

КОСМИЧЕСКОЕ ЖЕЛЕЗО В ОСАДКАХ МЕЛА–ДАНИЯ

© 2011 г. Д. М. Печерский¹, Д. К. Нурғалиев², В. А. Фомин³, З. В. Шаронова¹, Д. М. Пильманова²¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва;

E-mail: diatar1@front.ru

²Казанский государственный университет³Саратовский государственный университет

Поступила в редакцию 28.12.2009 г.

С помощью термомагнитного анализа до 800°C изучен состав и распределение частиц металлического железа в 8 разрезах осадков мела–дания Кавказа, Крыма и Копетдага. Обнаружено, что частицы железа присутствуют в 330 образцах из 571 изученных, содержание их от 10^{-5} до 0.05%, их распределение бимодальное. Зафиксировано обогащение частицами железа осадков сантона Кавказа и Кара–Калы, верхняя граница которого фиксируется резким спадом содержания железа около 84 Ма, она совпадает с верхней границей гиперхрона Джалал. Вариации точек Кюри железа от 680 до 780°C отражают колебания примеси никеля. Во всех изученных разрезах зафиксирован пик повышенного содержания железа с практически постоянной величиной примеси никеля 5%, т.е. это глобальный эффект. Глобальный характер распределения и состава частиц железа, очевидно, отражают их связь с космической пылью. В то же время частицы Ni–Fe сплава и чистого никеля встречаются очень редко, их концентрации не коррелируют с содержанием частиц железа. Видимо, их очень мало в космической пыли и, более вероятно, что частицы Ni–Fe сплава связаны, главным образом, с импактными событиями.

ВВЕДЕНИЕ

По данным многочисленных измерений в пылевых облаках, в атмосфере, в керне льда из Антарктиды и Гренландии, в океанских пелагических осадках обнаруживаются частицы космической пыли, содержащей частицы металлического железа и никеля. При этом данные об их распределении как по поверхности Земли, так и во времени, весьма ограничены, так как использовались лишь “прямые” методы фиксации таких частиц. Эти методы требуют большого объема материала, и по ним получаются осредненные данные. Обширную и оперативную информацию о распределении металлического железа можно получить по данным термомагнитного анализа (ТМА) осадков. ТМА широко применяется при палеомагнитных и петромагнитных исследованиях различных геологических объектов, в том числе осадков и осадочных пород разного геологического возраста. Главная цель таких измерений — оценка концентрации и состава основных носителей палеомагнитной записи, соответственно, температура ТМА, как правило, ограничивалась точкой Кюри гематита, т.е. максимум около 700°C. В результате информация о зернах металлического железа полностью исключалась.

При петромагнитных исследованиях осадков [Grachev et al., 2009; 2006a; Pechersky, 2008; Pechersky et al., 2008], чтобы проследить поведение металлического железа в пространстве и времени применен ТМА до 800°C. В отличие от “прямых” методов, где получаются осредненные данные, мы получаем сведения о содержании железа практически в точке, так

как величина пробы для ТМА не превышает 0.2 г. Повышение температурного интервала ТМА на 100°C дало возможность наблюдать детальную картину распределения частиц металлического железа в пространстве и времени.

Главный результат наших предыдущих исследований — обнаружение обогащения частицами железа осадков миоцена, синхронного в двух разрезах — Халац (Туркмения) и Квиринаки (Грузия), удаленных друг от друга более чем на 1500 км [Pechersky et al., 2008]. Т.е., это явление, вероятнее всего, глобальное и связано с космосом. Оно не зависит от местных условий осадконакопления, состава осадков, окислительно–восстановительной обстановки и др. Возраст этого явления 12.6–12.2 Ма.

При ТМА осадков на границе мела/палеогена, разрезы Гамс (Австрия), Тетрицкаро (Грузия), Ключи и Тепловка (Поволжье, Россия), Кошак (Туркмения) [Pechersky, 2008], выяснилось широкое распространение металлического железа в осадках в незначительных концентрациях, обычно ниже 0.001%. Кроме того обнаружена положительная корреляция между содержаниями парамагнитных и магнитных минералов земного происхождения, с одной стороны, и металлического железа, с другой стороны, что объясняется *переотложением* частиц космического железа. Наблюдаемая картина разной степени положительной корреляции между железом и перечисленными минералами отражает разную роль переотложения этих минералов.

Настоящая статья посвящена изучению распределения металлического железа в осадках, накопившихся во время двух принципиально различных



Рис. 1. Схема расположения изученных разрезов: 1 – Сельбухра, 2 – Верхоречье, 3 – Басс, 4 – Дженгутай, 5 – Аймаки, 6 – Гергебиль, 7 – Маджаллис, 8 – Кара-Кала.

состояний геомагнитного поля: а) устойчивое состояние без инверсий (гиперхрон Джалал, баррем–сантон, 125–84 Ма) и б) неустойчивый режим частых инверсий (суперхроны Туаркыр и Хорезм, кампанданий, 84–60 Ма). Это группа разрезов Кавказа, перекрывающих и дополняющих друг друга (рис. 1). Для оценки глобальности распределения металлического железа выполнен ТМА осадков в нескольких удаленных параллельных разрезах Копетдага (разрез Кара-Кала) и Крыма (Верхоречье, Сельбухра) (рис. 1). По возможности подбирались разрезы, в которых минимально количество видимых перерывов в осадконакоплении. Для учета роли переотложения в накоплении частиц космического железа обращалось внимание на связи содержаний железа с магнетитом, титаномагнетитом и с железосодержащими парамагнитными минералами, образование и накопление которых, в отличие от металлического железа, имеет земное происхождение.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Петромагнитные исследования включали измерение намагниченности образцов и ее зависимости от температуры, т.е. термомагнитный анализ (ТМА). ТМА проводился с помощью экспресс весов Кюри [Буров и др., 1986], который позволяет измерять величину индуктивной намагниченности при разных температурах со скоростью нагрева 100°С/мин. Для всех образцов получены термомагнитные кривые первого и второго нагревов до 800°С.

Известно, что в частицах космического железа основная примесь – это никель. Для оценки содержания примеси Ni в Fe–Ni сплаве можно использовать точки Кюри, полученные в результате ТМА. Перевод их в содержание примеси никеля позволит сопоставлять данные ТМА и результаты анализа состава металлических зерен микрозондом и др. Для этого примем, что зависимость точки Кюри соеди-

нения железа и никеля близка линейной. Тогда содержание никеля определится простой формулой:

$$Ni (\%) = 0.243(770 - T_c),$$

где 770 – точка Кюри железа, T_c – точка Кюри исследуемого образца.

Проверим, насколько реально такое допущение. Дело в том, что Fe–Ni сплавы, содержащие примесь никеля меньше 30%, при температурах близких к комнатной сохраняют упорядоченную объемно центрированную решетку (α -фаза). При более высоких содержаниях никеля и/или при повышении температуры α -фаза переходит в γ' -фазу с упорядоченной гранецентрированной решеткой и в γ -фазу с неупорядоченной гранецентрированной решеткой [Бозорт, 1956; Nagata et al., 1986; Диаграммы..., 1997]. У таких γ и γ' -сплавов по разным причинам точки Кюри существенно отклоняются от линейной зависимости состав– T_c в сторону “занижения” (чаще) или “завышения” (реже) (табл. 1). Появляются кажущиеся “точки Кюри” – результат перехода α -фазы в γ -фазу при нагреве образца и $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода при его охлаждении. Сказанное относится главным образом, к Fe–Ni сплавам промежуточного состава, содержащим никель более 20% и менее 80%. Для них характерны заметные расхождения в оценке содержания никеля по линейной зависимости T_c –Ni (табл. 1).

В нашем случае важнее не разбираться в природе таких отклонений, а в возможности оценки по точке Кюри содержания никеля в природных частицах Fe–Ni сплавов. Возникают два вопроса: 1) насколько применима оценка содержания примеси никеля по линейной зависимости T_c –Ni к природным метеоритам, содержащим Fe–Ni сплавы промежуточного состава, и 2) насколько широко распространены в космической пыли частицы Fe–Ni сплавов промежуточного состава.

Для ответа на первый вопрос воспользуемся данными из статей [Nagata, Funaki, 1987; Nagata et al.,

Таблица 1. Сравнение составов искусственных Ni-Fe сплавов с оценками по TMA

Марка сплава	Состав сплава (вес. %)	T_c , °C	Ni (%) по TMA
Vacaperm	Ni100	400	90
сгуоерm	Ni90Fe10	430	83
M7904	Ni80, Mo5, Fe15	443	80
Ni80	Ni80Fe20	560	51
Supermuniperm	Ni80Mn5Fe15	410	87
Perm77	Ni77, Mo4, Cu4.4, Fe14	410	87
M75	Ni75, Cr2, Cu5, Fe18	438	81
Ni60	Ni60Fe40	600	41
Carpenter	Ni55Fe45	530	58
AlloyNi50	Ni52Fe48	530	58
AlloyNi50	Ni50Fe50	500	66
Ni50	Ni50Fe50	530	58
M50	Ni48, Fe52	471	73
Nifemax	Ni48Fe52	470	73
Ni40	Ni40Fe60	356	100
Normaperm	Ni36Fe64	240	?
Invar	Ni36Fe64	230	?
Invar	Ni36Fe64	375	96
Invar film standard (1)	Ni36Fe64	250	?
Invar film after stress (2)	Ni36Fe64	400	90
Superinvar	Ni32Co5Fe63	279	?
AlloyNi30	Ni30Fe70	610	39

Таблица 2. Сравнение содержаний никеля и железа в метеоритах по данным микрозонда и TMA

метеорит	NiFe	T_c1 (%)	T_c2 (%)	T_c3 (%)	NiFe TMA
St. Catharina	50/50	565			50/50
Twin City	50/50	560			51/49
Toluca (γ -ламель)	50/50	580			46/54
Itutinga (γ -ламель)	50/50	565			50/50
St. Severin	50/50	565			50/50
Appley Bridge	50/50	565			50/50
Yamato74354	16/84	543(15) 55Ni \times 0.15	750(85) 5 \times 0.85		13/87
Yamato74362	14/86	545(17) 55Ni \times 0.17	740(83) 7		15/85
Yamato74442	28/72	365(7) 98Ni \times 0.07	555(21) 52Ni \times 0.21	756(72) 3.4Ni \times 0.72	21/79
Yamato790964	66/34	560(50) 51Ni \times 0.5	610(50) 39Ni \times 0.5		45/55
Yamato790448	40/60	575(80) 47Ni	770(20)		47/53
ALH76009	13/87	570(20) 49 \times 0.2	765(80) 1.2Ni \times 0.8		11/89
San-Cristobal	26/74	565			50/50
Lime Creek	30/70				41/59

Примечание: NiFe – содержание никеля и железа в металлической части метеорита (вес. %) по данным микрозондового анализа; T_c – точка Кюри (в скобках доля магнитной фазы в величине намагниченности, определенная по кривой TMA, %); NiFe TMA – суммарное содержание никеля и железа по линейной зависимости T_c -Ni, вес. %.

1987], где подобраны образцы металлических метеоритов и включения металла в каменные метеориты, по которым имеются микрозондовые данные о составе и результаты TMA (табл. 2). Расхождения меж-

ду микрозондовыми данными и TMA чаще сравнительно небольшие. Следовательно, в первом приближении допустимо использование линейной зависимости T_c -Ni для определения содержания

никеля по точкам Кюри. Тем более, в интересующих нас частицах металлического железа из осадков Fe-Ni сплавов промежуточные составы очень редки. Для этого рассмотрим имеющиеся в публикациях данные о составе металлических частиц в космической пыли во льдах Антарктики и Гренландии, в глубоководных осадках океана, плейстоценовых осадках Канады, эоценовых известняках Туамоту, в осадках из района Тунгусской катастрофы и из осадков на границе мезозоя и кайнозоя К/Т разреза Тамс [Brownlee, 1987; Grachev et al., 2009; Parkin, 1964; Shima, Yabuki, 1988]. Из 84 собранных данных на долю частиц, содержащих никель до 20%, приходится 45% определений, на долю частиц, содержащих никель более 80% — 46%, а на долю промежуточных составов 20% и меньше 80% только около 10%. Следовательно, для подавляющего большинства частиц вполне применима оценка содержания никеля по линейной зависимости T_c -Ni.

