

ГЛУБИННЫЕ ИСТОЧНИКИ УГЛЕВОДОРОДОВ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ И НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Б.М. Валяев, И.С. Дрёмин
ИПНГ РАН, e-mail: valyb@mail.ru

Генетический характер связи нефтегазовых месторождений с распространением и деятельностью грязевых вулканов был выявлен более ста лет назад [1 и др.]. Г. Абих связывал извержения грязевых вулканов и образование месторождений нефти и газа с глубинными источниками углеводородов. Действительно, масштабы и энергетика грязевулканической деятельности являются важным свидетельством ее глубинной природы.

С конца прошлого столетия в изучение грязевулканической деятельности и разгрузок углеводородов были вовлечены не только нефтегазоносные регионы на суше, но и в акватории Мирового океана. Результаты этих исследований отражены во многих итоговых статьях [2–5 и др.], монографиях [6–8 и др.] и диссертациях [9 и др.]. Выявилась связь гигантских углеводородных ресурсов газогидратов с разгрузками углеводородов на пассивных и активных континентальных окраинах, при отсутствии нефтегазосборных площадей и региональных покрывок [10–11 и др.]. Еще отчетливее обозначилось расхождение интерпретации геологических и геофизических данных в пользу глубинной природы углеводородов в разгрузках и газогидратах (по отношению к геохимическим и изотопно-геохимическим данным, интерпретируемым в пользу диагенетического и катагенетического генезиса углеводородов). Разбуривание всего осадочного разреза в нескольких десятках нефтегазоносных регионов мира свидетельствуют о связи распространения нефтегазовых месторождений с глубинными разломами и корово-мантийными неоднородностями (аномалиями), также вступая в противоречие с результатами интерпретации изотопно-геохимических данных.

Последнее десятилетие характеризуется нарастающим числом публикаций, посвященных абиогенному глубинному генезису углеводородов. Абиогенный генезис углеводородов был в числе основных проблем, разрабатываемых в рамках крупной международной программы «Deep carbon cycle» (США), первые результаты исследований по которой опубликованы в обширной коллективной монографии [12]. Изотопно-геохимические ($\delta^{13}\text{C}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$) критерии абиогенной природы метана и его гомологов пересматриваются и уже не совпадают с прежними изотопными показателями для

мантийных углеводородных флюидов [13–14]. Масштабы участия abiогенных глубинных углеводородов в формировании нефтегазовых месторождений, грязевых вулканов и разгрузок углеводородов остаются дискуссионными.

Изотопно-гелиевое отношение (ИГО) $^3\text{He}/^4\text{He}$ и углерод-гелиевое отношение (УГО) $\text{C}/^3\text{He}$ используются в качестве основных индикаторов в оценках мантийно-корового взаимодействия, масштабов и характера рециклинга корового материала [15–17 и др.]. Высокие (мантийные) значения отношения $^3\text{He}/^4\text{He} = 8R_a$ и концентрации мантийного (примордиального) легкого изотопа гелия ^3He оказываются характерными [18–19] для магматических (мантийных) процессов. Принято считать, что в отличие от вулканов, фумарол и гидротерм, газовая фаза флюидов которых обычно представлена CO_2 , для нефтегазовых месторождений высокие отношения ИГО (более $1R_a$) не характерны. Для выявления участия глубинных факторов в образовании водно-углекислых и углеводородных флюидов важная роль отводится рассмотрению показателей, связанных с углерод-гелиевой изотопно-геохимической системой. В этой системе, в дополнение к ИГО ($^3\text{He}/^4\text{He}$), привлекается углерод-гелиевое отношение числа атомов углерода углекислоты (или метана) к числу атомов легкого (мантийного) изотопа гелия в составе газов, то есть показатели $\text{C}_{\text{CH}_4}/^3\text{He}$ или $\text{C}_{\text{CO}_2}/^3\text{He}$ [20, 15 и др.]. Использование изотопно-гелиевых и углерод-гелиевых показателей и раньше [21], и в последние годы [13, 22, 6 и др.] укрепило представления о том, что в формировании нефтегазовых месторождений участие мантийных (abiогенных) углеводородов незначительно. Аналогичный вывод был сделан и для углеводородных газов грязевых вулканов России по результатам изучения изотопного состава их гелия и углерода метана [6, 9 и др.].

Гармонизация построений по результатам геологических и изотопно-геохимических данных могла быть достигнута только при возможной альтернативной интерпретации последних. Такого рода переинтерпретация нами частично выполнена, и ее результаты опубликованы в ряде статей [23–25], доложены на международных конференциях [26–28]. В статье [23] рассмотрены результаты впервые выполненного мультирегионального обобщения и переинтерпретации данных в рамках углерод-гелиевой изотопной системы для углекислоты вулканов, фумарол и гидротерм. Обобщением охвачены данные по 16 регионам активных Северо-Тихоокеанских окраин, зонам субдукции Центральной и Южной Америки, геодинамически активным регионам Западного Тетиса. Для метана нефтегазовых месторождений наше обобщение охватило 13

нефтегазоносных регионов России, Китая, США, Японии, Новой Зеландии и других стран. На обеих построенных суммарных диаграммах $C_{CO_2}/^3He - ^3He/^4He$ и $C_{CH_4}/^3He - ^3He/^4He$ выявилось межрегиональное и внутрирегиональное разнообразие величин показателей ИГО и УГО. Совмещение и сопоставление этих диаграмм показало их значительное перекрытие (рис. 1). Выявилась близость УГО для метана ($CH_4/^3He$) и углекислоты ($CO_2/^3He$) в широком интервале значений – от 10^8 до 10^{13} [23].

Подобно углекислоте, генезис метана также связан с глубинными, мантийно-коровыми процессами [23]. Рециклинг корового материала был задействован не только при генерации водно-углекислых, но и углеводородных флюидов. Смена типа дегазации от водно-углекислой к углеводородной связана с переходом обстановок генерации глубинных флюидов от окислительных – к восстановительным. Эта генерация сопровождалась ослаблением вулканической и гидротермальной деятельности (магматической активности). Вместе с тем, совмещение двух суммарных диаграмм (см. рис. 1) выявило и их разобшенность по оси $^3He/^4He$. В левой части диаграммы при низких значениях ИГО (от 0,008 R_a до 0,2 R_a) не встречаются показатели, характерные для CO_2 вулканов, фумарол и гидротерм. В правой части диаграмм при высоких значениях ИГО (от 6,5 до 7,8 R_a) не встречаются показатели, характерные для метана нефтяных и газовых месторождений.

