
doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.08.076>

УДК 553.98:552.6:556.1

А.Е. Лукин, И.П. Гафич

Институт геологических наук НАН Украины, Киев

E-mail: chv_ukrdgri@ukr.net

Позднеэпигенетический фрамбоидальный пирит в глубокозалегающих коллекторах газоконденсатных залежей

Представлено академиком НАН Украины А.Е. Лукиным

В поровом пространстве вторичных коллекторов нефти и газа на больших (4,5–6,5 км) глубинах установлено присутствие фрамбоидального пирита, который относится к терминальным позднеэпигенетическим новообразованиям. Это не только показатель специфических тектонофизических и геотермобарических условий нефтегазоаккумуляции на больших глубинах, но и индикатор процессов “самоочистки” глубинных газоконденсатных систем от сероводорода, реагирующего с ионами двухвалентного железа маломинерализованных гидрокарбонатных вод глубинной гидрогеологической инверсии.

Ключевые слова: *газоконденсатные углеводородные системы, вторичные коллекторы, позднеэпигенетические процессы, фрамбоидальный пирит.*

Данные глубокого ($\geq 4,5$ км) и сверхглубокого ($\geq 6,1$ км) бурения имеют особое значение для понимания процессов нафтидогенеза и формирования углеводородных систем в экстремальных геотермодинамических условиях. Были открыты новые морфогенетические типы пород-коллекторов, освоение которых в Днепровско-Донецкой впадине (ДДВ) позволило резко увеличить объемы газодобычи [1]. В их поровом (точнее — трещинно-каверно-поровом) пространстве установлено присутствие различных минеральных индикаторов наложенных позднеэпигенетических процессов, изучение которых позволяет выявить ряд новых закономерностей формирования глубокозалегающих продуктивных горизонтов [2]. В частности, значительный интерес представляет открытие явно позднеэпигенетического фрамбоидального пирита (ФП), который, согласно общепринятым представлениям, имеет микробиогенную (фоссилизированные сульфатредуцирующие бактерии) природу и относится к седиментогенно-раннедиагенетическим показателям — характерным фаціальным признакам гидрокарбонатных (эвксиниты, доманикоиды) и угленосных отложений [3, 4]. Характерны они и для криптогипергенных процессов в зоне сульфатных вод затрудненного водообмена [2]. Присутствие же их в составе гипогенно-аллогенетических

© А.Е. Лукин, И.П. Гафич, 2018

минеральных ассоциаций существенно расширяет диапазон геологических условий образования ФП.

Эти удивительные по своему виду сложноорганизованные на нано- и микроуровне минеральные агрегаты известны более 100 лет. Фрамбоид (от франц. framboise — малина) — это (суб)сферический агрегат (~5–10 мкм) плотно упакованных изометричных, но разнообразных по кристалломорфологии (сферы, октаэдры и др.) кристаллов (0,2–2,0 мкм), количество которых в одном фрамбоиде варьирует от 10^2 до 10^5 [5]. Состав их преимущественно дисульфидный — FeS_2 (пирит, а также гель-пирит, троилит), реже грейгитовый (Fe_3S_4) [6].

