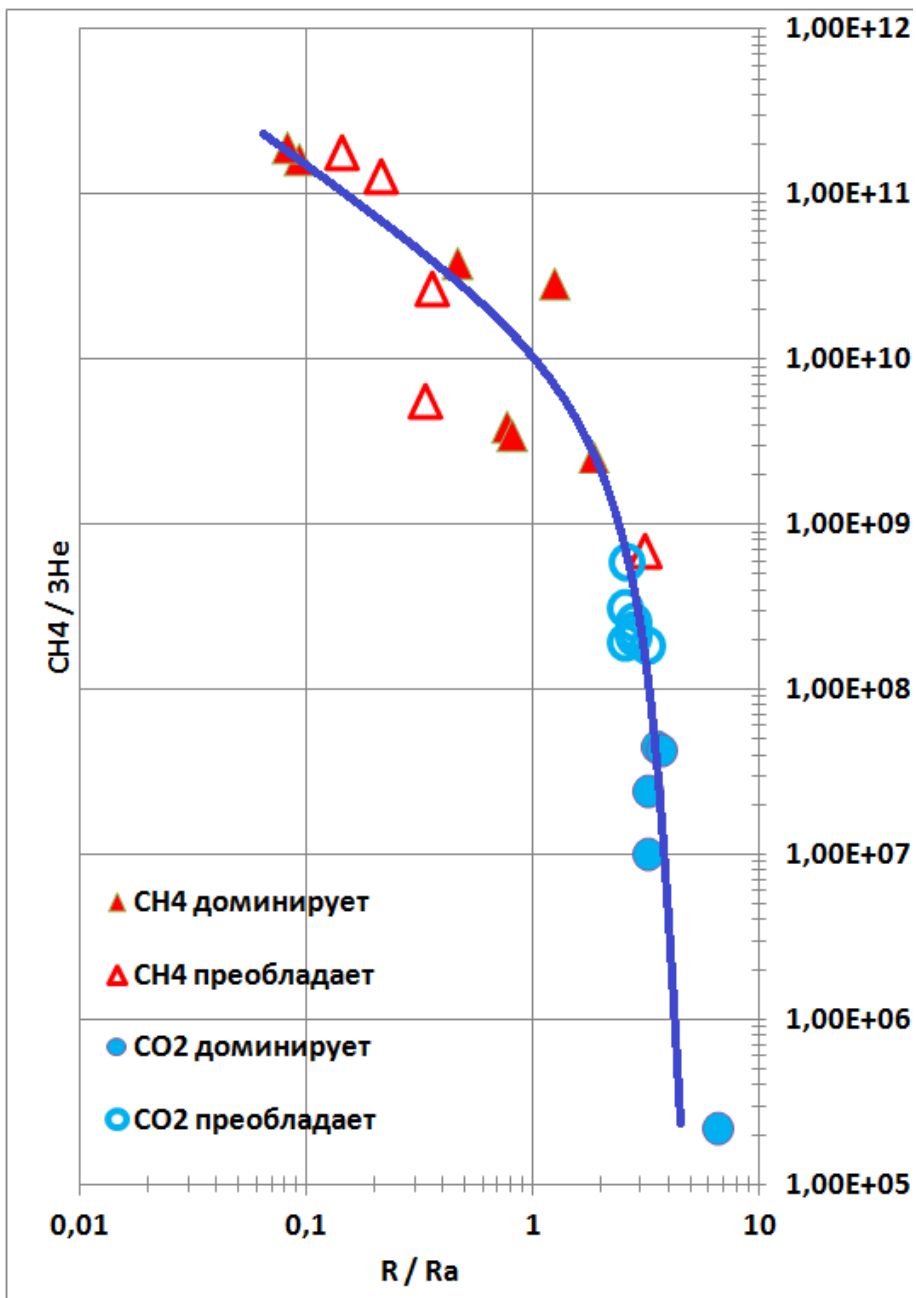


Рис. 4а. Тренд мантийно-корового взаимодействия (нефтегазовые месторождения бассейна Bohai Bay, Китай)