Дальнейший анализ потребовал привлечения показателей (значений) не только ИГО ($^3He/^4He$), но и его членов в числителе (3He) и знаменателе (4He). Этот анализ был выполнен с помощью построения изотопно-гелиевых ($^3He/^4He$) диаграмм, по данным для метана нефтегазовых месторождений в рассматриваемых нами 13 нефтегазоносных регионах [25]. Эти диаграммы позволяют анализировать разнообразие ИГО в связи с разнообразием содержаний каждого из изотопов гелия – 3He , 4He . Суммарная изотопно-гелиевая диаграмма демонстрирует то, что интервал изменения содержания гелия (4He) в газах нефтегазовых месторождений превышает 4 порядка величин, а изотопно-легкого гелия (3He) – пять порядков (рис. 2). Но для отдельных регионов этот интервал уменьшается на порядок величин и более. Разнообразие изотопных полей, характеризующее отдельные регионы в целом или их зоны, так же выявляется на диаграмме, как и различия конфигурации (тренды) изотопных полей. Это разнообразие трендов нами было рассмотрено ранее в рамках углерод-гелиевой изотопно-геохимической системы [24].

В рамках изотопно-гелиевой системы по конфигурации трендов изотопных полей выделяются два типа нефтегазоносных регионов, отличающихся по значениям ИГО. Для первого типа характерны низкие значения ИГО (от 0,008 R_a до 0,1 R_a), а для второго – повышенные и высокие значения ИГО (от 0,1 R_a до 6,5 R_a). Первый тип объединяет месторождения современных внутриконтинентальных нефтегазоносных регионов, а второй тип – месторождения современных регионов континентальных окраин и островных дуг. На рис. 3 выделенные типы разделяются зеленой линией D со значением ИГО = 0,1 R_a . Выделенные типы различаются по составу и процессам переработки корового материала, а также характеру и интенсивности магматических и гидротермальных процессов. Оба типа относятся к «холодной» углеводородной ветви дегазации Земли, по П.Н. Кропоткину. При этом для первого типа (см. рис. 3) с низкими значениями (показателями) ИГО характерно отсутствие интенсивных проявлений не только вулканической активности, но и гидротермальной деятельности (совпадает с левой частью совмещенных диаграмм на рис. 1). Во втором типе нефтегазоносных регионов интенсивность проявлений гидротермальной деятельности возрастает параллельно с ростом ИГО.

Полученные результаты выполненных мультирегиональных обобщений и построений в рамках углерод-гелиевой и изотопно-гелиевой систем позволили дополнительно обосновать выделение двух типов (двух ветвей) дегазации Земли (по П.Н. Кропоткину), а также двух типов (двух подветвей) углеводородной ветви дегазации Земли.

Данные по изотопии гелия для обоснования связи генезиса газов грязевых вулканов с глубинными процессами имеют особую ценность. На углерод-гелиевой диаграмме $C_{CH_4}/^3He - ^3He/^4He$ региональные изотопно-геохимические поля для грязевых вулканов формируют полосу-тренд (рис. 4). Наибольшими значениями отношения $C_{CH_4}/^3He$ ($10^{11} - 10^{12}$) характеризуются грязевые вулканы Тамани (Западное Предкавказье) при минимальных значениях отношения $^3He/^4He$ (0,02 – 0,04 R_a). Южно-Сахалинский грязевый вулкан и грязевый вулкан Lusi (о. Ява, Индонезия) располагаются на другом конце тренда с единичными минимальными значениями отношений $C_{CH_4}/^3He$ – до 2×10^8 – и максимальными $^3He/^4He$ – до 6,47 R_a . Углерод-гелиевый тренд включает также грязевулканические регионы других стран. Контур изотопного поля нефтегазоносных регионов оказываются значительно обширнее изотопного поля метана

грязевулканических регионов (см. рис. 4), свидетельствуя о различии обстановок генерации, дифференциации и трансформации углеводородных флюидов.

Как и для нефтегазовых месторождений, для дальнейшего анализа необходимо составление изотопно-гелиевой ($^3\text{He}/^4\text{He}$) диаграммы для газов грязевых вулканов рассмотренных грязевулканических регионов. Как и на углерод-гелиевой диаграмме (см. рис. 4), контуры изотопного поля метана нефтегазоносных регионов на изотопно-гелиевой диаграмме оказываются значительно обширнее изотопного поля метана грязевулканических регионов (рис. 5а). Разброс значений изотопно-тяжелого (^4He) и изотопно-легкого (^3He) на диаграмме для грязевулканических регионов на два порядка меньше, чем для нефтегазоносных регионов. В основном это различие связано с отсутствием высоких концентраций обоих изотопов гелия в газах грязевых вулканов.

Как и для нефтегазоносных регионов, в рамках изотопно-гелиевой системы по конфигурации трендов изотопных полей выделяются два типа грязевулканических регионов, отличающихся по значениям ИГО (рис. 5б). Высокие значения ИГО ($>0,1 R_a$) характерны для грязевулканических регионов континентальных окраин, шельфа Египта, Кахетии (специфический тектонический узел). Значения ИГО менее $0,1 R_a$ свойственны грязевулканическим регионам узловых прогибов вдоль северной окраины Альпийского (Западный Тетис) пояса. Разделительная линия D двух типов грязевулканических регионов (см. рис. 5б) и двух типов нефтегазоносных регионов (см. рис. 3) имеет одно значение ИГО, равное $0,1 R_a$. Как и для нефтегазоносных регионов с низкими значениями ИГО, грязевулканические регионы с низкими значениями ИГО характеризуются отсутствием интенсивных проявлений не только вулканической, но и гидротермальной деятельности. Во втором типе грязевулканических регионов интенсивность проявлений гидротермальной деятельности также возрастает параллельно с ростом ИГО, вплоть до смены типа дегазации их грязевых вулканов, от метана к углекислоте (Сахалин, Индонезия) или – к азоту (Аляска).

Аналогия с нефтегазоносными регионами была отмечена ранее [24] при описании трендов на углерод-гелиевой диаграмме. В нашей статье [23] отмечалось, что суммарное изотопное поле на углерод-гелиевой диаграмме $\text{CH}_4/^3\text{He} - ^3\text{He}/^4\text{He}$ для метана нефтегазовых месторождений не аппроксимируется двухкомпонентной кривой смешения кора–мантия. Эта кривая обычно используется при традиционной интерпретации изотопно-гелиевых данных [21, 6 и др.]. Оказывается, использование этой кривой не

подходит и в приложении к аппроксимации суммы углерод-гелиевых изотопных данных на диаграмме по грязевым вулканам. Универсальные конечные члены двухкомпонентной кривой смешения кора–мантия не отражают весь спектр обстановок рециклической переработки корового материала в процессах мантийно-корового взаимодействия. Но именно это взаимодействие контролирует обстановки и механизмы генерации глубинных углеводородных флюидов и грязевулканической деятельности.

