

ФЕРРИМАГНИТНЫЕ МИНЕРАЛЫ КАК ВОЗМОЖНЫЕ ИНДИКАТОРЫ ОБСТАНОВКИ СЕДИМЕНТАЦИИ ТАРХАНСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОСТОЧНОГО ПАРАТЕТИСА (РАЗРЕЗ КОП-ТАКЫЛ)

© 2022 О.В. Пилипенко^{1,2}, Ю.В. Ростовцева^{2,3}, Н.В. Сальная^{2,4}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, 123242;
e-mail: pilipenko@ifz.ru

²Геофизический центр РАН, Москва, Россия, 119296

³Геологический факультет Московского Государственного Университета
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 119234

⁴Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017

Поступила в редакцию 09.04.2022; после доработки 05.05.2022; принята в печать 27.06.2022

В работе представлены результаты исследований ферримагнитных минералов и их распределения в тарханских и тархан-чокракских отложениях разреза Коп-Такыл (Керченский п-ов, Восточный Паратетис). Магнитные минералы были идентифицированы с помощью методов петромагнетизма и сканирующей электронной микроскопии. Основным ферримагнитным минералом в породах верхней части аргунских слоев тарханских и переходных тархан-чокракских отложений, отвечающих регрессивному этапу развития рассматриваемого палеобассейна, является магнетит (маггемит). Отложения большей части тарханских отложений, которые формировались преимущественно под влиянием действия морской трансгрессии, содержат помимо магнетита (маггемита) магнитные сульфиды железа — моноклинный пирротин (грейгит). Эти минералы при детритовом и раннедиагенетическом происхождении могут являться индикаторами обстановки седиментации. Полученные данные о распределении ферримагнитных минералов в изучаемых тарханских и тархан-чокракских отложениях в целом согласуются с последовательностью смены существовавших в прошлом режимах седиментации.

Ключевые слова: миоцен, тарханский региоарус, петромагнитные характеристики, обстановки седиментации.

ВВЕДЕНИЕ

В береговых обнажениях черноморского побережья Керченского п-ва в разрезе Коп-Такыл вскрываются относительно глубоководные глинистые отложения тарханского региоаруса, формирование которых происходило в условиях сначала трансгрессивного, а затем регрессивного этапов развития бассейна (рис. 1).

Как было показано в работах (Pilipenko et al., 2020; 2021) основными носителями естественной остаточной намагниченности NRM в тарханских и переходных тархан-чокракских отложениях разреза Коп-Такыл является магнетит и моноклинный пирротин и/или грейгит. Магнетит в осадочных породах, в первую

очередь, предполагает седиментационную природу NRM, обусловленную отложением как детритного магнетита, принесенного со стоком рек, впадающих в палеобассейн, так и однодоменных зерен магнетита, образованных в результате жизнедеятельности магнитотактических бактерий (Evans, Heller, 2003). Так же не исключена химическая природа намагниченности, вызванная вторичным образованием магнетита из грейгита, в результате разложения грейгита в окислительной среде (Kodama, 2012). Нахождение в осадках моноклинного пирротина всегда предполагает химическую природу намагниченности, вызванную образованием минерала на различных стадиях диагенеза (Kodama, 2012). Сульфидный аналог магнетита —

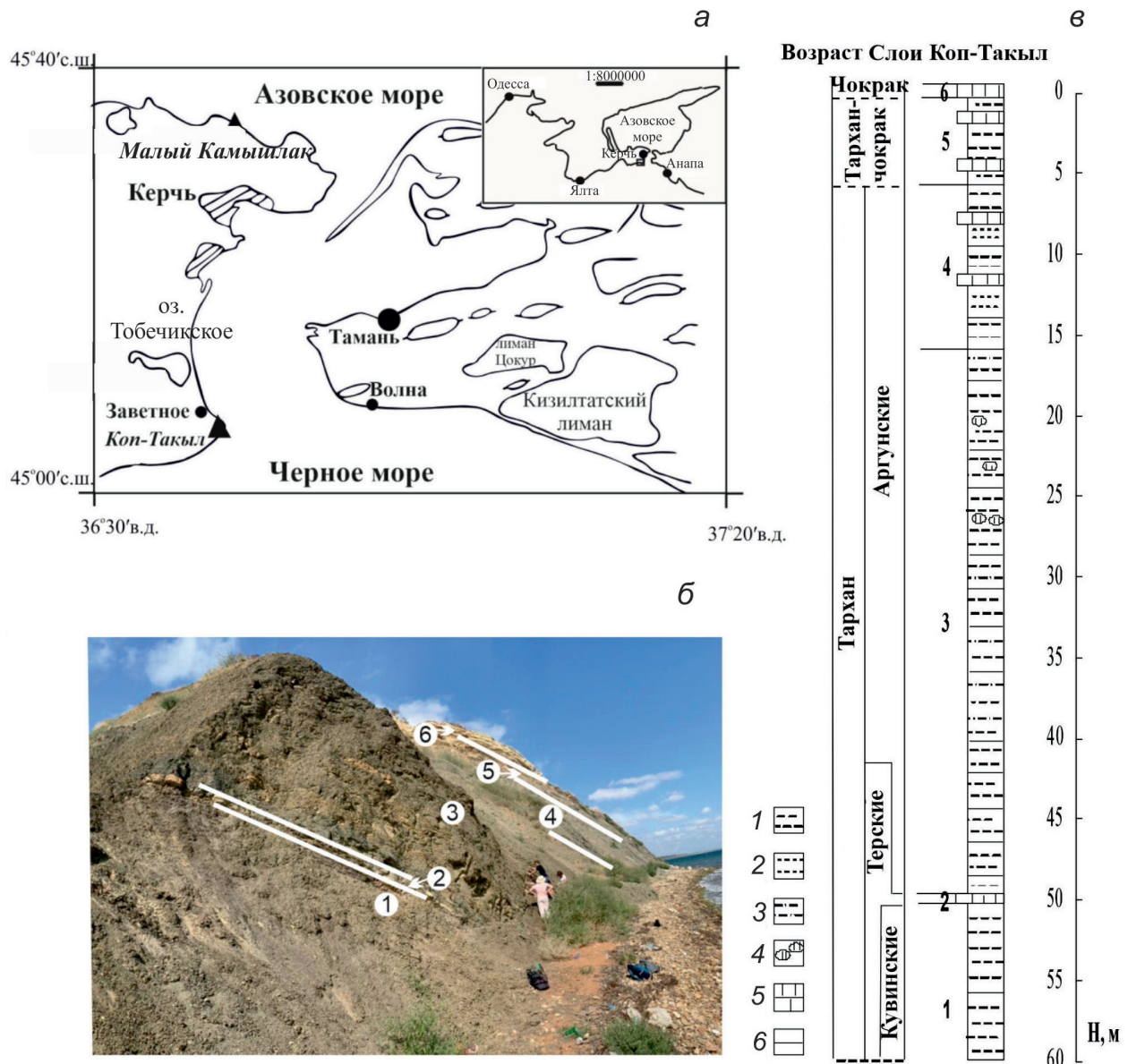


Рис. 1. Расположение района исследования (а), общий вид (б) и строение тарханских отложений разреза Коп-Такыл (Керченский п-ов) (в): 1 — глины; 2 — глины известковистые; 3 — глины с тонкими песчаными прослоями; 4 — карбонатные конкреции; 5 — карбонатные прослои; 6 — границы слоев. Символы: треугольник — миоценовые разрезы, кружок — населенные пункты. Числа в белых кружках обозначают номера слоев.