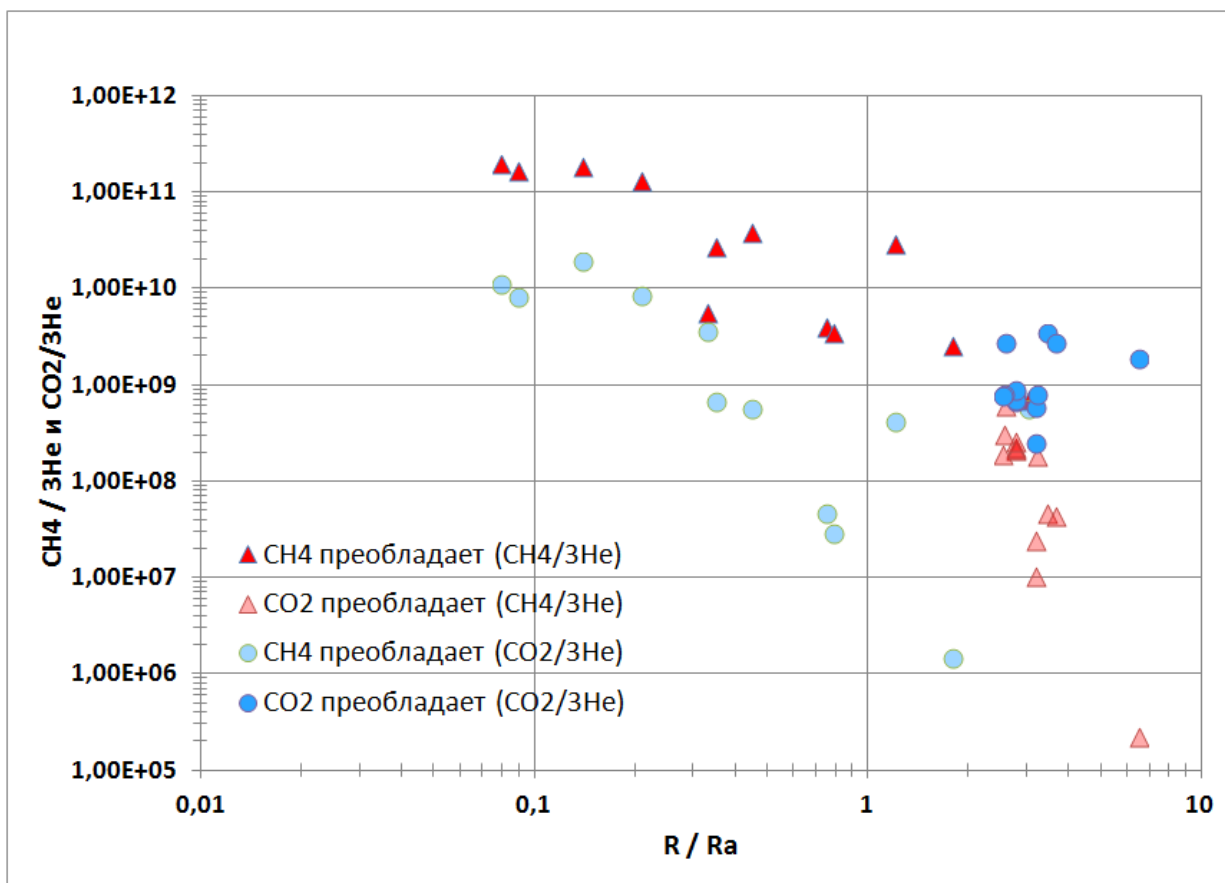


Рис 4б. Тренд мантийно-корового взаимодействия (нефтегазовые месторождения бассейна Bohai Bay, Китай)

