

Б.М. Валяев, И.С. Дрёмин

Институт проблем нефти и газа РАН, Санкт-Петербург

ДЕГАЗАЦИЯ ЗЕМЛИ И ПРИРОДА ПРОЦЕССОВ НЕФТЕГАЗОНАКОПЛЕНИЯ (ИЗОТОПНО- ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ)

Мультирегиональное обобщение и альтернативная интерпретация изотопно-геохимических данных в углерод-гелиевой системе свидетельствуют о мантийно-коровой природе углеводородных флюидов, участвующих в формировании нефтегазовых месторождений.

Ключевые слова: углерод-гелиевая изотопная система, $C_{CH_4}/^3He$, углеводородные флюиды, трансформация, грязевые вулканы.

Введение

К началу XXI века 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. 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 отчётливостью проявились в гигантских масштабах и неравномерностях традиционного и нетрадиционного нефтегазонакопления, в сверхвысоких аномалиях пластовых (флюидных) давлений и температур [6, 7].

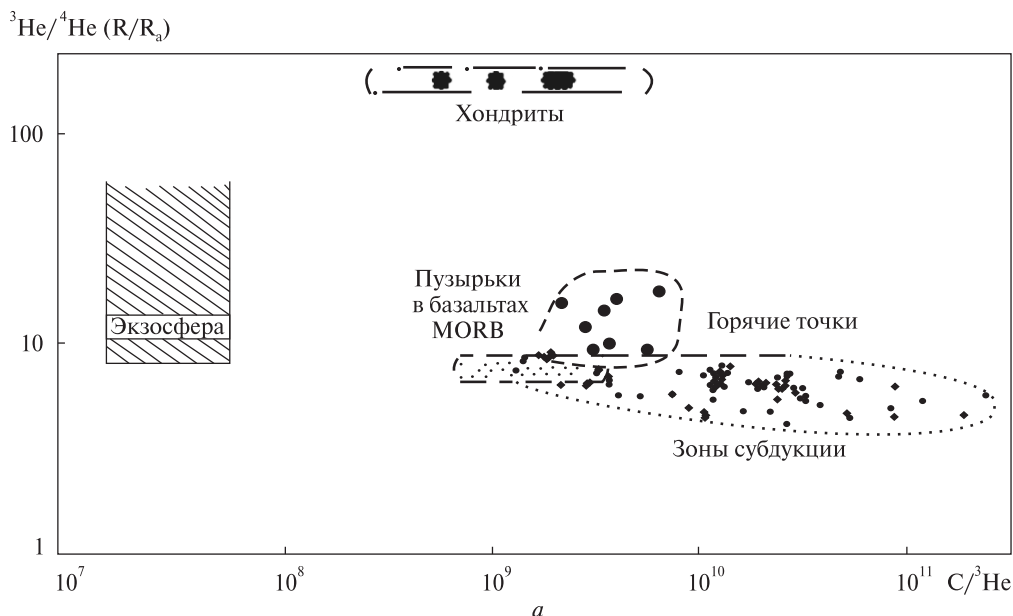
В последние годы бассейновое моделирование производится уже с учётом глубинной структуры бассейнов. Но значимость (роль) мантийных процессов (глубинной энергетике и глубинных флюидов) в процессах нефтегазообразования и нефтегазонакопления всё ещё недооценивается. По-прежнему генерация нефти и газа увязывается с преобразованием органического вещества осадочных пород на стадиях диагенеза и катагенеза. Диагностика этих стадий во многом продолжает опираться на данные по изотопии углерода, прежде всего, метана. Тридцать лет тому

© Б.М. ВАЛЯЕВ, И.С. ДРЕМИН, 2015

назад нами [9] была выполнена альтернативная интерпретация, в соответствии с которой разнообразие показателей по изотопному составу и углерода, и водорода метана было увязано с различиями состава глубинных углеводородных флюидов и с последующими трансформациями их химического состава и изотопным фракционированием в процессах миграции и формирования нефтегазовых скоплений. За прошедшие с тех пор годы накапливалось всё больше новых данных (изотопно лёгкий по $\delta^{13}\text{C}$ и δD метан в залежах на глубинах более 4 км, в породах фундамента, в высокотемпературных разгрузках флюидов и мн. др.), не укладывавшихся в рамки традиционных изотопно-геохимических и нефтегеологических построений [1, 2, 6, 10, 11]. Однако прежний «изотопный запрет» возможности глубинного генезиса нефти и газа, связанный с пестротой и большим диапазоном значений изотопного состава углерода метана ($\delta^{13}\text{C}$ от -20 до -80 ‰) в нефтегазовых месторождениях сменился новым, ещё более жёстким. Новый «запрет» связан с изотопным составом гелия, в соответствии с которым диагностирован «мантийный индикатор» глубинных (мантийных) процессов.

Углерод-гелиевая изотопно-геохимическая система

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 первозданного, вошедшего в состав Земли при ее формировании и до сих пор сохранившегося в недеплетированной мантии или в ядре Земли. Его соотношение с коровым радиогенным изотопом гелия



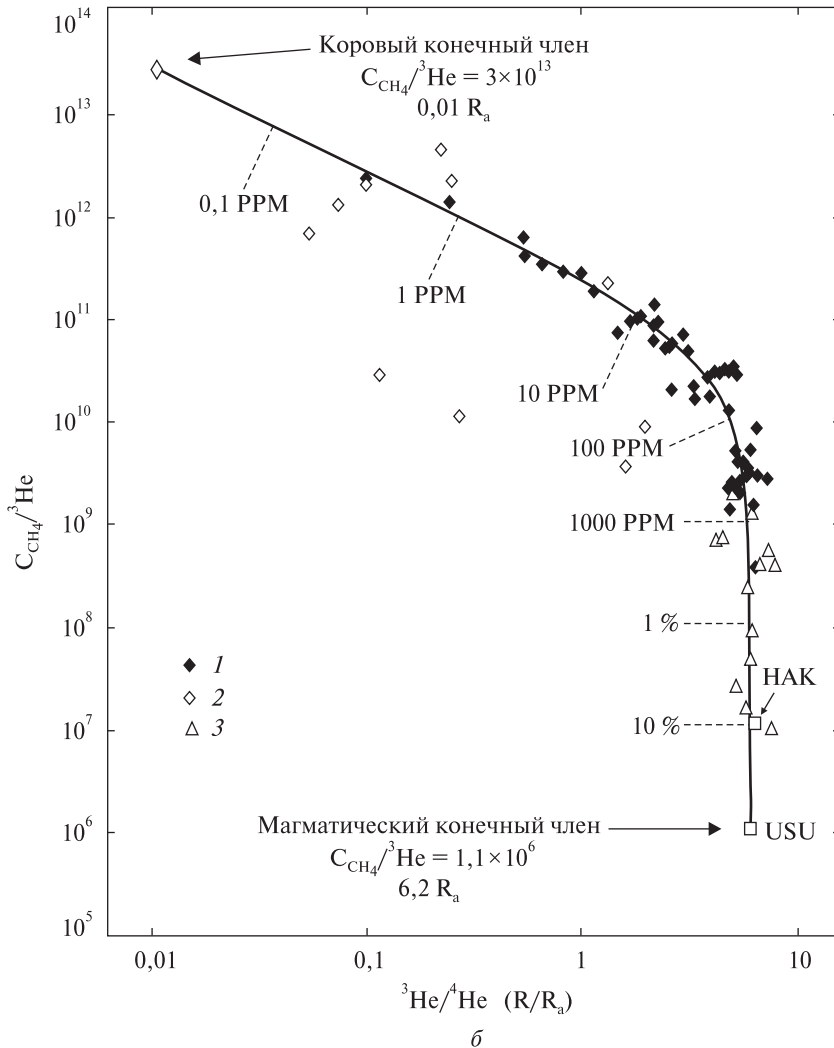
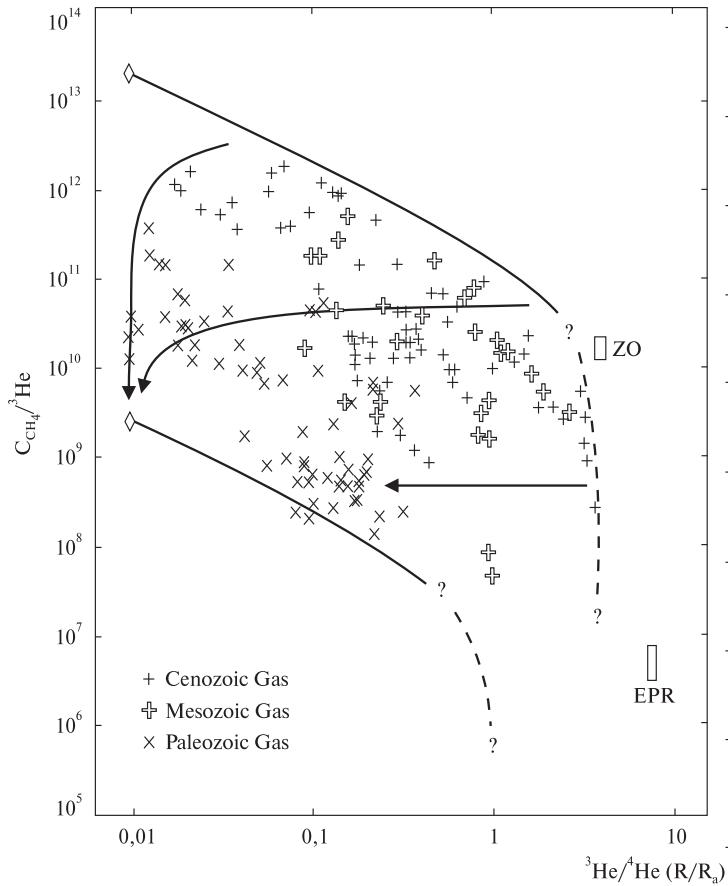