Fig. 1. Location of the study area (a), general view (b) and structure of the section of the Tarkhanian deposits of the Kop-Takyl section (Kerch Peninsula) (v): 1 — clay; 2 — calcareous clay; 3 — clay with thin sandy interlayers; 4 — carbonate nodules; 5 — carbonate interlayers; 6 — boundaries of layers. Symbols: triangle — Miocene sections, circle — settlements. Numbers in white circles denote the layer numbers in fig. b.

грейгит может иметь, как диагенетическую (Robertts, Weaver, 2005), так и биогенную природу, когда он образуется в результате жизнедеятельности магнитотактических бактерий, которые обладают внутриклеточной биоминерализацией монокристаллов грейгита (Mann et al., 1990). Эти кристаллы грейгита выстраиваются в цепочки и связаны с монокристаллами немагнитного минерала — пирита железа, образованными в результате пиритизации (Robertts et al., 2011).

В настоящей работе рассматриваются состав и распределение ферримагнитных минералов, присутствующих в тарханских и переходных тархан-чокракских отложениях разреза Коп-Такыл, во взаимосвязи со сменой обстановок осадконакопления. Также показана возможность применения петромагнитных исследований и методов электронной микроскопии для восстановления седиментационных и постседиментационных условий формирования отложений Восточный Паратетиса.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Разрез Коп-Такыл расположен на Черноморском побережье Керченского п-ва ($\varphi=45^{\circ}10'$ с.ш., $\lambda=36^{\circ}44'$ в.д.), южнее села Заветное и сложен в основном глинистыми отложениями тарханского возраста, содержащими карбонатные прослои (рис. 1). Тарханские отложения разреза Коп-Такыл вскрываются в северном крыле антиклинальной складки. Тарханский регионарус Восточного Паратетиса подразделяется на нижний (кувинские слои), средний (терские слои) и верхний (аргунские слои) (Мерклин, 1950; Носовский, 1998).

В изучаемых отложениях разреза Коп-Такыл снизу вверх выделяются следующие слои (рис. 1б, 1в):

1. Слабокарбонатные темно-серые (до черных), тонкослоистые глины с высыпками вторичного ярозита, видимой мощностью ~4 м (нижний тархан, кувинские слои). В нижней части отложения закрыты оползнем.

2. Светло-серый, сливного вида, тонкозернистый, линзовидный, с раковинами моллюсков *Lentipecten corneus denudatus* карбонатный прослой, толщиной ~0.2 м, который отвечает среднему тархану (терские слои) и обозначаемый как «тарханский мергель» (Невесская и др., 2004). Первичная высокая известковистость осадков и последующая вторичная карбонатизация отложений обусловила образование в этой части разреза бронирующего горизонта.

3. Глины темно-серые, тонкослоистые, местами с заметной пиритизацией, в основании известковистые, в средней части с единичными тонкими (до 5 см) алевроитово-песчаными прослоями, в верхней — с отдельными карбонатными прослоями (верхний тархан, аргунские слои). Мощность слоя ~33–34 м.

4. Глины серо-зеленые, тонкослоистые, с прослоями карбонатных пород, в верхней части — с обилием спирателл (верхний тархан, аргунские слои). Мощность слоя ~10–11 м.

5. Переслаивание прослоев глин серо-зеленых, тонкослоистых и карбонатных пород (переходные тархан-чокракские отложения). Мощность слоя ~5–6 м.

6. Переслаивание карбонатных пород с признаками вторичной доломитизации (чокракские отложения). Мощность слоя ~1–1.2 м.

Общая мощность изученных отложений разреза Коп-Такыл составляет ~53 м.

Район исследования относится к части Керченского п-ва, выделяемого вместе с территорией Таманского полуострова в область Еникальского пролива Восточного Паратетиса (Жижченко, 1940).

В конце коцахурского времени (в конце раннего миоцена) Восточный Паратетис сократился по площади и характеризовался пониженной соленостью вод (Невесская и др., 2003). Затем в раннем тархане (нижний-средний миоцен) бассейн расширился за счет начала развития широкой трансгрессии и восстановления связи с открытыми морскими водами. При этом произошло общее углубление водоема, в котором заметное распространение получили обстановки глубоководного шельфа (150–300 м) (Жижченко, 1940). Наряду с реликтами коцахурской фауны отмечается появление морских видов моллюсков (Гончарова и др., 2001). В середине тархана на фоне выравнивания рельефа дна бассейна произошло обмеление отдельных более глубоководных участков. Фауна оставалась разнообразной при начавшемся некотором сокращении связей с Мировым океаном. В позднем тархане углубление бассейна продолжилось. В пределах относительно глубоководных участков в придонных водах периодически возникали условия седиментации с разной степенью стагнации (Багдасарян, 1965; Мерклин, 1950). Связи Восточного Паратетиса с открытыми морскими водами продолжали сокращаться, усилилось поступление обломочного материала в бассейн (Багдасарян, 1965). К концу тархана произошло общее обмеление бассейна. На протяжении тархана Восточный Паратетис оставался морским бассейном с чуть меньшей соленостью (30–32‰) в среднем и позднем тархане (Гончарова, 1989; Гончарова и др., 2001). В начале чокрака области мелководья расширились, что обусловило широкое развитие бентосной фауны.

В пределах большей части Керченского полуострова в тархане существовали относительно глубоководные обстановки седиментации с накоплением преимущественно глинистых отложений.

ОТБОР КОЛЛЕКЦИИ ДЛЯ ПЕТРОМАГНИТНЫХ И ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для петромагнитных и палеомагнитных исследований были отобраны штуфы (44 шт.) коренных пород от верхов нижнетарханских (кувинских) до кровли верхнетарханских (аргунских) отложений и переходных тархан-чокракских слоев с шагом ~1.5 м. Ориентированные штуфы были взяты в основном по напластованию из свежерасчищенных вертикальных стенок разреза. Для проведения палеомагнитных исследований штуфы были распилены на горизонтальные пластины, из которых в свою очередь были изготовлены ориентированные кубические образцы с ребром 2 см по 2–3 образца из пластины.

Для проведения исследований методами термомангнитного анализа были выпилены образцы с ребром 1 см по два образца из пластины.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ

На первых дублях образцов объемом 8 см^3 со всех стратиграфических уровней коллекции образцов разреза Коп-Такыл были исследованы стандартные магнитные параметры: естественная остаточная намагниченность NRM, магнитная восприимчивость, безгистерезисная остаточная намагниченность ARM, созданная в переменном магнитном поле 1.2 Тл в присутствии постоянного магнитного поля 50 мкТл. На этих же образцах измерены остаточная намагниченность насыщения SIRM, созданная в постоянном магнитном поле 0.6 Тл (Pilipenko et al., 2020, 2021). На образцах объемом 1 см^3 , которые демонстрировали высокие начальные значения NRM, были сняты кривые непрерывного терморазмагничивания $M_{rs}(T)$ (Pilipenko et al., 2020) на трехкомпонентном термомангнитометре (Орион, Россия). Также представительная коллекция, состоящая из образцов объемом 8 см^3 с каждого слоя, была подвергнута ступенчатому термомангнитному анализу $M_{rs}(T)$ (Pilipenko et al., 2021).

Измерения NRM и ARM выполнены на SQUID-мангнитометре (2G Enterprises, США, чувствительность прибора составляет порядка 10^{-7} А/м), расположенном в немагнитной комнате (Lodestar Magnetics, США). SIRM создана на установке импульсного намагничивания Impulse Magnetizer IM-100 (ASC Scientific, США). Измерения SIRM выполнены на мангнитометре JR-6 (AGICO, Чехия, чувствительность прибора составляет $2 \times 10^{-6} \text{ А/м}$). Магнитная восприимчивость измерена на каппаметре Multi-Function Kappabridge MFK1-FA (AGICO, Чехия). Все образцы перед началом исследований были взвешены на весах CAUY120 (CAS-electronic balance, Япония).

