

УДК 549.324.31

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ГЕНЕЗИСА АУТИГЕННОЙ СУЛЬФИДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПРИВЬЕТНАМСКОГО ШЕЛЬФА И СКЛОНА ЮЖНО-КИТАЙСКОГО МОРЯ

© 2022 г. В. Ю. Калгин^а, *, А. И. Еськова^а, А. А. Легкодимов^а

^аТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
ул. Балтийская, 43, Владивосток, 690041, Приморский край, Россия

*e-mail: kalgin.vy@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 02.06.2021 г.

После доработки 12.11.2021 г.

Принята к публикации 25.02.2022 г.

В работе представлены результаты исследования аутигенных сульфидных агрегатов (пирит) из осадков юго-западной части Южно-Китайского моря. Материалы для исследования получены авторами в комплексной геолого-геофизической экспедиции на НИС “Академик М.А. Лаврентьев”, 88 рейс [Шакиров и др., 2021]. В ходе работы изучены морфология и микроструктура агрегатов пирита. Выполнены изотопные исследования серы в пирите для выяснения генезиса сульфидов, впервые обосновано abiогенное происхождение сульфидов в бассейне Фу Хань. Биогенную гипотезу генезиса большинства других сульфидных образований подтвердили геомикробиологические исследования.

Ключевые слова: Южно-Китайское море, донные осадки, пирит, минеральные индикаторы, геомикробиологические индикаторы.

DOI: 10.31857/S0024497X22040024

Южно-Китайское море характеризуется высоким потенциалом нефтегазоносности и развитием осадочно-гидротермальных рудных месторождений. Несмотря на то, что по ряду аспектов оно довольно хорошо изучено, ощущается явный недостаток минералогических и геохимических данных об осадках, и, в частности, об аутигенных минералах, их парагенезисах и процессах образования.

Аутигенные сульфиды были обнаружены и описаны ранее в юго-западной части Южно-Китайского моря (ЮКМ), здесь были изучены микроэлементный состав и микроструктура сульфидных образований, высказаны предположения о биогенном и abiогенном способах их формирования [Астахова, Астахов, 1990]. Кроме того, аутигенные сульфиды были обнаружены в бассейне Бейкан в южной части ЮКМ [Yang Zhou et al., 2020], авторы связывают их с холодным просачиванием метана в районах скопления газогидратов.

Изучение аутигенных сульфидных минералов в осадках Мирового океана в настоящее время является весьма актуальным, так как подобные образования распространены в различных его районах и несут информацию об обстановках

осадконакопления, окислительно-восстановительных условиях преобразования осадка, нефтегазоносности осадочных бассейнов, очагах разгрузки флюидов, палеогеодинамических событиях, связанных с ледниковыми эпохами и др. [Астахова, Астахов, 1990; Yang Zhou et al., 2020; Логвина, 2008].

Целью настоящей работы является исследование особенностей распространения и генезиса сульфидных аутигенных минералов в осадочных толщах привьетнамского континентального шельфа и склона ЮКМ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал был получен в ходе совместной Российско-Вьетнамской комплексной геолого-геофизической и океанографической экспедиции в Южно-Китайском море в 88-м рейсе НИС “Академик М.А. Лаврентьев” (25.10.2019–08.12.2019 гг.), организованной Тихоокеанским океанологическим институтом им. В.И. Ильичева ДВО РАН (ТОИ ДВО РАН) и Институтом морской геологии и геофизики Вьетнамской академии наук и технологий (ВАНТ). Экспедиция выполнялась в соответствии с Дорожной картой морских исследований ДВО РАН–ВАНТ и входит в серию экс-

педиций, предусмотренных для реализации проекта ГЕОМИР в рамках Десятилетия науки об океане, объявленного ООН в интересах устойчивого развития (2021–2030 гг.).

Проведенные комплексные геолого-геофизические, геохимические и океанографические исследования в экономической зоне Социалистической Республики Вьетнам (СРВ) были направлены на изучение перспективных нефтегазоносных акваторий ЮКМ. Работы проводились в юго-западной части ЮКМ в районе нефтегазоносного бассейна Нам Кон Сон (район 1), в районе шельфа и склона бассейна Фу Хань, где ранее были подтверждены признаки газопроявлений (район 2), и в северо-западной части ЮКМ в осадочном бассейне Красной реки (район 3).

Опробование проводилось с помощью гравитационного пробоотборника. Полученные образцы кернa имели длину до 600 см и диаметр 130 мм. Длина кернa варьировала в зависимости от плотности и литологических особенностей осадка. Всего было отобрано 55 кернов из трех указанных районов работ (рис. 1).

Объектом исследований являлись сульфидные минералы из верхнекайнозойских донных отложений ЮКМ. Опробование проводилось в интервалах 10–20 см, 30–40 см, 80–90 см, 130–140 см, 180–190 см, 230–240 см, 280–290 см до забоя на каждой станции. Пробы отбирались в окисленном слое осадков из нескольких интервалов; слабо измененный процессами окисления илестый осадок, как правило, продолжался до 80–90 см, а ниже вплоть до забоя вскрывались осадки восстановленного слоя. В нижней части кернов присутствуют прослой песка, следы биотурбации и другие седиментационные текстуры.

Полученный материал осадков промывался для отделения глинистых минералов и затем проводилось разделение на тяжелую и легкую фракции с использованием трибромметана CBr_3 (бромформа). Далее оптическими методами изучались сульфиды: на первом этапе с помощью стереоскопического микроскопа “Ломо” (МСП-2), на втором этапе для определения морфологии кристаллов и химического состава, использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) моделей Evo 40 (Carl Zeiss) и JSM-6390LV (Jeol), с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 и EBSD-приставкой Nordlys Nano (Oxford Instruments) в ИГГ УРО РАН и Национальном научном центре морской биологии ДВО РАН.

Определение содержания малых и следовых элементов в сульфидах выполнено методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 8800 (Agilent Technologies) в лаборатории аналитической химии ДВГИ ДВО РАН. Определение потерь после прокалива-

ния (ппп) и содержания SiO_2 выполнено методом гравиметрии, определение содержания главных элементов в сульфидах выполнено методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре iCAP 7600Duo (Thermo Scientific Corporation, США).

Для диагностики сульфидных минералов был выполнен рентгенофазовый анализ на дифрактометре (XRD) MiniFlex II производства RIGAKU (Япония).

Определение изотопов серы в сульфидах проводилось из монофракций, полученных в результате отмывки донных отложений 10 см длиной и отбора под бинокляром МСП-2. Изотопный анализ серы сульфидов выполнен в лаборатории стабильных изотопов ДВГИ ДВО РАН на изотопном масс-спектрометре. Подготовка проб к анализу проведена с использованием элементного анализатора FlashEA-1112 (ThermoScientific) в конфигурации S по стандартному протоколу конвентирования серы сульфидов и сульфатов в форму SO_2 . Измерение величин изотопного отношения $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ проведено на масс-спектрометре MAT-253 (ThermoScientific) в режиме непрерывного потока гелия. Измерения выполнены относительно лабораторного стандартного газа SO_2 , калиброванного по международным стандартам IAEA-S-1, IAEA-S-2, IAEA-S-3 и NBS-127. Для калибровки аналитической системы в ходе выполнения анализов использовали вышеуказанные международные изотопные стандарты. Результаты измерений представлены в общепринятой форме: $\delta^{34}\text{S} = (R_{\text{образец}}/R_{\text{стандарт}} - 1)$ и выражены в промилле (‰), где $R_{\text{образец}}$ и $R_{\text{стандарт}}$ – отношение $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ в образце и в стандарте соответственно. Воспроизводимость результатов определения $\delta^{34}\text{S}$ составляла $\pm 0.2\text{‰}$ (1σ) для исследованных образцов. Масса анализируемых образцов ~ 0.5 мг. Результаты измерений $\delta^{34}\text{S}$ даны в отношении к международному стандарту VCDT.