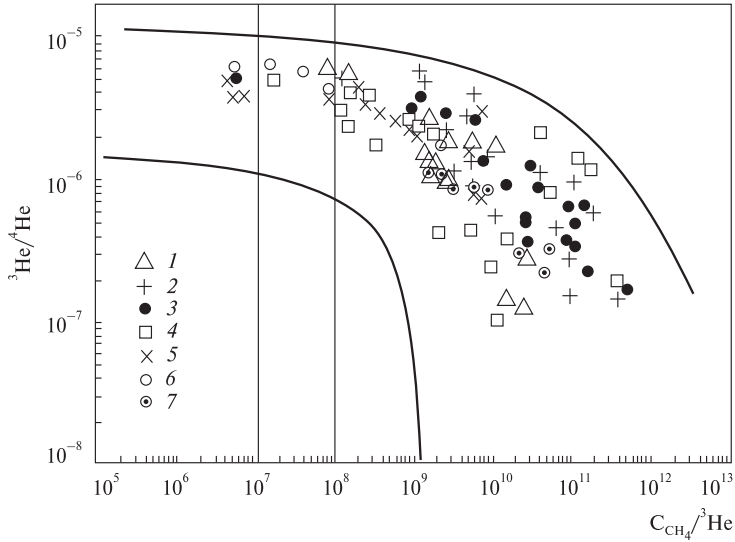
Рис. 1. Углерод-гелиевая изотопно-геохимическая диаграмма природных объектов [38] (а), модель смешения для гелия и метана в природных газах Японии [37] (б). Условные обозначения: 1 — регион зелёных туфов (Япония); 2 — другие регионы Японии; 3 — полуостров Камчатка [17]

^4He используется в качестве ключевого индикатора для диагностики и дифференциации мантийных и мантийно-коровых тектонических и магматических процессов. [20, 16, 23, 21 и др.]. Отношение изотопов гелия $^3\text{He}/^4\text{He}$ охватывает интервал, превышающий три порядка величин во флюидах разного генезиса, включая углеводородные, участвующие в формировании нефтегазовых месторождений [34, 25, 24, 22 и др.].

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 гелия — ^3He . Широкое использование в этих



a



б

Рис. 2. Метан-гелиевые отношения в 179 нефтегазовых месторождениях с дифференциацией по возрасту резервуара [37] (а). Данные по месторождениям Таиланда, Новой Зеландии, Индонезии, Филиппин, Тайваня, Барбадоса, Западной Канады, США и Центральной Ев-

исследованиях получила двойная диаграмма, по осям которой задаются параметры изотопно-гелиевой ($^3\text{He}/^4\text{He}$) и углерод-гелиевой ($\text{C}_{\text{CO}_2}/^3\text{He}$) систем. Углерод-гелиевое отношение приобрело статус одной из важнейших характеристик глубинных флюидных систем для мантии и зон субдукции [38]. Был выявлен интервал вариаций этого показателя для деплетированной мантии — в базальтах MORB — со средним значением $2 \cdot 10^9$. Для углекислоты глубинных флюидных систем зон субдукции величина отношения $\text{C}_{\text{CO}_2}/^3\text{He}$ возростала до значений 10^{11} и более — на фоне снижения отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ (рис. 1, а). Эта корреляция стала важным подтверждением рециклинга корового материала в зонах субдукции и послужила основанием для построения кривой смешения (mixing curve — MC) двух компонентов — конечных членов (end members — EM) — корового и мантийного (магматического, вулканического) в двухкомпонентной модели смешения.

Одна из первых MC была построена на базе данных исследований изотопии гелия по Камчатке [17] и Японии [47, 48]. На этой кривой для метана величина отношения $\text{CH}_4/^3\text{He} = 1,1 \cdot 10^6$ и гелиевого отношения $^3\text{He}/^4\text{He} = 6,2 R_a$ (R_a — это константа для отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ в атмосфере Земли, равная по величине $1,39 \times 10^{-6}$, используемая при интерпретации данных по изотопии гелия) для вулкана Usu (Япония) выбрана в качестве магматического EM (рис. 1, б).

Некорректность отождествления этого магматического EM для метана с мантийным EM по величине и последующего отношения величины $\text{CH}_4/^3\text{He} \approx 10^6$ для вулкана Usu к универсальной величине мантийного EM отношения $\text{CH}_4/^3\text{He}$ очевидна.

В конце прошлого столетия были опубликованы также первые данные исследований, относящиеся к углерод-гелиевой изотопно-геохимической системе для метана месторождений нефтегазоносных регионов Северной Америки, Азии и Европы, выполнены первые обобщающие работы [37, 49]. Итоги этих работ (рис. 2, а, б) подтверждали возможности глубинного abiогенного или магматического генезиса метана.

Однако две кривые смешения двух конечных (корового и магматического) членов $\text{C}_{\text{CH}_4}/^3\text{He}$ на рис. 2, а демонстрировали ограниченное участие магматического, а не мантийного метана в формировании нефтегазовых месторождений, с принятием величины магматического EM вулкана Usu в качестве универсального мантийного показателя (рис. 1, б).

За четверть века, прошедшую после этих пионерных работ, накопились результаты многих десятков публикаций по использованию углерод-гелиевых изотопно-геохимических данных. Эти исследования, в основном, относились к глубинным флюидно-газовым системам, связанным с вулканическими и гидротермальными процессами, в которых углекислота оказывалась преобладающим компонентом в составе газовой фазы по отношению к метану. Однако широких мультирегиональных обобщений накопившихся данных такого рода исследований ни по CO_2 , ни по CH_4 , а тем более их сопоставления, в сущности,

ропы. EPR — геотермальные флюиды Восточно-Тихоокеанского поднятия, 21°N . ZO — выходы газа из офиолитов Zambales (Филиппины). Углерод-гелиевая диаграмма природных газов нефтегазоносных регионов восточного Китая [49] (б). Условные обозначения — нефтегазоносные регионы Китая: 1 — Songliao; 2 — Liaohe; 3 — Huanghua; 4 — Jiyang; 5 — Subei; 6 — Sanshui; 7 — Dongpu