Другая трудность состоит в том, что между 360°C и 680°C обнаружить Fe-Ni сплав по ТМА очень трудно на фоне вклада в намагниченность минералов группы магнетита и гематита, так как точки Кюри гемоильменитового и титаномагнетитового ряда в этой области температур перекрываются с точками Кюри Fe-Ni сплавов. Для оценки составов Fe-Ni сплавов были выбраны образцы с точками Кюри в области 360–660°C, в которых при втором нагреве повторялись эти точки Кюри, и вклад этих магнитных фаз в величину намагниченности практически не менялся (рис. 2). Это условие позволяет предположить, что такие образцы содержат частицы никеля и его сплава с железом от 100% ($T_c = 360^\circ\text{C}$) до 27% ($T_c = 660^\circ\text{C}$), так как попадающие в этот интервал магнитные минералы (пирротины, титаномагнетиты, гемоильмениты) неустойчивы и при нагреве до 800°C окисляются, уничтожаются и/или гомогенизируются, в результате чего заметно меняется их точка Кюри и величина вклада в намагниченность образца.

Относительная точность определения вклада намагниченности данного магнитного минерала в величину намагниченности образца не лучше 10%, соответственно, не выше и точность определения концентрации частиц железа и сплава. Это нас вполне устраивает, так как содержания частиц железа в изученных образцах варьируют от $10^{-5}\%$ и меньше (не обнаруживаются при ТМА) до $10^{-2}\%$ и больше. Точность определения точки Кюри составляет примерно 5–10°C, чему соответствует точность определения содержания никеля в сплаве 1–2%, т.е. можно принять, что ошибка каждого определения не более 2%. Недостатки в применении линейной зависимости T_c -Ni и точности ТМА компенсируются простотой приготовления проб и их ТМА, быстротой и массой получаемых данных.

Для оценки концентрации в образцах магнетита, титаномагнетита, железа, Fe-Ni сплава по кривой

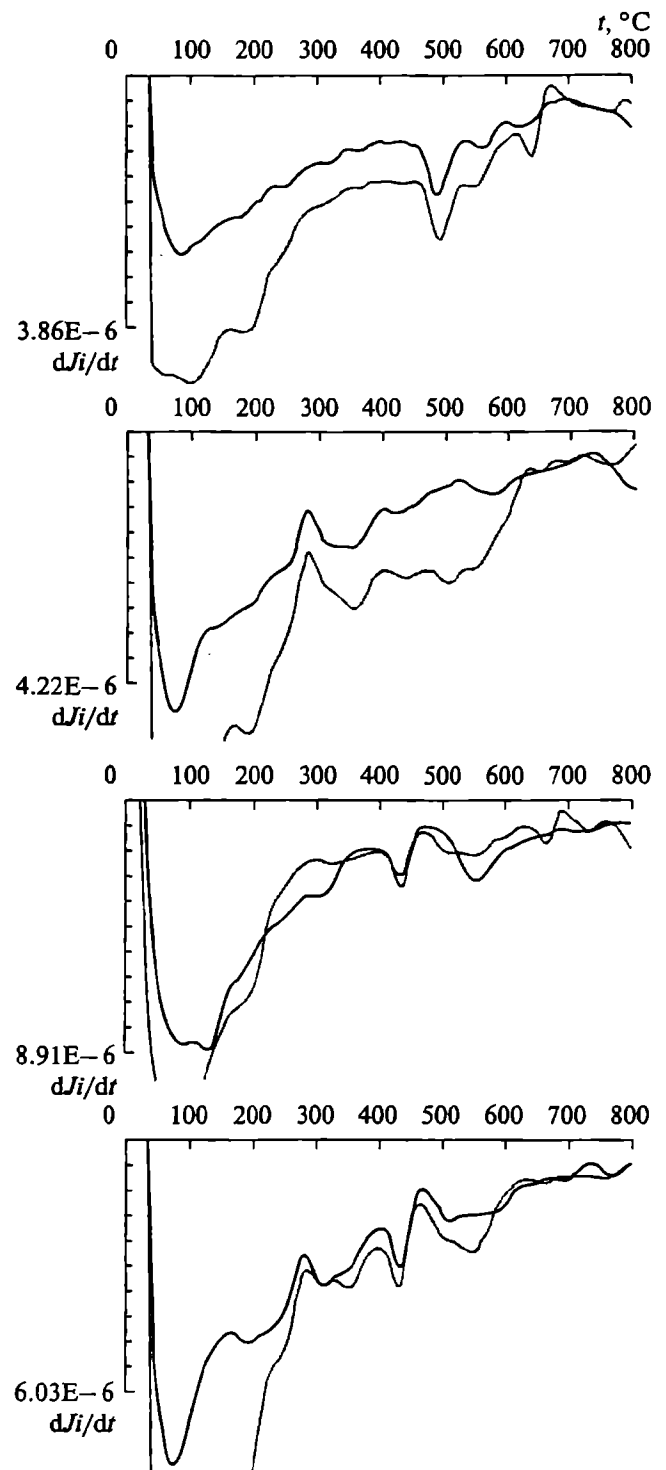


Рис. 2. Примеры кривых ДТМА, в которых присутствует магнитная фаза, отнесенная к Fe-Ni сплаву: (а) — образец 2029-100 (Басс, $T_c = 500^\circ\text{C}$); (б) — образец 2029-110 (Басс, $T_c = 365^\circ\text{C}$); (в) — образец 2035-7 (Аймаки, $T_c = 445^\circ\text{C}$); (г) — образец 2562-4 (Сельбухра, $T_c = 440^\circ\text{C}$). Жирная кривая — первый нагрев, тонкая кривая — второй нагрев.

$M_i(T)$ определялся вклад в величину M_i данного магнитного минерала, и эта величина делилась на удельную намагниченность насыщения этого минерала. Принимались следующие величины M_s : для магнетита и титаномагнетита, учитывая вариации их точек Кюри от 550 до 580°C, ~90 Ам²/кг, для железа, учитывая вариации его точки Кюри от 700 до 780°C, ~200 Ам²/кг. Для оценки концентрации железа и никеля в Fe-Ni сплаве принята линейная зависимость намагниченности насыщения между никелем ($M_s = 56.7$ Ам²/кг) и железом ($M_s = 212$ Ам²/кг):

$$M_s(\text{Fe-Ni сплава}) = 56.7 + 0.37(T_c - 360).$$

По данным магнитных измерений определена парамагнитная намагниченность образцов: $M_p = 1.378(M_{20} - M_{800})$, где M_p — парамагнитная намагниченность в поле 500 мТ при комнатной температуре; M_{20} и M_{800} — намагниченность образцов, измеренная в поле 500 мТ при температурах 20 и 800°C соответственно. В случае гиперболической формы кривой ТМА, когда доля магнитных минералов в величине M_{20} мала, она представляет собой парамагнитную + диамагнитную намагниченность M_d (диамагнитная намагниченность практически не зависит от температуры). В случае параболической формы кривой ТМА M_p определяется как $0.274 M_p = M_{800}$. Множитель 0.274 — это отношение температур 295°K/1075°K (закон Кюри–Вейса). Фактически величина парамагнитной намагниченности определяется суммой парамагнитных железосодержащих минералов.

В образцах исследуемых коллекций при нагреве нередко отмечается пик ТМА выше 500°C (максимум на 510–530°C). После пика спад кривой $M_i(T)$ завершается в точке Кюри 590–595°C, т.е. это катион-дефицитный магнетит, возникающий в ходе лабораторного нагрева. Появление магнетита при нагреве выше 500°C может служить диагностическим признаком сульфидов — пирита, арсенопирита. [Novakova, Gendler, 1995]. По высоте пика можно примерно судить о нижнем пределе концентрации сульфидов типа пирита. Будем в дальнейшем называть его “пиритом” из-за отсутствия более точной диагностики.

Последовательности отложений всех разрезов переведены на время для удобства их сопоставления следующим образом: принималось, что в интервале мощности каждого стратиграфического яруса осадконакопление шло равномерно с постоянной скоростью. Соответственно, эта скорость определялась делением времени (продолжительности) данного яруса на его мощность, и затем для каждой точки отбора образца определялся его возраст умножением расстояния (мощности) до границы яруса на скорость осадконакопления. Возраст ярусов взят из шкалы геологического времени-2008 [Gradstein et al., 2008].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ РАЗРЕЗОВ

КАВКАЗ. Верхнемеловые отложения Известнякового Дагестана протягиваются в виде непрерывной полосы по всей территории Предкавказья. Здесь изучены разрезы: Аймаки, Дженгутай, Маджалис, Басс, Гергебиль, (рис. 1). Подробное описание разрезов приводится в работах [Верхний мел..., 1986; Пергамент, 1978; Ренгартен, 1975 и др.]. Ниже дается краткое описание сводного разреза по Известняковому Дагестану.

Сеноманский ярус представлен чередующимися пластами серых известняков и зелено-серых мергелей общей мощностью до 90 м. Нижний турон представлен чередованием черных, зелено-серых и белых известняков и мергелей (мощность 37–42 м). Верхнетуронский подъярус сложен зелено-серыми, розовыми и красно-бурыми мергелями и известняками. Мощность верхнетуронской части толщи до 54 м. Коньякский ярус литологически однотипен с верхним туроном. Мощность до 110 м. Сантонский ярус представлен серыми известняками и мергелями, мощностью до 80 м. Кампанский ярус сложен белыми слоистыми известняками и светло-серыми глинистыми известняками. Мощность 200–460 м. Маастрихтский ярус представлен серыми глинистыми известняками. Мощность 120–400 м. Датский ярус согласно залегает на отложениях маастрихтского яруса и сложен глинистыми известняками с прослоями мергеля. Мощность около 170 м. В основании яруса прослеживается известняковая оползневая галька.

Аймаки. У селений Аймаки и Охли (Дагестан) (рис. 1) в серии обнажений вскрыт почти непрерывный разрез осадков от сеномана до датского яруса общей мощностью 1015 м. Зафиксированы перерывы на границе маастрихта/дания и на границе нижнего и верхнего турона. Представлены отложения исключительно карбонатными породами с примесью глинистого материала — известняками и мергелями.

Для нас наиболее интересно рассмотреть распределение в разрезе металлического железа (рис. 3а, 3е, 3ж). В 60 образцах из 112 присутствует железо, содержание которого превышает 10⁻⁵% (рис. 3а), достигая 0.0085%. Точка Кюри варьирует от 700 до 780°C и в среднем равна 755°C (рис. 3ж). Соответственно, примесь никеля достигает 17% и в среднем составляет около 4%. Лишь в одном образце обнаружена магнитная фаза с признаками Fe-Ni сплава (табл. 3).