Почти тридцать лет назад нами была выполнена сводка данных по изотопии не только углерода ($\delta^{13}\text{C}$), но и водорода (δD) метана для различных месторождений и его вероятных источников углерода и водорода [29]. На двойной диаграмме (рис. 6) обособились две ветви газов – углекислых (гидротермы, фумаролы) и углеводородных. Одна ветвь (углекислые газы) оказалось увязанной с проявлениями современного или четвертичного вулканизма (магматизма), а другая (углеводородная) с «продуктами» холодной, амагматической дегазации Земли (по П.Н. Кропоткину). Прослеживается общность генезиса 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.

Наши исследования грязевых вулканов СССР активно проводились в период с 1977–1985 г.г. Результаты этих исследований, связанные с изотопно-геохимическими и геодинамическими аспектами, отражены в целом ряде опубликованных работ [30–32 и др.]. Следует отметить, что изучение изотопного состава углерода не только метана, но и углекислоты содействует пониманию специфики генезиса грязевых (газонефтяных, газовых) вулканов.

На рис. 7 воспроизведена еще одна диаграмма, связанная с нашими исследованиями грязевых вулканов. Из диаграммы следует отчетливая 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 чехол. Метан грязевых вулканов по изотопному составу углерода близок к метану нефтегазовых месторождений, а по изотопному составу углерода углекислоты обособляется специфическая группа с изотопно-ультратяжелой углекислотой (см. рис. 7), выявленной в ходе наших исследований [30–31].

Глубинная природа грязевулканической деятельности наиболее ярко проявляется в энергетике и взрывном характере грязевулканических извержений, их связи с сейсмическими процессами. Эта сторона грязевулканической деятельности была детально рассмотрена в нашей статье более тридцати лет назад [32]. С тех пор сделанные в ней выводы получили подтверждение [5, 33–34 и др.].

ВЫВОДЫ

Вовлечение в анализ и переинтерпретацию изотопно-гелиевых материалов по грязевым вулканам позволило получить дополнительные данные для обоснования глубинной природы не только их газов, но и глубинных углеводородных флюидов, участвующих в формировании нефтегазовых месторождений. Выявлена общность изотопно-геохимических полей для типов грязевулканических и типов нефтегазоносных регионов при анализе данных в рамках углерод-гелиевой и изотопно-гелиевой систем. Как оказалось, углерод-гелиевые (УГО) и изотопно-гелиевые (ИГО) отношения относятся к числу важнейших показателей не только геодинамической активности нефтегазоносных регионов, мантийно-коровых взаимодействий, но и специфики процессов нефтегазообразования и нефтегазонакопления.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №14-05-00869И, и в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №1.4П, 2015–2017 г.г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абих Г.В.* О появившемся на Каспийском море острове и материалы к познанию грязевых вулканов Каспийской области (пер. с нем., изд. 1863 г.) // Труды Геол. ин-та АзФАН СССР. Баку. 1939. Т. 12. С. 21–122.
2. *Холодов В.Н.* Грязевые вулканы: распространение и генезис // Литология и полезн. иск. 2012. №4. С.5–27.
3. *Dimitrov L.* Mud volcanoes – the most important pathway for degassing deeply buries sediments // Earth Sci. Rev. 2002. Vol. 59. P. 49–76.
4. *Kopf A.* Significance of mud volcanism // Rev. of Geophys. 2002. Vol. 40. P. 1–49.
5. *Алиев Ад. А.* Грязевые вулканы Каспийского моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2014. №1. С. 34–44.

6. *Лаврушин В.Ю.* Подземные флюиды большого Кавказа и его обрамления // Труды Геологического института. М.: ГЕОС, 2012. Вып. 599. 348 с.
7. *Hovland M., Judd A.G.* Seabed fluid flow: impact on geology, biology and the marine environment // Cambridge University Press. Cambridge, 2007. 177 p.
8. *Etioppe G.* Natural gas seepage // The Earth's Hydrocarbon Degassing. Springer, Switzerland. 2015. 199 p.
9. *Киквадзе О.Е.* Геохимия грязевулканических флюидов Кавказского региона. Автореф. дис.... канд. геол.-минерал. наук. М., 2016. 29 с.
10. *Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М.* Углеводородная дегазация через дно океана: локализованные проявления, масштабы, значимость // Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: ГЕОС, 2002. С. 7–36.
11. *Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М.* Природа, ресурсы и значимость гидратов природного газа // Газовая промышленность. 2002. № 11. С. 22–25.
12. Carbon in Earth. Reviews in Mineralogy and Geochemistry // Mineralogical Society of America, Geochemical Society. 2013. Vol. 75. 698 p.
13. *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.
14. *Etioppe G., Schoell M.* Abiotic Gas: Atypical, But Not Rare // Elements. 2014. Vol. 10. P. 291–296.
15. *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.
16. *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.
17. *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.
18. *Polyak B.G.* Heat and mass transfer from the mantle: heat flow and He-isotope constraints // Annals of Geophysics. 2005. Vol. 48, № 1. P. 9–17.
19. *Прасолов Э.М.* Изотопная геохимия и происхождение природных газов. Л.: Недра, 1990. 283 с.

20. *Marty B., Jambon A.* $C^{13}He$ in volatile fluxes from the solid Earth: implications for carbon geodynamics // *Earth and Planetary Science Letters*. 1987. Vol. 83. P. 16–26.
21. *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. № 1570. P. 31–56.
22. *Zhijun Jin, Liuping Zhang, Yang Wang et. al.* 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.
23. *Валяев Б.М., Дремин И.С.* Природа процессов нефтегазообразования и нефтегазонакопления: углеводородные флюиды и первичный гелий [Электронный ресурс] // *Георесурсы, геоэнергетика, геополитика: электронный научный журнал*. 2014. Вып. 2(10). 25 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru/> (Дата обращения 22.12.2016 г.).
24. *Валяев Б.М., Дремин И.С.* Углерод-гелиевая изотопно-геохимическая система: тренды разнообразия и единства генезиса углеводородных флюидов и месторождений [Электронный ресурс] // *Георесурсы, геоэнергетика, геополитика: электронный научный журнал*. 2015. Вып. 1(11). 24 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru/> (Дата обращения 22.12.2016 г.).
25. *Валяев Б.М.* Изотопно-гелиевые показатели геодинамических обстановок процессов нефтегазообразования и [Электронный ресурс] // *Георесурсы, геоэнергетика, геополитика: электронный научный журнал*. Выпуск 1(13). 2016. 15 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru/> (Дата обращения 22.12.2016 г.).
26. *Valyaev B.M., Dremmin I.S.* Deep Roots of the Fluid Systems and Oil-Gas Fields (Isotope Geochemical and Geodynamic Aspects) // *Abstracts of the International Conference Goldschmidt2015*. Prague (Czech Republic), 2015. P. 3221.
27. *Valyaev B.M., Dremmin I.S.* Origin of Mud Volcano Gases and Gas Fields (Isotope-geochemical and Geodynamic Aspects) // *Abstracts of the International Conference on Gas Geochemistry 2015 (ICGG-13)*, Chengdu (China), 2015. P. 29–30.
28. *Valyaev B.M., Dremmin I.S.* Hydrocarbon degassing of the earth and origin of oil-gas fields (isotope-geochemical and geodynamic aspects) // *Abstracts of the International Conference EGU General Assembly 2016*. Vienna (Austria), 2016. P. 921.
29. *Валяев Б.М., Тутков Г.А.* К генезису метана в природных газах (по изотопному составу углерода и водорода) // *Докл АН СССР*. 1985. Т. 281, № 1. С. 146–150.