Как уже отмечалось [7], идея о биогенной природе ФП была впервые высказана в 1928 г. известным специалистом по рудным месторождениям Г. Шнейдерхеном, который рассматривал их как результат пиритизации индивидуальных бактерий и их колоний. Эти представления получили широкое развитие в многочисленных работах ряда специалистов по геомикробиологии, минералогии, литологии и осадочному (вулканогенно-осадочному) рудообразованию. Здесь уместно отметить, что микробиогенную природу ФП можно трактовать неоднозначно. Если говорить об источнике сероводорода, то несомненна его связь с жизнедеятельностью метанотрофных сульфатредуцирующих бактерий в современных и древних фациальных зонах с конседиментационным H_2S -заражением. В частности, обильные и разнообразные скопления микробиогенного ФП — один из важнейших фациальных признаков гидрокарбонатитов или черных сланцев (black shales) — древних аналогов сапропелевых илов — осадков водоемов эвксинского типа. Характерной особенностью микробиогенного ФП является аномально облегченный изотопный состав сульфидной серы ($\delta^{34}\text{S} -10 \div -25 \text{‰}$) [7]. Значительное изотопное облегчение органической серы эвксинитов приблизительно в таком же диапазоне ($\delta^{34}\text{S}_{\text{орг}} -12 \div -25 \text{‰}$) подтверждает ведущую роль биохимического H_2S в процессе сульфуризации органического вещества (керогена). Здесь ярко проявляется отмеченная неоднозначная роль микробиологического фактора в дисульфидном фрамбоидогенезе. Интенсивная генерация H_2S в присутствии реакционноспособного двухвалентного железа в иловых растворах обуславливает образование глобулярного гель-пирита. Наряду с этим идут процессы прямого замещения пиритом как отдельных бактерий, так и их колоний. Тем не менее трактовка фрамбоидального и вообще глобулярного пирита исключительно как “оруденелых бактерий” [8, с. 1140], особенно применительно к эндогенным колчеданным месторождениям в вулканогенных и эффузивно-осадочных формациях, является весьма дискуссионной. В эвксинских и болотных фациях разного возраста осаждение ФП, несомненно, “индуцируется биологически” [8, с. 1140]. Однако ошибочно полагать на этом основании, что микробиогенный фактор фрамбоидогенеза является универсальным. Не говоря о фрамбоидальных агрегатах самородного железа и сульфидов в углистых хондритах, о возможности абиогенного происхождения ФП свидетельствуют результаты исследований различных земных объектов [7]. В частности, обилие ФП установлено в детально изученных инъекциях темноцветного полиминерального вещества по стилолитизированным трещинам естественного фрекинга и в виде цемента брекчий дробления [9]. В отличие от микробиогенного ФП эвксинитов, с изотопно-легкой серой этот генетический тип ФП характеризуется значениями $\delta^{34}\text{S} (\pm 0,5)$, близкими к метеоритному стандарту, что свидетельствует о глубинном (мантийном) источ-

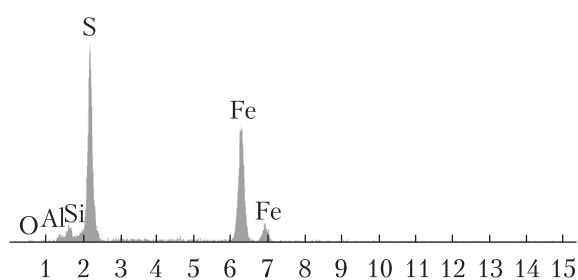
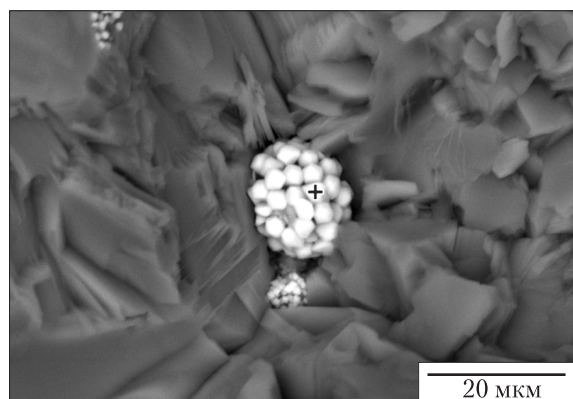


Рис. 1. ФП в центральной части вторичной поры-каверны, заполненной микропористым агрегатом кристаллов триклинного совершенного каолинита. Растровый электронный микроскоп РЭМ-106 (ДДВ, Камышняяское газоконденсатное месторождение, скв. 2, 5480–5497 м)