Распределение по разрезу железа неравномерно. Наиболее высокое его содержание 0.0085% отмечено в позднем сеномане, в узком интервале 890–877 м (рис. 3а), что соответствует времени 95–95.7 Ма (рис. 3е). Выше по разрезу выделяется интервал 710–635 м (87–84.6 Ма) (рис. 3а, 3е) повышенного содержания железа 0.3–0.8 × 10⁻³%, и его спад при-

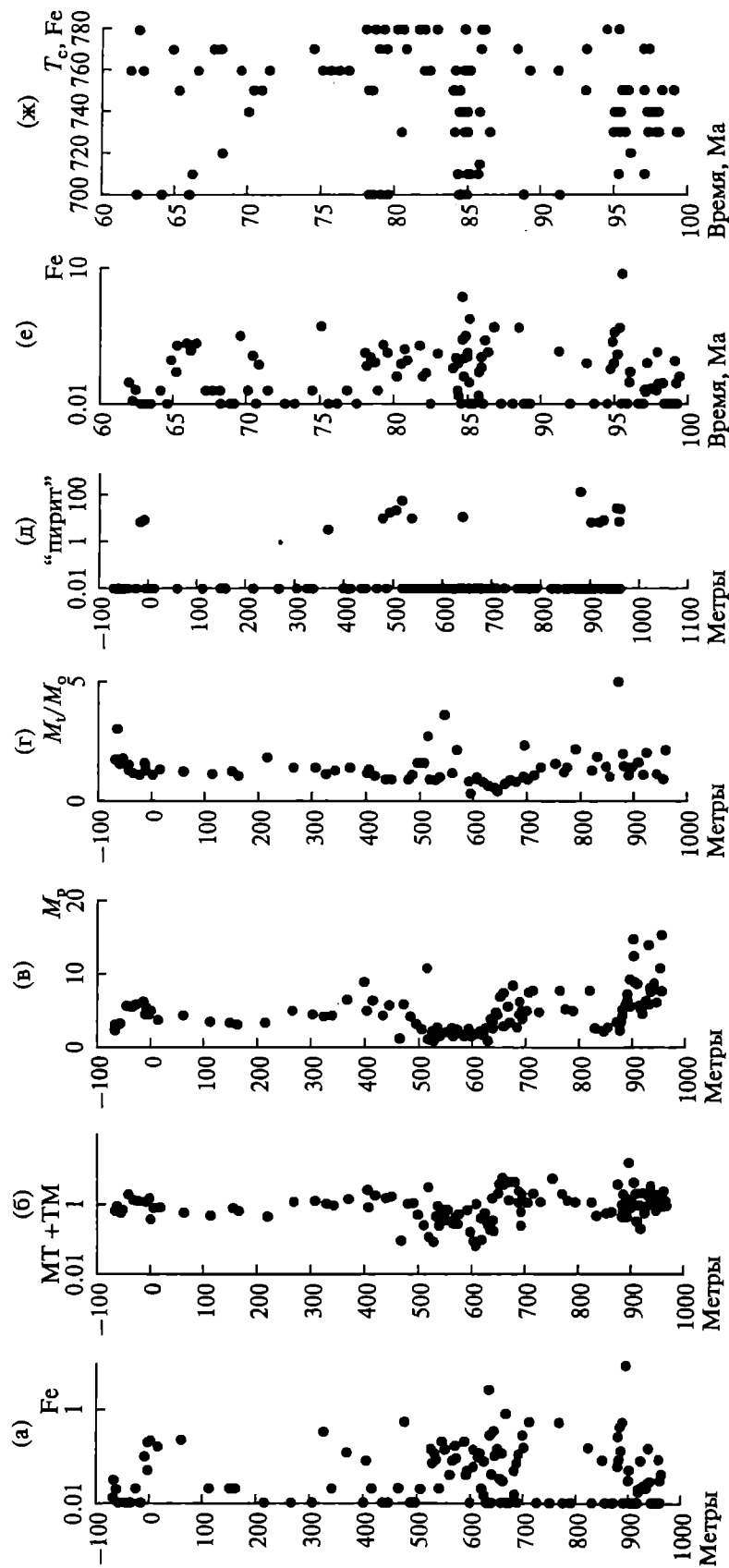


Рис. 3. Распределение в колонке Аймаки содержания железа, 10⁻³% — (а); магнетита + титаномагнетита, 10⁻³% — (б); парамагнитной намагниченности M_p, 10⁻³ Ам²/кг — (в); отношения величины намагниченности после нагрева образца до 800°С к ее исходной величине — (г); высоты пика ТМА при 510–530°С (процент относительно величины исходной намагниченности образца), отражающей образование магнетита при окислении "пирита" в результате нагрева образца — (д); распределение во времени содержания железа — (е) и точек Кюри железа — (ж).

Таблица 3. Данные о Ni-Fe сплаве

разрез	образец	T_c	%Ni	NiFe	Fe	MT	Ma	N	N(Fe)	N(NiFe)
Аймаки	2035-7	450	78.5	0.11	0.09	1	99.06	112	60	1
Басс	2029-110	370	97	0.1	0	0.4	62.78	104	57	2
	2029-100	500	66.6	0.08	0.01	0.3	64.96			
Гергебиль	2038-206	460	76.2	0.12	0	0.9	110.13	44	36	4
	83	380	93	0.4	0	2	123.8			
	31	455	77.4	0.3	0	24.5	127.36			
	6	360	100	0.35	0	23.2	129.43			
Маджалис	2061-48	440	81	0.02	0	0.7	86.1	57	39	2
	37	365	98	0.05	0	0.3	87.2			
Дженгутай	2057-78	445	79.7	0.04	0.8	1.28	84.4	13	8	2
	19	455	77.4	0.03	0.03	1.3	89.5			
Кара-Кала	2048-128	455	77.4	0.13	0.04	6.3	69.72	181	98	3
	138	450	78.5	0.05	0.03	2	70.64			
	175	440	81	0.01	0.01	8.6	74.5			
Сельбухра	2562-4	440	81	0.1	0.14	0.8	99.02	36	27	2
	2562-7	440	81	0.07	0.12	0.75	98.44			

Примечание: T_c – точка Кюри частиц Ni-Fe сплава; %Ni – содержание никеля в сплаве, определенное по точке Кюри; NiFe – содержание частиц Ni-Fe сплава в образце, $10^{-3}\%$; Fe – содержание железа в том же образце, $10^{-3}\%$; MT – содержание магнетита и титаномагнетита в том же образце, $10^{-3}\%$; Ma – возраст осадка в месте отбора образца, млн. лет; N – общее число измеренных ТМА образцов в данном разрезе; N(Fe) – число образцов, в которых обнаружено железо; N(NiFe) – число образцов, в которых обнаружен Ni-Fe сплав.

ходится, примерно, на верхнюю границу гиперхрона на Джалал.

Очевидно, доле глинистого материала следует содержание парамагнитных минералов, что выражается в вариациях величины парамагнитной намагниченности (рис. 3в). Повсеместно присутствует магнетит, его $T_c = 560\text{--}640^\circ\text{C}$, чаще $T_c \geq 600^\circ\text{C}$, что говорит об однофазном окислении магнетита. Реже присутствует титаномагнетит, его $T_c = 510\text{--}550^\circ\text{C}$, в частности, такие точки Кюри появляются после нагрева образца до 800°C , очевидно, в результате частичной гомогенизации гетерофазно окисленных зерен титаномагнетита. Концентрации магнетита (+титаномагнетита) варьируют от 10^{-4} до $10^{-2}\%$ (рис. 3б) и заметно коррелируют с M_p (рис. 3в), коэффициент линейной корреляции 0.662 (табл. 4). Это говорит о совместном накоплении глинистого материала и магнетита. Во всех образцах отмечаются магнитные фазы с $T_c = 70\text{--}140^\circ\text{C}$, $190\text{--}250$, реже $310\text{--}340$ и $410\text{--}460^\circ\text{C}$. Судя по тому, что в большинстве случаев эти фазы сохраняются после нагрева до 800°C (по крайней мере, частично), это именно точки Кюри и они, скорее всего, соответствуют различным феррошпинелям и гемоильменитам [Grachev et al., 2009].

Спад содержания железа, приходящийся на верхнюю границу гиперхрона Джалал, коррелирует со спадом магнетита и парамагнитных минералов, что мы связываем с переотложением железа совместно с другими минералами земного происхождения [Pechersky, 2008]. Еще один интервал между 60 и 10 м (66.6–65.2 Ma) повышенного содержания железа со спадом, приходящимся на границу маастрихта и дания, в отличие от предыдущего спада не отмечается в поведении M_p .

На ряде уровней разреза, особенно в интервалах мощности 475–545 м и 900–950 м, отмечен пиком на кривой ТМА выше 500°C “пирит” (рис. 3д). Появление “пирита” не коррелирует с содержаниями железа, магнетита, парамагнитных минералов (табл. 4), что подчеркивает более вероятную его аутигенную природу, более позднюю по отношению ко времени накопления осадка. Весьма сомнительно, чтобы зерна пирита сохранились в процессе накопления осадка. После нагрева образцов до 800°C величина намагниченности или близка к единице или возрастает. Отчасти последнее связано с присутствием “пирита”, окисление которого в ходе нагрева приводит к образованию магнетита и, соответственно, росту намагниченности (рис. 3г). В других случаях рост

Таблица 4. Коэффициенты линейной корреляции

г	Аймаки	Басс	Дженгутай	Маджалис	Гергебиль	Кара-Кала	Верхоречье	Сельбухра
M_p -MT	0.37	0.952	0.372	0.229	0.442	0.622	-0.347	0.377
$\lg M_p - \lg MT$	0.4	0.725	0.367	0.465	0.548	0.635	0.028	0.507
M_p -Fe	0.083	-0.101	0.482?	0.265	0.209	0.354	-0.157	0.409
$\lg M_p - \lg Fe$	-0.024	0.304	0.268?	0.322	0.172	0.326	0.05	0.436
MT-Fe		-0.077	0.516?	0.012	-0.041	0.355	-0.319	0.737
$\lg Fe - \lg MT$	0.147	0.18	0.174?	-0.094	0.108	0.272	-0.611	0.616
пик- M_p		0.433				0.049		
пик-MT		0.331				0.186		
пик-Fe		-0.097				0.029		

Примечание: M_p – парамагнитная намагниченность в поле 500 мТ; MT – содержание магнетита и титаномагнетита; Fe – содержание металлического железа; пик – высота пика на кривой ТМА, отражающая превращение “пирита” в магнетит в ходе лабораторного нагрева образца.

намагниченности, скорее всего, связан с гомогенизацией гомоильменита [Grachev et al., 2009].

Дженгутай. Примерно в 15 км к северу от разреза Аймаки (рис. 1), вдоль шоссе, пересекающего Чабанский хребет, на пути от селения Верхний Дженгутай на юг к селению Левашаи обнажаются карбонатные отложения от верхнего турона (выше перерыва) до сантона, повторяя интервал разреза Аймаки. Мощность отложений 100 м, по сравнению с Аймаки она заметно сокращена, где на интервал верхнего турона-сантона приходится 250 м.

Железо обнаружено в 8 образцах из 13. Четко выделяется интервал мощности 7–18 м (рис. 4а) или 84.4–85.6 Ма (рис. 4д), в котором содержание железа достигает $0.45 \times 10^{-3}\%$. Точки Кюри железа варьируют от 700 до 780°C, средняя $T_c = 735^\circ\text{C}$, что соответствует содержанию примеси никеля – до 17% и в среднем 8.5%. Магнитные фазы с признаками Fe-Ni сплава обнаружены в двух образцах (табл. 3). Уровень 84.4–85.6 Ма практически повторяет уровень обогащения железом в разрезе Аймаки. Можно говорить о региональном обогащении железом. Очень важно подчеркнуть это обстоятельство, так как этот уровень соответствует примерно верхней границе гиперхрона Джалал.