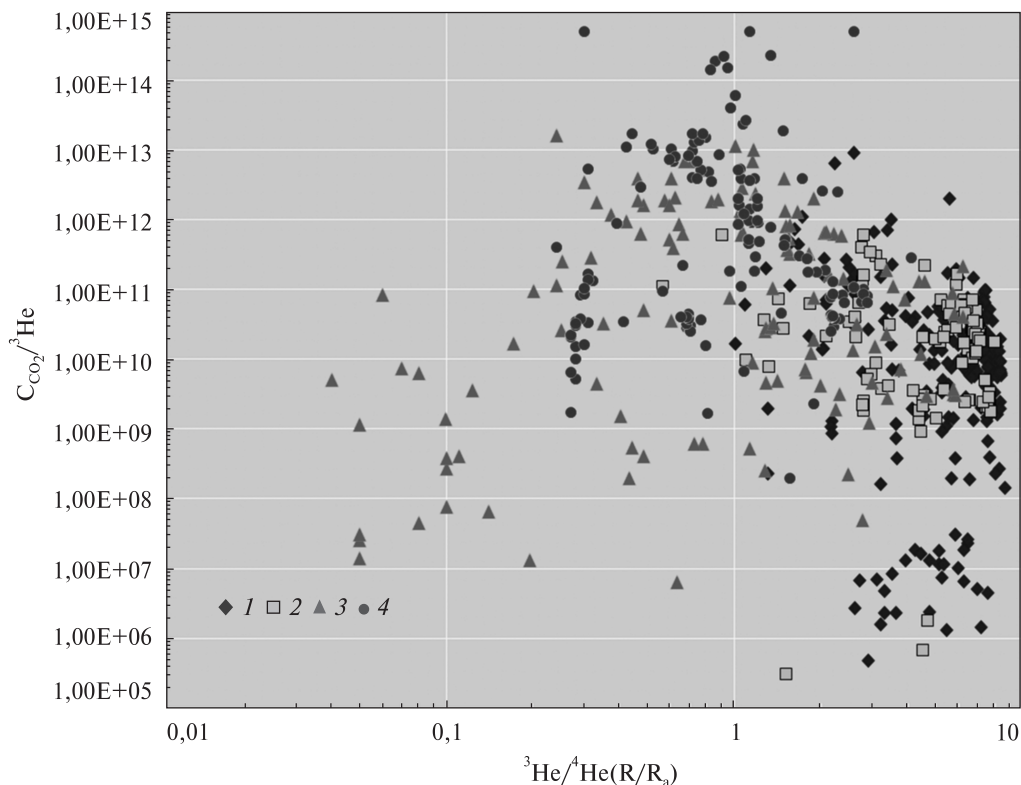


Рис. 3. Суммарная диаграмма соотношений в изотопно-геохимической углерод-гелиевой ($C_{CO_2}/^3He$) и изотопно-гелиевой ($^3He/^4He$) системах для углекислоты газов вулканов, фумарол и гидротерм четырёх групп регионов. Условные обозначения по группам регионов: 1 — северные и восточные активные окраины Тихого океана; 2 — зоны субдукции Центральной и Южной Америки; 3 — регионы Западного Тетиса; 4 — регионы Турции. Источники данных: для северных и восточных активных окраин Тихого океана — [44; Symonds, 2003; Halldorsson, 2013; Lupton, 2008; Takahata Naoto, 2003]; для зон субдукции Центральной и Южной Америки — [41, 43, 44; Tassi et al., 2010; Aguilera et al., 2012]; для зон субдукции Центральной и Южной Америки — [Caracausi et al., 2013; Polyak et al., 2009; Cinti et al., 2011; D’Alessandro et al., 2010]; для регионов Турции — [Mutlu Halim et al., 2008; Wiersberg et al., 2011; de Leeuw et al., 2007; Italiano et al., 2013]

не проводилось. Мы попытались восполнить этот пробел, приняв в основу своих построений результаты многолетних исследований по проблеме дегазации Земли, увязанных с генезисом глубинных углеводородных флюидов, и новыми геодинамическими построениями для осадочных бассейнов.

На рис. 3 представлена суммарная диаграмма выполненного нами мульти-регионального обобщения углерод-гелиевых изотопно-геохимических данных, относящихся к глубинным флюидно-газовым системам вулканов и гидротерм. В этих системах углекислота оказалась преобладающим компонентом в составе газовой фазы по отношению к метану. Построению этой диаграммы предшествовали обобщение и анализ опубликованных данных по 16 регионам, характеризующимся субдукционными коллизионными и рифтогенными режимами. В подписи к диаграмме приведены ссылки на работы, данные из которых были использованы для выполненных построений.

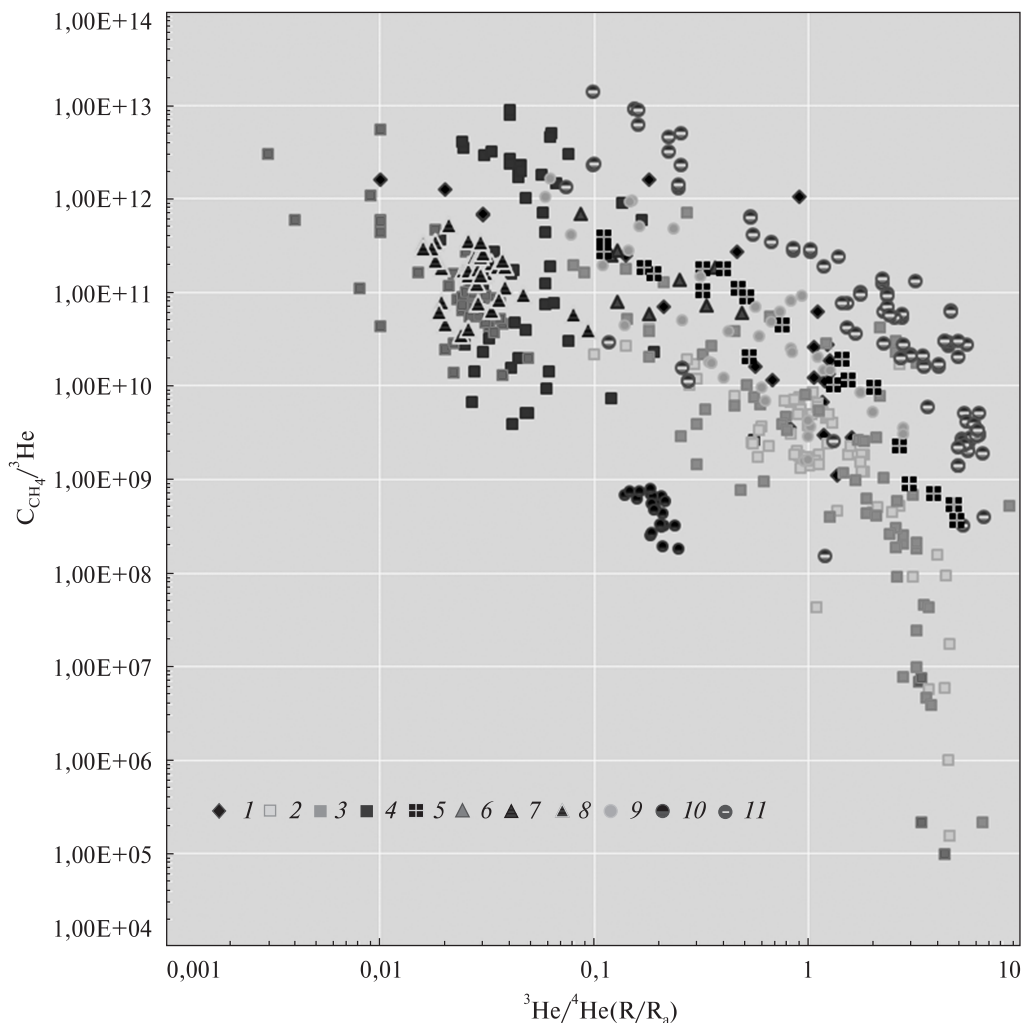


Рис. 4. Суммарная диаграмма соотношений в изотопно-геохимической углерод-гелиевой ($C_{CH_4}/^3He$) и изотопно-гелиевой ($^3He/^4He$) системах для метана месторождений нефтегазоносных бассейнов различных регионов: нефтегазоносные регионы и нефтегазовые месторождения: 1 — Бразилия; 2 — Tarim (Китай); 3 — Ordos, Sichuan (Китай); 4 — Songliao (Китай); 5 — Vohai Bay (Китай); 6 — Yinggehai (Китай); 7 — Японии; 8 — Новой Зеландии; 9 — Западной Сибири; 10 — Калифорнии (США); 11 — Канзаса, Оклахомы, Техаса (США). Данные по публикациям: [24, 35, 37, 39, 47, 48; Ballentine et al., 2002; Jenden et al., 1988; Liu Quanyou et al., 2008; Lyon et al., 1996; Poreda et al., 1986; Prinzhofner et al., 2010; Quanyou Liu et al., 2012; Sano et al., 1982; Yuenian Zhu et al., 2000; Zhijun Jin et al., 2009]

Региональные различия не только показателя $^3He/^4He$, но и отношения $C_{CO_2}/^3He$ отчётливо проявились на диаграмме (рис. 3). Эти различия связаны, по мнению авторов работ, использованных при построении диаграммы, с особенностями глубинного строения и геодинамики рассматриваемых регионов. Они обусловлены, прежде всего, различиями субдукционных и коллизионных процессов в этих регионах. Показатель (индикатор) $C_{CO_2}/^3He$ варьирует по регионам, возрастая от значения 10^8 до значения 10^{14} , при снижении тектонической (магматической) активности — от $8 R_a$ до $0,2 R_a$ по гелиевому отношению $^3He/^4He$ (рис. 3).