Эксперимент проводился на базе Центра коллективного пользования Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

Из образцов со всех изученных слоев разреза Коп-Такыл было осуществлено выделение тяжелой фракции тяжелой жидкостью (бромформом) и гранулометрическое разделение зерен по размеру с использованием набора сит: >0.25 , $0.25-0.1$, $0.1-0.05$, $0.05-0.01$ мм в лаборатории Геологии и рудогенеза океанической литосферы Геологического института (ГИН) РАН аналитиком Т.Д. Зеленовой. Железосодержащие зерна размером >0.25 мм, $0.25-0.1$ мм исследованы под бинокулярным микроскопом Olympus SZ (Olympus Corporation, Япония). Далее зерна раз-

мещались на демонстрационную шайбу с подложкой из золотого напыления. Сканирование поверхности зерен пучком высокоэнергетичных электронов, определение элементного химического состава и снимки зерен выполнены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) VEGA 3 (TESCAN, Чехия) в лаборатории Физических методов изучения порообразующих минералов ГИН РАН оператором Н.В. Горьковой и доктором геол.-мин. наук В.В. Петровой.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОМАГНИТНОГО АНАЛИЗА

В работе (Pilipenko et al., 2020) показано, что значения NRM несколько различаются в верхней и нижней частях разреза. В нижней части разреза в слоях 1–2 (глубины 55–51 м) значения NRM колеблются в интервале $(1-3) \times 10^{-7} \text{ А} \times \text{м}^2/\text{кг}$. Выше по разрезу, в слое 3 (глубины 50–28 м) значения NRM увеличиваются с глубиной от $2 \times 10^{-7} \text{ А} \times \text{м}^2/\text{кг}$ до $5 \times 10^{-7} \text{ А} \times \text{м}^2/\text{кг}$. Эти относительно высокие значения соответствуют интервалу глин, накопление которых происходило в пределах шельфа в относительно глубоководных условиях. В верхней части разреза на глубинах от 2–28 м величина NRM вновь снижается до значений $(0.6-2) \times 10^{-7} \text{ А} \times \text{м}^2/\text{кг}$ из-за низкой концентрации ферримангнетика, вызванной опесчаниванием глин из-за общего обмеления бассейна.

Величина магнитной восприимчивости в целом демонстрирует низкие значения по разрезу: среднее значение магнитной восприимчивости для первых дублей образцов $\sim 1.5 \times 10^{-4}$ ед. СИ (Pilipenko et al., 2020), что говорит о том, что величина магнитной восприимчивости определяется парамагнитной фракцией (Tarling, Hrouda, 1993).

Изменения магнитной восприимчивости, NRM, SIRM и ARM демонстрируют рост в нижней части слоя 3, что может быть связано с ростом вклада активности органики и бактерий (Tarling, Hrouda, 1993).

На трехкомпонентном термомангнитометре по зависимости остаточного магнитного момента M_{rs} , созданного в поле 0.2 Тл, от температуры на образцах глин объемом 1 см^3 с относительно высокими начальными значениями NRM (№№1 ($H=55.32$ м), 8 ($H=46.22$ м), 12 ($H=41.77$ м), 21 ($H=17.41$ м), 39 ($H=27.20$ м)) был проведен термомангнитный анализ (ТМА), предполагающий непрерывное измерение M_{rs} от температуры (Pilipenko et al., 2020). ТМА других образцов не представлялся возможным из-за низких значений остаточного магнитного момента. ТМА показал, что на кривых $M_{rs}(T)$ первого нагрева имеются точки перегиба в районе $\sim 300-350^\circ\text{C}$ и $\sim 580^\circ\text{C}$ (рис. 2).

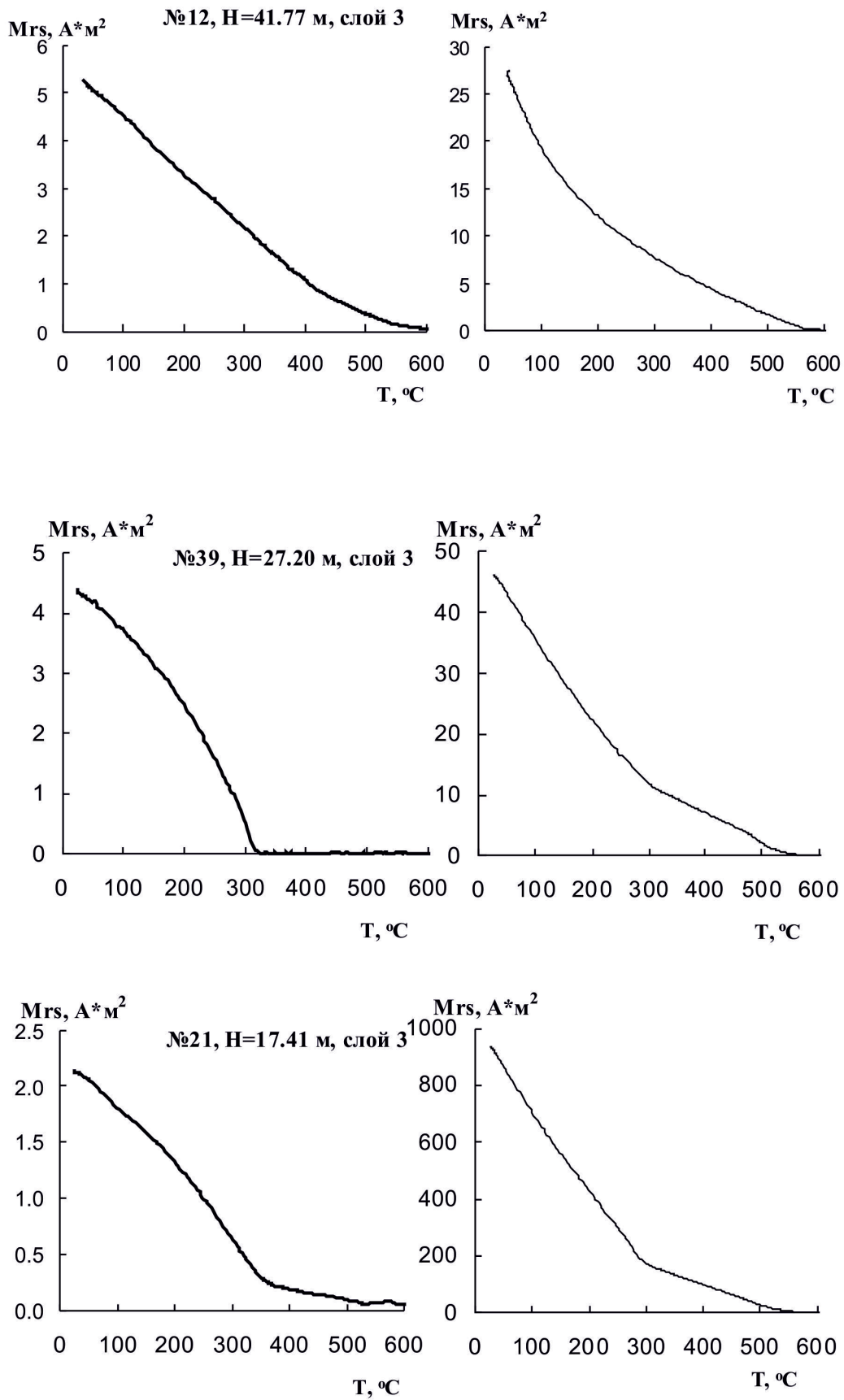


Рис. 2. Кривые зависимости остаточного магнитного момента насыщения от температуры $M_{rs}(T)$ при непрерывном нагреве. Жирная линия — кривая первого нагрева, тонкая линия — кривая второго нагрева.