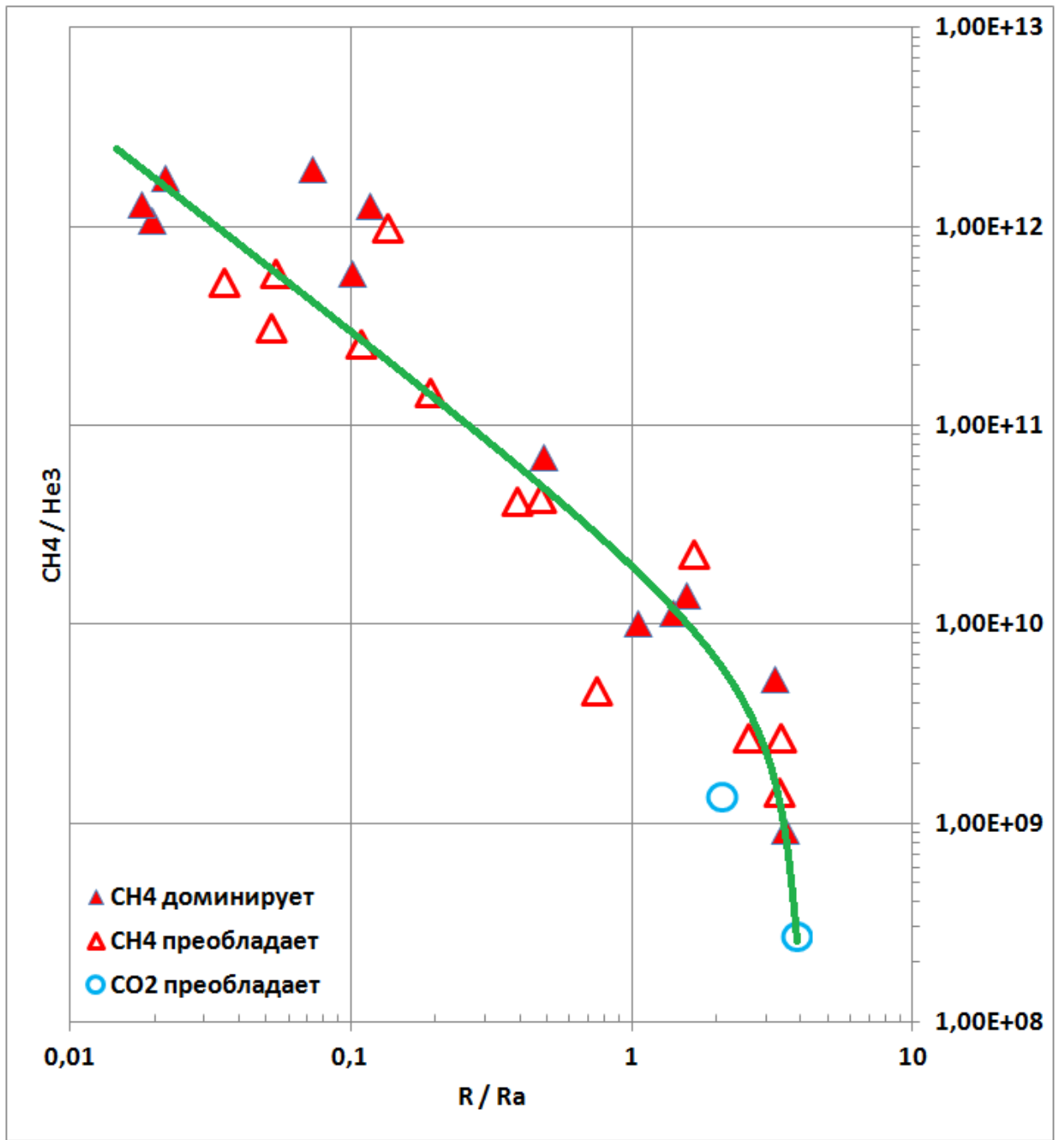


Рис. 5а. Тренд мантийно-корового взаимодействия (зоны субдукции) [16]

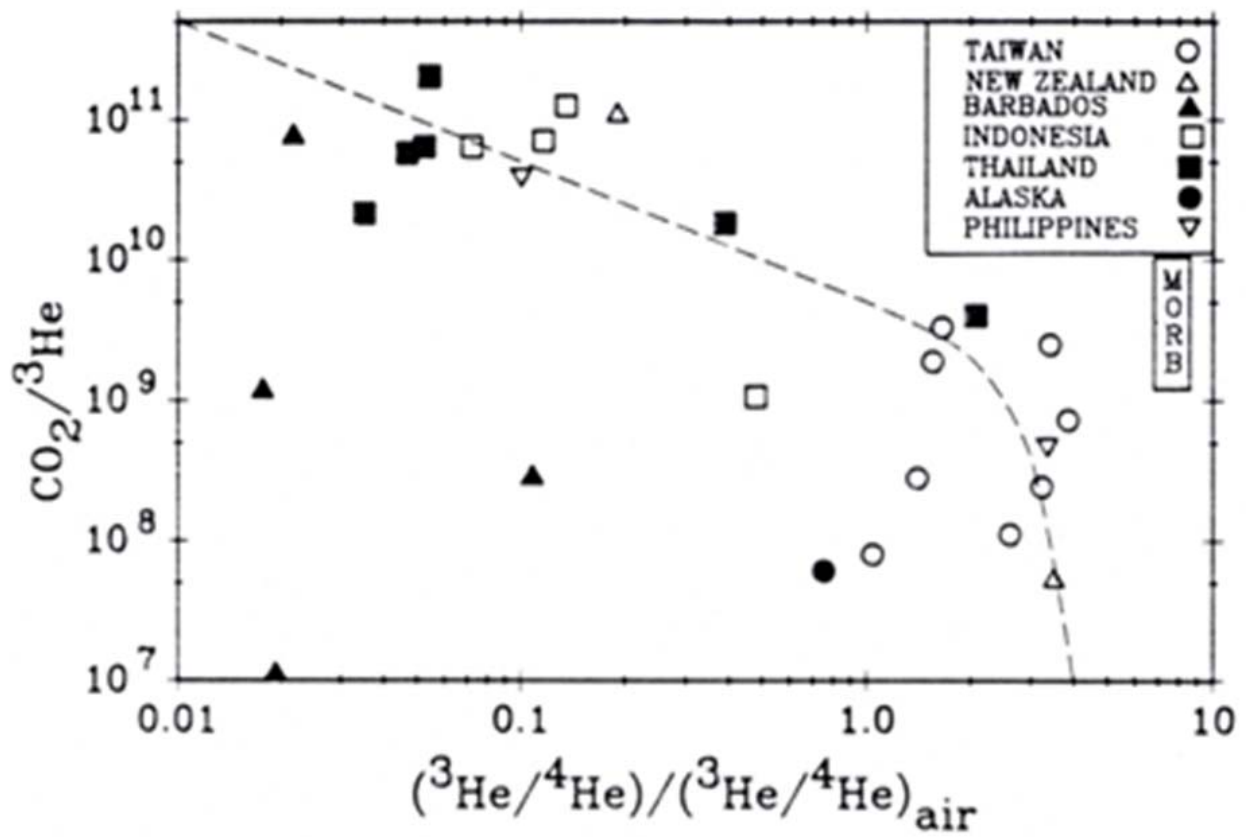


Рис. 5б. Диаграмма соотношений в изотопно-геохимической углерод-гелиевой ($CO_2/{}^3He$) и изотопно-гелиевой (${}^3He/{}^4He$) системах для углекислоты газов активных тектонических окраин [16]