Повсеместно в разрезе присутствуют магнитные фазы с $T_c = 80$ –110, 200–270, 410–460°C. Вероятнее всего, это феррошпинели, гомоильмениты, точки Кюри 410–460°C соответствуют, скорее всего, Ni-Fe сплаву, но не титаномагнетиту, который при нагреве

до 800°C окисляется до магнетита. Во всех образцах магнетит с $T_c = 580^\circ\text{C}$ отсутствует, а присутствует катион-дефицитный магнетит с $T_c = 610$ –640°C, после нагрева частично восстанавливающийся до магнетита с $T_c = 560$ –575°C. Это говорит о высокоокислительной обстановке в осадках разреза, приведшей, в частности, к низкотемпературному окислению магнетита.

Корреляция между содержанием железа и магнетита практически отсутствует ($r = 0.174$, табл. 4), значит можно говорить о первичном накоплении железа, а не переотложении его. В разрезе Дженгутай не обнаружен “пирит”, что отличает его от разреза Аймаки.

Маджалис. В 66 км к юго-востоку от разреза Аймаки (рис. 1) в обрывах реки Уллу-чай в окрестности селения Маджалис находится разрез известняков, повторяющий разрез Дженгутай, от перерыва в основании верхнего турона до верхов сантона, практически той же мощности, 120 м.

Железо обнаружено в 39 образцах из 57 измеренных. При этом распределение его в двух разрезах заметно различается (рис. 4, рис. 5). Содержание железа широко варьирует от менее 10^{-5} до $10^{-3}\%$, наиболее высокие содержания до $0.6 \times 10^{-3}\%$ отмечаются в интервале мощности 81–114 м (рис. 5а) или 87.8–90.8 Ма (рис. 5д). Точки Кюри железа варьируют от 690 до 780°C (рис. 5е), средняя $T_c = 735^\circ\text{C}$, что соответствует содержанию примеси никеля – до 19% и в среднем около 9%. Признаки Fe-Ni сплава обнаружены в двух образцах (табл. 3).

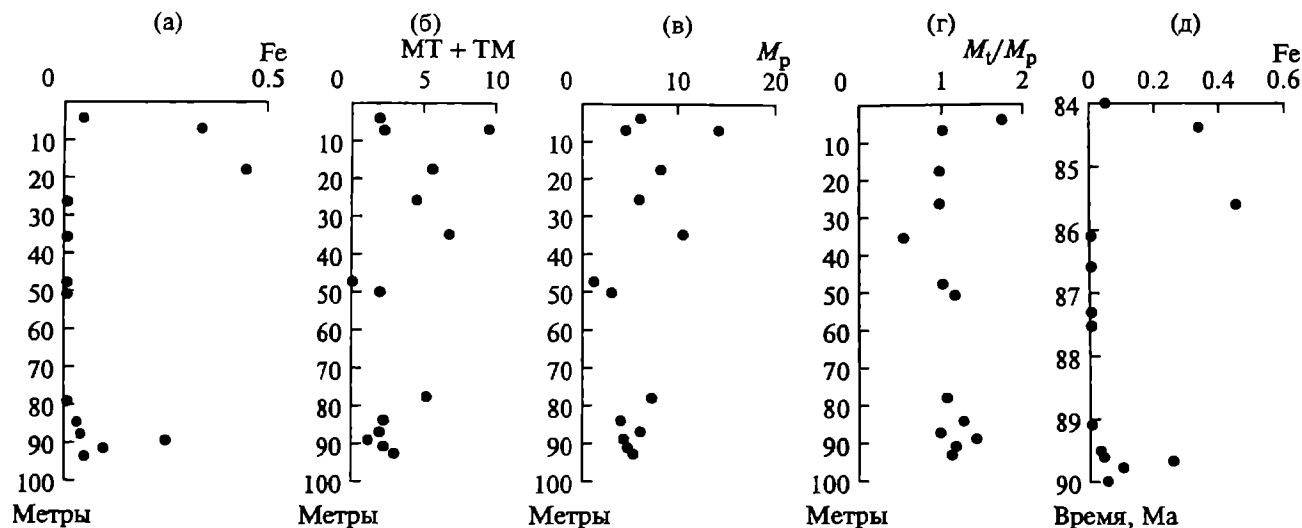


Рис. 4. Распределение в колонке Дженгутай содержаний железа, $10^{-3}\%$ – (а); магнетита + титаномагнетита, $10^{-3}\%$ – (б); парамагнитной намагниченности M_p , $10^{-3} \text{ Ам}^2/\text{кг}$ – (в); отношения величины намагниченности после нагрева образца до 800°C к ее исходной величине – (г); распределение железа во времени – (д).

Верхняя граница гиперхрона Джалал в разрезе Маджалис выражена слабо: в интервале 84.6–84.5 содержание железа повышается до $0.2 \times 10^{-3}\%$ (рис. 5).

Присутствует как неокисленный, так и катион-дефицитный магнетит, что видно по вариациям его точки Кюри от 560 до 660°C , есть и титаномагнетит, его $T_c = 490\text{--}550^\circ\text{C}$, и она уменьшается после нагрева, отражая частичную гомогенизацию распавшихся зерен титаномагнетита. Концентрации магнетита (+титаномагнетита), подобно Аймаки, варьируют от 10^{-4} до $10^{-2}\%$ (рис. 5б) и заметно коррелируют с M_p (рис. 5в). В отличие от Аймаки и Дженгутая, в данном разрезе снизу вверх четко прослеживается плавный спад содержаний магнетита, парамагнитных минералов, с которым согласуется плавный спад отношения величины намагниченности до и после нагрева M_i/M_0 (рис. 5). Повсеместно в разрезе присутствуют магнитные фазы с $T_c = 80\text{--}110$, $200\text{--}270$, $410\text{--}460^\circ\text{C}$. Вероятнее всего, это феррошпинели, гемильмениты и, возможно, Fe-Ni сплав. Как и в разрезе Аймаки, здесь присутствует “пирит”, на уровнях 4 м (83.66 Ма), 35.5 м (85.4 Ма) и 40 м (85.53 Ма). Корреляция содержания железа с земными минералами практически отсутствует (табл. 4).

Гергебиль. Менее чем в 5 км к юго-западу от Аймаки, у селения Гергебиль (рис. 1) находится разрез, нарастающий снизу разрез Аймаки от альба до баррема, Стратиграфическое расчленение разреза дается по Ю.П. Смирнову [Меловые отложения..., 1980]. В разрезе выделяются снизу вверх 3 пачки: 1. Алевролитно-глинистая пачка сложена сероцветными алевролитами, глинами, мелкозернистыми

песчаниками с многочисленными прослоями алевролитов-ракушняков в нижней части пачки. В верхней части пачки прослеживаются несколько выдержанных горизонтов конкреций размером $0.3\text{--}0.5$ м. Мощность пачки – 260 м. 2. Алевролитовая пачка представлена чередованием серых глинистых алевролитов и известковистых глин с многочисленными горизонтами конкреций различных размеров ($0.3\text{--}3$ м). Видимая мощность пачки – 275 м. Далее следует перерыв в обнаженности 8 м. 3. Мергельно-глинистая пачка образована тонким переслаиванием светлых мергелей и темно-серых глин. Нижняя часть пачки 1 мощностью 181 м относится к баррему. Средняя часть пачки 1, мощностью около 40 м, ограниченная снизу фосфоритовым горизонтом, а сверху горизонтом конкреций, относится к нижнему апту. Верхняя часть пачки 1 (39 м), и подавляющая часть пачки 2 (195 м) относятся к среднему апту. Верхняя часть пачки 2 отвечает верхнему апту. Контакт среднего и верхнего апта скрыт в перерыве обнаженности. Видимая мощность верхнего апта составляет 78 м. Альбский ярус представлен нижней частью пачки 3 видимой мощностью 96 м.

Железо в отложениях баррема–альба обнаружено ТМА в 36 образцах из 44, его содержание колеблется от менее 10^{-5} до 0.003% (рис. 6а). Точки Кюри железа варьируют от 710 до 780°C (рис. 6б), средняя $T_c = 740^\circ\text{C}$, что соответствует содержанию никеля – до 15% и в среднем 7.5%. В 4 образцах обнаружены признаки Fe-Ni сплава (табл. 3).

Можно выделить интервалы, где относительное обогащение железом превышает 0.001% : $690\text{--}687$ м ($128.1\text{--}128$ Ма), $410\text{--}338$ м ($118.7\text{--}116.1$ Ма), 208--

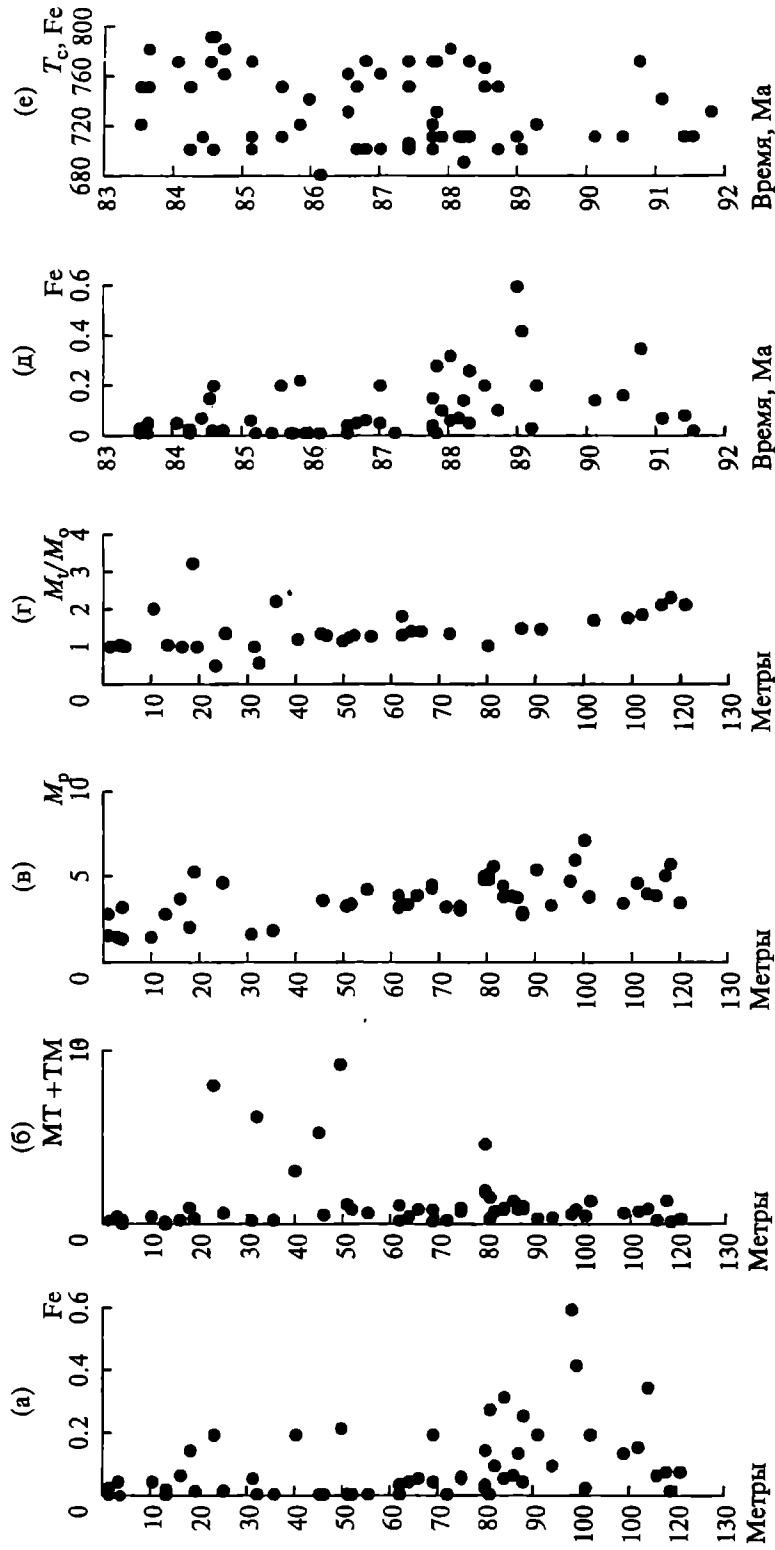


Рис. 5. Распределение в колонке Маджалис содержания железа, 10⁻³% – (а); магнетита + титаномагнетита, 10⁻³% – (б); парамагнитной намагниченности M_p, 10⁻³ Ам²/кг – (в); отклонения величины намагниченности после нагрева образца до 800°С к ее исходной величине – (г); распределение во времени содержащий железо – (д) и точек Кюри железа – (е).