Fig. 2. Curves of dependence of remanent magnetic moment saturation on the temperature $M_{rs}(T)$ during continuous heating. Bold line is the curve of the first heating, thin line is the curve of the second heating.

Кривые второго нагрева всегда проходят много выше кривых первого нагрева и имеют перегиб в интервале $\sim 550\text{--}580^\circ\text{C}$, что соответствует температурам деблокирования магнетита или маггемита. Для некоторых образцов на кривых второго нагрева наблюдается перегиб при температуре $\sim 300\text{--}350^\circ\text{C}$, что отвечает температурам деблокирования сульфидов железа (моноклинного пирротина или грейгита). Сильный рост магнитного момента на кривой второго нагрева, скорее всего, связан с образованием магнетита из пирита.

Для подтверждения состава ферримагнитной фракции было выполнено ступенчатое терморазмагничивание M_{rs} , созданного в импульсном магнитном поле 1.2 Тл на образцах с ребром 2 см. На представительной коллекции (№№ 3, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 24, 27, 30, 34, 36, 40) было проведено терморазмагничивание от 25°C до 580°C с шагом $40\text{--}50^\circ\text{C}$. На рис. 3 показано, что на всех кривых ступенчатого размагничивания наблюдается полное разрушение магнитного момента к $\sim 580^\circ\text{C}$, что говорит о наличии магнетита или

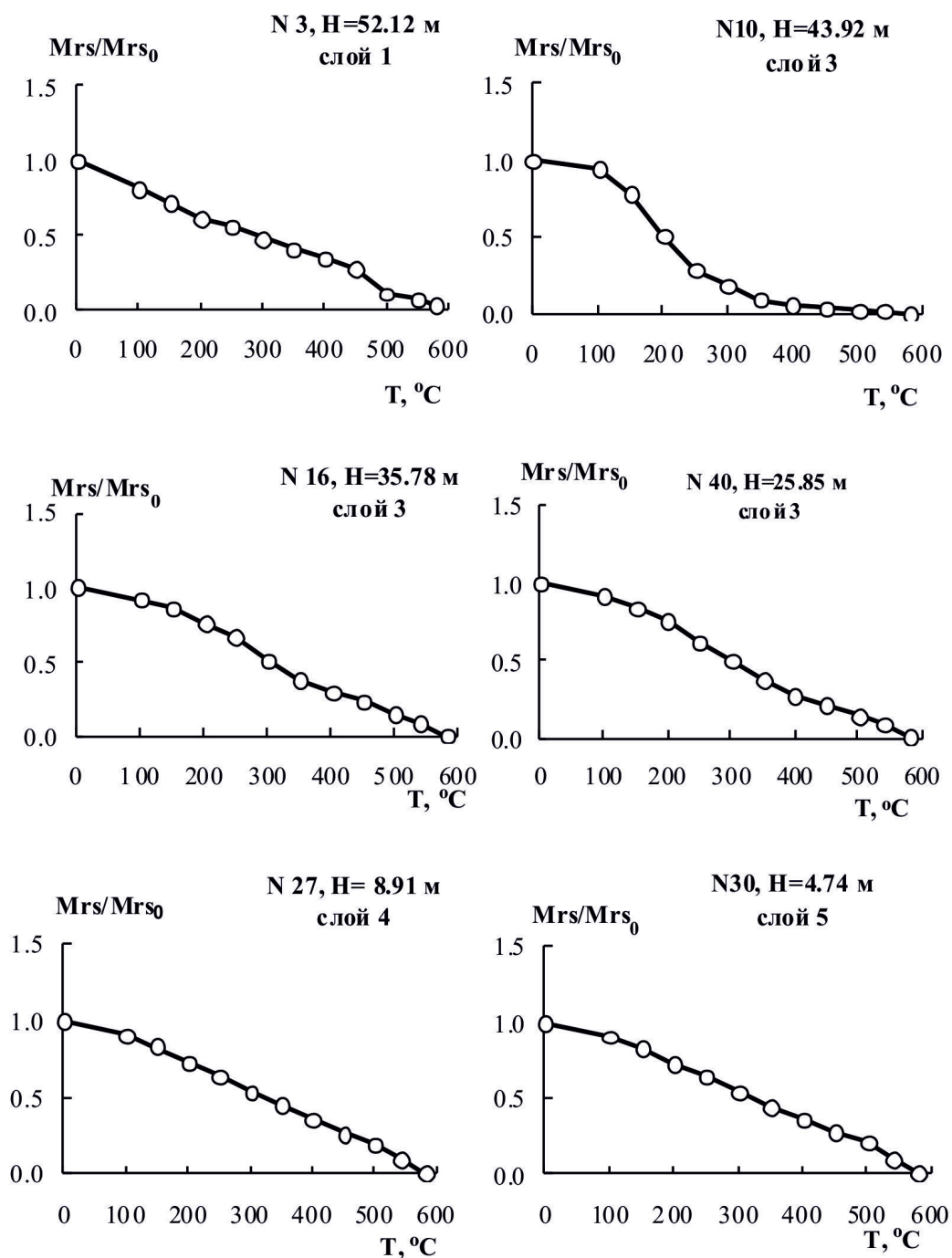


Рис. 3. Терромагнитные кривые M_{rs}/M_{s0} ступенчатых нагревов.

Fig. 3. Thermomagnetic curves of M_{rs}/M_{s0} of step heating.

маггемита. Помимо магнетита (маггемита), начиная с глубин разреза ~26 м и до ~55 м, в слоях 3–6, относящихся к аргунским отложениям, на кривых термомагнитного анализа наблюдается точка перегиба в интервале температур 300–350°C, соответствующим температурам деблокирования магнитного сульфида железа.

РЕЗУЛЬТАТЫ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НА СКАНИРУЮЩЕМ ЭЛЕКТРОННОМ МИКРОСКОПЕ

Для определения состава магнитных минералов из всех стратиграфических слоев тарханских и тархан-чокракских отложений разреза Коп-Такыл было отобрано 11 образцов глин для выделения тяжелой фракции с использованием бромформа. В лаборатории Геологии и рудогенеза океанической литосферы ГИН РАН был проведен гранулометрический анализ образцов с выделением фракций размером >0.25, 0.25–0.1, 0.1–0.05 и 0.05–0.01 мм, включающий размокание и отмучивание глин, с дальнейшим применением тяжелой жидкости и получением минералов с повышенным удельным весом (аналитик Т.Д. Зеленова). Из всех полученных фракций под бинокулярным микроскопом Olympus SZ были взяты перспективные зерна для микрозондового анализа на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 (TESCAN) (консультант доктор геолого-минералогических наук В.В. Петрова). Всего было отобрано 117 зерен.

В семи из одиннадцати исследуемых образцов, а именно из слоя 1 — № 3, из слоя 3 — № 9, 17, 42, из слоя 4 — № 28, из слоя 5 — № 31, 32 было установлено наличие ферримагнитной фракции в зернах. Остальные проанализированные зерна относились к парамагнитным минералам — пириту, марказиту, хромшпинели и ильмениту. На основе результатов анализа состава зерен были рассчитаны минералогические формулы. В образцах № 1–2 (слой 1), 4–4 (2) (слой 1), 11 (слой 3), 25 (слой 4) во фракции размером >0.25 мм и 0.25–0.1 мм ферримагнитных зерен не выявлено, что не исключает наличия более мелкой ферримагнитной фракции с размером зерен 0.1–0.05, 0.05–0.01 мм. По данным микрозондового анализа ферримагнитные минералы представлены оксидами (магнетитом, маггемитом (или гематитом), сульфидами (пирротин, грейгитом) и гидрооксидами железа (гетитом). Рассчитанные химические формулы ферримагнетиков, полученные в результате сканирования минералов на СЭМ и анализа элементного химического состава, сведены в табл. 1. В качестве примера на рис. 4 представлены изображения зерен грейгита и пирротина из образца №17 (H=34.41м, слой 3), на которых хорошо видно агрегатное строение выделений сульфидов железа.