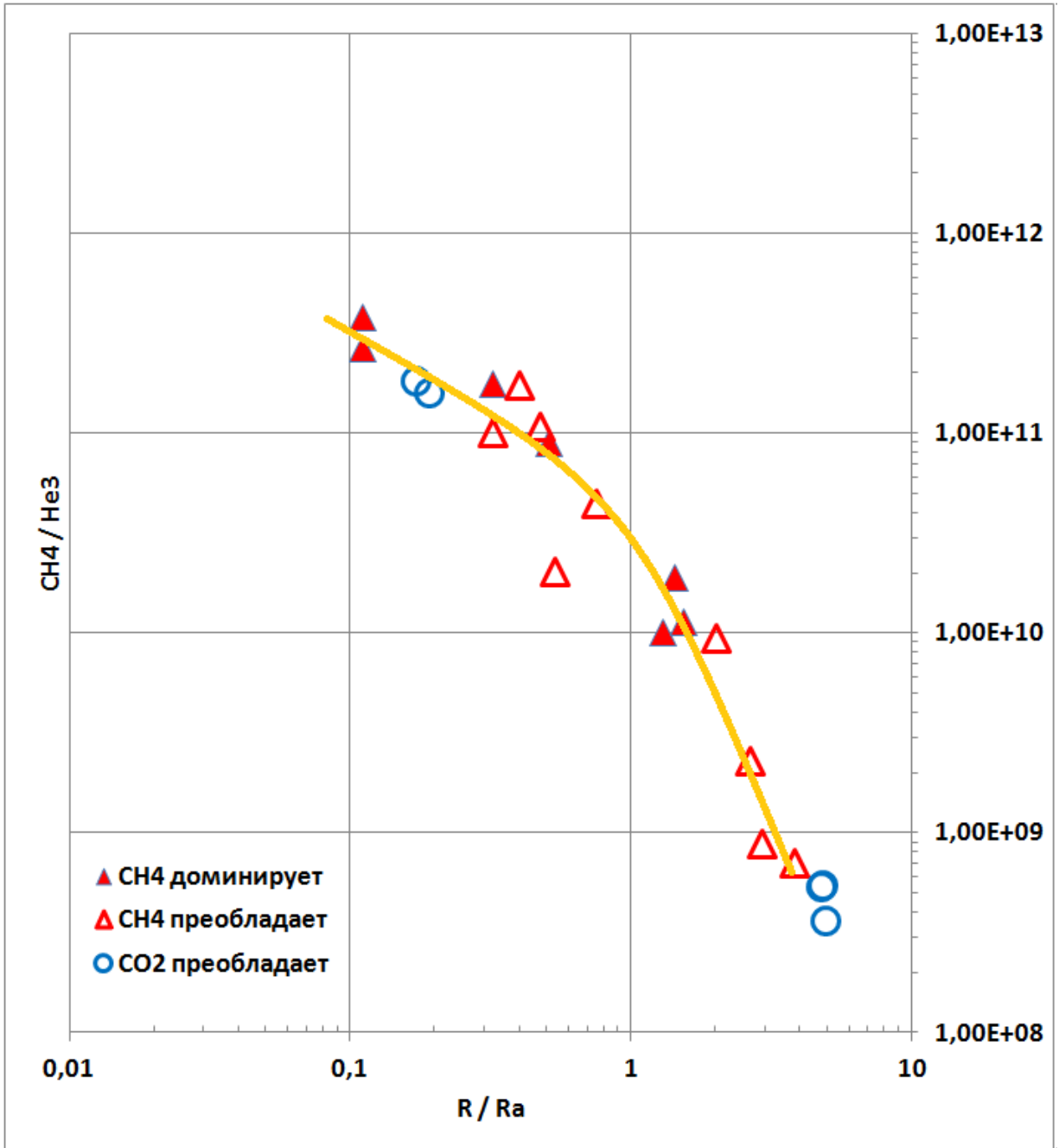


Рис. 6. Тренд мантийно-корового взаимодействия (нефтегазовые месторождения бассейна Taranaki, Новая Зеландия)