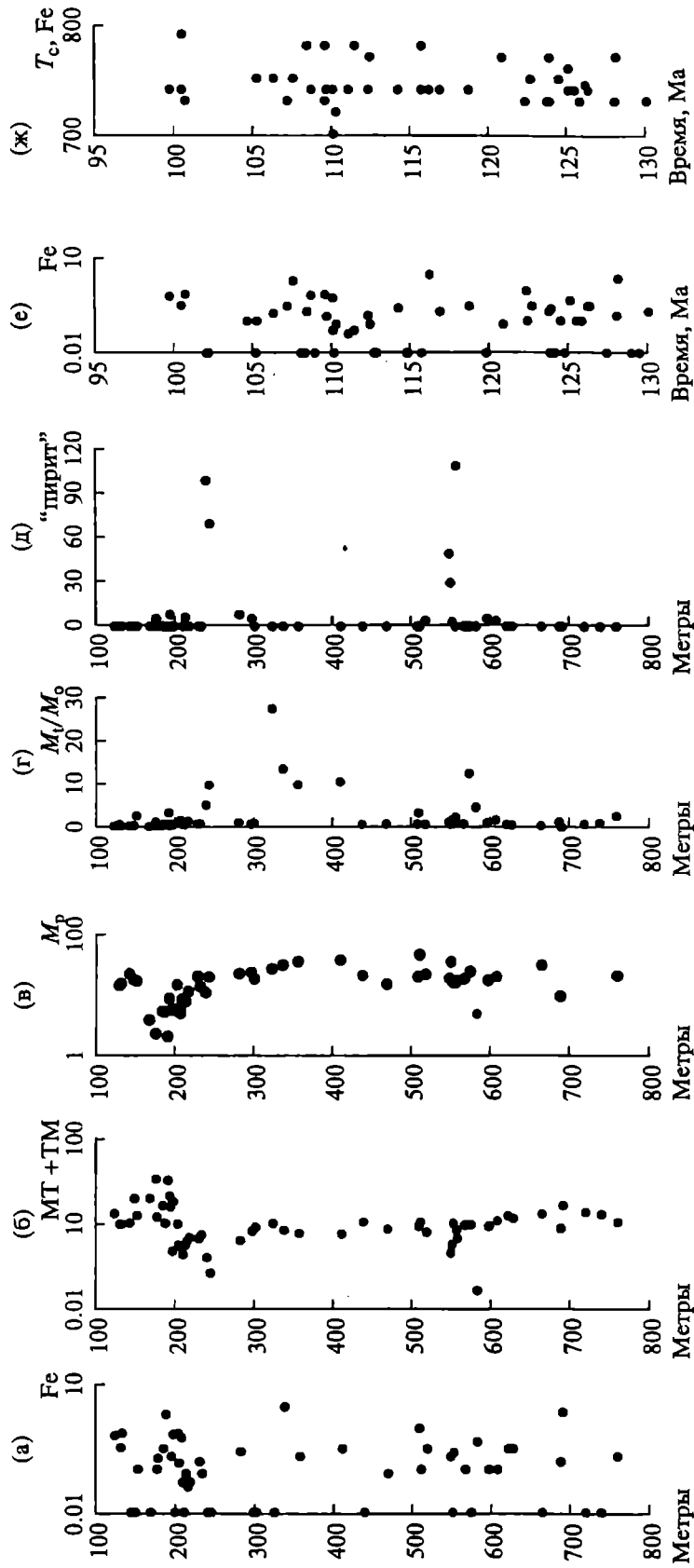


Рис. 6. Распределение в колонке Пертебиль содержания железа, $10^{-3}\%$ – (а); магнетита + титаномагнетита, $10^{-3}\%$ – (б); парамагнитной намагниченности M_r , $10^{-3} \text{ Ам}^2/\text{кг}$ – (в); отношения величины намагниченности после нагрева образца до 800°C к ее исходной величине – (г); высоты пика TMA при $510\text{--}530^\circ\text{C}$ (процент относительно величины исходной намагниченности образца), отражающей образование магнетита при окислении "пирита" в результате нагрева образца – (д); распределение во времени содержания железа – (е) и точек Кюри железа – (ж).

184 м (110.06–107.17 Ма) и 132–123 м (100.7–99.7 Ма) (рис. 6а, 6е). Эти интервалы не согласуются ни со стратиграфическими, ни с литологическими границами. Нижняя граница гиперхрона Джалал (~125 Ма) не отмечается, возможно, некоторый спад на уровне 122 Ма относится к ней (рис. 6е).

Распределение парамагнитных минералов (M_p) подчиняется литологическому контролю: снизу до –450 м мощности (уровень ~117 Ма) песчано-глинистый разрез характеризуется повышенной переменной M_p , выше которого идет плавный спад величины M_p , очевидно с ростом доли глинистого материала вплоть до появления мергелей, в верхней части последних (верхний альб) M_p возрастает (рис. 6в). В пределах баррема–апта идет плавный спад содержания магнетита (+титаномагнетит) примерно от 0.05–0.02% до 0.001%, повторяя в определенной мере поведение M_p , тогда как в альбских мергелях содержание магнетита резко повышается до более 0.1% (рис. 6б). Это отличает альбские мергели от верхнемеловых, в которых заметно меньше магнетита (рис. 3б, рис. 4б, рис. 5б и рис. 6б). Примерно в половине измеренных образцов фиксируется магнетит с $T_c = 560–580^\circ\text{C}$ и в половине – катион-дефицитный магнетит с $T_c > 600^\circ\text{C}$, в 12 образцах присутствует и титаномагнетит с $T_c = 480–550^\circ\text{C}$, часто отмечается гематит. Подобно верхнемеловым отложениям в осадках Гергебиля повсеместно присутствуют магнитные фазы с T_c от 80 до 450°C . На разных уровнях разреза отмечен “пирит” (рис. 6д), присутствие которого не коррелирует с другими минералами и литологическими особенностями разреза.

Распределение железа по разрезу не является результатом переотложения, что следует из отсутствия корреляции с земными минералами ($r = 0.11$ и 0.17 , табл. 4).

Басс. Примерно в 100 км к ЗСЗ от Аймаки (рис. 1) расположен по долине реки Басс в окрестностях села Махкеты (Чечня) непрерывный разрез карбонатных отложений от турона до дания общей мощностью 1135 м. Это преимущественно известняки и реже глинистые известняки и мергели.

В 57 образцах из 104 ГМА зафиксировано железо, и только в двух из них обнаружены признаки Fe-Ni сплава (табл. 3). Точки Кюри железа варьируют от 690 до 780°C (рис. 7ж), средняя $T_c = 740^\circ\text{C}$, что соответствует примеси никеля – до 19% и в среднем 7%. Зафиксирован довольно длительный интервал от 634 до 200 м (87–72 Ма) относительно повышенного содержания железа (рис. 7е). Внутри него можно выделить узкий интервал (84.4–83.6 Ма), который согласуется с разрезами Аймаки (рис. 3д) и Дженгутай (рис. 4д). Отметим еще несколько “всплесков” относительно повышенного содержания железа, 80.3 Ма ($1.2 \times 10^{-3}\%$), 73 Ма ($1.5 \times 10^{-3}\%$) (рис. 7е).

Подобно другим верхнемеловым отложениям в осадках разреза Басс повсеместно присутствуют магнитные фазы с T_c от 80 до 450°C . Присутствует как неокисленный (чаще в верхней части разреза), так и катион-дефицитный магнетит (явно преобладает в нижней половине разреза), что видно по вариациям точки Кюри от 560 до 660°C , гораздо реже встречается титаномагнетит, его $T_c = 460–550^\circ\text{C}$. Содержание магнетита + титаномагнетита заметно коррелирует с содержанием парамагнитных минералов ($r = 0.927$, табл. 4, рис. 7б, 7в) и в меньшей степени с содержанием “пирита” (рис. 7д) и отношением M_i/M_o (рис. 7г). Особенно заметна эта общая корреляция в интервалах повышенного содержания магнетита и парамагнитных минералов, что связано с повышенным содержанием “пирита”. Это парамагнитный минерал, и он в естественных условиях частично окислен с образованием магнетита, в свою очередь в ходе лабораторного нагрева “пирит” окисляется до магнетита, в результате чего растет M_i/M_o , отсюда их корреляция. Интервалы обогащения “пиритом” литологически никак не выражены и приходятся на однородные пачки известняков.

Распределение железа никак не связано ни с магнетитом, ни с “пиритом”, что видно по отсутствию или слабой корреляции с ними (табл. 4, рис. 7), т.е. можно рассматривать отложение железа как первичное.

КОПЕТ-ДАГ. Кара-Кала. Для выявления возможных глобальных особенностей распространения железа изучен разрез верхнемеловых отложений в Копетдаге (Туркмения) у селения Кара-Кала, находящийся примерно в 1000 км к юго-востоку от разреза Аймаки (рис. 1). Разрез расположен вдоль дороги между Кизыл-Арватом и Кара-Калой и начинается южнее горы Исак. Литологически разрез делится на две части. Нижняя – сеноманская, преимущественно терригенная, верхняя – турон-мастрихтская преимущественно карбонатная. В разрезе прослежены все описанные А.А. Атабековым и А.А. Лихачевой [1961] ярусы, подъярусы и зоны.

Отложения сеноманского яруса согласно залегают на альбских и представлены песчаниками, алевролитами и глинами. Мощность – 734 м. Нижний турон литологически сходен с верхними горизонтами сеномана и связан с ним постепенным переходом. Верхний турон расчленяется на две пачки: нижнюю – мергельную и верхнюю – известковую. Между подъярусами перерыв, граница неровная, бугристая и покрыта зернами глауконита в виде сплошной корки. Мощность турона – 13 м. Кольяк трансгрессивно залегают на туроне и сложен красными мергелями с прослоями серых глинистых известняков и чередованием зеленовато-серых глин и розовых мергелей. Мощность – 97 м. Сангон со-