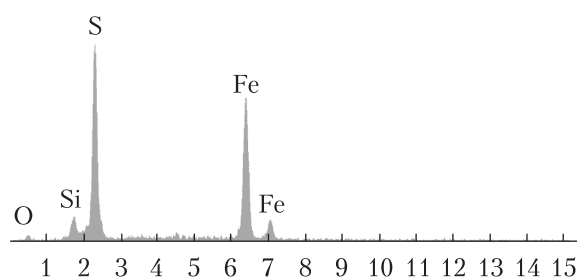
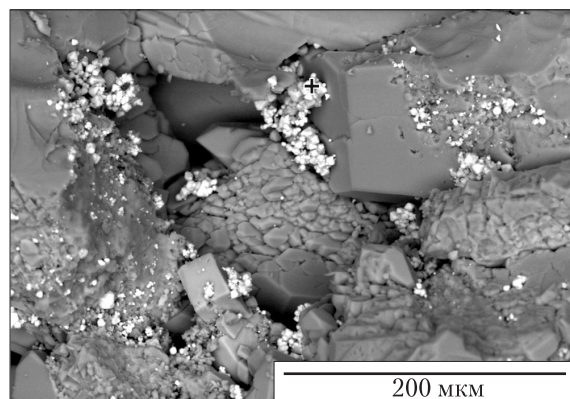


Рис. 2. Терминальная фрамбоидальная пиритизация на стенках позднеэпигенетических пор (каверн) во вторичном кварцево-песчаном коллекторе суперглубокой газоконденсатной залежи (ДДВ, Семиренкоовское газоконденсатное месторождение, скв. 17, 6531–6533 м)

нике серы [7, 9]. Это характерно и для цементирующего вещества агрегатов взрывных брекчий (включая кимберлиты и разнообразные флюидизиты), а также разнообразных туфов, игнимбритов, туфобрекчий, черная окраска которых связана не только с углеродистым метасоматозом, но и с дисперсным грейгитом (мельниковитом), гель-пиритом и пиритом. Абиогенное образование ФП наблюдается в фумарольных областях современного вулканизма [10]. Возможность абиотического генезиса ФП доказана и экспериментально [11].

Таким образом, ФП полигенетичен и вместе с тем характеризуется какими-то общими особыми механизмами формирования природных минеральных агрегатов на фоне широкого диапазона геологических обстановок. Здесь в качестве общего свойства биогенных и абиогенных ФП уместно особо подчеркнуть фрактальность (самоподобие) фрамбоидов. Это яркий пример “фрактальной геометрии природы”, близкой к классическому образцу фрактала — множеству Мандельброта [12].

Свойством фрактальности, как известно [12], обладают различные объекты как живой, так и неживой природы, возникающие в нелинейных динамических условиях. Применительно к природному минералообразованию это пульсирующий пароксизмальный флюидодинамический режим, характеризующийся резкими колебаниями давлений, температур, а также pH и Eh [7]. Он характерен для различных геологических обстановок. В водоемах с придонным H₂S-заражением, как отмечалось, это может быть связано с сезонной циклич-

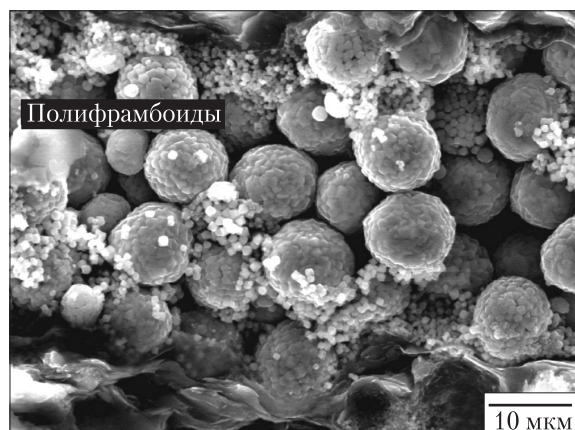


Рис. 3. ФП (полифрамбоидный агрегат) в черных сланцах эвксинского типа (США, Преаппалачский прогиб, формация Marcellus, средний девон) (по G.G. Lash, R. Blood)

ностью микробиологической активности, в областях активного вулканизма — с эксплозивными явлениями и поствулканической фумарольно-сульфатарной активностью, в нефтегазоносных и рудоносных бассейнах — с тектоно-термальной активностью [13, 14]. В связи с этим особого внимания заслуживает присутствие ФП в поровом пространстве вторичных коллекторов нефти и газа глубоководных продуктивных горизонтов.