Выполнена также аналогичного рода сводка данных, относящихся к углерод-гелиевой изотопно-геохимической системе для метана из месторождений нефтегазоносных регионов России, США, Китая, Японии, Новой Зеландии и других стран. В подписях к диаграмме (рис. 4) приведены ссылки на опубликованные работы — первоисточники данных. В тех случаях, когда в табличном материале этих работ не содержались графы со значениями величин отношений $C_{CH_4}/^3He$, эти отношения были рассчитаны нами по первичным таблицам данных изотопных исследований гелия и химического состава газов. На построенной суммарной диаграмме (рис. 4) для метана выявляются обширные интервалы значений основных рассматриваемых характеристик как по $C_{CH_4}/^3He$, так и по $^3He/^4He$. Различные нефтегазоносные регионы на этой диаграмме могут быть обособлены отдельными изотопными полями. Разнообразие значений гелиевого изотопного показателя (от 0,01Ra до 7Ra) свидетельствует о большом разнообразии эндогенных геодинамических обстановок и режимов, характеризующих нефтегазоносные регионы. Разнообразие геодинамических обстановок рециклинга корового материала и мантийно-корового взаимодействия [46] определяет разнообразие обстановок генерации глубинных углеводородных флюидов, их восходящей миграции и трансформации при формировании нефтегазовых месторождений. Это разнообразие величин отношений $C_{CH_4}/^3He$ и $^3He/^4He$ (рис. 4) не находит своего полного отражения в единой траектории MC двух EM (мантийного и корового) источников углерода. Использование этой кривой для оценки природы метана во всём спектре разнообразных геодинамических обстановок оказывается неправомерным.

Информативность используемой диаграммы $C_{CH_4}/^3He$ — $^3He/^4He$ можно продемонстрировать на примере хорошо изученных в плане изотопии гелия нефтегазоносных регионов Китая (рис. 5). По изотопно-гелиевому $^3He/^4He$ отношению (ось абсцисс) выявляется чёткое различие характеристик для трёх геодинамических мегарегионов Китая: восточного, центрального и западного. Восточный мегарегион (бассейны Songliao, Bohai Bay, North Jiangsu и др.) характеризуется максимальной неотектонической (геодинамической) активностью, которая отражается в показателях изотопно-гелиевого отношения $^3He/^4He$ от 0,15 до $3R_a$. Для наиболее тектонически стабильного центрального мегарегиона (бассейны Ordos и Sichuan) характерны минимальные показатели $^3He/^4He$ от 0,008 до $0,04R_a$. Для западного, тектонически активизированного мегарегиона (бассейны Tarim, Turpan-Nami) по сравнению со стабильным центральным характерны повышенные значения отношения $^3He/^4He$ от 0,025 до $0,07R_a$. С показателями изотопно-гелиевого отношения $^3He/^4He$ коррелируются и показатели углерод-гелиевого отношения $C_{CH_4}/^3He$ [15]. Последние возрастают от восточного мегарегиона к западному от значений $5 \cdot 10^8$ — $5 \cdot 10^{10}$ до значений $4 \cdot 10^{10}$ — $1 \cdot 10^{12}$ и более. Максимальными значениями углерод-гелиевого отношения до $6 \cdot 10^{12}$ и более характеризуется бассейн Tarim (рис. 5). Тенденция роста величин отношения $C_{CH_4}/^3He$ со снижением отношения $^3He/^4He$ для трёх рассмотренных мегарегионов проявляется отчётливо. В традиционной интерпретации (рис. 1, б) эта тенденция демонстрирует уменьшение вклада мантийной компоненты — магматического EM и увеличение вклада корового вещества-компонента EM. На примере нефтегазовых месторождений Китая можно проследить большое разнообразие изотопных гелиевых и углеродно-гелиевых отношений, свидетельствующих о

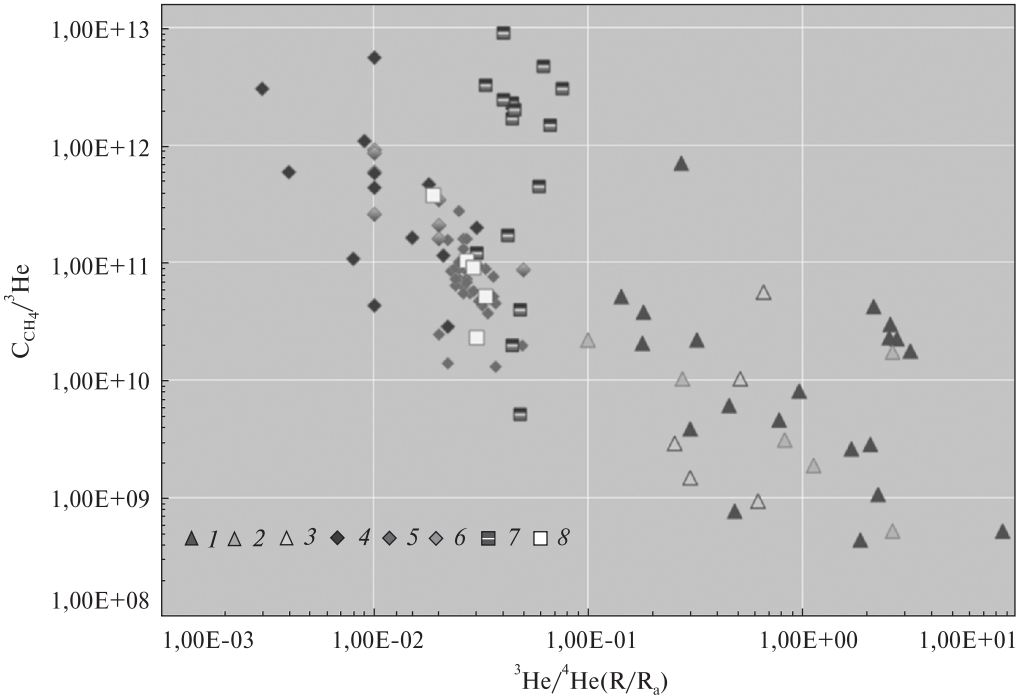


Рис. 5. Корреляция соотношений $C_{CH_4}/^3He$ и $^3He/^4He$ для месторождений нефтегазовых регионов Китая — Бохай Бэй, Северное Янгу, Сунляо, Ордос, Сычуань, Тарим, Турпан-Хами. [35]: 1 — Bohai Bay; 2 — North Jiangsu; 3 — Songliao; 4 — Ordos; 5 — Sichuan 1; 6 — Sichuan 2; 7 — Tarim; 8 — Turpan-Hami

большом разнообразии региональных геодинамических обстановок генерации углеводородных флюидов и процессов нефтегазоаккумуляции и их смене во времени. Возвращаясь к рис. 2, *a* можно отметить, что используемая диаграмма оказывается информативной в аспекте дифференциации рассматриваемых на ней нефтегазовых залежей и по возрасту их резервуаров в различных регионах [37].