30. *Валяев Б.М., Гринченко Ю.И., Ерохин В.Е. и др.* Изотопный облик газов грязевых вулканов // Литология и полез. ископаемые. 1985. № 1. С. 72–87.
31. *Валяев Б.М. Гринченко Ю.И.* О генезисе изотопно-ультротяжелой углекислоты // Бюллетень МОИП. Отд. Геол. 1985. Т. 60, Вып. 3. 20 с.
32. *Кропоткин П.Н., Валяев Б.М.* Геодинамика грязевулканической деятельности (в связи с нефтегазоносностью) // Геологические и геохимические основы поисков нефти. Киев: Наукова думка, 1981. С. 148–178.
33. *Manga M., Brumm M., Rudolph M.L.* Earthquake triggering of mud volcanoes // Marine and Petroleum Geology. 2009. Vol. 26. P. 1785–1798.
34. *Mellors R. Kilb., Aliyev A., Guseinov A., Yetirmishli G.* Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions // Journal of Geophysical research. 2007. Vol. 112 (B4). B04304.

ПРИЛОЖЕНИЕ

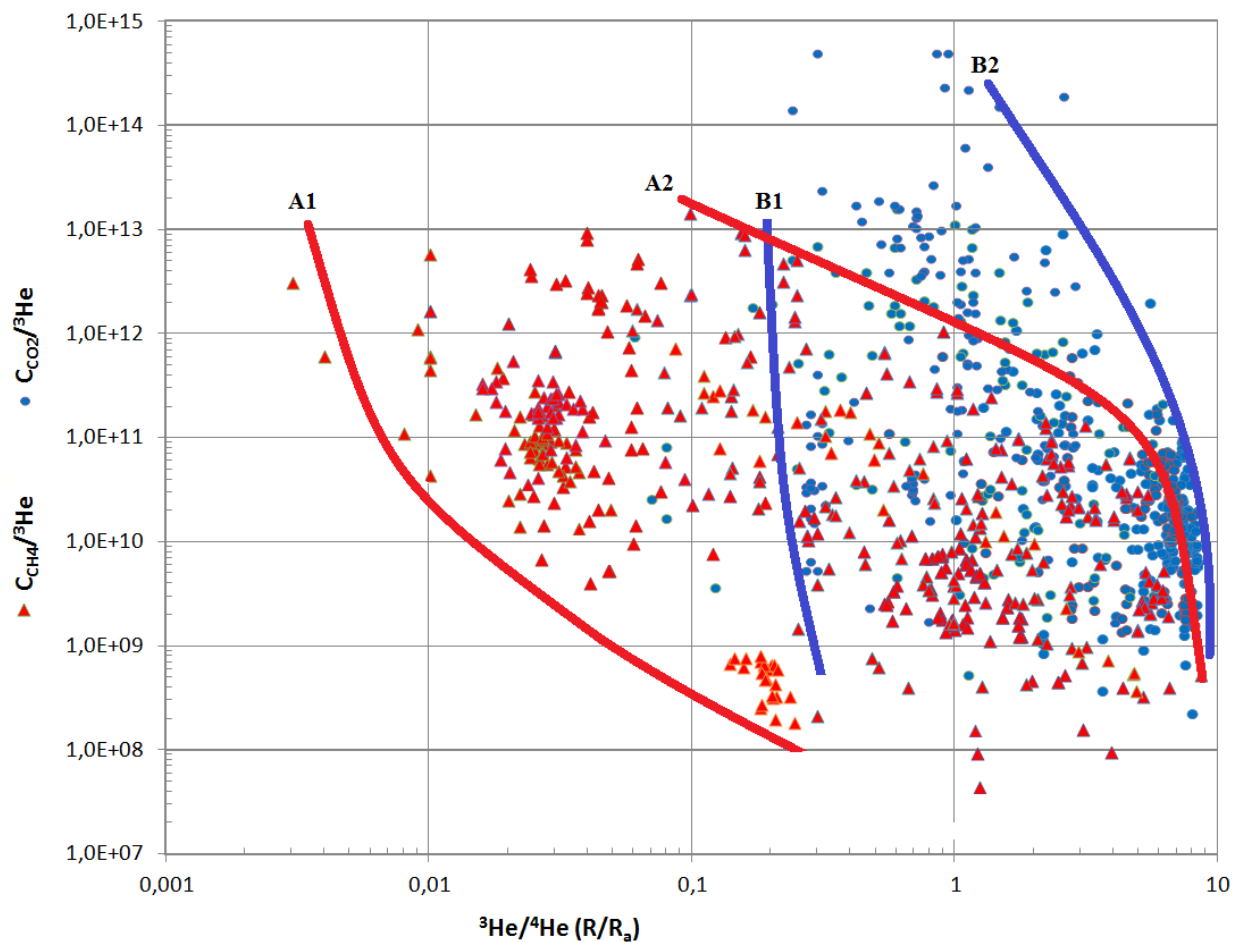


Рис. 1. Объединение суммарных диаграмм изотопно-гелиевых ($^3He/^4He$) и изотопно-геохимических углерод-гелиевых соотношений для метана ($C_{CH_4}/^3He$) и углекислоты ($C_{CO_2}/^3He$), красные значки и линии отражают суммарное поле метана для нефтегазовых месторождений; синие значки и линии отражают суммарное поле углекислоты для флюидов вулканов, фумарол и гидротерм. (Данные для построения приведены в статье [23])