Как уже отмечалось [15], появление в катагенетически уплотненных (с элиминированной первичной пористостью) кварцитопесчаниках вторичной пустотности связано с фазами тектоно-(гидро)термальной активизации на нео- и актуотектонических этапах и обусловлено наложенным (гипогенный аллогенез) разуплотняющим воздействием восходящих высокоэнталийных флюидов (s.l.) плюм-тектонической природы. Индикатором этих процессов является сложная по составу (до 20–30 и более различных минералов) минерализация. К ней относятся и ФП, пространственно-временные соотношения которого с другими минеральными индикаторами гипогенного аллогенеза позволяют отнести их к наиболее поздним (терминальным) генерациям. Прежде всего это относится к диккит-каолинитовым кристаллическим агрегатам — наиболее важным индикаторам продуктивных вторичных коллекторов [14, 15]. Они неравномерно заполняют сложное по морфологии трещинно-кавернозное пространство и характеризуются изменчивой межкристаллитной микропористостью. Спорадическое присутствие ФП в центральных частях таких микропор (рис. 1) свидетельствует о том, что в этой позднеэпигенетической ассоциации ФП является терминальным новообразованием. Скопления ФП инкрустируют стенки “пустых” вторичных пор катаклазированного и перекристаллизованного кварца (рис. 2). Это подтверждает связь разуплотнения глубоководных катагенетически уплотненных компетентных пород (в данном случае — кварцитопесчаников и кристаллически зернистых

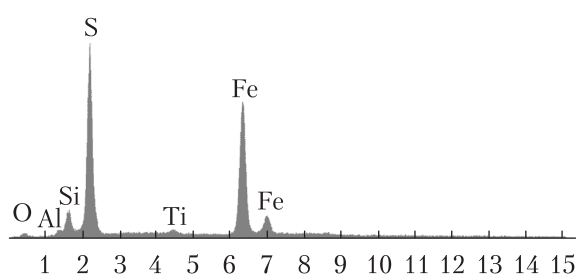
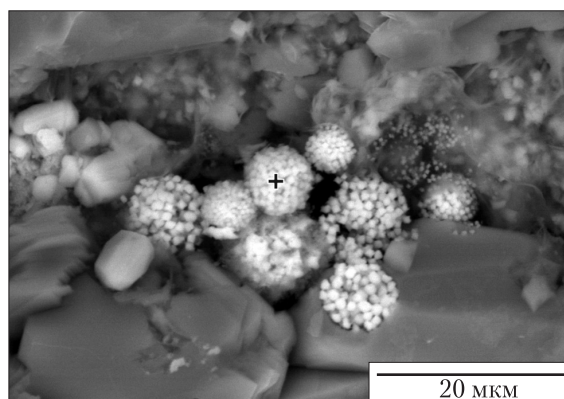


Рис. 4. Скопление позднеэпигенетического ФП во вторичной поре-каверне гипогенно-разуплотненного кварцитопесчаника (ДДВ, Камышнянское газоконденсатное месторождение, скв. 2, 5480–5497 м)

известняков) с пульсирующим характером тектоно-(гидро)термальной активизации [13, 14], которая сопровождается импульсным стрессом [14]. Последний проявляется в микросдвиговых дислокациях (наличие характерных ромбовидных и треугольных пор), которые сопровождаются резкими сбросами давления, индикатором чего являются сферическая форма ФП и сублимационный характер пиритизации.