Альтернативная интерпретация и сравнительный анализ углерод-гелиевых данных для метана и углекислоты был выполнен также с использованием двойной диаграммы $C/^3He - ^3He/^4He$. При совмещении и сопоставлении двух суммарных диаграмм: $C_{CH_4}/^3He - ^3He/^4He$ и $C_{CO_2}/^3He - ^3He/^4He$ (рис. 6) выявляется, что их изотопные поля на диаграммах в значительной мере перекрываются. Факторы и механизмы, определяющие генезис и количественную характеристику отношений $C_{CO_2}/^3He$ для вулканов и гидротерм, по многим регионам детально исследовались. Оказалось, что рост этого отношения до значений $10^{12} - 10^{14}$ увязывается с субдукцией и разными механизмами рециклинга (дополнительной мобилизации корового углерода — карбонатного или из метаморфизованных пород, обогащённых органическим веществом) [40, 43, 41, 44 и др.]. Близкий характер изменения отношения числа атомов углерода к числу атомов лёгкого изотопа гелия (3He) для метана нефтегазовых месторождений ($10^9 - 10^{13}$) и для углекислоты во флюидах вулканов, фумарол и гидротерм ($10^9 - 10^{14}$) не случаен. Сходство диаграмм (рис. 6) свидетельствует о том, что подобно углекислоте, генезис метана оказывается также связан с глубинными, мантийно-коровыми процессами, т.е. разные механизмы и процессы рециклинга корового материала были задействованы не только при генерации водно-углекислых, но и углеводородных флюидов.

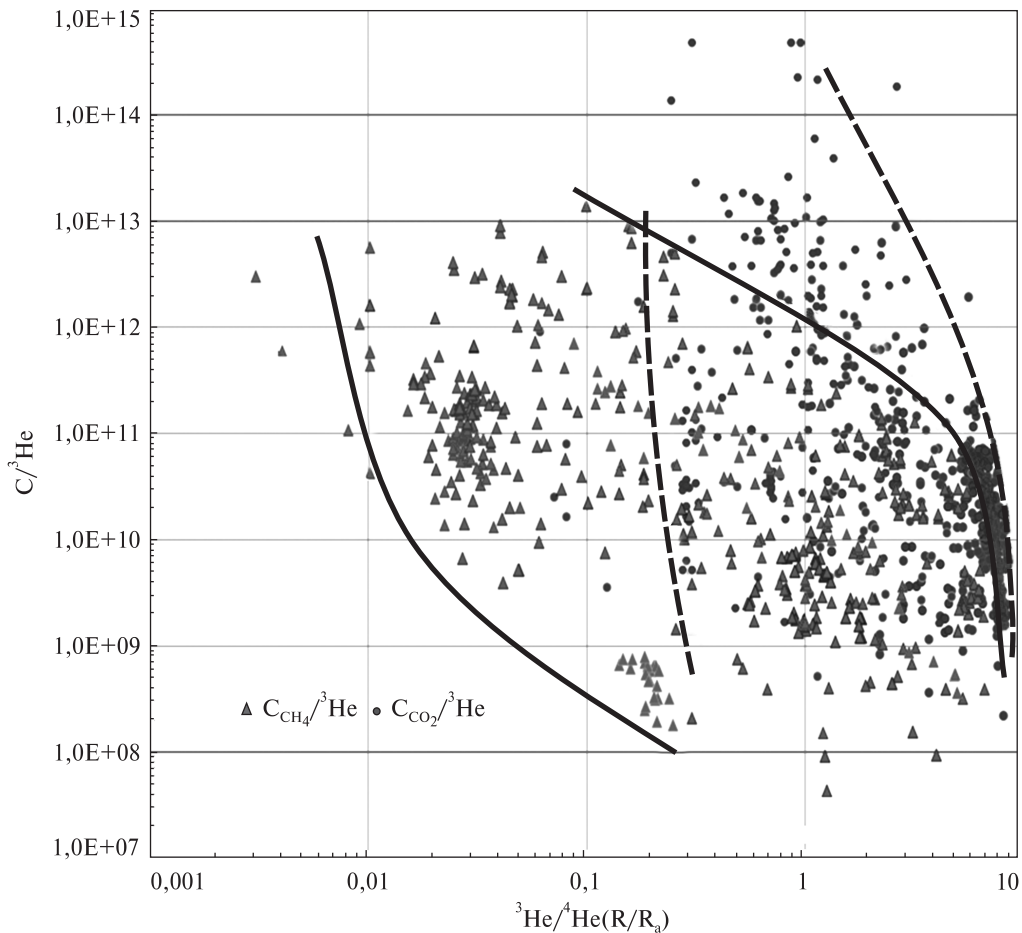


Рис. 6. Объединённая диаграмма изотопно-гелиевых ($^3\text{He}/^4\text{He}$) и изотопно-геохимических углерод-гелиевых соотношений для метана ($\text{C}_{\text{CH}_4}/^3\text{He}$, треугольники) по рис. 4 и углекислоты ($\text{C}_{\text{CO}_2}/^3\text{He}$, кружки) по рис. 3. Данные по публикациям представлены на рисунках 3 и 4. Условные обозначения: сплошные линии обрамляют суммарное поле метана для нефтегазовых месторождений (рис. 4); пунктирные линии обрамляют суммарное поле углекислоты для флюидов вулканов, фумарол и гидротерм (рис. 3). Совмещение изотопно-геохимических полей метана и углекислоты отражается наложением значков для $\text{C}_{\text{CH}_4}/^3\text{He}$ и $\text{C}_{\text{CO}_2}/^3\text{He}$

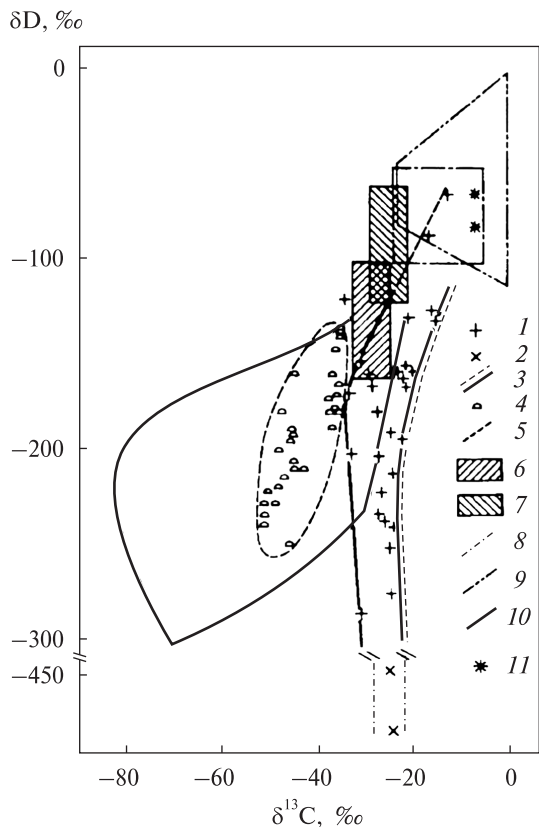
Мобилизация рециклируемого корового углерода может вносить значительный и даже основной вклад в рост величины отношения $\text{C}_{\text{CH}_4}/^3\text{He}$, подобно росту величины $\text{C}_{\text{CO}_2}/^3\text{He}$. Это находит согласие с параллельным снижением величины отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$, также обусловленного переработкой корового материала в процессах мантийно-корового взаимодействия. Смена окисленного состояния углерода (CO_2) восстановленным (CH_4 и более высокомолекулярные углеводороды) свидетельствует о снижении интенсивности магматической деятельности (степени частичного плавления вещества). Таким образом изменение состава главных углеродистых газовых компонентов от CO_2 к CH_4 глубинных флюидов отражает изменение обстановок и механизмов их глубинной генерации при изменении обстановок мантийно-корового взаимодействия.

Приповерхностные проявления дегазации Земли и приповерхностный интервал нефтегазоаккумуляции

Трудности с аппроксимацией изотопных полей углекислоты флюидов вулканов, фумарол и гидротерм единой траекторией МС мантийного и корового ЕМ на углерод-гелиевой диаграмме обозначились ещё в работе [40]. Для их преодоления широко используется другая диаграмма, предложенная в работе [42]. В качестве одной координаты (оси) на диаграмме вместо изотопного состава гелия используется изотопный состав источника углерода — $\delta^{13}\text{C}$ для углекислоты, с тремя новыми ЕМ. В качестве последних приняты значения этого показателя для рециклированного органического вещества и карбонатов, а также углерода мантии. Вторая координата (ось) остаётся прежней — отношение $\text{C}_{\text{CO}_2}/^3\text{He}$. Вклады двух источников (за счёт корового и осадочного вещества) оцениваются по сдвигу значений изотопного состава $\delta^{13}\text{C}$ углекислоты по отношению к мантийному источнику углерода ($\delta^{13}\text{C} \sim -7 \text{‰}$) в сторону облегчения за счёт былого органического вещества ($\delta^{13}\text{C} \sim -30 \text{‰}$), а в сторону утяжеления — за счёт карбонатного углерода ($\delta^{13}\text{C} \sim 0 \text{‰}$).