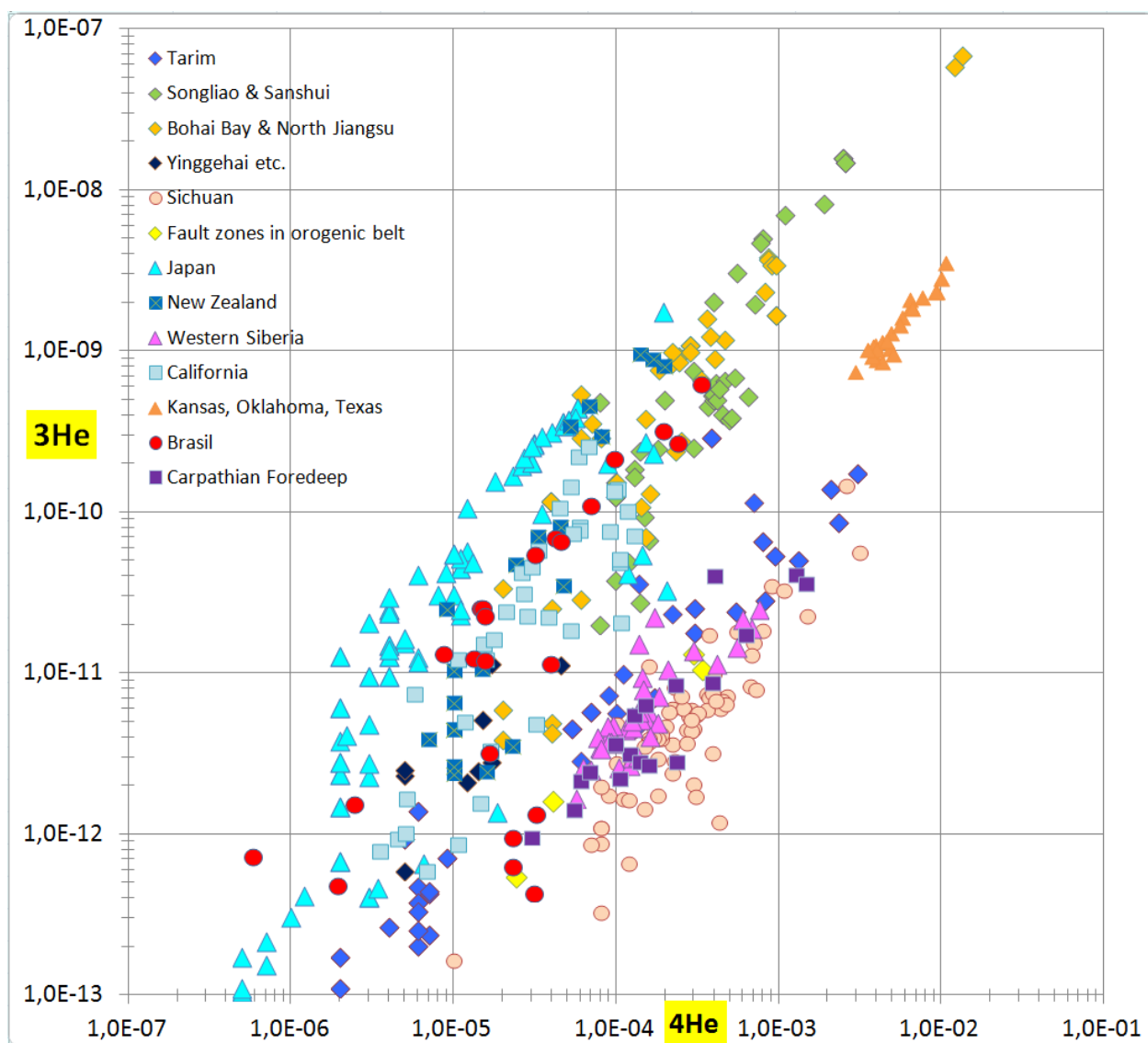


Рис. 2. Мультирегиональная изотопно-гелиевая диаграмма для метана нефтегазовых месторождений, (по данным [23])