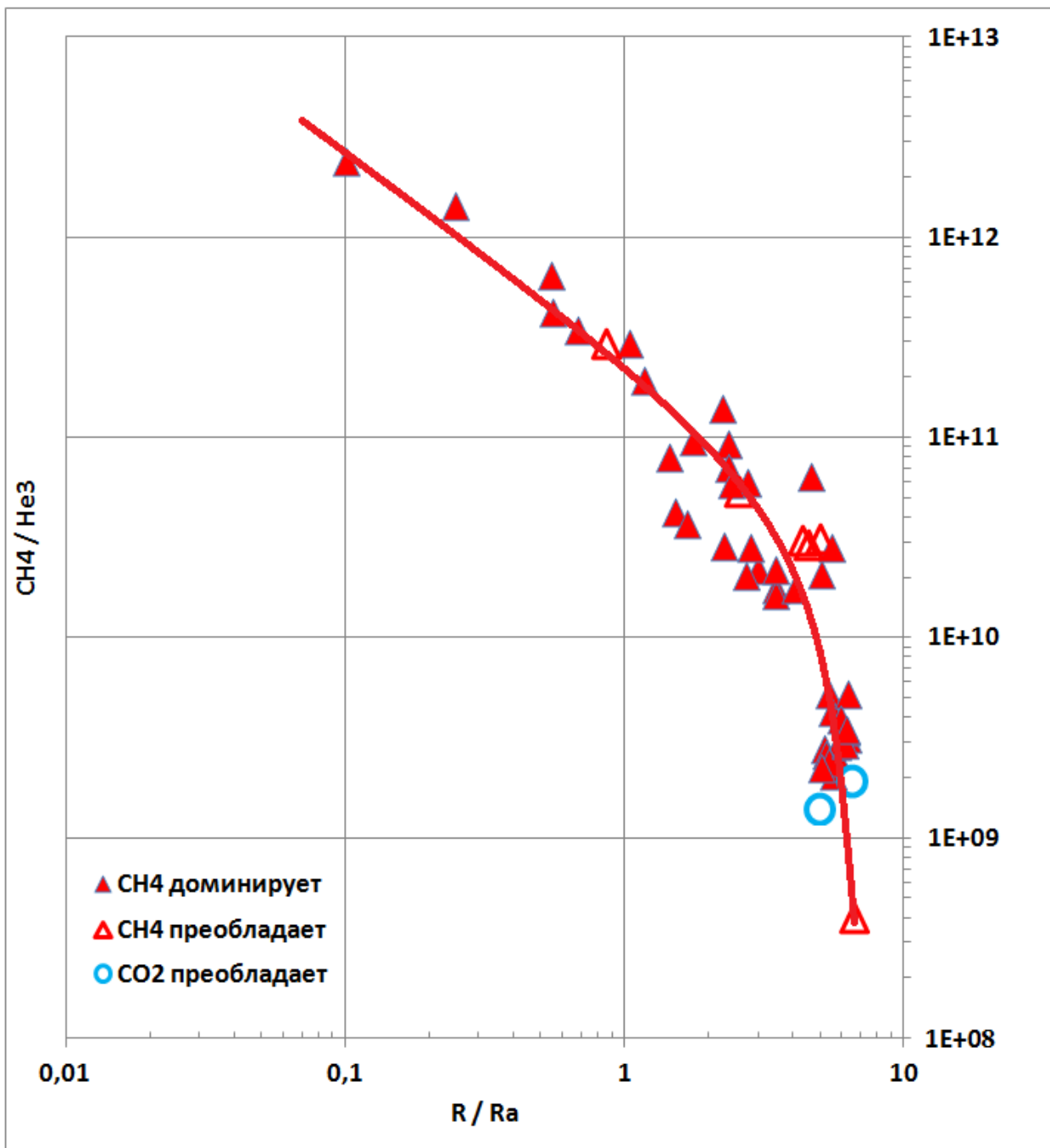


Рис. 7а. Тренд мантийно-корового взаимодействия (нефтегазовые месторождения региона Green Tuff, Япония)