Отбор проб для геомикробиологических исследований проводился в соответствии с требованиями ПНД Ф 12.1:2.2:2.3:3.2-03 [Методические рекомендации ..., 2014].

Учет численности микроорганизмов исследуемых групп проводили на средах, описанных в статье [Еськова и др., 2020], и определяли ее методом предельных разведений [Практическая гидробиология, 2006]. Наиболее вероятное количество бактерий определяли по таблице Мак-Креди [Руководство ..., 1980]. Температура культивации $+20^\circ\text{C}$.

Для обнаружения сульфат-редуцирующих бактерий в пробах донных отложений исследовали ген *dsrB* как универсальный генетический маркер [Bagwell et al., 2009].

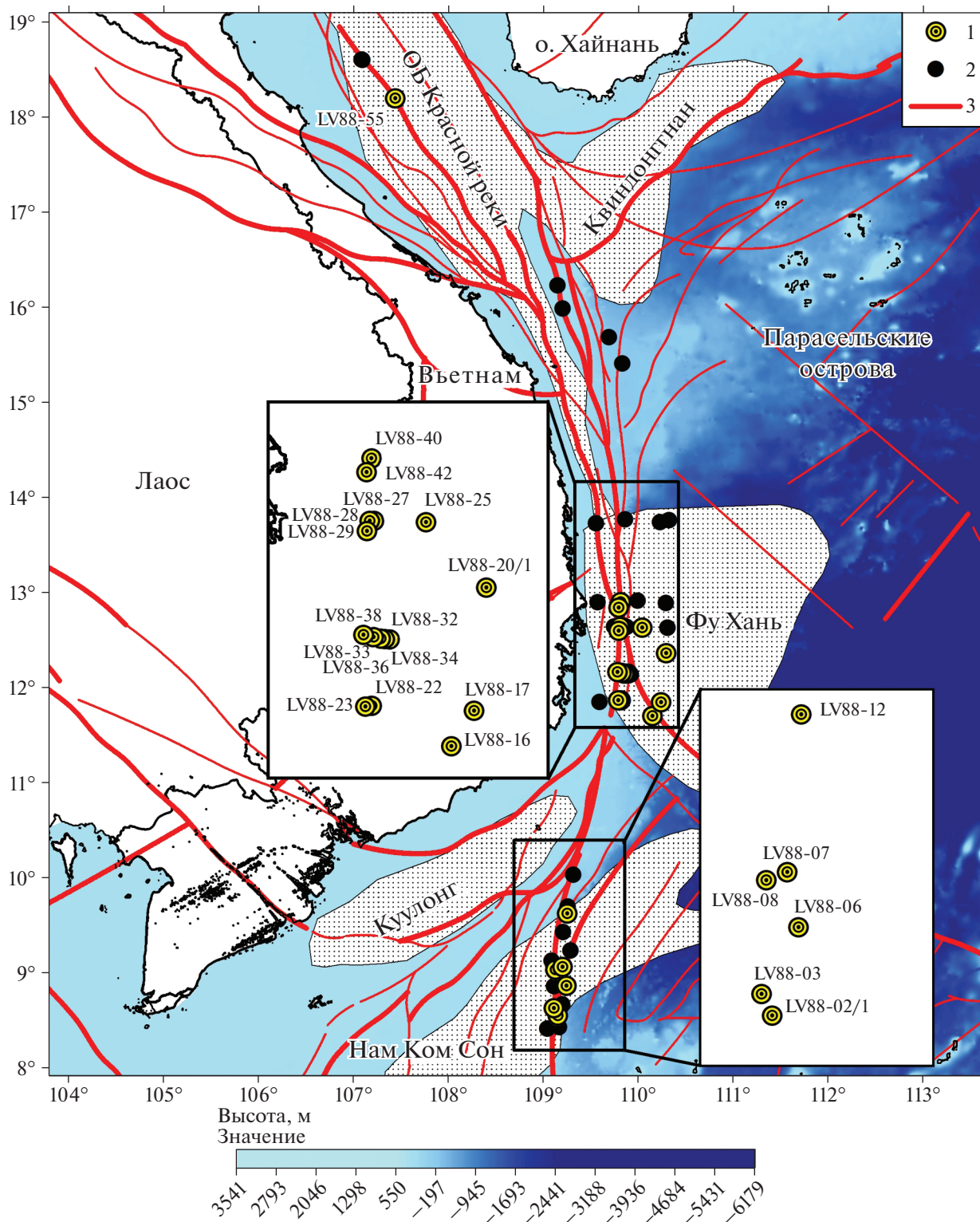


Рис. 1. Схема расположения станций отбора донных осадков в 88 рейсе НИС “Академик М.А. Лаврентьев” и тектонических разломов в западной части Южно-Китайского моря. 1 – станции, в которых был определен изотопный состав серы в сульфидах, 2 – станции без изотопного анализа, 3 – тектонические разломы.

Выделение суммарной ДНК из проб донных отложений проводили по методу Мармура в модификации [Marmur, 1961]. Определение функциональных генов сульфат-редуцирующих бактерий *dsrB* (5'СААСАТСГТТСАТАСССАГГГЗ', 3'GTGTAGCAGTTACCGCA5') [Priha et al., 2013; Корнеева, 2015] определяли методом “вложенной” ПЦР с использованием высококонсервативного участка 16S рРНК бактерий и архей V3–V4 (5'ССТАСГГГНГГСВГСАГЗ', 3'GACTACHVGGGTATСТААТСС5') (Система праймеров Zymo Research), в реальном времени в 2 этапа (Амплификатор Dtpriime-5, ДНК-Технология).

ОСАДОЧНЫЕ БАССЕЙНЫ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЮЖНО-КИТАЙСКОГО МОРЯ

Южно-Китайское море относится к субэкваториальному и экваториальному климатическим поясам Земли. Для региона характерны высокие среднегодовые температуры, большая годовая сумма осадков (до 3000 мм/год), муссонный климат с чередованием дождливого и засушливого периодов. Подобные колебания активно влияют на процессы выветривания, что объясняет значительный вынос обломочного материала реками в прилегающее море [Лисицын, 1978; Деркачев, Николаева, 2010]. Морфологически ЮКМ сочетает в себе признаки окраинного морского бассейна как котловинного типа, так и типичного шельфового [Деркачев, Николаева, 2010].

ЮКМ является южным звеном зоны перехода “континент–океан” в северо-западной части Тихого океана. В пределах западной части Южно-Китайского моря выделяются основные пять осадочных бассейнов: бассейн Красной реки (Шонг Хонг), бассейн Нам Хай Нама (южный Хайнань), бассейн Фу Хань, бассейн Кыулунг, бассейн Нам Кон Сон.

По результатам моделирования установлено, что земная кора плато Най, мощностью 16 км, имеет трехслойное строение и представлена базальтовым, гранитным и осадочным слоями. Уменьшенная мощность земной коры позволяет отнести ее к субконтинентальному типу [Российско-вьетнамские ..., 2020].

Было зафиксировано проявление современного вулканизма в связи с геодинамическими событиями, что свидетельствует об эволюции котловины Южно-Китайского моря [Горшков, 1982].