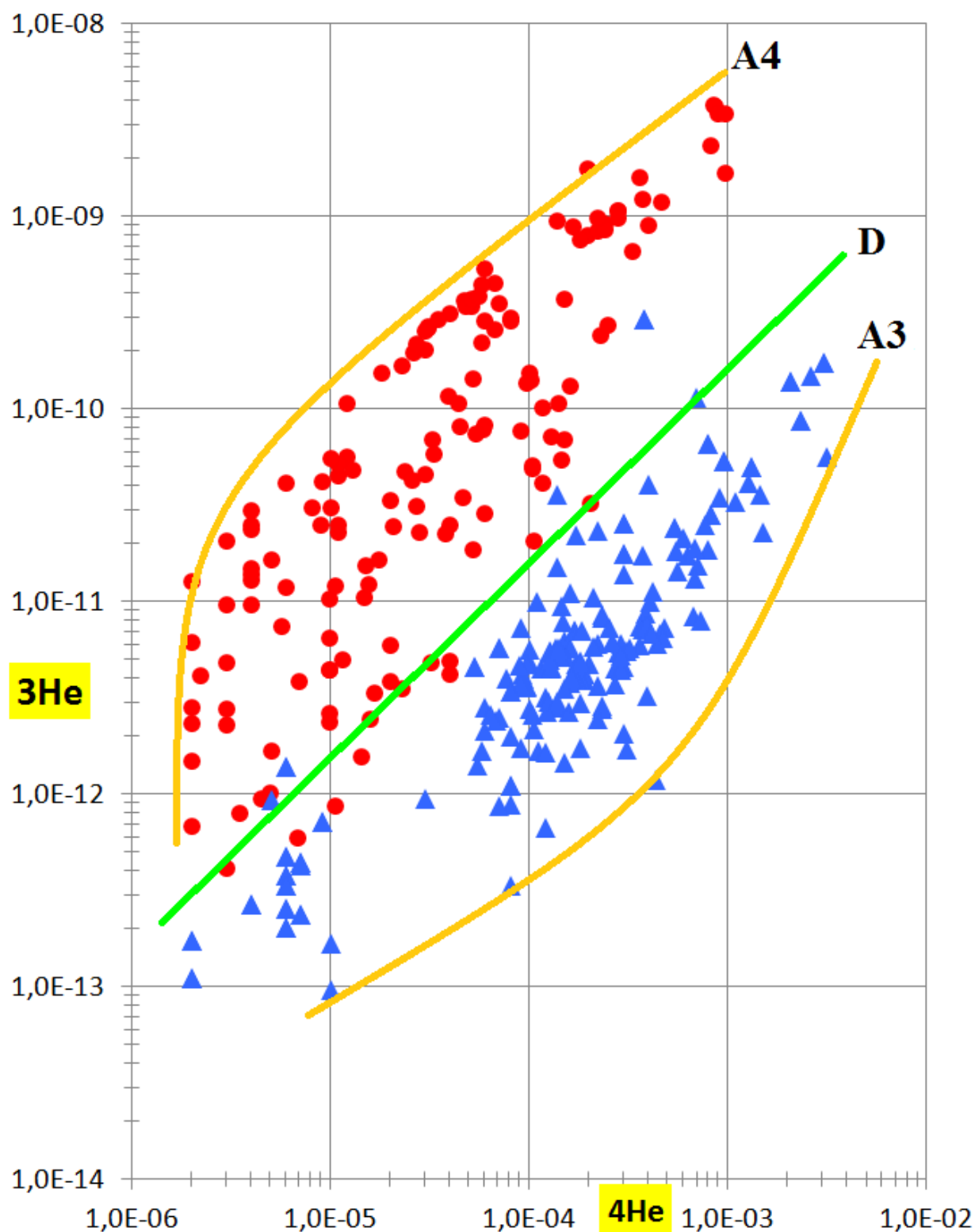


Рис. 3. Модификация рис. 2. Изотопно-гелиевая диаграмма для метана месторождений: сопоставление нефтегазоносных регионов с умеренными (менее $0,1R_a$, синие значки) и с высокими (от $0,1R_a$ до $6,5R_a$, красные значки) значениями отношений $^3\text{He}/^4\text{He}$. Кривые A3 и A4 обрамляют изотопное поле метана нефтегазовых месторождений. (Модификация рис. 2)

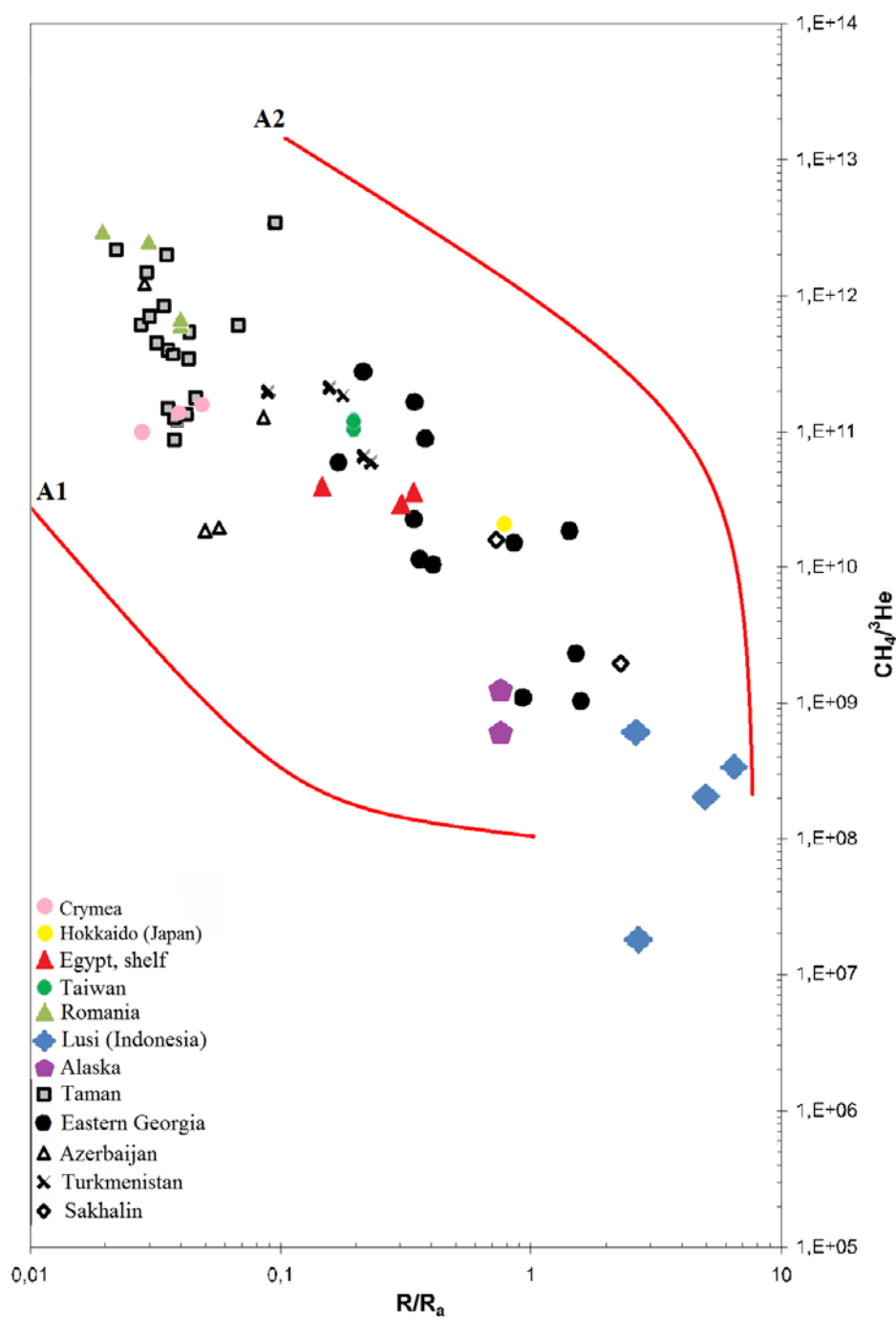


Рис. 4. Взаимосвязь отношений $\text{CH}_4/^3\text{He}$ и R/R_a в газах грязевых вулканов бывшего Советского Союза (Lavrushin et al., 2009) с нашими дополнениями по данным грязевых вулканов других регионов (Prinzhofer et al., 2013; Etiope et al., 2004; Gordienko et al., 2001; Kazuya Miyakawa et al., 2013; Yang et al., 2003; Mazzini et al., 2012; Motyka et al., 1989).

Линии A1 и A2 взяты с рис. 1. Они ограничивают изотопное поле метана нефтегазовых меторождений