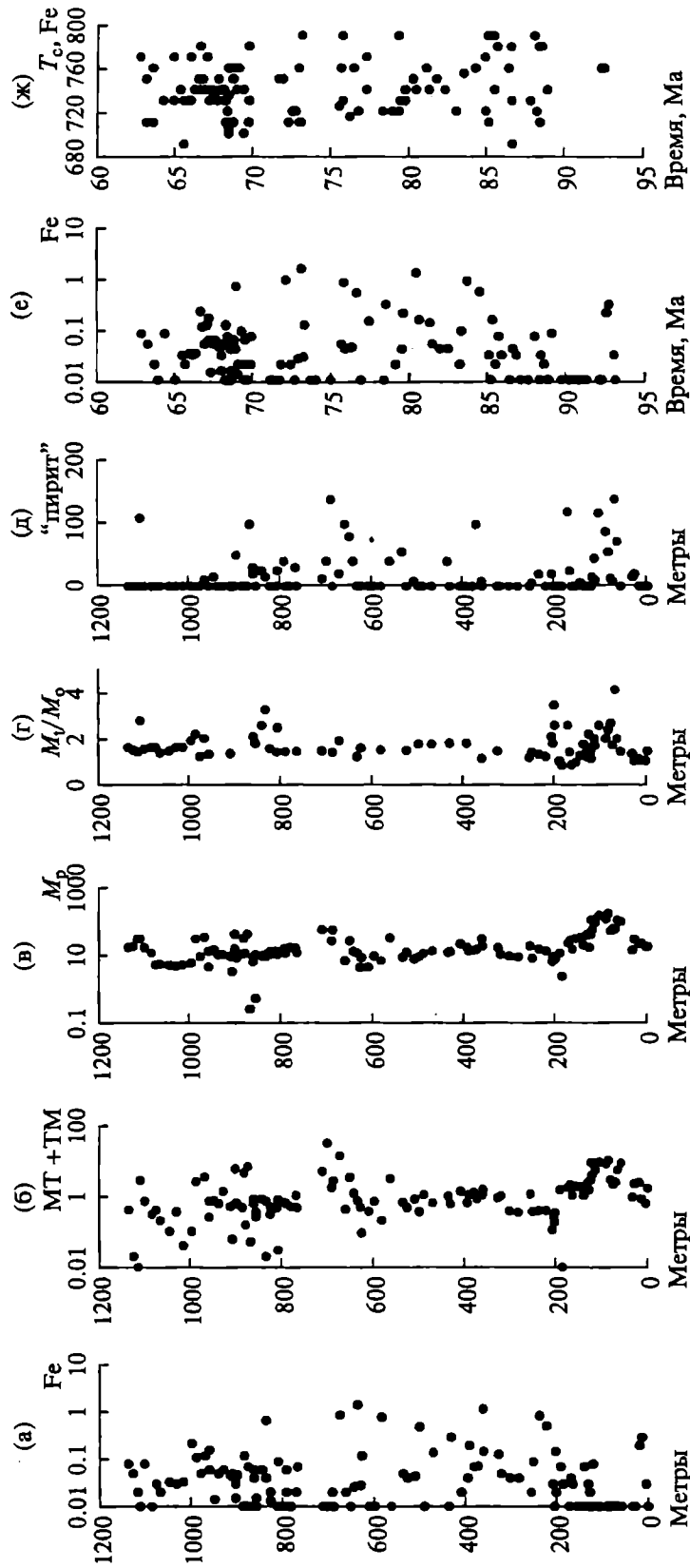


Рис. 7. Распределение в колонке Басс содержания железа, $10^{-3}\%$ – (а); магнетита + титаномагнетита, $10^{-3}\%$ – (б); парамагнитной намагниченности M_p , $10^{-3} \text{ Ам}^2/\text{кг}$ – (в); отношения величины намагниченности после нагрева образца до 800°C к ее исходной величине – (г); высоты пика ТМА при $510\text{--}530^\circ\text{C}$ (процент относительно величины исходной намагниченности образца), отражающей образование магнетита при окислении "пирита" в результате нагрева образца – (д); распределение во времени содержания железа – (е) и точек Кюри железа – (ж).

гласно залегает на коньяке и представлен чередованием серых, розовых и красных мергелей, известняков и глин. Мощность — 305 м. Переход от сантона к кампану постепенный. Кампан представлен чередованием пачек мергелей, известняков зеленовато-серого, белого цветов. Мощность — 559 м. Маастрихтские образования представлены мергелями мощностью 206 м. Маастрихт перекрывают со следами размыва датские отложения, представленные светло-серыми комковатыми, детритовыми и алевритистыми известняками с иридиевым горизонтом в основании. В дании опробованы нижние 19 м.

Содержание железа в осадках Кара-Калы существенно выше, чем в осадках Кавказа (рис. 8а, 8е), оно обнаружено в 98 образцах из 181. Точки Кюри железа варьируют от 690 до 780°C (рис. 8ж), средняя $T_c = 740^\circ\text{C}$, что соответствует содержанию примеси никеля — до 19% и в среднем 7.3%. Только в трех образцах обнаруживаются признаки Ni-Fe сплава (табл. 3).

Помимо ряда точечных “выскоков”, выделяются сеноман-туронский от 1845 до 1169 м (99–90 Ма), сантонский от 1080 до 1069 м (86.1–85.8 Ма), кампанский от 720 до 705 м (82.5–82.1 Ма) и датский от –4.5 до –10 м (65–64.3 Ма) интервалы повышенных содержаний железа. Резкий спад на 1069 м (85.8 Ма) повторяет данные по Кавказу и, похоже, отражает верхнюю границу Джалала. Самое высокое из всех изученных разрезов содержание железа в сеноманских отложениях Кара-Калы, где оно достигает 0.05%.

Подобно Кавказским верхнемеловым отложениям, в осадках разреза Кара-Кала повсеместно присутствуют магнитные фазы с T_c от 80 до 450°C, магнетит, как неокисленный (чаще), так и катион-дефицитный (реже), титаномагнетит с $T_c = 410–550^\circ\text{C}$. Распределение по разрезу магнетита (+титаномагнетит) довольно равномерное (рис. 8б). Отмечен “провал” на уровне 1250–1170 м (94–90 Ма, верхи сеномана–турон), совпадающий с понижением содержания парамагнитных минералов (рис. 8в). Подобные спады содержания парамагнитных минералов отмечаются на уровнях 0–300 м и в районе 700 м (рис. 8в). Литологическими особенностями перепады содержаний магнетита и парамагнитных минералов не отмечены. В общем, между содержаниями магнетита и парамагнитных минералов заметна положительная корреляция ($r = 0.63$, табл. 4) и намечается плавный спад их содержаний снизу вверх (рис. 8б, 8в), за которым следует плавный рост M_i/M_0 (рис. 8г).

В нижней половине разреза содержание железа коррелирует с содержанием магнетита и парамагнитных минералов (рис. 8а–8в), что свидетельствует о заметной роли переотложения в распределении

железа в этих осадках. В то же время в верхней половине разреза такая корреляция отсутствует, скорее намечается обратная корреляция, особенно заметная в интервале 80–72 Ма, где железо практически не обнаружено (рис. 8а–8в).

На ряде интервалов разреза распространен “пирит” (рис. 8д). Любопытно, что его присутствие находится в “противофазе” с титаномагнетитом, так из общего числа образцов 181, только в 10 случаях встречаются совместно в образце “пирит” и титаномагнетит с $T_c = 410–550^\circ\text{C}$, зато в 70 случаях, где есть титаномагнетит “пирита” нет и в 27 случаях, где есть “пирит”, нет титаномагнетита. Присутствие “пирита” не коррелирует ни с какими другими рассматриваемыми компонентами (табл. 4).

КРЫМ. Для выявления возможных глобальных особенностей распространения железа, кроме разреза Кара-Кала, изучены разрезы меловых отложений Верхоречья (баррем–апт) и Сельбухры (сеноман) (рис. 1).

Верхоречье. Разрез баррем–аптских отложений Горного Крыма начинается на южном склоне горы Белой в 500 м к западу от села Верхоречье и надстраивается разрезом, расположенным в 300 м ближе к селу. Перекрытие составляет 2–3 м. В сводном разрезе снизу вверх выделяются восемь пачек [Барабошкин и др., 2004]. Пачка I. Переслаивание серых и красно-коричневых глин. В кровле подстилающих известняков присутствует поверхность типа “твердого дна”, а в подошве глин — мелкая галька известняков и прослой охристой глины. Мощность — 6.8 м. Пачка II. Глины серые и желтовато-серые, в верхней части коричневые, с прослоями вишнево-красных анкеритов. Мощность — 7.5 м. Пачка III. Чередование биотурбированных серых глин, содержащих рассеянные конкреции сульфидов, и коричневатых серых глин. Мощность — 8.3 м. Пачка IV. Чередование серых и коричневатых глин с редкими прослоями конкреций вишнево-красных анкеритов. Видимая мощность около 32 м, вышележащая часть задернована. Пачка V. Глина с отдельными ярко-зелеными пятнами и разводами. Мощность — 5.5 м. Пачка VI. Глина серая, биотурбированная, в подошве — мелкие буро-бежевые фосфатные округлые стяжения. Мощность — 3.5 м. Пачка VII. Глина красная, в основании тонкопереслаивающаяся с зеленовато-серой; сменяется вверх бурой биотурбированной глиной, в подошве присутствуют конкреции вишневого анкерита. Мощность — 3.1 м. Пачка VIII. Глина серая биотурбированная. Мощность — более 3 м. Пачки I–IV (нижняя часть) относятся к барремскому ярусу, пачки IV (верхняя часть)–VIII относятся к аптскому ярусу. Заметная часть апта, между 19 и 29 м мощности (123–117 Ма) отсутствует.

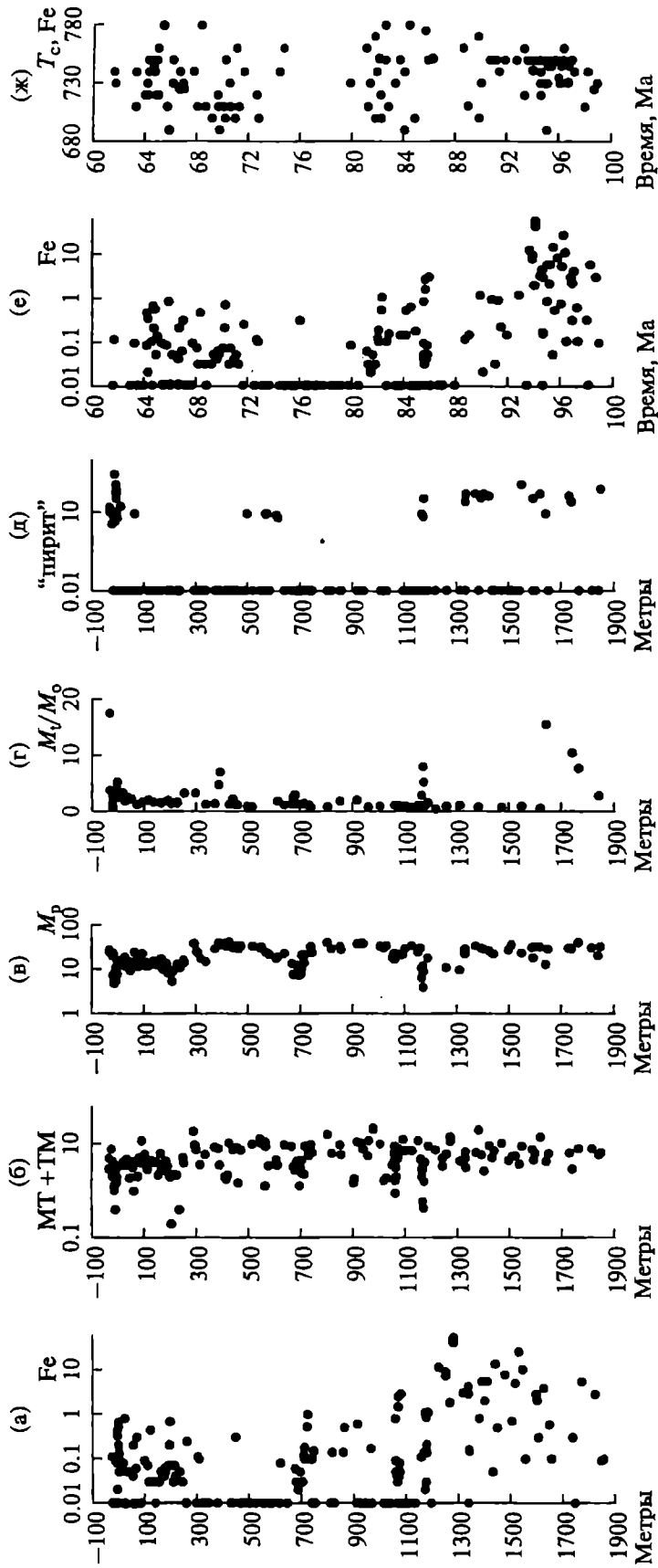


Рис. 8. Распределение в колонке Кара-Кала содержания железа, 10⁻³% — (а); магнетита + титаномагнетита, 10⁻³% — (б); парамагнитной намагниченности М_р, 10⁻³ Ам²/кг — (в); отношения величины намагниченности после нагрева образца до 800°С к ее исходной величине — (г); высоты пика ТМА при 510–530°С (процент относительно величины исходной намагниченности образца), отражающей образование магнетита при окислении "пирита" в результате нагрева образца — (д); распределение во времени содержания железа — (е) и точек Кюри железа — (ж).