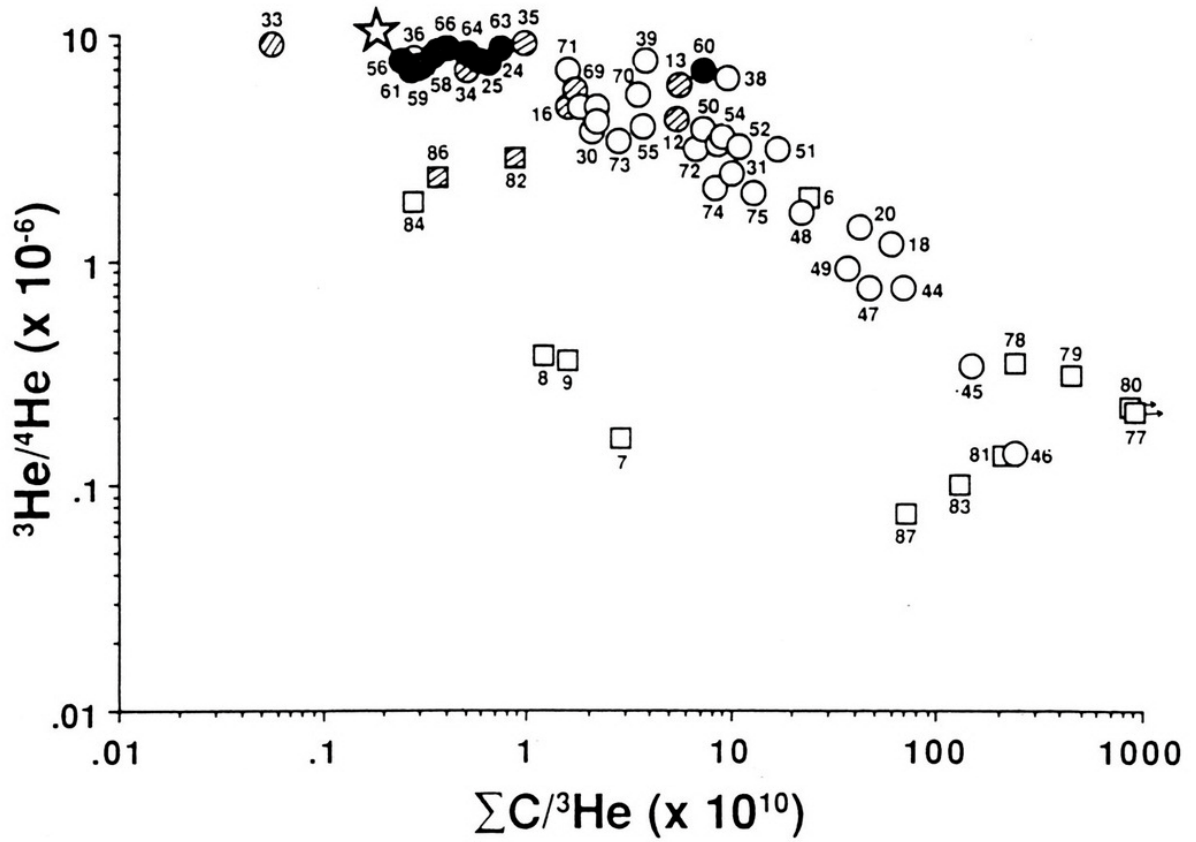


Рис. 76. Изотопно-гелиевые и углерод-гелиевые отношения в нефтегазовых месторождениях Японии [23]

Условные обозначения: ● – газы региона Green Tuff; ⊙ – газы вулканических пород региона Green Tuff; ○ – газы осадочных пород региона Green Tuff; □ – газы преддуговых и задуговых бассейнов; ▣ – газы метаморфизированных пород. ☆ – газы мантийных резервуаров