Результаты определения ферримагнитных минералов по температурам деблокирования, полученным в результате ТМА, и с помощью СЭМ сведены в табл. 2.

Таблица 1. Химические формулы ферримагнитных минералов на основе анализа результатов работы на СЭМ.

Table 1. Chemical formulas of ferrimagnetic minerals based on SEM analysis.

№ образца	№ зерна	№ анализа	Расчетная формула	Минерал
3	9	9	$\text{Fe}_{2.04}\text{O}_3$	Маггемит или гематит (Fe_2O_3)
3	11	11	$\text{Fe}_{1.92}\text{O}_3$	Маггемит или гематит (Fe_2O_3)
9	17	17	$\text{Fe}_{3.08}\text{O}_4$	Магнетит (Fe_3O_4)
9	18	18-1	$\text{Fe}_{1.95}\text{O}_3$	Маггемит или гематит (Fe_2O_3)
17	2	2	$\text{Fe}_{0.96}\text{O}_2$	Гетит ($\text{FeO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)
17	8	14	$\text{Fe}_{1.01}\text{S}$	Пирротин (FeS)
17	9	16	$\text{Fe}_{3.2}\text{S}_4$	Грейгит (Fe_3S_4)
17	12	21	$\text{Fe}_{0.92}\text{O}_2$	Гетит ($\text{FeO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)
17	13	23	$\text{Fe}_{1.00}\text{O}_2$	Гетит или лимонит ($\text{FeO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)
28	19	32	$\text{Fe}_{1.98}\text{O}_3$	Маггемит или гематит (Fe_2O_3)
31	45	45	$\text{Fe}_{3.04}\text{O}_4$	Магнетит (Fe_3O_4)
31	47	47	$\text{Fe}_{2.10}\text{O}_3$	Маггемит или гематит (Fe_2O_3)
32	24	41	$\text{Fe}_{1.98}\text{O}_3$	Маггемит или гематит (Fe_2O_3)
42	37	55	$\text{Fe}_{3.2}\text{S}_4$	Грейгит (Fe_3S_4)

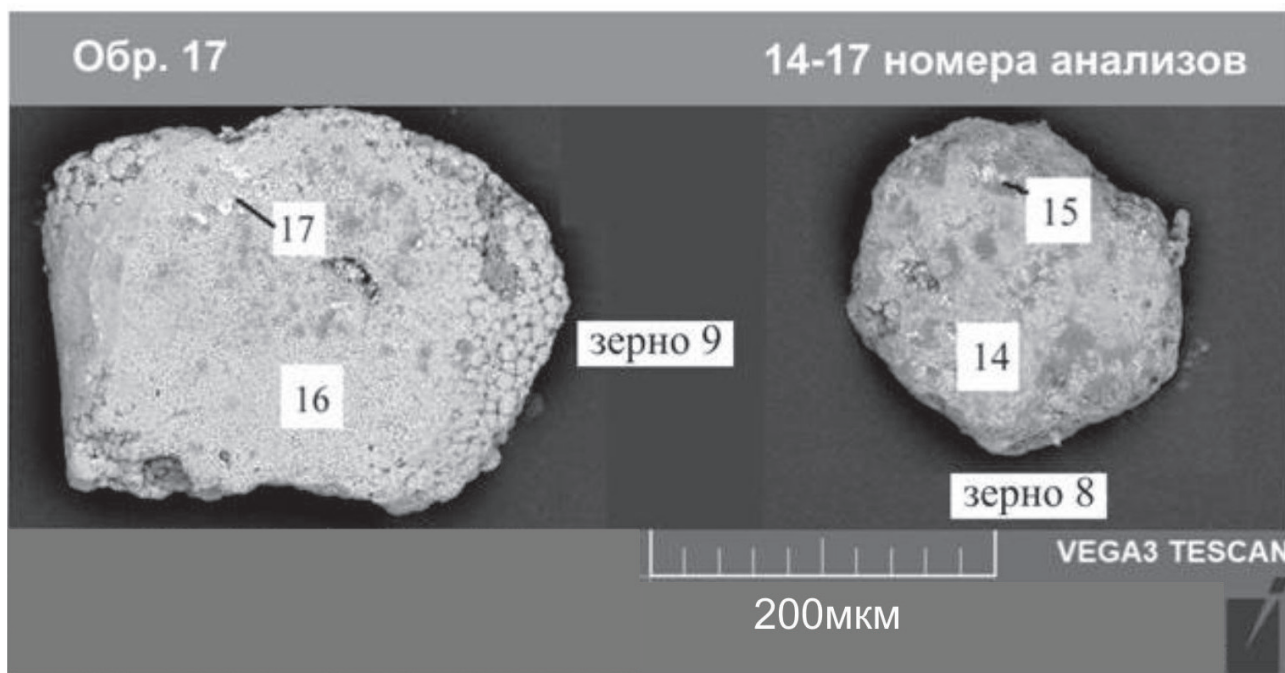


Рис. 4. Изображение железосодержащих зерен, выделенных из образца 17 (H=34.41 м), полученное на СЭМ: зерно 8 — пирротин, зерно 9 — грейгит. Числа в белых квадратах обозначают номера анализов.

Fig. 4. Image of iron-bearing grains isolated from sample 17 (H=34.41 m): grain 8 — pyrrhotite, grain 9 — greigite. Numbers in white squares indicate the numbers of analyses.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Тарханские и тархан-чокракские отложения разреза Коп-Такыл характеризуются низкими значениями естественной остаточной намагниченности $(0.05\text{--}0.57) \times 10^{-6} \text{ А} \times \text{м}^2/\text{кг}$ и удельной магнитной восприимчивости $(0.67\text{--}1.47) \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$ из-за низкой концентрации ферримагнитной фракции и большого количества парамагнитной и диамагнитной (Pilipenko et al., 2020, 2021). Это затруднило проведение непрерывного термомангнитного анализа по $M_{rs}(T)$ на образцах объемом 1 см^3 .

В соответствии с результатами ступенчатого терморазмагничивания $M_{rs}(T)$ образцов объемом $\sim 8 \text{ см}^3$, определения температур деблокирования и сканирования зерен на СЭМ (табл. 2) по составу магнитных минералов в разрезе выделяются две части. В нижней части разреза (до глубины $\sim 17 \text{ м}$, слои 1–3, большая часть тарханских отложений) согласно результатам исследований наблюдаются магнетит (маггемит) и сульфид железа (моноклинный пирротин или грейгит). В верхней части разреза (глубины $\sim 2\text{--}16 \text{ м}$, слои 4–5, кровля аргунских слоев и переходные тархан-чокракские отложения) выявляется, в основном, только магнетит (маггемит).

Происхождение ферримагнитных минералов, присутствующих в изучаемых отложениях разреза Коп-Такыл, может быть аллотигенным (детритовым) и/или аутигенным (вторичным, за счет

действия бактериальных и химических процессов). Эти минералы, в случае их сингенетического образования (одновременно с осадконакоплением и/или в начале диагенеза), могут свидетельствовать об обстановках седиментации и первичных условиях захоронения отложений. Можно предположить, что при определенных условиях информация об обстановках осадконакопления может быть унаследована в том или ином виде и при наличии вторичного перемагничивания.