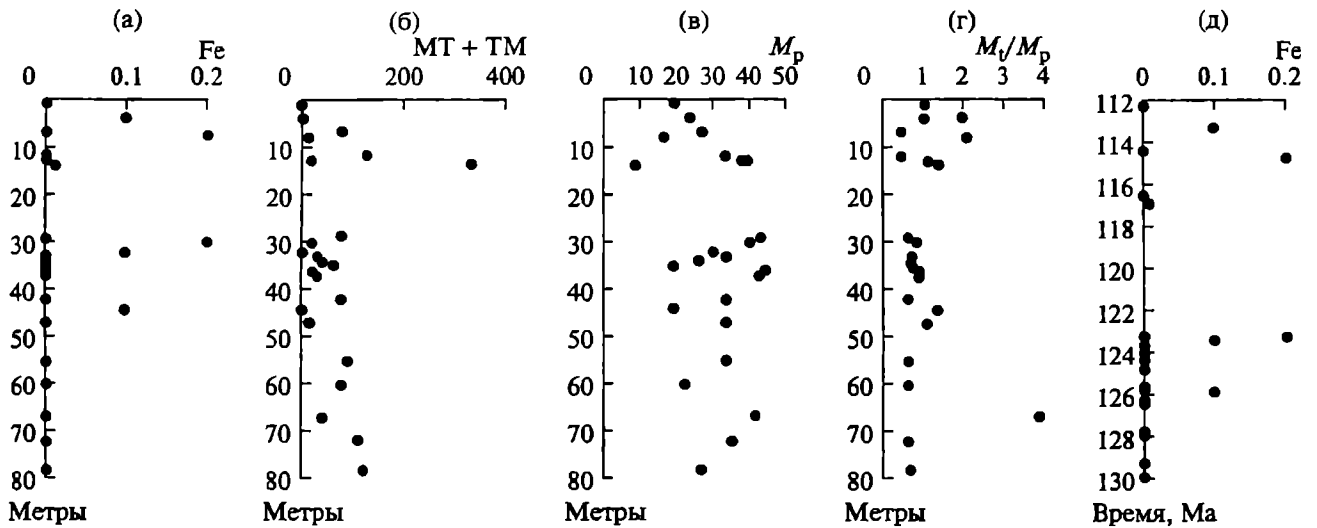


Рис. 9. Распределение в колонке Верхоречья содержаний железа, 10⁻³% — (а); магнетита + титаномагнетита, 10⁻³ — (б); парамагнитной намагниченности M_p , 10⁻³ Ам²/кг — (в); отношения величины намагниченности после нагрева образца до 800°C к ее исходной величине — (г); распределение во времени содержаний железа — (д).

В отложениях Верхоречья практически отсутствуют железо (рис. 9а, 9д) и Ni-Fe сплав, нет ни одного надежного их определения ТМА. Там, где отмечается незначительное присутствие железа, его точка Кюри варьирует от 720 до 780°C, т.е. это железо с примесями никеля от 12% до нуля. Подобно Кавказским меловым отложениям в осадках Верхоречья повсеместно присутствуют магнитные фазы с T_c от 80 до 450°C, магнетит, преимущественно катион-дефицитный, титаномагнетит с $T_c = 410\text{--}550^\circ\text{C}$. Характерно повышенное содержание парамагнитных минералов и магнетита (рис. 9б, 9в), более высокое, чем в песчано-глинистых отложениях Гергебиля и Кара-Калы. При этом необычна по сравнению с другими разрезами отрицательная корреляция между содержанием парамагнитных минералов и магнетита (табл. 4).

Сельбухра. Разрез Сельбухры расположен в Бахчисарайском районе Горного Крыма в окрестности села Прохладное. На южном склоне горы Сельбухра обнажаются отложения сеноманского яруса. Подробное описание разреза приведено в [Алексеев и др., 1997]. На песчаниках верхнего альба несогласно залегают отложения сеноманского яруса. Нижнесеноманские отложения представлены в нижней части песчаниками и алевролитами, в верхней — чередованием темных глинистых и светлых известковистых мергелей. В подошве прослеживается гравийный конгломерат с кварцевым гравием и глауконитом. Мощность — 19 м. Среднесеноманские образования представлены темно-серыми мергелями с прослоями известняков, переходящими выше в пачку ритмичного чередования светло-серых известняков и темно-серых глинистых мергелей с редкими конкрециями сульфидов. Контакт с нижним сеноманом выражен

“каменным дном”. Мощность — 16 м. Верхний сеноман сложен мергелями и белыми известняками. На контакте со средним сеноманом прослеживается узкий прослой бентонитовых глин. Видимая мощность верхнего сеномана — 16 м.

Железо обнаружено в 27 образцах из 36 (рис. 10а), и только в двух из них отмечены признаки Ni-Fe сплава (табл. 3). В основании разреза содержание железа около $3 \times 10^{-3}\%$ и кверху падает в сто раз. Точки Кюри железа изменяются от 700 до 780°C (рис. 10е), средняя $T_c = 745^\circ\text{C}$, т.е. примесь никеля достигает 17% и в среднем равна 6%.

Повсеместно присутствуют магнитные фазы с T_c от 80 до 400°C, магнетит, изредка катион-дефицитный, титаномагнетит с $T_c = 410\text{--}550^\circ\text{C}$, гематит. Содержание магнетита (+титаномагнетит) в песчаниках низа разреза достигает 0.3% и плавно падает снизу вверх по разрезу (рис. 10б). Поведение магнетита повторяется в содержании парамагнитных минералов (рис. 10в) и в содержании железа (рис. 10а). Между всеми тремя заметная положительная корреляция (табл. 4). Столь сходное поведение по разрезу железа, магнетита и парамагнитных минералов говорит о заметной роли переотложения в накоплении в осадках Сельбухры железа.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Содержание металлических частиц в осадках. Частицы металлического железа очень часто встречаются в изученных осадках, они обнаружены в 330 образцах из 571 изученных, в количестве от 10⁻⁵% до 0.05%. Подобная картина наблюдается в разрезах Австрии, России (Поволжье), Грузии и Туркмении,

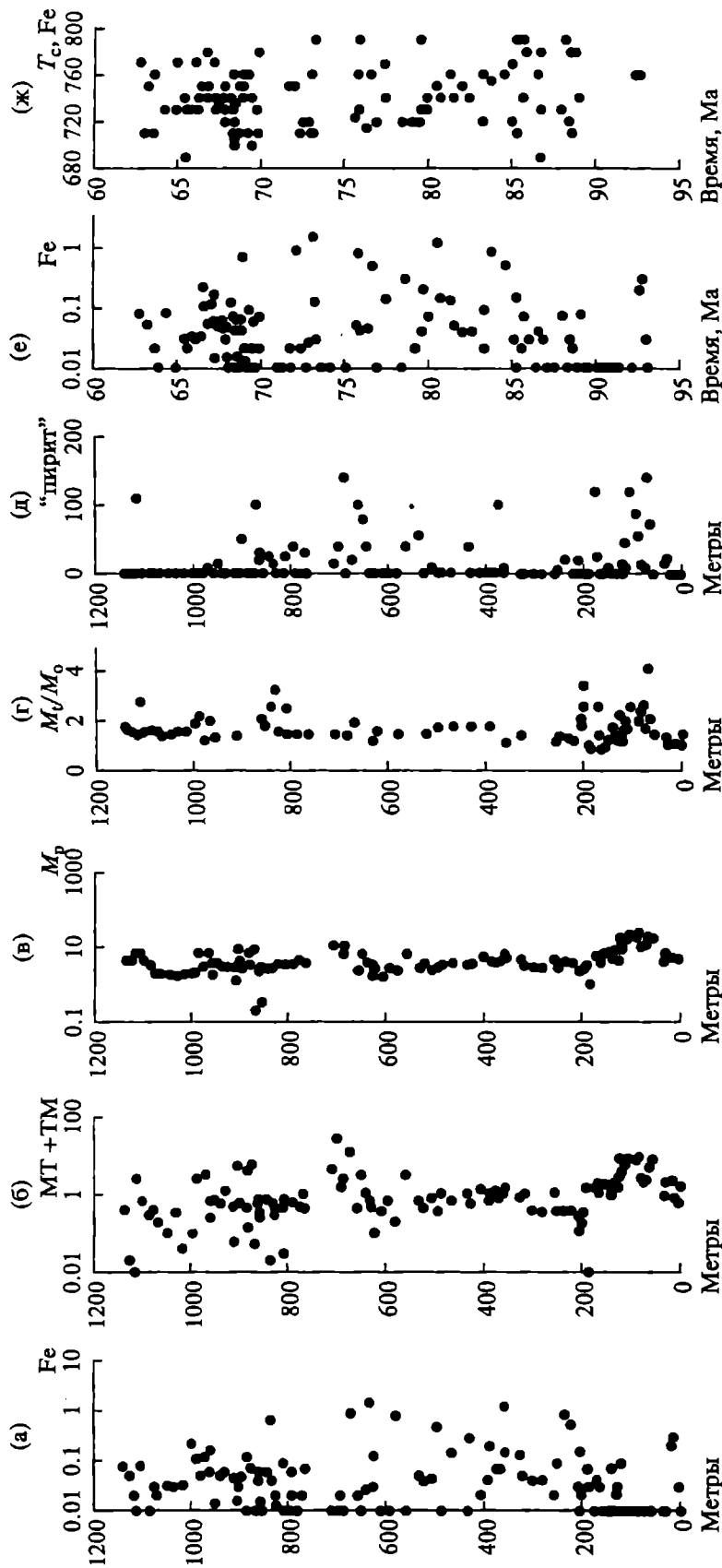


Рис. 10. Распределение в колонке Сельбукра содержания железа, $10^{-3}\%$ – (а); магнетита + титаномагнетита, $10^{-3}\%$ – (б); парамагнитной намагниченности M_p , $10^{-3} \text{ Ам}^2/\text{кг}$ – (в); отношения величины намагниченности после нагрева образца до 800°C к ее исходной величине – (г); высоты пика ТМА при $510\text{--}530^\circ\text{C}$ (процент относительно величины исходной намагниченности образца), отражающей образование магнетита при окислении "пирита" в результате нагрева образца – (д); распределение во времени содержания железа – (е) и точек Кюри железа – (ж).