Предпринимались попытки использования данных по изотопии углерода $\delta^{13}\text{C}$ и при выявлении мантийно-коровых источников углерода для скоплений углеводородов [48, 35, 39 и др.]. Почти тридцать лет назад нами была выполнена сводка данных по изотопии не только углерода ($\delta^{13}\text{C}$), но и водорода (δD) для метана самых различных месторождений и его вероятных и возможных источников углерода [9]. На диаграмме (рис. 7) обособились две ветви газов — углекислых (гидротермы, фумаролы) и углеводородных. Одна ветвь (углекислые газы) увязывается с проявлениями современного или четвертичного вулканизма (магматизма), а другая — углеводородная — с «продуктами» холодной, амагматической дегазации Земли (по П.Н. Кропоткину). Прослеживается и единство генезиса

Рис. 7. Диаграмма изотопного состава углерода $\delta^{13}\text{C}$ и водорода δD метана в различных типах природных газов и их источников [9]: 1–3 — газы фумарол и гидротерм (1 — $\text{CH}_4/\text{H}_2 > 1$; 2 — $\text{CH}_4/\text{H}_2 < 1$); 3 — контуры изотопных полей; 4, 5 — газы, образующиеся при пиролизе высокомолекулярных углеводородов; 6 — сырые нефти; 7 — кероген; 8 — ювенильные источники; 9 — метаморфогенные источники; 10 — метан в залежах нефти и газа (суммарно); 11 — изотопная метка CH_4 для газов Хибинского плутона



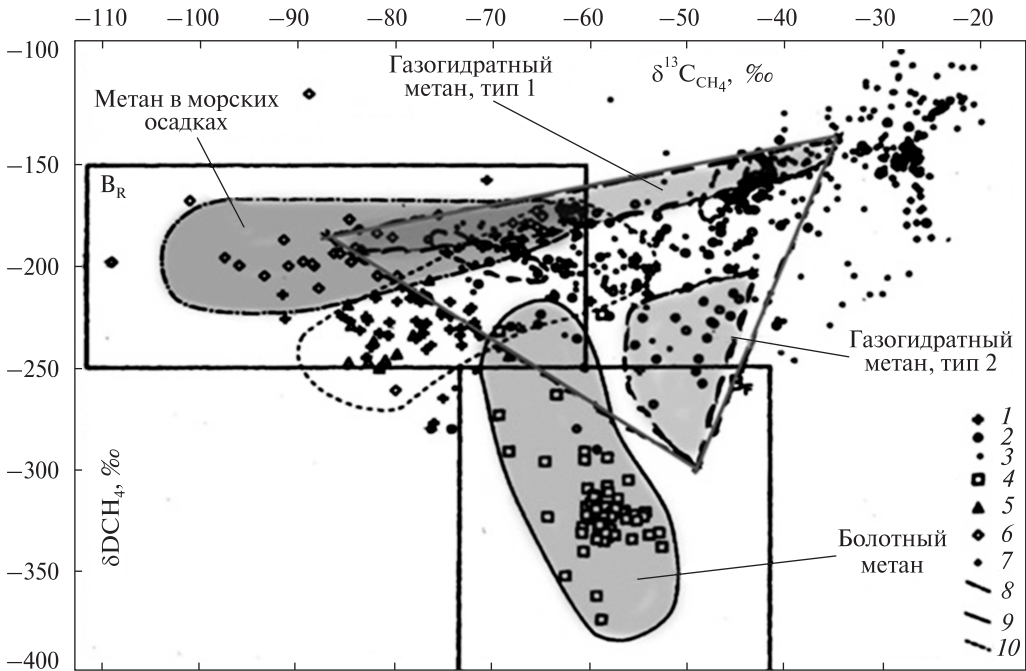


Рис. 8. Изотопный состав углерода и водорода метана различных типов природных газов (включая газогидраты) [5]. Использованы опубликованные данные: Coleman D., Erohin V.E, Galimov E.M., Jenden P., Kvenvolden K., Mattavelli L., Rice D., Schoell M., Whiticar M., Shen Ping, B.Sherwood, Valyaev B.M., Waldron S., et al. Условные обозначения: 1–3 — метан в залежах на глубинах: 1 — до 150 м, 2 — от 150 до 1000 м, 3 — более 1000 м, 4–7 — метан в газах: 4 — болот и осадков озер; 5 — мелководных участков морей и прибрежных болот, 6 — глубоководных участков морей и океанов, 7 — гидротерм Новой Зеландии; 8–10 — изотопные поля метана в газах: 8 — осадков глубоководных морей и океанов, 9 — болот и осадков озер, 10 — залежей на глубинах до 150 м

глубинных флюидов двух ветвей, и их частичное совмещение на диаграмме. Для обеих ветвей могли быть задействованы не только мантийные, но и коровые (рециклические) источники углерода и водорода.

В дальнейшем в ряде публикаций изотопное поле метана углеводородной ветви дегазации Земли на диаграмме $\delta^{13}C/\delta D$ нами дифференцировано, с детализацией генетических построений. По данным для нефтегазовых залежей, формирующихся на разных глубинах, на рис. 8 видно последовательное фракционирование изотопного состава углерода $\delta^{13}C$ и водорода δD метана глубинных углеводородных флюидов в процессах дифференциации и трансформации вторгшихся в осадочный разрез. Трансформация химического и фракционирование изотопного состава глубинных углеводородных флюидов задействованы и в формировании газогидратов. По изотопному составу метана на рис. 8 обособляется два типа газогидратов с изотопно-лёгким углеродом ($\delta^{13}C$) в осадочных разрезах морей и океанов и с изотопно-лёгким водородом (δD) в приарктических регионах континентов. Основные ресурсы газогидратов распространены в приповерхностном интервале осадочных отложений бассейнов дна Мирового океана, и связь их скоплений с локализованными потоками (разгрузками) глубинных углеводородных флюидов прослежена в наших работах [5, 3, 4, 13, 12, 14 и др.].

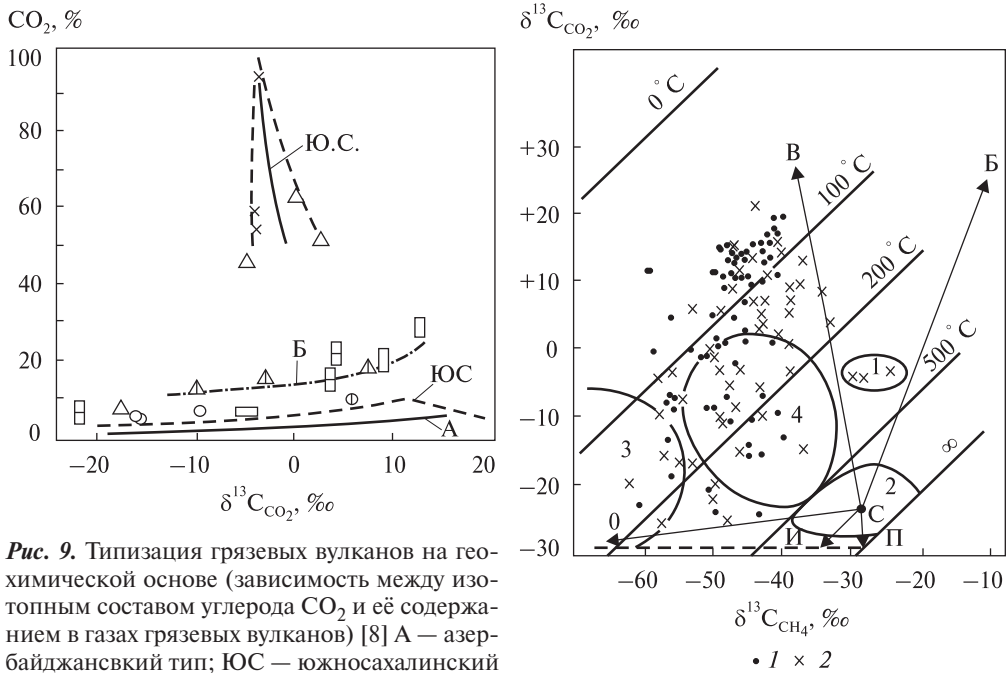


Рис. 9. Типизация грязевых вулканов на геохимической основе (зависимость между изотопным составом углерода CO_2 и её содержанием в газах грязевых вулканов) [8] А — азербайджанский тип; ЮС — южносахалинский тип; Б — булганакский подтип