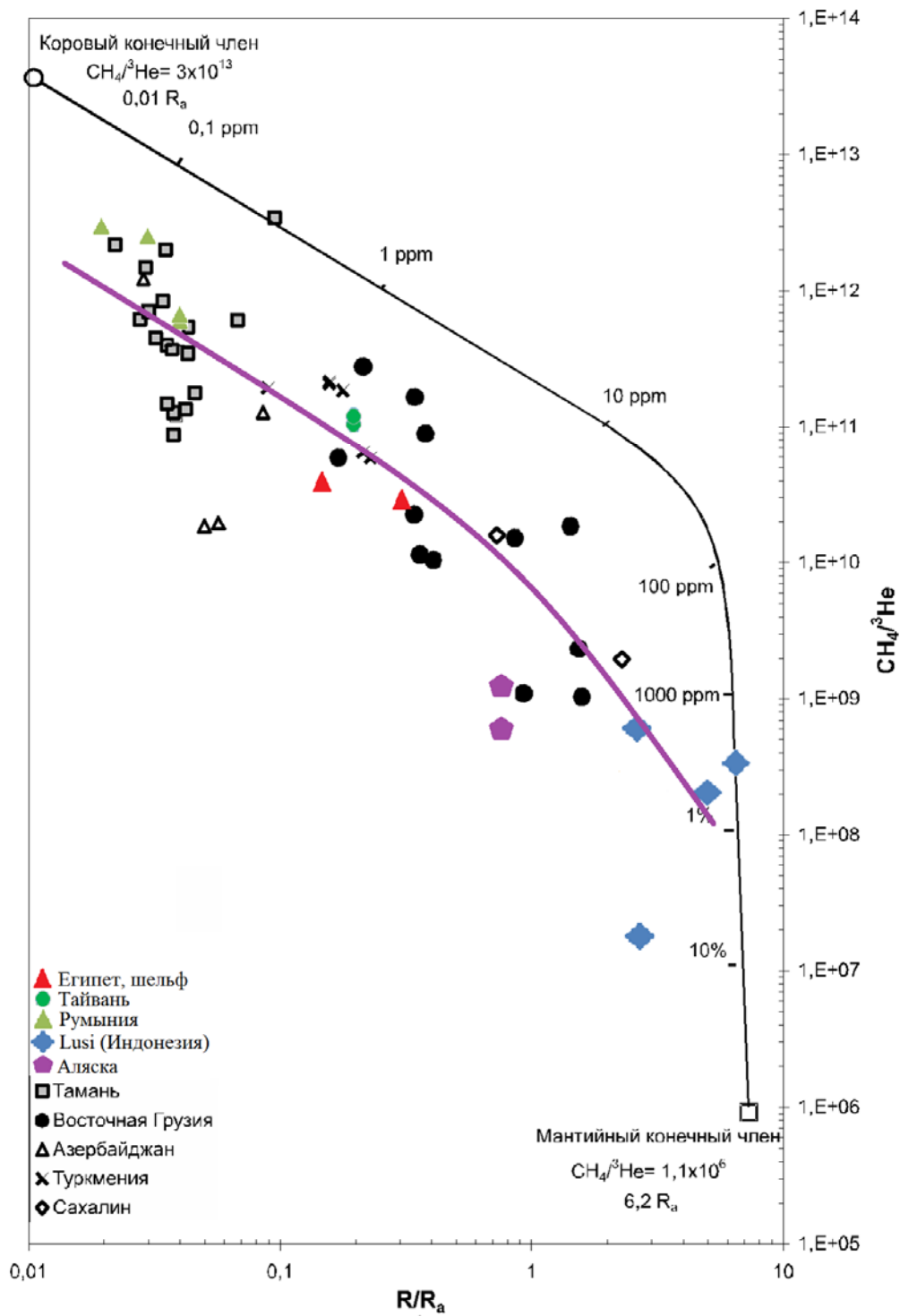


Рис. 8. Связь отношений $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$ и R/R_a в газах грязевых вулканов бывшего СССР. Линия – график смешения конечных членов: «корового» ($\text{CH}_4/{}^3\text{He} = 3 \cdot 10^{13}$ и $0,01 R_a$) и «мантийного» ($\text{CH}_4/{}^3\text{He} = 3 \cdot 10^6$ и $6,2 R_a$) (по [4] с добавлениями данных по грязевым вулканам регионов Румынии, Тайваня, Египта, Аляски и Индонезии)