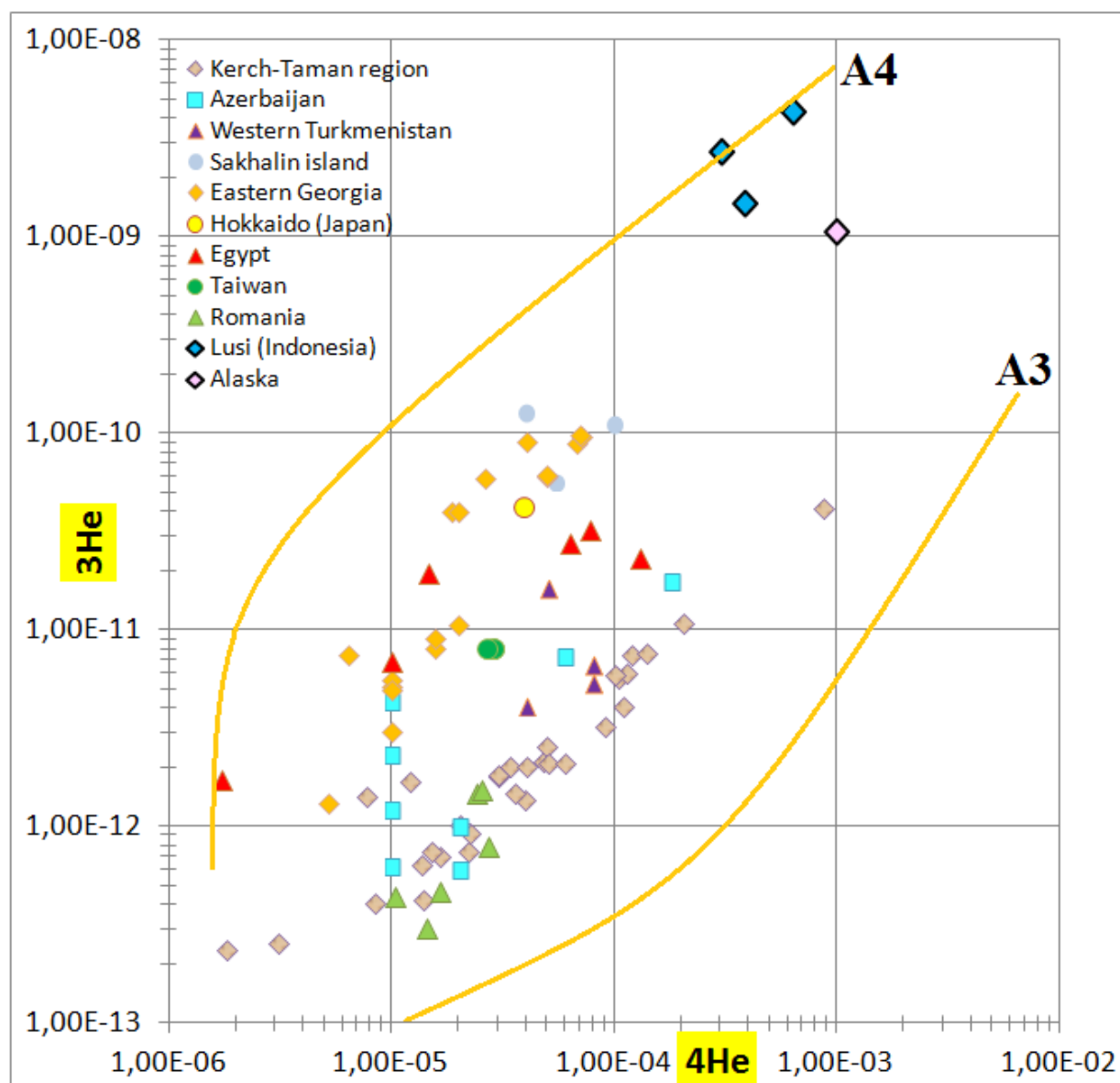


Рис. 5а. Мультирегиональная изотопно-гелиевая диаграмма для метана грязевых вулканов (по данным [6] с дополнениями). Кривые А3 и А4 обрамляют изотопное поле метана нефтегазовых месторождений на рис. 3

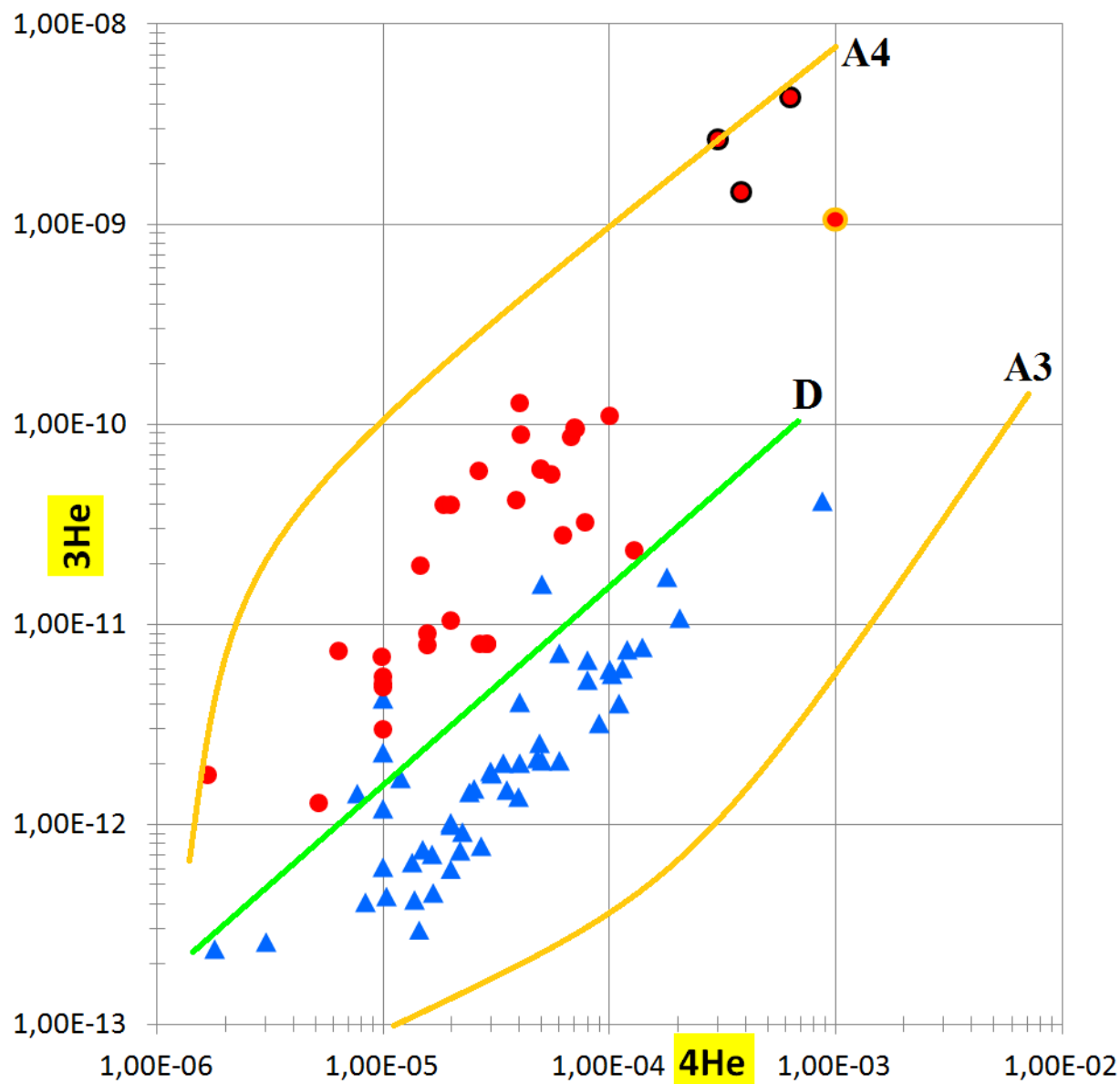


Рис. 5б. Модификация рис. 5а. Два типа грязевулканических регионов: с умеренными (менее $0,1R_a$, синие значки) и с высокими (от $0,1R_a$ до $6,5R_a$, красные значки) значениями отношений $^3\text{He}/^4\text{He}$. Кривые A3 и A4 обрамляют изотопное поле метана нефтегазовых месторождений