Присутствие магнетита (маггемита) в изучаемых породах выявлено практически на протяжении всего разреза. Магнетит (маггемит) установлен в глинах, в которых отсутствует или содержится обломочная примесь, поступающая в бассейн со стоком рек. В случае отсутствия поступления обломочной примеси не исключено образование магнетита (маггемита) химической природы и магнетита бактериальной природы. В случае содержания обломочной примеси, возможно, предположить детритовый (аллотигенный) генезис той или иной части этих зерен. В большей части тарханских отложений магнетит (маггемит) встречается совместно с магнитными сульфидами железа. В работе (Pilipenko et al., 2020) было показано, что диаграммы Зийдervельда помимо вязкой компоненты намагниченности несут единственную характеристическую компоненту, идущую в ноль, и разделить вклад минералов в естественную остаточную намагниченность не представляется возможным.

Таблица 2. Состав и распределение ферримангнитных минералов в изучаемых тарханских и тархан-чокракских отложениях разреза Коп-Такыл.

Table 2. Composition and distribution of ferrimagnetic minerals in the studied Tarkhanian and Tarkhanian-Chokrakian deposits of the Kop-Takyl section.

№ образца	№ слоя	Глубина Н, м	Ферримангнетик	Анализ
32	5	2	Маггемит (или гематит)	СЭМ
31	5	3.37	Магнетит + маггемит (или гематит)	СЭМ
30	5	4.74	Магнетит (или маггемит)	ТМА
28	4	7.34	Маггемит (или гематит)	СЭМ
27	4	8.91	Магнетит (или маггемит)	ТМА
24	4	13.61	Магнетит (или маггемит)	ТМА
22	3	15.91	Магнетит (или маггемит)	ТМА
21	3	17.41	Магнетит (или маггемит) + моноклинный пирротин (или грейгит)	ТМА
19	3	20.15	Магнетит (или маггемит)	ТМА
42	3	23.68	Грейгит	СЭМ
40	3	25.85	Магнетит (или маггемит) + моноклинный пирротин (или грейгит)	ТМА
39	3	27.20	Моноклинный пирротин (или грейгит)	ТМА
36	3	30.57	Магнетит (или маггемит) + моноклинный пирротин (или грейгит)	ТМА
34	3	33.04	Магнетит (или маггемит) + моноклинный пирротин (или грейгит)	ТМА
17	3	34.41	Грейгит + пирротин + гетит	СЭМ
16	3	35.78	Магнетит (или маггемит) + моноклинный пирротин (или грейгит)	ТМА
13	3	40.07	Магнетит (или маггемит) + моноклинный пирротин (или грейгит)	ТМА
12	3	41.77	Магнетит (или маггемит)	ТМА
10	3	43.92	Магнетит (или маггемит) + моноклинный пирротин (или грейгит)	ТМА
9	3	45.02	Магнетит + маггемит (или гематит)	СЭМ
7	3	47.72	Магнетит (или маггемит) + моноклинный пирротин (или грейгит)	ТМА
4	1	51.12	Магнетит (или маггемит) + моноклинный пирротин (или грейгит)	ТМА
3	1	52.12	Магнетит + маггемит (или гематит) + моноклинный пирротин (или грейгит)	ТМА СЭМ

Анализ результатов, полученных на СЭМ показал, что часть выделенных ферримангнитных минералов (грейгит, гетит, маггемит, гематит) являются вторичными минералами, образованными в процессе диагенеза. Вторичные магнитные минералы несут химическую намагниченность. Возраст образования этой намагниченности не известен: намагниченность может быть как сингенетической, так и более поздней, отстоящей по времени на сотни тысяч лет от момента накопления толщ.

Возможно, это послужило причиной перемагничивания пород разреза Коп-Такыл по

современному полю. Как было показано в работе (Pilipenko et al., 2020) изученные отложения характеризуется продолжительным интервалом прямой полярности, сменяемым кратковременным интервалом обратной полярности в самых низах разреза.

В ходе проведенного исследования были получены данные о распределении ферримангнитных минералов в изучаемых тарханских и тархан-чокракских отложениях, которые в целом согласуются с последовательностью смены существовавших в прошлом режимов седиментации (рис. 5).

Возраст Слои Коп-Такыл

Ферри-

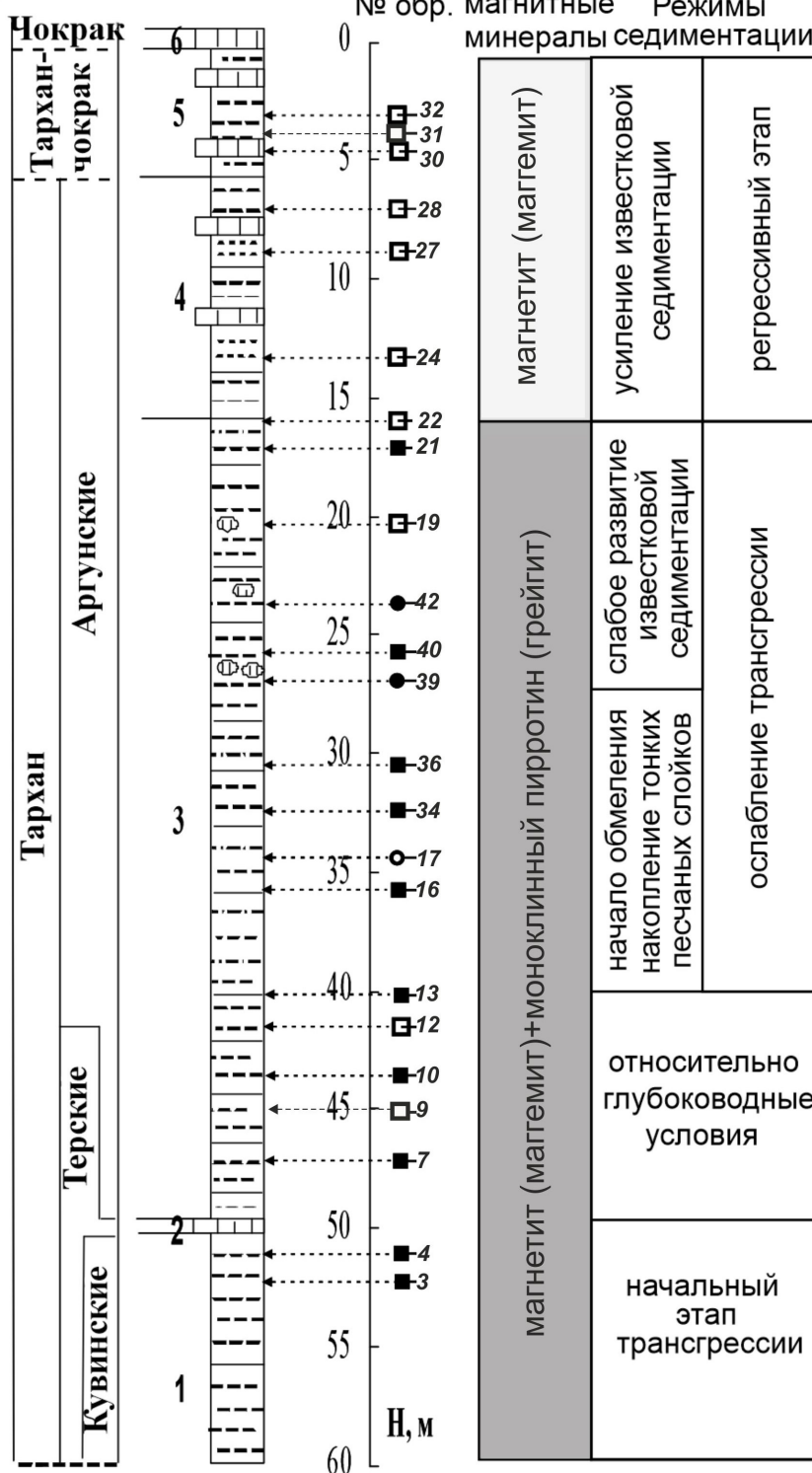
№ обр. магнитные Режимы
минералы седиментации

Рис. 5. Распределение ферримангнитных минералов в тарханских отложениях разреза Коп-Такыл и режимы седиментации. Содержание ферримангнитных минералов в образцах: №№ 3, 4, 7, 9, 10, 13, 16, 34, 36, 40, 21 — магнетит (маггемит), моноклинный пирротин (грейгит) — залитый квадрат; №№ 9, 12, 19, 22, 24, 27, 28, 30, 31, 32 — магнетит (маггемит) — пустой квадрат; №№ 39, 42 — моноклинный пирротин (грейгит) — залитый кружок; №17 — моноклинный пирротин (грейгит) и гетит — пустой кружок.