Фундамент в пределах ЮКБ залегает, по данным сейсмического профилирования и бурения скважин, на глубинах 4 км и более, представлен преимущественно гранитами, гранодиоритами, диоритами и в меньшей степени метаморфическими породами. Возраст консолидации фундамента, вероятно, ранний палеоген (конец позднего мела). Вследствие развития гранитоидов,

обогащенных радиоактивными элементами, в пределах бассейна наблюдается повышенный геотермический градиент в осадочном чехле (3.7–4.5/4.1 °С/100 м) [Тиен, 1999], несмотря на лавинный темп осадконакопления в неогене [Фи и др., 2016]. Мощность коры континентального шельфа ЮКМ составляет от 20 до 25 км. В его строении принимают участие палеозойские породы, пронизанные гранитными интрузиями. Скорости сейсмических волн в осадочных отложениях составляют 1.8–4.8 км/с. В фундаменте шельфа скорости увеличиваются с глубиной от 5.0–6.3 до 6.5–7.6 км/с [Vochu, Hayes, 2003; Hayes, Taylor, 1978; Родников и др., 2011]. Для определения плотности и мощности осадочных отложений были использованы остаточные аномалии гравитационного поля. Так, для бассейна Красной реки плотность осадочного толща варьирует в пределах 2.0–2.4 г/см³, для бассейна Фу Хань – от 1.8 до 2.6 г/см³ и бассейна Нам Кон Сон – 2.4–2.6 г/см³. Далее эти значения были применены для расчета мощности кайнозойских отложений и полученные данные варьируют от 155 до 8358 м. Максимальные значения зафиксированы в бассейнах Красной реки (более 10000 м) и Фу Хань (около 8000 м с постепенным снижением к глубоководной котловине). Нам Кон Сон характеризуется мощностью осадочного чехла свыше 8000 м, в некоторых местах около 4000 м [Российско-вьетнамские ..., 2020].

Формирование ЮКМ связывается с кайнозойским рифтогенезом [Fyhn et al., 2009], не исключается его образование в результате спрединга, продолжавшегося от позднего олигоцена до среднего миоцена [Pin Yan et al., 2008].

В тектоническом плане ЮКБ представляет собой кайнозойский осадочный бассейн, сформированный в периферийной области спрединга ЮКМ. Для ЮКБ характерна диагональная система разломов с преобладанием северо-восточного и юго-западного простирания. Разломы ортогональной системы имеют подчиненное значение.

В северо-западной части шельфа у побережья Юго-Восточного Вьетнама расположены Кыулунгский (Меконгский) и Южно-Коншонский прогибы – важные нефтегазоносные провинции с огромными скоплениями углеводородов в пределах кристаллического, преимущественно гранитного, фундамента. Изучением геологического строения региона и условий формирования залежей углеводородов в гранитном фундаменте занимались многие исследователи, однако проблемы происхождения углеводородов и выяснения механизмов образования их залежей в кристаллических породах, а также исследование структурно-тектонических особенностей гранитных массивов, уточнение геодинамических обстановок их формирования и способов выведения в верх-

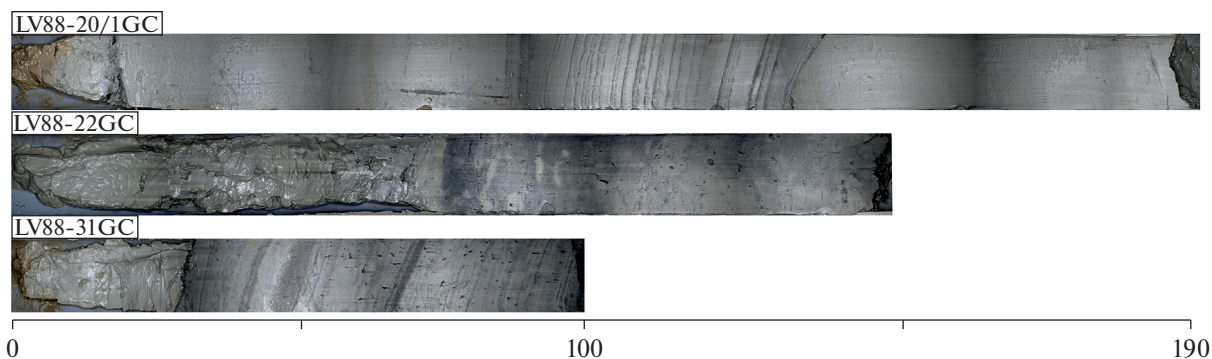


Рис. 2. Фотографии керн с песчаными прослоями (LV88-20/1GC и LV88-31GC) и пятнистой текстурой (LV88-22GC).

ние горизонты, остаются актуальными [Жеримов и др., 2019]. В южной части бассейна Красной реки (Консон) в 2020 г. обнаружено крупное месторождение газа. Положительный прогноз на поиски нефти и газа в этом бассейне связан с работами также и российских исследователей [Обжиров и др., 1985]. Важное значение для оценки перспектив нефтегазоносности имеют минералогические индикаторы, которые обсуждаются в следующих разделах этой работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика осадочных отложений

Осадочный разрез на исследованных полигонах образован нестратифицированными голоцен-верхнеплейстоценовыми, преимущественно терригенными отложениями. Исходя из имеющихся данных о скорости осадконакопления на материковом склоне Южно-Китайского моря, составляющей около 15–20 см/тыс. лет, граница плейстоцена и голоцена в наших колонках располагается на глубине около 1.5–2 м от поверхности дна. Станции литологического опробования были сосредоточены, главным образом, в пределах крупных осадочных бассейнов, имеющих высокий нефтегазоносный потенциал. В результате полевого описания все поднятые нами колонки можно разбить на три группы.

Первая группа объединяет колонки, сложенные пелитовыми осадками оливкового цвета (желтовато-зеленого). Как правило, эти осадки однородны по всей длине колонки и часто имеют следы биотурбации и постседиментационных минеральных новообразований в виде тонкорасеянного гидротроилита. В колонках этой группы трудно однозначно провести границу между плейстоценом и голоценом, или можно предполагать, что вся осадочная толща выполнена голоценовыми осадками.

Вторая группа объединяет колонки, в которых пластичные пелитовые оливковые илы к низу сменяются более плотными илами зеленовато-серой и темно-серой окраски. Предположительно, нижняя часть разреза может быть отнесена к плейстоцену, хотя не исключено, что изменение окраски осадков связано с диагенетическими изменениями.

Третья группа включает колонки с песчаными прослоями (1–2 до 5 см) в пелитовых илах, что свидетельствует о нарушении фоновой седиментации турбидными потоками. Часто в таких колонках наблюдаются следы оползания и смятия слоев (рис. 2).

Палеогеографические особенности районов исследования

На внешнем шельфе трубкой пробоотборника вскрыты реликтовые аллювиальные пески времени последней регрессии (14–18 тыс. лет назад, уровень моря в это время был ниже современного на 130 м). Исключением являются колонки, отобранные на станциях 55–56 с глубиной моря около 60–70 м. Осадки в этих колонках представлены пластичными пелитами, в которых к низу увеличивается количество мелких фрагментов битой ракушки и возрастает содержание тонкозернистого песка.

В целом в исследованных районах ЮКМ в голоцене и позднем вюрме седиментация была обусловлена привносом с суши терригенного материала и контролировалось климатическими изменениями и связанными с ними гляциоэвста- тическими колебаниями уровня моря.

Аутигенные сульфиды

Сульфиды были встречены во всех шлиховых пробах станций при проведении минералогического анализа. По данным рентгено-дифракционного анализа сульфиды представлены пиритом, дифрактограмма пирита представлена на рис. 3.