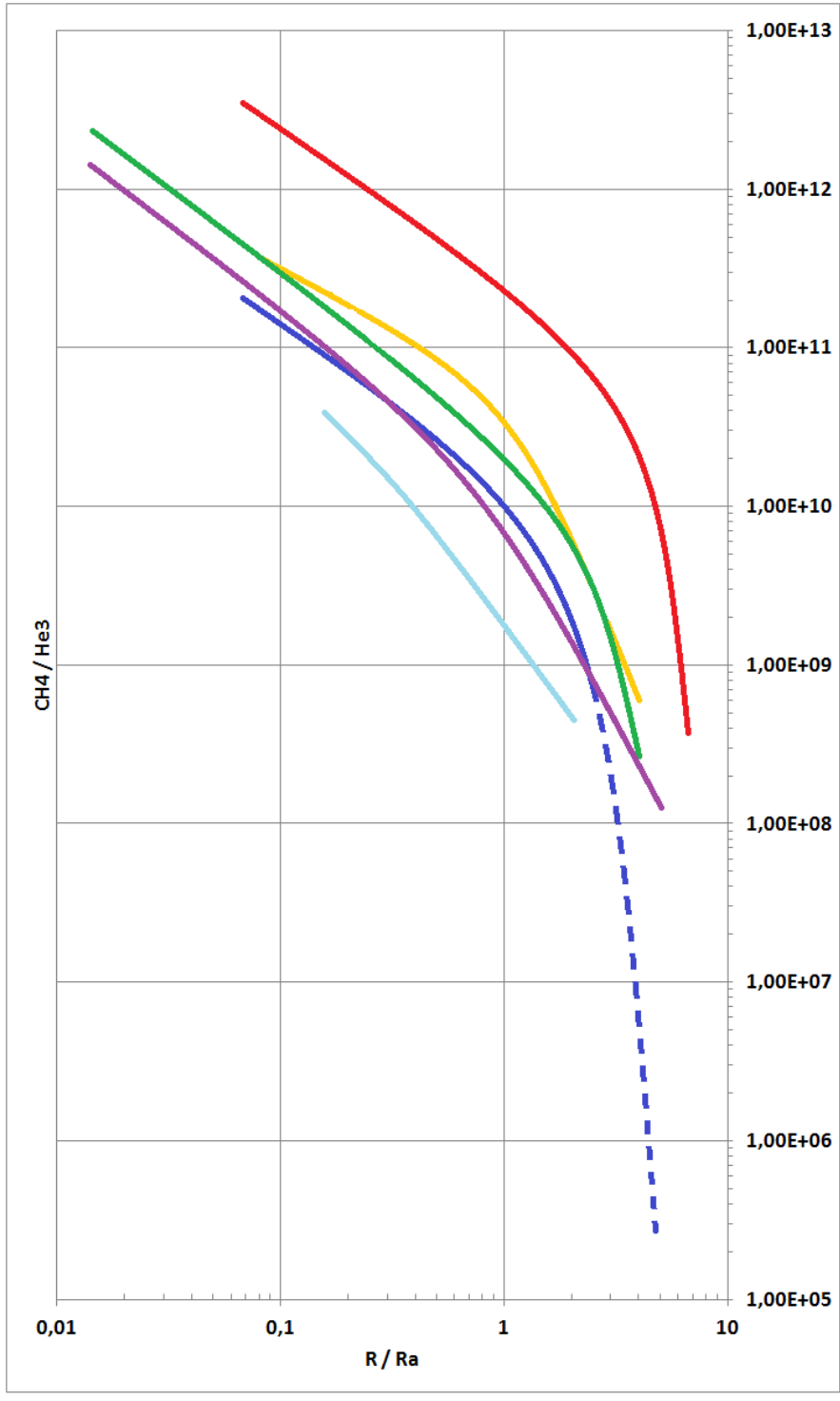


Рис. 9. Тренды мантийно-корового взаимодействия различных нефтегазоносных и грязевулканических регионов и групп регионов

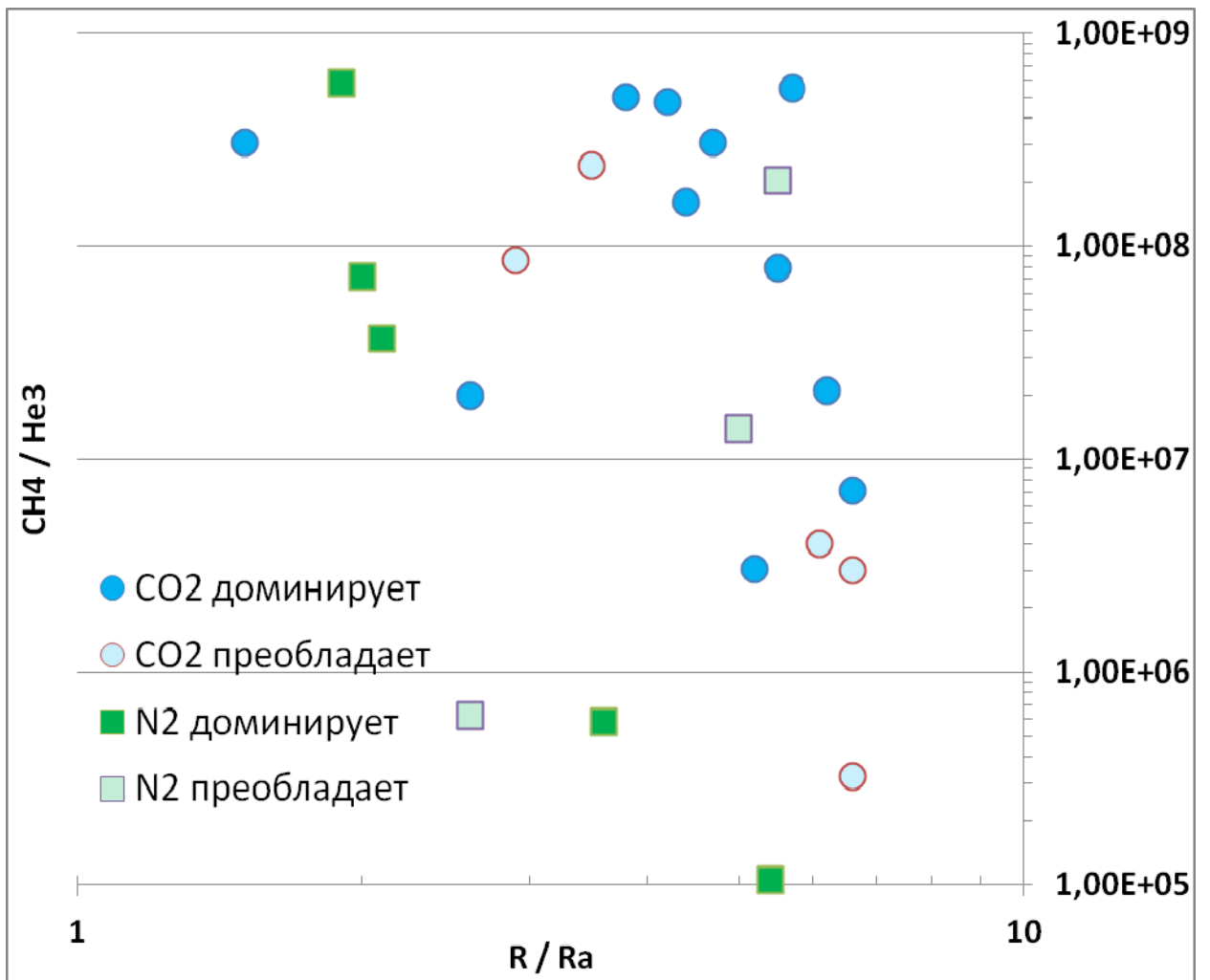


Рис. 10. Двойная углерод-гелиевая и изотопно-гелиевая диаграмма для гидротермальных газов Японии