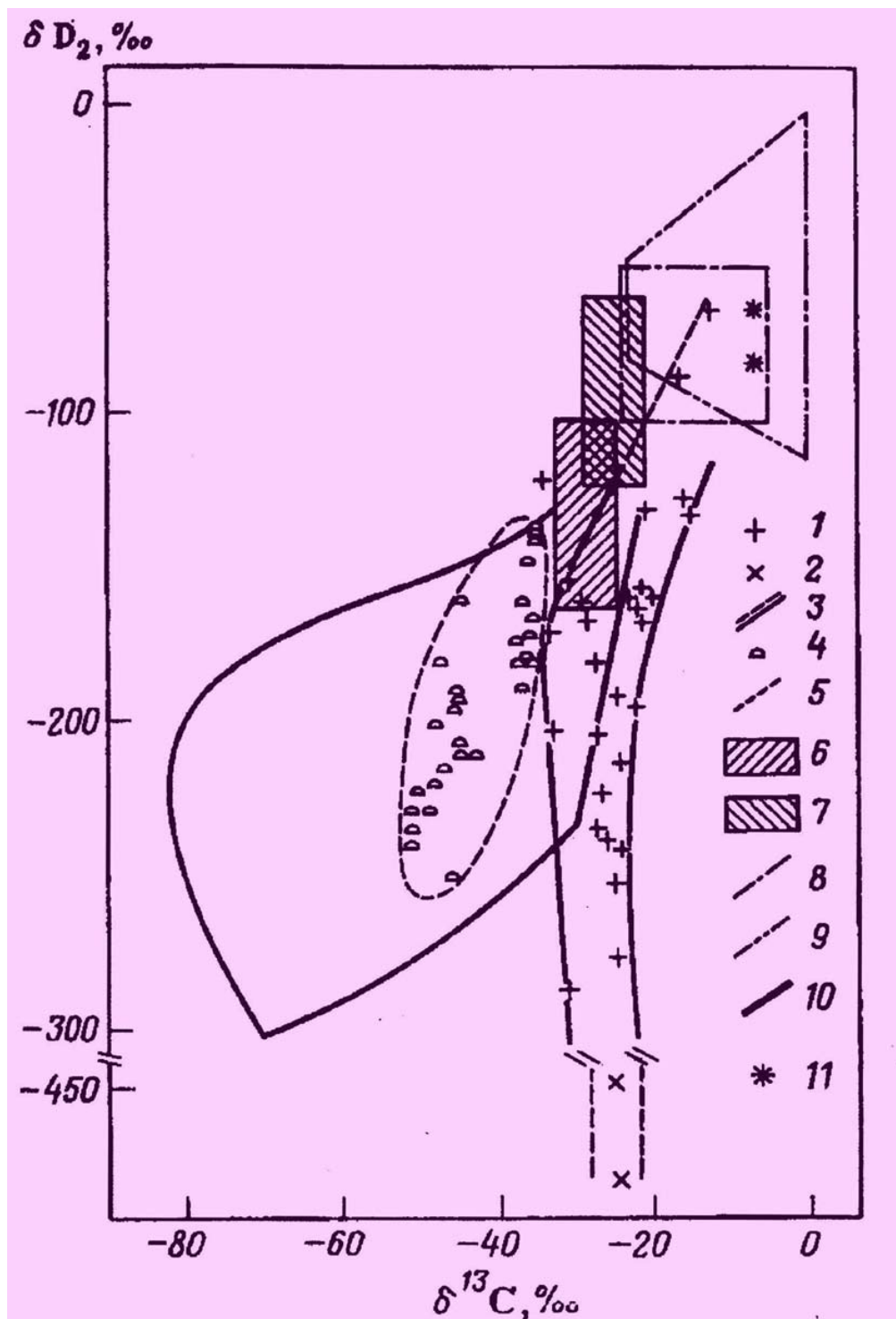


Рис. 6. Диаграмма изотопного состава углерода $\delta^{13}\text{C}$ и водорода δD метана в различных типах природных газов и их источников [27].

Условные обозначения: 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

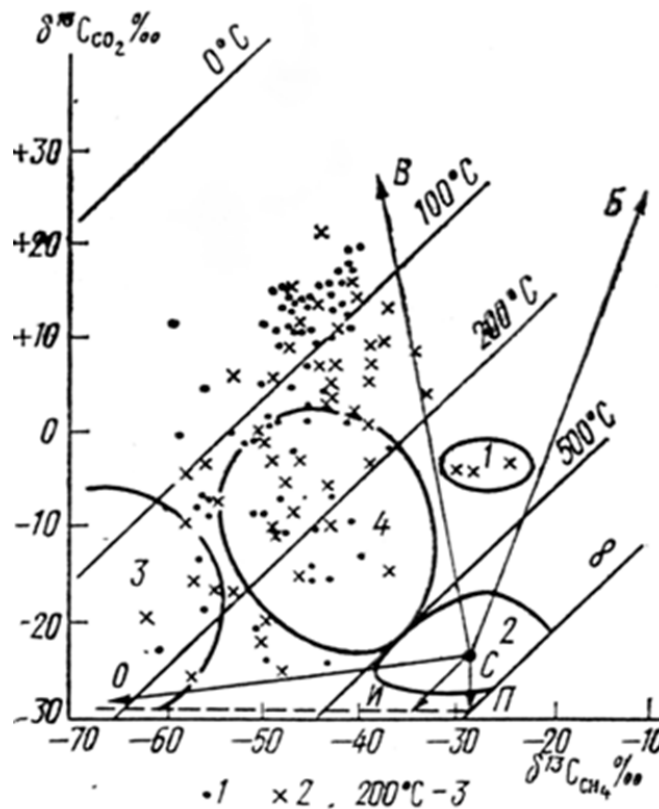


Рис. 7. Диаграмма соотношений изотопного состава углерода углекислоты и метана для различных типов природных газов. Два типа дегазации Земли.
 Условные обозначения 1-2 – Газы грязевых вулканов (1 – Азербайджана, 2 – других регионов СССР); 3 – изотопные изотермы по равновесной системе $\text{CH}_4 - \text{CO}_2$.
 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 (СБ, СВ, СО, СИ и СП – лучи направления трансформации глубинных углеводородов)