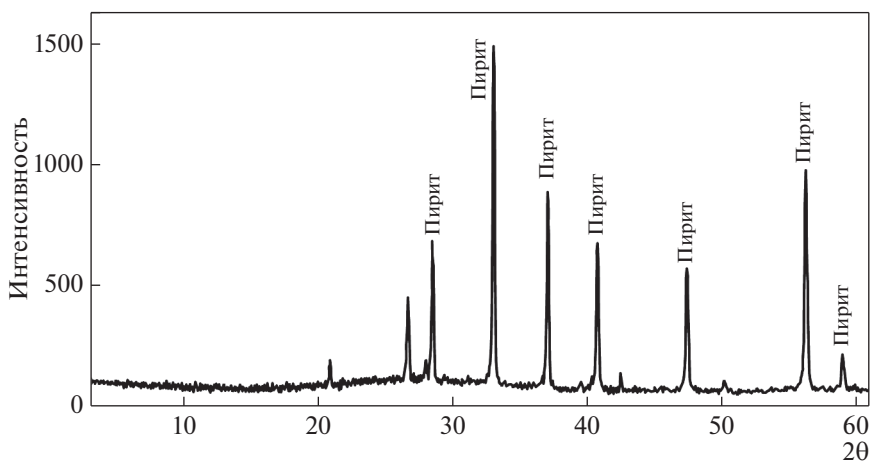


Рис. 3. Дифрактограмма пирита (станция LV88-25GC).

Морфология проанализированных образований пирита характеризуется широким разнообразием. Пиритовые агрегаты формируют крупные сростки в виде трубочек (рис. 4а, б), ксеноморфных сгустков, сфероидальных образований (см. рис. 4г); часто наблюдается заполнение пиритом раковин фораминифер. Один из наиболее крупных образцов имеет форму тонкой трубочки диаметром 5 мм и длиной 5 см. Подобные трубчатые агрегаты часто образуются по ходам бентосных организмов (полихет). Пирит в основном представлен агрегатами светло-желтой, латунной, серой и черной окраски, последняя объясняется окислением пирита и развитием гематита на его поверхности или с образованием полных псевдоморфоз [Наумов, 1981]. В осадках одной и той же станции встречаются пириты всех перечисленных видов окраски; некоторые образцы имеют пеструю ярко-синюю побежалость. При наблюдении в СЭМ видно, что поверхность каждого исследованного образца состоит из сферических образований (глобул), формирующих псевдоколлоидную структуру (см. рис. 4в), а сами глобулы состоят из микрокристаллической массы, образованной хорошо ограниченными октаэдрическими кристалликами пирита (см. рис. 4д, е).

Исследованные районы ЮКМ различаются по содержанию сульфидной минерализации в колонках осадков.

Район 1. Бассейн Нам Ком Сон. В этом бассейне станциями охарактеризованы глубины 163 м до 1011 м. В колонках осадков станций отмечаются общие закономерности в распределении пирита.

В верхнем горизонте осадков, в интервалах 10–20 см, 30–40 см и 80–90 см, в полужидких алевропелитовых и пелитовых илах пепельно-желтой до оливковой окраски, отмечено крайне малое содержание пирита, составляющего, как правило, доли процента от общего объема тяже-

лой фракции. На некоторых станциях в осадках этого горизонта встречаются единичные мелкие глобулы пирита светло-латунные, с металлическим блеском, размером не более 0.2 мм.

Ниже интервала 80–90 см осадки обычно представлены алевро-пелитовыми илами серовато-зелеными и темно-серыми. В них, помимо глобул (диаметром до 0.5 мм), встречаются агрегаты пирита в виде трубочек (длиной до 1 см). Сульфиды имеют от серого до темно-серого цвета, с металлическим блеском. Содержание сульфидов составляет до 10% объема тяжелой фракции алевро-пелитовых илов.

Нижняя часть колонок кернa, вблизи забоя, представлена относительно более плотными алевро-пелитовыми и пелитовыми илами. В этой части кернa содержание сульфидов в колонках разных станций различается: на некоторых станциях вблизи забоя содержание сульфидов увеличивается (LV88-02/1GC, LV88-03GC, LV88-08GC, LV88-12GC, LV88-14GC). Пирит слагает трубочки и ксеноморфные сгустки, часто встречаются фрагменты этих агрегатов. На остальных станциях бассейна Нам Ком Сон, сульфидные агрегаты, вблизи забоя, представлены в основном мелкими единичными глобулами, не превышающие 0.1 мм.

Район 2. Бассейн Фу Хань. Станции охватывали зону шельфа от глубины 170 м и континентальный склон, характеризующимся большими глубинами (до 2400 м). Этот район отличается обилием сульфидной минерализации в полученных колонках осадков. Характерной чертой бассейна является присутствие сульфидов в верхнем слое осадков, где в интервале 30–40 см, представленном полужидким зеленовато-оливковым алевропелитовым илом, интенсивно проявлена аутигенная сульфидная минерализация. Например, на станции LV88-20/1GC в верхней части колонки осадков встречены трубчатые сульфидные стяже-

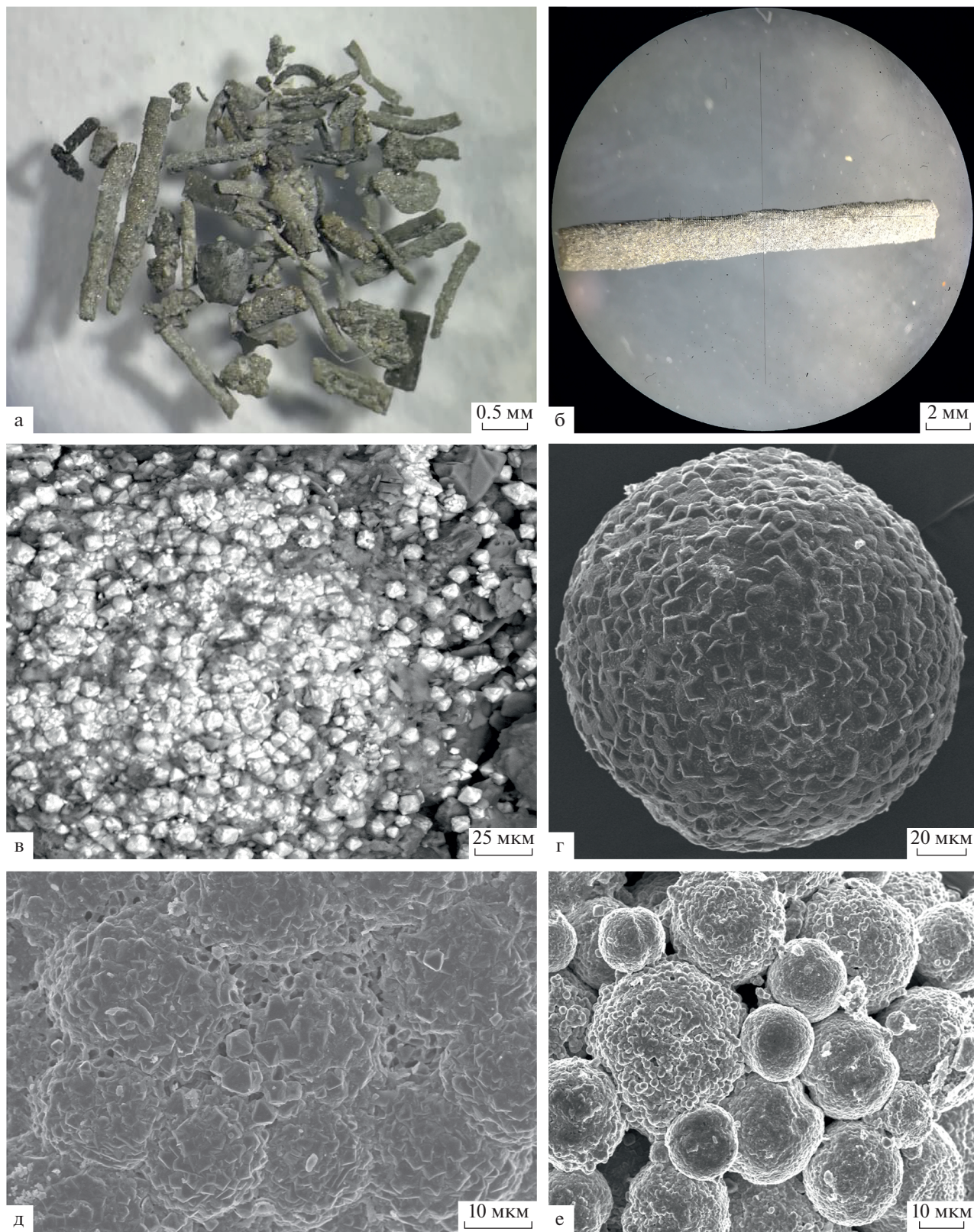


Рис. 4. Морфологические разновидности агрегатов пирита.