Fig. 5. Distribution of ferrimagnetic minerals in the Tarkhanian deposits of the Kop-Takyl section and sedimentation regimes. The content of ferrimagnetic minerals in the samples: №№ 3, 4, 7, 9, 10, 13, 16, 34, 36, 40, 21 — magnetite (maghemite), monoclinic pyrrhotite (greigite) — filled square; №№ 9, 12, 19, 22, 24, 27, 28, 30, 31, 32 — magnetite (maghemite) — hollow square; №№ 39, 42 — monoclinic pyrrhotite (greigite) — filled circle; №17 — monoclinic pyrrhotite (greigite) and goethite — hollow circle.

Отложения слоя 1 разреза Коп-Такыл, отвечающие кувинским слоям тархана, накапливались в относительно глубоководных условиях на начальном этапе развития трансгрессии, обусловившей поступление открытых морских вод в ранее существовавший солоноватоводный бассейн. Смена режима седиментации, по-видимому, сопровождалась неустойчивым обогащением придонных вод кислородом, что привело к осаждению тонкослоистых бескарбонатных и слабоизвестковых глинистых осадков (Ростовцева, 2012), а также возможному росту бактериальных сообществ и усиленному образованию грейгита биогенного происхождения.

Слой 2 в разрезе Коп-Такыл представлен известково-глинистыми маломощными отложениями, вторично доломитизированными и содержащими разнообразную морскую фауну. В этом слое встречаются *Abra parabilis*, *Lentipecten corneus denudatus*, *Abra alba* и др. (Головина, Гончарова, 2004). Отложения откладывались при достаточном насыщении придонных вод кислородом и низких скоростях седиментации при широком развитии донной макрофауны (Ростовцева, 2012). Возможно, снижение скоростей седиментации было связано с начавшейся структурной перестройкой бассейна.

Формирование отложений нижней части слоя 3 происходило на фоне общего углубления бассейна при продолжающемся действии морской трансгрессии, в периодически возникающих условиях стагнации. Глины характеризуются редкими находками раковин бентосных моллюсков. В средней части слоя 3 отмечается наличие песчаных тонких прослоев, накопление которых было связано с увеличением поступления терригенного материала при начавшемся общем обмелении бассейна. В дальнейшем возникли условия благоприятные для осаждения не только глинистых, но и глинисто-известковых осадков (Ростовцева, 2012). В отложениях нижней части слоя 3 выявлено совместное присутствие магнетита (маггемита) и моноклинного пирротина (грейгита). В средней и верхней частях слоя 3 магнетит (маггемит) и магнитные сульфиды железа встречаются поочередно в породах. Периодическое присутствие окисных и закисных соединений железа может свидетельствовать о нестабильности кислородного режима придонных вод в условиях ослабления действия морской трансгрессии. В периодически возникающих условиях стагнации в результате развития магнитотактических бактерий, в осадках возможно образование грейгита биогенного происхождения.

Отложения слоев 4 и 5 охарактеризованы обилием спирателл (крылоногих моллюсков) и обеднением остальных видов морской фауны

(Головина, Гончарова, 2004). В это время связи Восточного Паратетиса с открытыми морскими водами продолжали сокращаться. Обмеление бассейна усилилось. В рассматриваемой части Восточного Паратетиса стало возможно накопление глинистых, глинисто-известковых и известковых осадков при возрастающем влиянии карбонатной седиментации (Ростовцева, 2012). Придонные воды были преимущественно в достаточном количестве насыщены кислородом. В породах слоев 4 и 5 среди ферримангнитных минералов установлено присутствие магнетита (маггемита).

ВЫВОДЫ

В тарханских и тархан-чокракских отложениях разреза Коп-Такыл по составу магнитных минералов выделяются две части. В низах разреза, отвечающей большей части тарханских отложений (до глубины ~17 м, слои 1–3) выявлено среди ферримангнитных минералов присутствие магнетита (маггемита) и сульфидов железа (моноклинный пирротин (грейгит)). В верхах разреза (глубины ~2–16 м, слои 5–4, кровля аргунских слоев и переходные тархан-чокракские отложения) установлено наличие, в основном, магнетита (маггемита).

Генезис ферримангнитных минералов, установленных по температурам деблокирования и с помощью СЭМ в изучаемых отложениях разреза Коп-Такыл, может быть аллотигенным (детритовым) и/или аутигенным (вторичным, за счет действия бактериальных и химических процессов). Эти минералы при аллотигенном (детритовом) и сингенетическом (ранне-диагенетическом) происхождении могут являться индикаторами обстановок седиментации.

При определенных условиях информация о первичных условиях осадконакопления может быть унаследована в том или ином виде и при наличии вторичного перемагничивания.

В ходе проведенного исследования были получены данные о распределении ферримангнитных минералов в изучаемых тарханских и тархан-чокракских отложениях, которые в целом согласуются с последовательностью смены существовавших в прошлом режимов седиментации.

Для отложений тархана, накопившихся в условиях наиболее широкого развития морской трансгрессии при углублении бассейна, свойственно в основном совместное нахождение окисных и закисных форм магнитных минералов железа: магнетита (маггемита) и моноклинного пирротина (грейгита).

В породах кровли тарханских и в тархан-чокракских отложениях, сформировавшихся при значительном обмелении бассейна и ослаблении

действия морской трансгрессии, выявлено наличие окисных форм магнитных минералов железа (магнетита, маггемита и гематита).

Проведенные исследования показали, что выявление взаимосвязи состава ферримангнитных минералов от обстановок седиментации представляется важным, и необходимо дальнейшее продолжение всестороннего изучения этого вопроса.

Авторы выражают глубокую благодарность А.И. Рыбкиной за организацию полевых работ, А.А. Одинцовой за помощь в отборе и подготовке коллекции образцов, Т.Д. Зеленовой за проведение гранулометрического анализа в лаборатории Геологии и рудогенеза океанической литосферы ГИН РАН, В.В. Петровой и Н.В. Горьковой за проведение минералогических исследований на сканирующем электронном микроскопе в лаборатории Физических методов изучения породообразующих минералов ГИН РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-77-10075 на базе центра коллективного пользования Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (Веселовский и др., 2022).