Рис. 10. Диаграмма соотношений изотопного состава углерода углекислоты и метана для различных типов природных газов. Два типа дегазации Земли: Условные обозначения: 1, 2 — газы грязевых вулканов (1 — Азербайджана, 2 — других регионов СССР); 3 — изотопные изотермы по равновесной системе $\text{CH}_4 - \text{CO}_2$. Контуры изотопных полей групп природных газов (цифры на схеме): 1 — гидротермальных; 2 — термометаморфических (пиролиз органического вещества); 3 — приповерхностных (почвенных, болотных); 4 — залежи нефти и газа на глубинах более 1000 м. С→Б, С→В, С→О, С→И и С→П — лучи направления трансформации глубинных углеводородов

К уникальным объектам разгрузок углеводородных флюидов (seeps, грязевые вулканы) и газогидратонакопления относится регион Черного моря [31, 32 и др.]. Многолетние исследования этого региона, вклад в его изучение украинских специалистов суммирован в недавно вышедшей монографии «Газовый вулканизм Чёрного моря». Авторы этой монографии [28] уделили большое внимание обоснованию глубинной природы не только отдельных разгрузок и грязевых вулканов в Чёрном море, но и отразили роль мантийных диапиров в их формировании, роль специфического геодинамического режима, обусловившего региональный газовый вулканизм Чёрного моря в целом [31].

Наши исследования грязевых вулканов СССР активно проводились в период с 1977 г. по 1985 г. Результаты этих исследований, связанные с изотопно-геохимическими и геодинамическими аспектами, отражены в целом ряде опубликованных работ [18, 8 и др.]. Здесь уместно отметить, что в понимание специфики генезиса грязевых (газонефтяных, газовых) вулканов вносит изучение изотопного состава углерода не только метана, но и углекислоты. Именно содержание в газах углекислоты и специфического состава её углерода в этих вулканах послужили основой для их типизации (рис. 9). Особое место в этой типизации занимает булганакский подтип. Видимо, он находится в одном ряду с теми керченскими

грязевыми вулканами, во вдавленных синклиналиях которых были выделены специфические железные руды в киммерийских отложениях [29, 30, 33 и др.].

Мировой океан, островные дуги, острова становятся объектами новых открытий. В их числе отметим *асфальтовые* (грязевые), *серпентинитовые* (грязевые) вулканы, рожденные в 2006 г. «на ровном месте» на востоке о. Ява (Индонезия), и быстрое разрастание *гидротермального* (грязевого) вулкана Lusi * [36, 45 и др.]. Несомненно грязевый (газовый) вулканизм бассейнов Мирового океана преподнесёт ещё новые открытия и в плане рудоносности [26, 27 и др.].

В завершение статьи уместно воспроизвести ещё одну диаграмму, связанную с нашими исследованиями грязевых вулканов (рис. 10). Из диаграммы следует отчётливая упорядоченность в расположении полей изотопного ($\delta^{13}\text{C}$) состава углерода углекислоты и метана в природных газах между собой и в связи с изотопными изотермами, фиксирующими минимальные температуры происшедшей трансформации состава глубинных углеводородных флюидов на уровне их вторжения в осадочный разрез. Метан грязевых вулканов по изотопному составу углерода близок к метану нефтегазовых месторождений, а по изотопному составу углерода углекислоты обособляется специфическая группа с изотопно-ультратяжёлой углекислотой, выявленной нашими исследованиями [8].

Заключение

Выполнено мультирегиональное обобщение изотопно-геохимических данных в углерод-гелиевых системах по углекислоте вулканической и гидротермальной деятельности и метану нефтегазовых месторождений. Результаты альтернативной интерпретации свидетельствуют о мантийно-коровой природе углеводородных флюидов, участвующих в формировании нефтегазовых месторождений. Изменение состава главных углеродистых компонентов от CO_2 к CH_4 в глубинных флюидах отражает изменение обстановок и механизмов их глубинной генерации при изменении обстановок мантийно-корового взаимодействия.

Разнообразие значений гелиевых $^3\text{He}/^4\text{He}$ (от $0,01 R_a$ до $7 R_a$) и углерод-гелиевых $\text{C}_{\text{CH}_4}/^3\text{He}$ отношений (от 10^9 до 10^{13}) для нефтегазовых месторождений и регионов отражает специфику обстановок восходящей миграции (вторжения) глубинных углеводородных флюидов и трансформации химического и фракционирования изотопного составов их компонентов.

Трансформация и фракционирование глубинных углеводородных флюидов задействованы и в грязевулканической деятельности, и в процессах формирования газогидратов в осадках дна бассейнов Мирового океана.

При сопоставлении углерод-гелиевой диаграммы для углекислоты вулканов и гидротерм с аналогичной диаграммой для метана нефтегазовых месторождений обособляются две ветви глубинной дегазации Земли («горячей и холодной» по П.Н. Кропоткину). Эти же ветви ранее были нами выявлены при анализе

* За восемь лет (2006—2014) спровоцированного землетрясением извержения гидротермального вулкана Lusi излияние грязи в объёме 90 млн m^3 привело к затоплению двенадцати населённых пунктов и эвакуации 40 тыс. их жителей. На этом месте сформировался покров площадью 10 km^2 и толщиной более 30 м. Прибавляется новая страница в познании темпов и интенсивности процессов дегазации Земли.

данных в изотопно-геохимических системах $\delta^{13}\text{C}/\delta\text{D}$ для метана, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}/\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}/\text{CO}_2$ и др. Упорядоченное расположение изотопных полей на этих диаграммах подтверждает генетическое единство систем природных газов при всём их разнообразии.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Валяев Б.М.* Углеродородная дегазация Земли: масштабы и роль в нефтегазоаккумуляции // Геология нефти и газа. — 1994. — № 9. — С. 38—42.
2. *Валяев Б.М.* Углеродородная дегазация Земли и генезис нефтегазоконденсатных месторождений // Газовая промышленность. — 1997. — № 7. — С. 6—10.
3. *Валяев Б.М.* Приповерхностный интервал нефтегазоаккумуляции: специфика и масштабы утилизации углеводородных флюидов // Материалы XVII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии «Геология морей и океанов». — М.: ГЕОС, 2007. — Т. 1. — С. 92—95.
4. *Валяев Б.М.* Утилизация локализованных разгрузок и потоков углеводородов в водной толще и донных осадках акваторий // Материалы XVII Международной конференции (школы) по морской геологии «Геология морей и океанов». — М.: ГЕОС, 2007. — С. 95—97.
5. *Валяев Б.М.* Арктические и приарктические регионы: специфика процессов нефтегазоаккумуляции // Электронный научный журнал. Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. — 2010. — Вып. 1(1). — 19 с.
6. *Валяев Б.М.* Углеродородная дегазация Земли, геотектоника и происхождение нефти и газа (признание и развитие идей П.Н. Кропоткина) // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений (к 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кропоткина). — М.: ГЕОС, 2011. — С. 10—32.
7. *Валяев Б.М.* От генезиса традиционных к генезису традиционных и нетрадиционных скоплений и ресурсов углеводородов // Электронный научный журнал. Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. — 2013. — Вып. 1 (7). — 15 с.
8. *Валяев Б.М., Гринченко Ю.И., Ерохин В.Е. и др.* Изотопный облик газов грязевых вулканов // Литология и полезные ископаемые. — 1985. — № 1. — С. 72—87.
9. *Валяев Б.М., Титков Г.А.* К генезису метана в природных газах (по изотопному составу углерода и водорода) // Доклады АН СССР. — 1985. — Т. 281, № 1. — С. 146—150.
10. *Валяев Б.М., Титков Г.А.* Об изотопном составе водорода метана в скоплениях углеводородов // Доклады РАН. — 1997. — Т. 357, № 6. — С. 808—811.
11. *Валяев Б.М., Титков Г.А., Чудецкий М.Ю.* О генезисе изотопно-лёгкого ($\delta^{13}\text{C}$, δD) метана нефтегазовых месторождений // Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. — М.: ГЕОС, 2002. — С. 108—134.
12. *Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М.* Природа, ресурсы и значимость гидратов природного газа // Газовая промышленность. — 2002. — №11. — С. 22—25.
13. *Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М.* Углеродородная дегазация через дно океана: локализованные проявления, масштабы, значимость // Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. — М.: ГЕОС, 2002. — С. 7—36.
14. *Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М.* Распространение и ресурсы метана газовых гидратов // Наука и техника в газовой промышленности. — 2004. — № 1—2. — С. 5—13.
15. *Дремин И.С.* Углерод-гелиевая изотопная система в расшифровке обстановок генезиса нефтегазовых месторождений // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Нетрадиционные ресурсы углеводородов: распространение, генезис, прогнозы, перспективы развития». 12—14 ноября 2013 г. — М.: ГЕОС, 2013. — С. 44—48.
16. *Каменский И.Л., Якуцени В.П., Мамырин Б.А. и др.* Изотопы гелия в природе // Геохимия. — 1971. — № 8. — С. 914—931.
17. *Каменский И.Л., Лобков В.В., Прасолов Э.М. и др.* Компоненты верхней мантии Земли в газах Камчатки (по изотопам He, Ne, Ar, C) // Геохимия. — 1976. — № 5. — С. 682—695.