а – сульфиды из осадков Южно-Китайского моря (LV88-25GC); б – трубчатые стяжения (LV88-20/1GC); в – поверхность сульфидного агрегата, сложенная октаэдрическими кристаллами пирита (LV88-32GC); г – сферическая глобула, образованная пентагон-додекаэдрическими и октаэдрическими кристаллами пирита (LV88-40GC); д – фрамбоидальный пирит (LV88-19GC); е – слабосцементированный агрегат разноразмерных фрамбоидов пирита (LV88-32GC).

ния длиной до 5 см. Подобное распространение сульфидов в верхнем слое осадков прослеживается на станциях LV88-18GC, LV88-25GC, LV88-27GC, LV88-28GC, LV88-29GC, располагавшихся на континентальном склоне, и поднятые осадки являются глубоководными.

В интервале от 80–90 до 180–190 см верхний слой полужидких осадков сменяется однородными плотными, местами пластичными, пелитовыми илами. В этом слое сульфиды представлены трубочками, агрегатов в виде сплюснутых форм, менее распространены глобулы пирита.

Нижний интервал, от 180–190 см до забоя, представлен плотным алевро-пелитовым илом. В этом интервале на некоторых станциях наблюдается увеличение обилия аутигенной сульфидной минерализации с увеличением глубины станции (LV88-16GC, LV88-18GC, LV88-29GC, LV88-36GC, LV88-40GC, LV88-46GC, LV88-47GC, LV88-48GC).

На станциях (LV88-22GC, LV88-30GC, LV88-42GC) в верхней (10–90 см) и центральной (90–190 см) частях колонок проявлено множество различных форм агрегатов сульфидов, которые составляют около 70% общего объема тяжелой фракции, а у забоя колонки встречаются лишь единичные зерна пирита.

Выделяются станции LV88-38GC, LV88-39GC, LV88-49GC, с которых подняты осадки со слабой сульфидной минерализацией по всей длине колонок, представленной в основном глобулами пирита.

Район 3. В северной части ЮКМ располагается третий район работ – бассейн Красной реки, который характеризуется относительно небольшими глубинами (станции от 62 м до 520 м). В нижних частях поднятых колонок наблюдается характерное увеличение аутигенной сульфидной минерализации в осадках.

По сравнению с другими бассейнами (Нам Ком Сон и Фу Хань), этот район выделяется слабым проявлением сульфидной минерализации, Сульфиды в основном представлены глобулами (до 0.5 мм) пирита светло-серого цвета с латунным оттенком и металлическим блеском, размерностью; на станции LV88-55GC в нижнем интервале также обнаружены удлиненные агрегаты пирита.

Результаты исследования позволяют выделить в осадках бассейнов ЮКМ сульфиды следующих морфологических разновидностей: 1) глобулы; 2) удлиненные трубчатые агрегаты; 3) уплощенные агрегаты пирита неправильной формы.

Происхождение пиритовых глобул можно связать с разрушением раковин фораминифер, внутренние полости которых они первоначально выполняли. Наиболее мелкие глобулы, вероятно,

были сформированы колониями сульфат-редуцирующих микроорганизмов.

Крупные трубчатые стяжения (длиной 1–5 см), по-видимому, представляют собой следы жизнедеятельности (ихнофоссилии), которые образовались в результате биотурбации осадка бентосными организмами (предположительно, полихетами) и замещены пиритом, однако происхождение мелких трубочек без видимых признаков биотурбации осадка, форма которых не соответствует следам и норам полихет, остается неясной.

Содержание пирита в осадках колонок на профиле от шельфа к континентальному склону увеличивается. В верхнем окисленном слое (от 0 до 80–90 см), как правило, пирит представлен мелкокоразмерными глобулами. В восстановленном слое осадков (от 80–90 см до забоя колонок) в основном встречаются удлиненные трубчатые агрегаты. Распространение трубчатых стяжений можно связать с интенсивной деятельностью сульфат-редуцирующих бактерий; вероятно, над дном бассейна Фу Хань возникало сероводородное заражение из-за интенсивного сноса с материка органического материала. Продолжительность сероводородного заражения исключает факт обитания бентосных животных в данном ореоле. Так, например, полихета *Harmothoe imbricate* способна сохранять жизнеспособность с концентрацией H_2S до 8 мг/л всего несколько дней [Лосовская, 2011]. В то же время, некоторые исследователи связывают сероводород с очагами разгрузки флюида, которые считаются индикаторами нефтегазоносных проявлений [Логвина, 2008].

ИЗОТОПНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выяснения источника серы были проведены изотопные исследования пирита из осадков ряда станций. Монофракция сульфидов была отобрана в восстановленном слое керн (ниже 50 см). Диапазон полученных значений варьирует в широких пределах от -43.6 до $+47.0\%$. Полученные данные приведены на рис. 5.

Выделяют три основных источника серы на основании изотопного соотношения [Гриненко, Гриненко, 1974]: 1) сера абиогенного (мантийного) происхождения со значениями $\delta^{34}S = 0 \pm 3\%$, но этот диапазон может быть увеличен, т.к. для современных субмаринных гидротермальных систем она может достигать до $\delta^{34}S + 12\%$ [Дубинина и др., 2020]; 2) сера, близкая к сульфату морской воды – около $\delta^{34}S + 21.0 \pm 0.2\%$ [Rees et al., 1978]; 3) сильно восстановленная сера, которая характеризуется отрицательными значениями изотопного отношения, характерная для биогенного образования [Леин, Иванов, 2018]. Состав изотопно-тяжелого сульфида, с значениями $\delta^{34}S$ от $+25\%$ до $+47\%$, можно объяснить реакцией

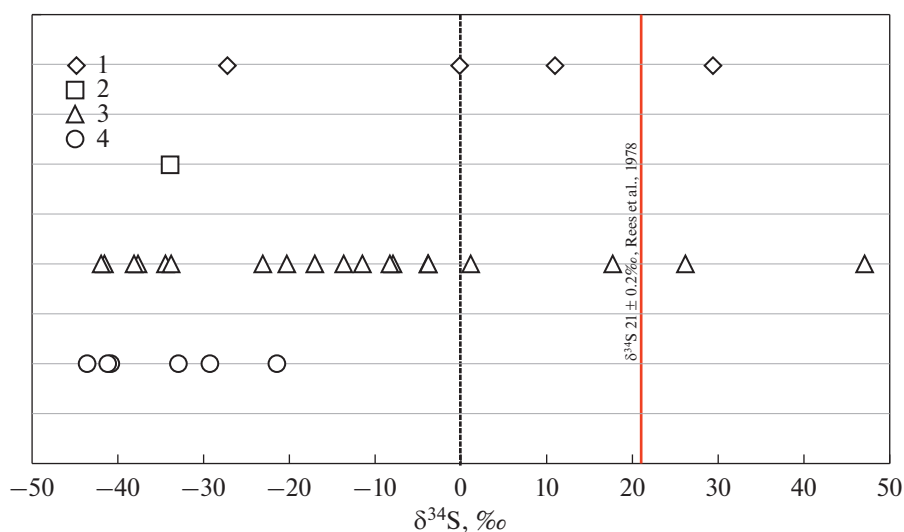


Рис. 5. Изотопный состав серы в пирите восстановленного слоя донных осадков в западной части ЮКМ. Вертикальная красная линия – изотопный состав серы в сульфате современной морской воды ($\delta^{34}\text{S}$ $21.0 \pm 0.2\text{‰}$, [Rees et al., 1978]).