Это позволяет объяснить поразительное сходство, которое наблюдается в характере заполнения первичных полостей в седиментогенезе — раннем диагенезе (сапропелевые илы и их древние аналоги — рис. 3) и вторичных пустот в глубокозалегающих коллекторах нефти и газа (рис. 4). Таким образом, ФП как сферическая форма самоорганизации наносферул является показателем импульсного падения давления, характерного для процессов тектоно-гидротермальной активизации, с которыми связано формирование вторичных коллекторов нефти и газа. Наряду с триклинным совершенным каолинитом, ФП относится к наиболее поздним минеральным новообразованиям. Его присутствие является показателем не только специфических тектонофизических и геотермобарических условий нефтегазонакопления на больших глубинах, но и индикатором процессов «самоочистки» глубинных газоконденсатных систем от сероводорода, реагирующего с ионами двухвалентного железа мало-минерализованных гидрокарбонатных вод глубинной гидрогеологической инверсии.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Лукин А.Е. Углеродный потенциал больших глубин и перспективы его освоения в Украине. *Геофиз. журн.* 2014. **36**, № 4. С. 3–23.
2. Лукин А.Е. Генетические типы вторичных преобразований и нефтегазонакопление: Препр. Институт геологических наук АН УССР. Киев, 1989. 52 с.
3. Астафьева М.М., Розанов А.Ю., Хувер Р. Фрамбоиды: их структура и происхождение. *Палеонтол. журн.* 2005. № 5. С. 3–9.
4. Кизильштейн Л.Я., Минаева Л.Г. Происхождение фрамбоидальных форм пирита. *Докл. АН СССР.* 1972. **206**, № 5. С. 1187–1189.
5. Butler I., Rickard D., Grimes S. Framboidal pyrite: self organisation in the Fe–S system. *J. Conf. Abstr.* 2000. **5**, № 2. P. 276–277.
6. Штрюбель Г., Циммер З. Минералогический словарь. Москва: Недра, 1987. 494 с.
7. Лукин А.Е., Лукина О.И., Самойленко И.И. Природа фрамбоидального пирита. *Геолог Украины.* 2007. № 3. С. 16–31.
8. Скрипченко Н.С., Лыткин В.А. Структура и генезис «оруденелых бактерий». *Докл. АН СССР.* 1969. **188**, № 5. С. 1137–1140.
9. Лукин А.Е. Инъекции глубинного углеводородно-полиминерального вещества в глубокозалегающих породах нефтегазоносных бассейнов: природа, прикладное и гносеологическое значение. *Геол. журн.* 1999. № 4. С. 7–22.
10. Augusto M.R., Caselli A.T. Manifestaciones de piritas framboidales en fumarolas de Isla Decepción (Antártida): Implicancias metalogénicas. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* 2004. **59**, № 1. P. 152–157.
11. Ohfuic H., Rickard D. Experimental syntheses of framboids — a review. *Earth-Sci. Rev.* 2005. **71**. P. 147–170.
12. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. Москва: Мир, 1975. 350 с.
13. Лукин А.Е. Литогеодинимические факторы нефтегазонакопления в авлакогенных бассейнах. Киев: Наук. думка, 1997. 225 с.
14. Коробов А.Д., Коробова Л.А. Пульсирующий стресс как отражение тектоногидротермальной активизации и его роль в формировании продуктивных коллекторов чехла (на примере Западной Сибири). *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений.* 2011. № 6. С. 4–12.

15. Лукин А.Е. Гипогенно-аллогенетическое разуплотнение — ведущий фактор формирования вторичных коллекторов нефти и газа. *Геол. журн.* 2002. № 4. С. 15–32.