18. Кротокин П.Н., Валяев Б.М. Геодинамика грязевулканической деятельности (в связи с нефтегазоносностью) // Геологические и геохимические основы поисков нефти. — К.: Наук. думка, 1981. — С. 148—178.
19. Лаврушин В.И. Подземные флюиды большого Кавказа и его обрамления. — М.: ГЕОС, 2012. — 348 с.
20. Мамырин Б.А. Толстихин И.Н. Изотопы гелия в природе. — М.: Энергоиздат, 1981. — 222 с.
21. Поляк Б.Г. Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры. — М.: Наука, 1988. — 192 с.
22. Поляк Б.Г., Прасолов Э.М., Каменский И.Л. и др. Изотопы гелия в газах Северного Кавказа: следы разгрузки тепломассопотока из мантии // Геохимия. — 1998. — №4. — С. 383—397.
23. Поляк Б.Г., Толстихин И.Н., Якуцени В.П. Изотопный состав гелия и тепловой поток — геохимический и геофизический аспекты тектогенеза // Геотектоника. — 1979. — № 5. — С. 3—23.
24. Прасолов Э.М. Изотопная геохимия и происхождение проиридных газов. — Л.: Недра, 1990. — 283 с.
25. Прасолов Э.М., Толстихин И.Н. Ювенильные газы — He, CO₂, CH₄: их соотношения и вклад во флюиды земной коры // Геохимия. — 1987. — №10. — С. 1406—1414.
26. Шнюков Е.Ф., Белодед Р.М., Цемко В.П. Полезные ископаемые Мирового океана. — К.: Наук. думка, 1979. — 256 с.
27. Шнюков Е.В., Зибров А.П. Минеральное богатство Чёрного моря. — К., 2004. — 280 с.
28. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Пасынков А.А. Газовый вулканизм Черного моря. — К.: Логос, 2013. — 284 с.
29. Шнюков Е.Ф. Науменко П.И. Киммерийские железные руды вдавненных синклиналей Керченского полуострова. — Симферополь: Крымиздат, 1964. — 126 с.
30. Шнюков Е.Ф. Науменко П.И., Лебедев Ю.С. и др. Грязевой вулканизм и рудообразование. — К.: Наук. думка, 1971. — 332 с.
31. Шнюков Е.В., Старостенко В.И., Иванников А.В. и др. Газовый вулканизм Черного моря. — К.: ОМГОР, 2005. — 136 с.
32. Шнюков Е.Ф., Старостенко В.И., Коболев В.П. Газогидратоносность донных отложений Черного моря // Геофиз. журн. — 2006. — Т. 28. — №6. — С. 29—40.
33. Шнюков Е.Ф., Шереметьев В.М., Маслаков Н.А. и др. Грязевые вулканы Керченско-Таманского региона. — Краснодар: Главмедиа, 2005. — 287 с.
34. Якуцени В.П. Динамика современной дегазации Земли по данным гелиево-изотопного критерия // Дегазация Земли и геотектоника. — М.: Наука, 1980. — С. 49—54.
35. Dai JinXing, ZOU CaiNeng, ZHANG ShuiChang et. al. Discrimination of abiogenic and biogenic alkane gases // Sci. China, Ser. D-Earth Sci. — 2008. — Vol. 51, № 12. — P. 1737—1749.
36. Davies R.J., Swabrick R.E., Evans R.J., Huuse M. Birth of a mud volcano: East Java, 29 May 2006 // GSA Today. — 2007. — Vol. 17. — С. 4—9.
37. 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.
38. Marty B., Jambon A. C/³He in volatile fluxes from the solid Earth: implications for carbon geodynamics // Earth and Planetary Science Letters. — 1987. — Vol. 83. — P. 16—26.
39. Ni Yunyan, Dai Jinxing, Zhou Qinghua et. al. Geochemical characteristics of abiogenic gas and its percentage in Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin, NE China // Petrol. Explor. Develop. — 2009. — Vol. 36 (1). — P. 35—45.
40. 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.
41. 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.
42. Sano Y., Marty B. Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs // Chemical Geology — 1995. — Vol. 119. — P. 265—274.
43. 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.

44. Taran Y.A. Geochemistry of volcanic and hydrothermal fluids and volatile budget of the Kamchatka-Kuril subduction zone // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. — 2009. — Vol. 73. — P. 1067—1094.
45. Trigay M. Initial pore pressures under the Lusi mud volcano, Indonesia // *Interpretation*. — 2015. — Vol. 3, № 1. — P. SE33—SE49.
46. Valyaev B., Dremmin I. Recycling of crustal matter and the processes of mantle-crust interaction in the genesis of hydrocarbon fluids // *International Conference on Gas Geochemistry 2013, Patras, Greece, 1—7 September 2013, Book of abstracts*. — P. 32.
47. Wakita H., Y. Sano. $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in CH_4 -rich natural gases suggest magmatic origin // *Nature*. — 1983. — Vol. 305. — P. 792—794.
48. Wakita H., Y. Sano, A. Urabe, Y. Nakamura. 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.
49. Xu Yongchang, Shen Ping, Liu Wenhui et al. Geochemistry of mantle-source volatiles in natural gas of China's petroliferous regions — II. Helium, argon and carbon compounds in mantle-source volatiles // *Science in China (Series D)*. — 1996. — Vol. 26. — P. 187—192.

Статья поступила 17.04.2015

Б.М. Валяев, І.С. Дрьомін

ДЕГАЗАЦІЯ ЗЕМЛІ Й ПРИРОДА
ПРОЦЕСІВ НАФТОГАЗОНАКОПИЧЕННЯ
(ІЗОТОПНО-ГЕОХІМІЧНІ Й ГЕОДИНАМІЧНІ АСПЕКТИ)

Мультирегіональне узагальнення та альтернативна інтерпретація ізотопно-геохімічних даних у вуглець-гелієвій системі свідчать про мантіїно-корову природу вуглеводневих флюїдів, що беруть участь у формуванні нафтогазових родовищ.

Ключові слова: вуглець-гелієва ізотопна система, $C_{\text{CH}_4}/^3\text{He}$, вуглеводневі флюїди, трансформація, грязьові вулкани.

B.M. Valyaev, I.S. Dremyn

DEGASSING OF THE EARTH
AND NATURE OF THE PROCESS OIL-GAS ACCUMULATION
(ISOTOPIC-GEOCHEMICAL AND GEODYNAMIC ASPECTS)

Multiregional generation and alternative interpretation of isotopic geochemical data in carbon-helium systems testify to the mantle-crust nature of hydrocarbon fluids participating in the formation of oil-gas fields.

Keywords: carbon-helium isotope system, $C_{\text{CH}_4}/^3\text{He}$, hydrocarbon fluids, transformation, mud volcanoes.