1 – литературные данные [Астахова, 2007] (бассейн Кылулонг); 2 – бассейн Красной реки; 3 – бассейн Фу Хань; 4 – бассейн Нам Кон Сон.

эпигенетического восстановления сульфатов, которое происходит при низких температурах с участием бактерий в результате “Релеевского истощения” при восстановлении малого количества сульфатов [Гриненко, Гриненко, 1974; Виноградов, 2003; Дубинина, 2019].

Из полученных данных следует, что изотопный состав серы в пирите весьма различен в осадках станций.

Район 1. В южном районе работ, на шельфе бассейна Нам Кон Сон полученные значения $\delta^{34}\text{S}$ достигают отрицательной величины -43.6‰ . В осадках континентального склона, поднятых на станции LV88-06GC, пирит менее обеднен изотопом ^{34}S , и значение $\delta^{34}\text{S}$ равно -32.9‰ . Изотопные отношения серы, полученные для бассейна, подтверждают предположение об интенсивном выносе с континента органического материала, который стал основным источником питания для сульфат-редуцирующих бактерий.

Район 2. В бассейне Фу Хань сульфиды были отобраны в осадках шельфа и континентального склона. Полученные значения $\delta^{34}\text{S}$ варьируют от -42‰ до $+47\text{‰}$. Изотопное отношение в сульфиде глубоководной части континентального склона имеет разные значения: -34.5‰ для пирита станции LV88-16GC и -1.5‰ для пирита станции LV88-18GC.

В станциях LV88-20/1GC и LV88-25GC были отобраны по две монофракции сульфидов из верхнего и нижнего горизонта. Полученные значения для пирита первой станции близки -37.7‰ и -38‰ , тогда как в пирите второй станции су-

щественно разные: $+17.7\text{‰}$ и -17.0‰ . Из станции LV88-17GC проба была отобрана на глубине 2300 м, и значение ^{34}S в пирите является близким к сере абиогенного происхождения -3.9‰ . На большинстве станций пирит из осадков континентального склона обогащен тяжелыми изотопами серы и характеризуется положительными значениями $\delta^{34}\text{S}$. Так, на станции LV88-23GC значение достигает $+26.1\text{‰}$, причем величина $\delta^{34}\text{S}$ на станции LV88-27GC больше в 2 раза и достигает $+47.0\text{‰}$. На станции LV88-32GC значение $\delta^{34}\text{S}$ в пирите попадает в диапазон мантийной серы и равно $+1.1\text{‰}$.

В бассейне Фу Хань (станции LV88-17GC, LV88-28GC, LV88-32GC, LV88-33GC, LV88-34GC) изотопное отношение серы в пирите варьирует в диапазоне от -10‰ до $+12\text{‰}$. Такие значения можно объяснить пространственной близостью расположения станций к зоне тектонических разломов (см. рис. 1) или залежей углеводородов, где поток H_2S поступает со дна вместе с CH_4 [Леин, Иванов, 2018].

Район 3. В северном районе работ выполнено определение $\delta^{34}\text{S}$ в пирите только для одной станции LV88-55GC, расположенной на шельфе бассейна Красной реки. Пирит обеднен изотопом ^{34}S , и значение $\delta^{34}\text{S}$ составляет -34.0‰ . Для большинства проб осадков бассейнов ЮКМ отмечены отрицательные значения изотопного отношения серы в пирите, что говорит о биогенном происхождении сульфидной минерализации [Гриненко, Гриненко, 1974]. На основании всего объема полученных данных по изотопному составу

серы, пирит в осадках исследованных бассейнов ЮКМ имеет как биогенное, так и абиогенное происхождение.

Высокие величины отношения изотопов серы, от +26.1‰ и до +47‰, в донных отложениях станций LV88-23GC, LV88-27GC можно объяснить восстановлением в толще осадках сульфат-редуцентами уже утяжеленного сульфата, поэтому и продуцируемый ими сероводород существенно обогащен изотопом ^{34}S [Леин, Иванов, 2018].

Исследования изотопного состава серы в пирите указывают на гетерогенность аутигенной сульфидной минерализации: установлены образования как биогенного, так и абиогенного происхождения. Для бассейна Фу Хань впервые определены положительные величины отношения изотопов серы. Это указывает на абиогенную природу сульфидов, которые в этом случае могут быть индикаторами гидротермальных или поствулканических проявлений в этом бассейне. Полученные результаты требуют продолжения исследований.

ГЕОМИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Микроорганизмы, населяющие морские отложения, являются основными участниками круговорота веществ в Мировом океане [Kirkpatrick et al., 2019]. Они участвуют в осаждении и растворении минералов, а также сорбируют и концентрируют металлы. Специфические потребности микроорганизмов в источниках питания, факторах роста или микроэлементах делают их удобными объектами для использования в качестве гео-микробиологических индикаторов. При этом распределение биоиндикаторных групп нефтеокисляющих, сульфат-редуцирующих и метанотрофных микроорганизмов, в донных отложениях Южно-Китайского моря, изучено мало.

В результате проведенных гео-микробиологических исследований в акватории ЮКМ было установлено присутствие в донных отложениях сульфат-редуцирующих, нефтеокисляющих и метанотрофных бактерий.

Район 1. На станции LV88-03GC наблюдалась наибольшая численность метанотрофных микроорганизмов (2×10^4 кл/г), отмечено присутствие сульфат-редуцирующих микроорганизмов [Еськова и др., 2020]. Ген, кодирующий β -субъединицу диссимиляционной (би) сульфит-редуктазы (*dsrB*) — ключевой фермент метаболизма всех сульфат- и сульфит-редуцирующих микроорганизмов, отвечающий за превращение сульфита в сульфид, обнаруживался в пробах четырех станций: LV88-01GC, LV88-02/1GC, LV88-03GC, LV88-08GC.

Район 2. На станции LV88-20/1GC было отмечено наличие сульфат-редуцирующих микроорганизмов по всей длине отобранного керна; их максимальная численность составила 3×10^4 – 5×10^4 кл/г. На станции LV88-42GC в керне осадка обнаружены сразу три исследуемые группы микроорганизмов: метанотрофные, нефтеокисляющие и сульфат-редуцирующие [Еськова и др., 2020]. Метанотрофы встречались на глубинах больше 800 м. Гены — индикаторы сульфат-редуцирующих микроорганизмов (*dsrB*) отмечены в пробах донных отложений станций: LV88-20/1GC, LV88-27GC, LV88-46GC.

Район 3. На станциях LV88-55GC и LV88-56GC отмечается присутствие сульфат-редукторов, но с небольшой численностью (10 кл/г), в сравнении с вышеописанными районами [Еськова и др., 2020]. В пробах донных отложений этого района, гены *dsrB* были обнаружены на станциях: LV88-50GC, LV88-53GC, LV88-55GC.

Присутствие указанных групп бактерий в различных сочетаниях указывает на разные условия генезиса и накопления органического вещества. Это позволяет изучать, в частности, процессы интенсивного восстановления сульфата и выделения сероводорода, который, в свою очередь, вступая в реакцию с ионами железа, образует сульфиды железа.

Полученные данные подтверждают активное участие сульфат-редуцирующих сообществ в процессах образования аутигенных сульфидов в осадочных отложениях.