Список литературы [References]

- Багдасарян К.Г.* Развитие моллюсковой фауны чокрака Грузии // Тбилиси: Мецниереба. 1965. 211 с. [*Bagdasaryan K.G.* Development of the mollusk fauna of the Chokrak of Georgia // Tbilisi: Metsniereba. 1965. 211 p. (in Russian)].
- Веселовский Р.В., Дубиня Н.В., Пономарев А.В. и др.* Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» // Геодинамика и тектонофизика. 2022. V. 13. Вып. 2. 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579> [*Veselovskiy R.V., Dubinya N.V., Ponomarev A.V. et al.* Shared Research Facilities Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. V. 13 (2), 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>]
- Головина Л.А., Гончарова И.А.* Планктон и бентос (наннопланктон и двустворчатые моллюски) в тарханских отложениях Керченского полуострова и Западного Предкавказья // Проблемы стратиграфии фанерозоя Украины. Киев. 2004. С. 147–150 [*Golovina L.A., Goncharova I.A.* Plankton and benthos (nannoplankton and bivalves) in the Tarkhanian deposits of the Kerch Peninsula and the Western Ciscaucasia. Problems of stratigraphy of the Phanerozoic of Ukraine. Kiev. 2004. P. 147–150 (in Russian)].
- Гончарова И.А.* Двустворчатые моллюски тарханского и чокракского бассейнов. М.: Наука. 1989. 200 с. [*Goncharova I.A.* Bivalve mollusks of the Tarkhanian and Chokrakian basins. Moscow: Science. 1989. 200 p. (in Russian)]
- Гончарова И.А., Хонджариан С.О., Щерба И.Г.* Тархан-караганский этап развития Эвксино-Каспийского бассейна (Восточный Паратетис). Часть первая — тархан // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2001. Т. 9. № 5. С. 94–108 [*Goncharova I.A., Hondkarian S.O., Shcherba I.G.* Tarkhanian-Karaganian stage of development of the Euxino-Caspian basin (Eastern Paratethys). Part one — tarkhanian // Stratigraphy Geology Correlation. 2001. V. 9. №. 5. P. 94–108 (in Russian)].
- Жижченко Б.П.* Нижний и средний миоцен // Стратиграфия СССР. Т. XII. Неоген СССР. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1940. С. 11–227 [*Zhizhchenko B.P.* Lower and Middle Miocene // Stratigraphy of the USSR. V. XII. Neogene USSR. M.-L.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. 1940. P. 11–227 (in Russian)].
- Мерклин Р.Л.* Пластинчатожаберные спириалисовых глин, их среда и жизнь // М.: Изд-во АН СССР, 1950. 95 с. [*Merklin R.L.* Lamellar gills of spiralis clays, their environment and life // M.: Publishing House SSSR Academy of Sciences. 1950. 95 p. (in Russian)].
- Невесская Л.А., Гончарова И.А., Ильина Л.Б. и др.* О стратиграфической шкале неогена Восточного Паратетиса // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2003. Т. 11. № 2. С. 3–26 [*Nevesskaya L.A., Goncharova I.A., Ilyina L.B. et al.* The Neogene stratigraphic scale of the Eastern Paratethys // Stratigraphy. Geological correlation. 2003. V. 11. № 2. P. 105–127].
- Невесская Л.А., Коваленко Е.И., Белуженко Е.В. и др.* Объяснительная записка к унифицированной региональной стратиграфической схеме неогеновых отложений Южных регионов Европейской части России. Москва. Палеонтологический институт РАН. 2004. 83 с. [*Nevesskaya L.A., Kovalenko E.I., Beluzhenko E.V. et al.* Explanatory note to the unified regional stratigraphic scheme of Neogene deposits of the southern regions of the European part of Russia. Moscow. Paleontological Institute of the Russian Academy of Sciences. 2004. 83 p. (in Russian)].
- Носовский М.Ф.* Эквиваленты хроностратиграфических ярусов неогена Средиземноморья в миоцене и плиоцене Керченского п-ова // Геология и разведка. 1998. № 5. С. 29–34 [*Nosovsky M.F.* Equivalents of the chronostratigraphic stages of the Neogene of the Mediterranean in the Miocene and Pliocene of the Kerch Peninsula // Geology and exploration. 1998. № 5. P. 29–34. (in Russian)].
- Ростовцева Ю.В.* Седиментогенез в бассейнах среднего и позднего миоцена Восточного Паратетиса (стратотипический Керченско-Таманский регион) // Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Москва. 2012. 330 с. [*Rostovtseva Yu.V.* Sedimentology of the Middle and Late Miocene basins of Eastern Paratethys (stratotype Kerch-Taman region) // Dissertation for the degree of doctor of geological and mineralogical sciences. 2012. 330 p. (in Russian)].
- Evans M.E., Heller F.* Environmental Magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetics. Academic Press. 2003. 299 p.
- Kodama K.P.* Paleomagnetism of sedimentary rocks: process and interpretation. Blackwell Publishing Ltd. 2012. 157 p.
- Mann S., Sparks N.H.C., Frankel R.B. et al.* Biomineralization of ferrimagnetic greigite (Fe₃S₄) and iron pyrite (FeS₂)

- in a magnetotactic bacterium // *Nature*. 1990. V. 3. Iss. 43. P. 258–261.
- Pilipenko O.V., Filina E.V., Rostovtseva Yu.V., Novruzov Z.* Petromagnetism and paleomagnetism of the Tarkhanian sediments in Kop-Takyl section (the Kerch Peninsula) // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020. V. 20. ES3003, <https://doi.org/10.2205/2020ES000712>
- Pilipenko O.V., Salnaya N.V., Rostovtseva Yu.V., Novruzov Z.* Rock-magnetic studies of the Tarkhanian sediments in Kop-Takyl section (the Kerch peninsula) // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2021. V. 21. ES2005. <https://doi.org/10.2205/2021ES000765>
- Robertts A.P., Chang L., Rowan C.J. et al.* Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe_3S_4): An update // *Reviews of Geophysics*. 2011. V. 49. Iss. 1. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010RG000336>
- Robertts A.P., Weaver R.* Multiple mechanisms of remagnetization involving sedimentary greigite (Fe_3S_4) // *Earth and Planetary Science Letters*. 2005. V. 231. Iss. 3–4. P. 263–277.
- Tarling D.H., Hrouda F.* The magnetic anisotropy of rocks. London, Glasgow, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: Chapman & Hall. 1993. 277 p.

FERRIMAGNETIC MINERALS AS POSSIBLE INDICATORS OF THE SEDIMENTATION ENVIRONMENTS OF THE EASTERN PARATETHYS TARKHANIAN DEPOSITS (KOP-TAKYL SECTION)

O.V. Pilipenko^{1,2}, Yu.V. Rostovtseva^{2,3}, N.V. Salnaya^{2,4}

¹*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

⁴*Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Received September 15, 2021; revised May 30, 2022; accepted June 27, 2022

The paper presents the results of studies of ferromagnetic minerals and their distribution in the Tarkhanian and transition Tarkhanian-Chokrakian deposits of the Kop-Takyl section (Kerch Peninsula, Eastern Paratethys). Magnetic minerals were identified by petromagnetism and scanning electron microscopy. The main ferrimagnetic mineral in the rocks of the upper part of the Argunian strata of Tarkhanian deposits and the Tarkhanian-Chokrakian deposits, which correspond to the regressive stage of the paleobasin under consideration, is magnetite (maghemite). In addition to magnetite (maghemite), the sediments of most of the Tarkhanian deposits, which were formed mainly during marine transgression, contain magnetic iron sulfides: monoclinic pyrrhotite (greigite). These minerals of the detrital and early diagenetic origin may be indicators of sedimentation conditions. The obtained data on the distribution of ferromagnetic minerals in the studied Tarkhanian and Tarkhanian-Chokrakian deposits are generally consistent with the sequence of changes in the sedimentation modes that existed in the past.

Keywords: Miocene, Tarkhanian regional stage, rock-magnetic characteristics, sedimentation environments.