Поступило в редакцию 24.04.2018

REFERENCES

1. Lukin, A. E. (2014). Hydrocarbon potential of great depths and prospects of its mastering in Ukraine. *Geophys. J.*, 36, No. 4, pp. 3-23 (in Russian).
2. Lukin, A. E. (1989). Genetical types of secondary alteration and oil-gas accumulation. Prepr. Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine. Kiev (in Russian).
3. Astafieva, M. M., Rozanov, A. Yu. & Hoover, R. (2005). Framboids: Their structure and origin. *Paleontol. J.*, No. 5, pp. 3-9 (in Russian).
4. Kizilstein, L. Ya. & Minayeva, L. G. (1972). Origin of framboidal forms of pyrite. *Dokl. AN SSSR*, 206, No. 5, pp. 1187-1189 (in Russian).
5. Butler, I., Rickard, D. & Grimes, S. (2000). Framboidal pyrite: Self organisation in the Fe—S system. *J. Conf. Abstr.*, 5, No. 2, pp. 276-277.
6. Stryubel, G. & Zimmer, Z. (1987). *Mineralogical dictionary*. Moscow: Nedra (in Russian).
7. Lukin, A. E., Lukina, O. I., Samoylenko, I. I. (2007). Nature of framboidal pyrite. *Geolog Ukrainy*, No. 3, pp. 16-31 (in Russian).
8. Skripchenko, N. S. & Lytkin, V. A. (1969). Structure and genesis of “mineralized bacteria”. *Dokl. AN SSSR*, 188, No. 5, pp. 1137-1140 (in Russian).
9. Lukin, A. E. (1999). Injection of deep hydrocarbon-polymineral substance in deep-seated rocks of oil and gas basins: nature, applied and epistemological significance. *Geol. J.*, No. 4, pp. 7-22 (in Russian).
10. Agosto, M. R. & Caselli, A. T. (2004). Manifestaciones de piritas framboidales en fumarolas de Isla Decepción (Antártida): Implicancias metalogénicas. *Rev. Asoc. Geol. Argent.*, 59, No. 1, pp. 152-157.
11. Ohfuic, H. & Rickard, D. (2005). Experimental syntheses of framboids — a review. *Earth-Sci. Rev.*, 71, pp. 147-170.
12. Mandelbrot, B. (1975). *Fractal geometry of nature*. Moscow: Mir (in Russian).
13. Lukin, A. E. (1997). Lithogeodynamic factors of oil-gas accumulation in aulacogenic basins. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
14. Korobov, A. D. & Korobova, L. A. (2011). Pulsating stress as reflection of tectonic hydrothermal activation and its role in generation of productive collectors cover (West Siberia is taken as an example). *Geologija, geofizika i razrobotka neftejnyh i gazovyh mestorozhdenij*, No. 6, pp. 4-12 (in Russian).
15. Lukin, A. E. (2002). Hypogenic-allogenic decompression — the leading factor of formation of secondary oil and gas reservoirs. *Geol. J.*, No. 4, pp. 15-32 (in Russian).

Received 24.04.2018

О.Ю. Лукин, І.П. Гафін

Інститут геологічних наук НАН України, Київ

E-mail: chv_ukrdgri@ukr.net

ПІЗНЬОЕПІГЕНЕТИЧНИЙ ФРАМБОЇДАЛЬНИЙ ПІРИТ У ГЛИБОКОЗАЛЯГАЮЧИХ КОЛЕКТОРАХ ГАЗОКОНДЕНСАТНИХ ПОКЛАДІВ

У поровому просторі вторинних колекторів нафти і газу на великих (4,5–6,5 км) глибинах встановлено наявність фрамбоїдального піриту, який належить до термінальних пізньоепігенетичних новоутворень. Це не тільки показник специфічних тектонофізичних і геотермобаричних умов нафтогазонакопичення на великих глибинах, але й індикатор процесів “самоочищення” глибинних газоконденсатних систем від сірководню, що реагує з іонами двовалентного заліза маломінералізованих гідрокарбонатних вод глибинної гідрогеологічної інверсії.

Ключові слова: газоконденсатні вуглеводневі системи, вторинні колектори, пізньоепігенетичні процеси, фрамбоїдальний пирит.

A.E. Lukin, I.P. Gafich

Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kiev

E-mail: chv_ukrdgri@ukr.net

LATE-EPIGENETIC FRAMBOIDAL PYRITES
IN DEEP-LYING RESERVOIRS OF GAS-CONDENSATE POOLS

The presence of framboidal pyrites within the pore space of deep-lying (4500-6500 m) secondary reservoirs of gas-condensate pools has been found. It belongs to the terminal late-epigenetic mineral new formations. This is not only the sign of specific tectonophysical and geothermobaric conditions at great depths, but the indicator of the processes of self-cleaning of deep-seated gas-condensate systems from hydrogen sulphide as a result of its reactions with Fe²⁺ cations of condensed hydrocarbon waters connected with the deep hydrogeologic inversion.

Keywords: *gas-condensate hydrocarbon systems, secondary reservoirs, late-epigenetic processes, framboidal pyrite.*