На станциях LV88-23GC, LV88-25GC, LV88-32GC, где были получены положительные величины $\delta^{34}\text{S}$ в пирите, присутствие сульфат-редуцирующих сообществ не установлено. Представленные результаты требуют продолжения гео-микробиологических исследований.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ ПИРИТА

Для выяснения состава и примесей сульфидов были выполнены геохимические исследования. Содержание микроэлементов в пробе пирита, отобранной из керна восстановленного слоя осадков (от 50 см до 400 см), приведено в табл. 1. В сравнении с литературными данными, в пирите из станции LV88-20/1GC отмечается резкое увеличение содержания Ni в 5 раз, тогда как содержание Pb, Cd и Ag сравнительно ниже данных, полученных предшественниками [Астахова, 2007]. Незначительное различие наблюдается в содержании Fe, Mn, Co, Zn, которое в целом является близким среднему содержанию этих элементов в образцах из юго-западной части ЮКМ [Астахова, 2007]. Предположительно, высокое содержание

Таблица 1. Содержание микроэлементов ($10^{-4}\%$) в аутигенном пирите из осадков бассейна Фу Хань

Аутигенный пирит	Fe, %	Mn	Ni	Co	Pb	Zn	Cd	Ag
Пирит LV88-20/1GC	34.9	165.9	573.0	67.3	8.7	48.8	0.1	0.1
Пирит LV88-25GC	36.13	180.4	82.3	57.3	8.01	43.9	0.1	0.1
Пирит LV88-31GC	35.8	170.8	79.2	58.6	9.5	51.2	0.2	0.1
8758-1*	41.3	517.5	58.3	31.3	29.6	87.5	4.4	—
8758-2*	43.7	267.0	73.8	—	48.5	97.1	19.4	48.5
8758-3*	47.9	179.4	134.5	89.7	67.3	56.1	—	—
8758-4*	42.6	221.4	73.8	40.6	18.5	48.2	3.7	—
Пирит*	43.0	214.1	107.1	37.1	32.1	56.1	4.8	—
8388*	—	1345.0	182.0	156.0	110.0	—	8.0	4.0

Примечание. *Образцы пирита из осадков ЮКМ по данным [Астахова, 2007].

Ni можно объяснить биосорбированием его микробиотой в донных отложениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований выявлены морфологические типы агрегатов сульфидов и особенности микроструктуры аутигенных образований пирита в донных отложениях Южно-Китайского моря.

Определены закономерности распространения сульфидов в колонках осадков различных станций и на профиле от шельфа к материковому склону. Выяснено, что содержание пирита минимальное в верхних горизонтах колонок осадков, а ниже интервала 80–90 см его количество увеличивается. Крупные агрегаты пирита (1–5 см), по видимому, связаны с интенсивной деятельностью сульфат-редуцирующих бактерий. Можно предположить, что в геологическом прошлом в бассейне Фу Хань периодически или локально возникало сероводородное заражение. Высокое содержание сульфидов по всей длине колонки LV88-20/1GC можно объяснить интенсивной деятельностью сульфат-редуцирующих бактерий в осадках приконтинентального шельфа и склона.

Выполненные в ходе исследований определения изотопного состава серы в пирите указывают на гетерогенность аутигенной сульфидной минерализации: установлены образования как биогенного, так и абиогенного происхождения. Впервые для бассейна Фу Хань получено соотношение изотопов серы в сульфидах с положительной меткой, что указывает на абиогенную природу сульфидов, и они могут быть индикаторами поствулканических (гидротермальных) проявлений в этом бассейне.

Для ряда участков (станции LV88-03GC, LV88-20/1GC, LV88-42GC, LV88-55GC) выяснено биогенное происхождение пирита, что подтверждается микробиологическими исследованиями.

Станции, в осадках которых установлено присутствие разных групп сульфат-редуцирующих бактерий, расположены преимущественно на шельфе, но также и на континентальном склоне и его подножье.

В свою очередь, для других станций можно предположить действие комплекса абиогенных и биогенных процессов при образовании сульфидов (или смешанное их происхождение), в котором участвовали газы мантийных и углеводородных источников совместно с сульфат-редуцентами. Нельзя исключить, что сульфидообразование может происходить и без участия микроорганизмов, хемогенным путем, однако это предположение требует специальных исследований.

Районы исследований в ЮКМ различаются по интенсивности проявления аутигенной сульфидной минерализации в колонках осадков, по соотношению изотопов серы в пирите, а также по геомикробиологическим показателям продуктивности микроорганизмов. Полученные данные являются основанием для новых оценок эндогенных газово-флюидных проявлений в западной привьетнамской части Южно-Китайского моря и применения комплексных минералогических и геомикробиологических индикаторов для прогноза перспектив нефтегазоносности; а установленные закономерности распределения аутигенной сульфидной минерализации в осадках ЮКМ открывают возможности для применения геофизических методов при оконтуривании перспективных нефтегазоносных районов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность руководителю экспедиции доктору геол.-мин. наук Р.Б. Шакирову, капитану дальнего плавания С.С. Склярору и экипажу судна за успешно выполненные в экспедиции исследования. Отдельная благодарность УНИФ ДВО РАН и Минобрнауки РФ за обеспечение рейса и содействие в решении вопросов организации экспедиции, а также

МИД РФ, руководству ВАНТ, ДВО РАН и ТОИ ДВО РАН, Министерству природных ресурсов и соответствующим ведомствам Социалистической Республики Вьетнам за оперативную работу по оформлению документов и процедур, необходимых для проведения экспедиции. Выражаем признательность сотрудникам ТОИ ДВО РАН, доктору геол.-мин. наук А.И. Обжирову за обсуждение важных аспектов рукописи, доктору геол.-мин. наук С.П. Плетневу за консультирование по литологическим особенностям донных отложений, кандидату геол.-мин. наук М.Г. Валитову за помощь с геофизическими данными региона исследования и кандидату биологических наук А.Л. Пономаревой за дискуссии по проблеме биологической активности в донных отложениях.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Экспедиция была организована в рамках государственных заданий ТОИ ДВО РАН по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. раздела IX: Науки о Земле (AAAA-A17-117030110035-4, AAAA-A19-119122090009-2, AAAA-A19-119122390017-4).

Экспедиционные работы выполнены в рамках работы «Газогеохимические поля Мирового океана, геодинамические процессы и потоки природных газов, влияющие на формирование геологических структур с залежами углеводородов и аутигенной минерализации» (№ 0211-2021-0006), научный руководитель доктор геол.-мин. наук А.И. Обжиров (регистрационный № 121021500055-0).

Исследования выполнены в рамках программы «Геосистемы и минеральные ресурсы зоны перехода «континент–океан» и открытого океана» (ГЕОМИР) в рамках Десятилетия науки об океане в интересах устойчивого развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астахова Н.В.* Аутигенные образования в позднекайнозойских отложениях окраинных морей Востока Азии. Владивосток: Дальнаука, 2007. 244 с.
- Астахова Н.В., Астахов А.С.* Конкреции сульфидов из четвертичных осадков юго-западной части Южно-Китайского моря // Вулканология и сейсмология. 1990. № 4. С. 76–81.
- Виноградов В.И.* Некоторые черты эпигенеза с позиций изотопной геохимии // Литология и полез. ископаемые. 2003. № 4. С. 391–411.
- Горшков А.П.* Исследования подводных вулканов в 10-м рейсе НИС «Вулканолог» // Вулканология и сейсмология. 1981. № 6. С. 39–45.
- Гриненко В.Л., Гриненко Л.Н.* Геохимия изотопов серы. М.: Наука, 1974. 274 с.
- Держачев А.Н., Николаева Н.А.* Минералогические индикаторы обстановок приконтинентального осадкообразования западной части Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2010. 321 с.
- Дубинина Е.О.* Новая модель поведения изотопов серы в современных субмаринных гидротермальных системах / Ред. Е.О. Дубинина, Н.С. Бортников // Докл. РАН. 2019. Т. 486. № 5. С. 593–597.
- Дубинина Е.О., Бортников Н.С., Ставрова О.О., Коссова С.А.* Изотопное фракционирование серы при формировании сульфидов субмаринных гидротермальных систем на примере полей Логачев, Краснов и Рэйнбоу (САХ) // Геология рудных месторождений. 2020. № 5. С. 391–413.
- Еськова А.И., Пономарева А.Л., Легкодимов А.А. и др.* Особенности распределения индикаторных групп микроорганизмов в донных отложениях Южно-Китайского моря // Известия ИГУ. Сер. Науки о Земле. 2020. Т. 33. С. 33–43.
- Керимов В.Ю., Леонов М.Г., Осипов А.В. и др.* Углеводороды в фундаменте шельфа Южно-Китайского моря (Вьетнам) и структурно-тектоническая модель их формирования // Геотектоника. 2019. № 1. С. 44–61.
- Корнеева В.А.* Биоразнообразие сульфатредуцирующих бактерий в кислородсодержащих водах Черного и Балтийского морей / Автореф. ... дис. канд. биол. наук. М.: МГУ, 2015. 25 с.
- Леин А.Ю., Иванов М.В.* Изотопный состав серы и углерода как результат биогеохимических процессов в Черном море // Система Черного моря / Отв. ред. А.П. Лисицын. М.: Научный мир, 2018. С. 560–604.
- Лисицын А.П.* Процессы океанской седиментации. М.: Наука, 1978. 392. с.
- Логвина Е.А.* Различные сценарии формирования аутигенных минералов в отложениях очагов разгрузки флюидов // Вестник СПбГУ. 2008. Сер. 7. Вып. 4. С. 46–61.
- Лосовская Г.В.* Об индикаторных и толерантных видах полихет (на примере Северо-Западной части Черного моря) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. № 25-1. С. 327–334.
- Наумов В.А.* Оптическое определение компонентов осадочных пород. М.: Недра, 1981. 203. с.
- Обжиров А.И., Ильичев В.И., Кулинич Р.Г.* Аномалия природных газов в придонной воде Южно-Китайского моря // Докл. АН СССР. 1985. Т. 281. № 5. С. 1206–1209.
- Практическая гидробиология. Пресноводные экосистемы / Под ред. В.Д. Фёдорова, В.И. Капкова. М.: Изд-во ПИМ, 2006. 367 с.
- ПНД Ф 12.1:2.2:2.3.2-03 Методические рекомендации. Отбор проб почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод, шламов промышленных сточных вод, отходов производства и потребления. М.: ФЦАО. 2014. 15 с.
- Родников А.Г., Забаринская Л.П., Рашидов В.А. и др.* Глубинное строение континентальных окраин региона Южно-Китайского моря // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. 18. С. 52–72.
- Российско-вьетнамские океанологические исследования в Южно-Китайском море / Коллектив авторов / Гл. ред. В.Б. Лобанов. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2020. 334 с.

- Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений / Под ред. А.В. Цыбань. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 192 с.
- Тиен Х.Д. Условия нефтегазообразования и формирования углеводородных скоплений в кайнозойских осадочных бассейнах континентального шельфа СРВ / Автореф. дис. ... доктора геол.-мин. наук: 04.00.17. Вунгтау, 1999. 60 с.
- Фи М.Т., Силантьев Ю.Б., Скоробогатов В.А. Оценка перспектив нефтегазоносности Южно-Коншонского бассейна на основе геохимического моделирования // Научно-технический сборник "Вести газовой науки". 2016. № 1(25). С. 172–175.
- Шакиров Р.Б., До Хуи Кыонг, Обжиров А.И. и др. Геолого-геофизические и океанографические исследования в Южно-Китайском море в 88-м рейсе научно-исследовательского судна "Академик М.А. Лаврентьев" // Океанология. 2021. Т. 61. № 1. С. 165–168.
- Bagwell C.E., Formolo M., Ye Q. et al. Direct analysis of sulfate reducing bacterial communities in gas hydrate-impacted marine sediments by PCR-DGGE // J. Basic. Microbiol. 2009. V. 49(1). P. 87–92.
- Bochu Yao, Hayes D.E. Comprehensive geophysical studies of the processes forming conjugate rifted margins: the example of the South China Sea // InterMargins Newsletter. 2003. № 3. P. 7–8.
- Fyhn M.B.W., Boldreel L.O., Nielsen L.H. Geological development of the Central and South Vietnam semargin: implications for the establishment of the South China Sea, Indochinese escape tectonics and Cenozoic volcanism // Tectonophysics. 2009. № 478. P. 184–214.
- Hayes D.E., Taylor B. Tectonics // A geophysical atlas of East and Southeast Asian seas / Ed. D.E. Hayes. Boulder, Colorado: Geol. Soc. America Map and Chart Series MC-25, 1978. Sheet 1.
- Kirkpatrick J.B., Walsh E.A., D'Hondt S. Microbial selection and survival in subseafloor sediment // Front. Microbiol. 2019. V. 10. Iss. 10. P. 1–15.
- Marmur J. A. Procedure for the isolation of deoxyribonucleic acid from microorganisms / J. Marmur // J. Mol. Biol. 1961. V. 3. P. 208–218.
- Pin Yan, Yanlin Wang, Hailing Liu. Post-spreading transpressive faults in the South China Sea Basin // Tectonophysics. 2008. V. 450. Iss. 1–4. P. 70–78.
- Priha O., Nyyssönen M., Bomberg M. et al. Application of denaturing high-performance liquid chromatography for monitoring sulfate-reducing bacteria in oil fields // Appl. Environ. Microbiol. 2013. V. 79(17). P. 5186–5196.
- Rees C.E., Jenkins W.J., Monster J. The sulphur isotopic composition of ocean water sulphate // Geochim. Cosmochim. Acta. 1978. V. 42. P. 377–381.
- Yang Zhou, Pengfei Di, Niu Li et al. Unique authigenic mineral assemblages and planktonic foraminifera reveal dynamic cold seepage in the southern South China sea // Minerals. 2020. V. 10(3). P. 275.

Features of the Distribution and Genesis of Authogenic Sulfide Mineralization in the Bottom Sediments of the Privetnam's Shelf and the Slope of the South China Sea

V. Yu. Kalgin¹, *, A. I. Eskova¹, A. A. Legkodimov¹

¹V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Baltiyskaya str., 43, Vladivostok, 690041 Primorsky Krai, Russia

*e-mail: kalgin.vy@poi.dvo.ru

The paper presents the results of a study of authigenic sulfide aggregates (pyrite) from sediments of the southwestern part of the South China Sea. The authors obtained materials for the study in a comprehensive geological and geophysical expedition on the R/V Akademik M.A. Lavrentyev, cruise 88 [Shakirov et al., 2021]. The morphology and microstructure of pyrite have been studied. Isotopic studies of sulfur in pyrite were performed to elucidate the genesis of sulfides, and the abiogenic nature of their formation for the first time was substantiated for the Fu Han basin. Biogenic hypothesis of genesis of most other sulfide formations was confirmed by geomicrobiological investigations. The composition and element admixtures of pyrite were studied where a high Ni content was found. The work was carried out in the framework of the Geosystems and mineral resources of the continental-ocean transition zone and open Ocean Programme of the deep ocean cluster of the UN Decade of Ocean sciences for sustainable development.

Keywords: South China Sea, sediments, pyrite, mineral indicators, geomicrobiological indicators.