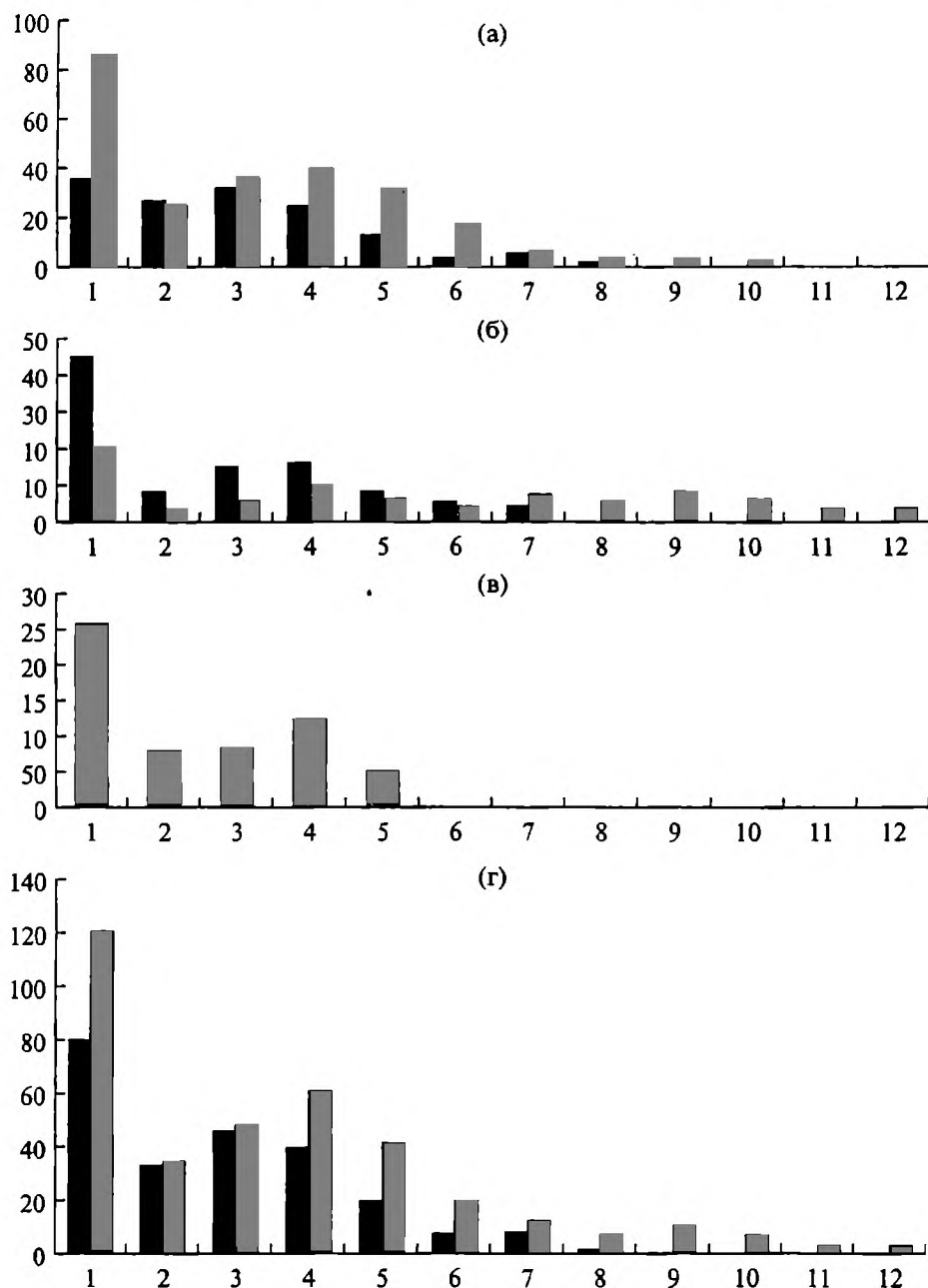


Рис. 11. Гистограммы распределения содержаний железа в разрезах Кавказа (а); Кара-Калы (б); Крыма (в); сумма данных (г). Черный цвет – отложения кампана–дания (моложе гиперхрона Джалал), серый цвет – отложения баррема–сантона (время гиперхрона Джалал). Масштаб интервалов содержаний железа логарифмический: 1 – 0–0.01 ($10^{-3}\%$); 2 – 0.01–0.03; 3 – 0.03–0.07; 4 – 0.07–0.15; 5 – 0.15–0.31; 6 – 0.31–0.63; 7 – 0.63–1.27; 8 – 1.27–2.55; 9 – 2.55–5.11; 10 – 5.11–10.23; 11 – 10.23–20.49; 12 – 20.49–54 ($10^{-3}\%$).

от мела до миоцена [Pechersky, 2008; Pechersky et al., 2008; Grachev et al., 2009].

Появление и скопление железа не зависит от окислительно-восстановительной обстановки в осадке, что видно по отсутствию корреляции с наличием в осадках катион-дефицитного магнетита (высокоокислительные условия), с одной стороны, и “пирита” (восстановительные условия), с другой стороны.

В общем, четко видно (рис. 11), как по отдельным разрезам, районам, так и в сумме данных, бимодальное распределение концентраций частиц железа, отражающее неоднородное их накопление в осадках: первая совокупность с “нулевой” модой – это осадки, в которых железо отсутствует (не обнаружено ТМА), распределение таких осадков в изученных разрезах незакономерно. Вторая совокупность име-

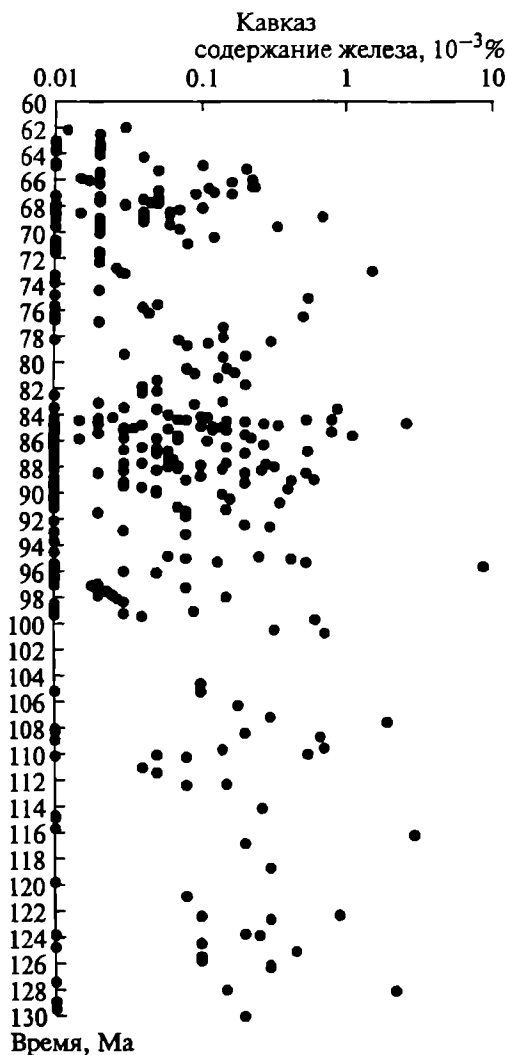


Рис. 12. Распределение частиц железа в осадках Кавказа. Сумма данных по разрезам Аймаки, Джентугай, Маджалис, Гергебиля и Басс, сведенных в одну колонку.

ет логнормальное распределение с модой в интервале $0.04-0.15 \times 10^{-3}\%$. При этом в случае отложений из гиперхрона Джалал (апгг-сантон) мода несколько выше по сравнению с более поздними отложениями (рис. 11). На общем фоне выделяются “хвостом” повышенных концентраций отложения Кара-Калы (рис. 116).

Скорее получается географический, а не литологический контроль: по мере движения с запада на восток растет содержание железа. В меловых отложениях Крыма очень низкие содержания железа, как в песчано-глинистых (кроме локального содержания 0.003% в самых низах сеномана Сельбухры), так и карбонатных отложениях, где оно не выше $0.1-0.2 \times 10^{-3}\%$. Более высокие содержания железа в верхнемеловых карбонатных отложениях Кавказа,

где оно достигает $0.5-10 \times 10^{-3}\%$. В песчано-глинистых отложениях нижнего мела Гергебиля отмечены локальные аномалии $0.5-3 \times 10^{-3}\%$. Наиболее высокие содержания железа на востоке, в разрезе Кара-Кала, где в сеноманской части оно достигает 0.05% .

Судя по отсутствию корреляции содержания космического железа с земным магнетитом (+ титаномагнетитом) (табл. 4), накопление железа в рассматриваемых осадках происходило, главным образом, непосредственно из космических источников. Исключение составляют сеноманские отложения Сельбухры и Кара-Калы, где заметная корреляция его с содержанием магнетита (табл. 4) свидетельствуют, вероятнее всего, о роли переотложения в накоплении железа в сеноманских осадках этих районов.

Можно говорить о четырех типах накопления металлического железа: точечное, локальное, региональное и глобальное.

Точечный тип, наиболее распространенный, когда повышенное содержание железа фиксируется в одном образце, в “точке”, и отсутствует в соседних образцах, этот тип носит случайный характер. Может быть как результатом первичного попадания железа в осадок, так и результатом его переотложения.

Локальный тип: повышенное содержание железа фиксируется в серии соседних образцов одного разреза, но не прослеживается от разреза к разрезу. Скорее всего, это сочетание первичного накопления и вторичного переотложения. Наиболее яркий пример длительного неравномерного локального первичного накопления железа (отсутствует корреляция металлического железа с земными минералами железа) — в разрезе Басс интервал от 81 до 72 Ма (рис. 7, табл. 4). Пример длительного преимущественно вторичного накопления железа в результате переотложения — разрез Кара-Кала — 95–99 Ма, заметна корреляция содержания железа и земных минералов (табл. 1), особенно в нижней половине разреза (рис. 8). В нижней части гиперхрона Джалал, в разрезе Гергебиля зафиксирован ряд локальных всплесков содержания железа ($2-3 \times 10^{-3}\%$), возраст которых 107.54 Ма, 116.17 Ма и 128.08 Ма. Возможно, часть из них окажутся региональными после изучения серии нижнемеловых разрезов в других районах.

Региональный тип: повышенное содержание железа фиксируется в синхронных интервалах серии разрезов, например, Кавказа. Маловероятно, что это результат переотложения, синхронного на большой территории. Если объединим вместе все разрезы Кавказа, должны получить более четкую картину регионального обогащения железом осадков, точечные и, вероятно, локальные значения сгладятся,

должен сгладиться эффект вторичного переотложения (рис. 12).

Отметим наиболее заметные с нашей точки зрения интервалы регионального накопления железа:

1) 64–67 Ма, низы дания–верхи мела, содержание железа приближается к $10^{-3}\%$ и фиксируется во всех изученных разрезах, где есть этот интервал времени (рис. 3, рис. 7, рис. 8, рис. 12).

2) 84–86 Ма, сантон, содержание железа зафиксировано в 5 разрезах, максимальное содержание от разреза к разрезу варьирует от $0.2 \times 10^{-3}\%$ (Маджалис, рис. 5) до $2.9 \times 10^{-3}\%$ (Кара-Кала, рис. 8). Несколько варьируют границы интервала, что, вполне возможно, связано с неточностью перевода шкалы стратиграфической в хронологическую. Особенно интересно и важно: этот интервал практически совпадает с верхней границей гиперхрона Джалал. На сводном разрезе (рис. 12) она четко фиксируется спадом содержания железа около 84 Ма. Из-за малого числа данных нижняя граница гиперхрона Джалал четко не фиксируется (рис. 12). Возможно, намечающийся на уровне 122 Ма спад содержания железа относится к нижней границе гиперхрона Джалал.

3) 94–96 Ма, поздний сеноман, железо зафиксировано в разрезах Аймаки (максимум $9 \times 10^{-3}\%$ приходится на возраст 95.6 Ма), и Кара-Кала (максимум $54 \times 10^{-3}\%$ приходится на возраст 94.3 Ма). Его с довольно большой натяжкой можно отнести к региональному накоплению железа из-за заметной роли вторичного переотложения железа именно в нижних частях обоих разрезов (табл. 1, рис. 3, рис. 8, рис. 12).

Глобальный тип: повышенное содержание железа фиксируется в синхронных интервалах удаленных на большие расстояния разрезов. Сюда можно отнести накопление железа в районе верхней границы гиперхрона Джалал (сантонский век).

Повсеместное, в общем, распространение частиц железа свидетельствует о главном их источнике – космической пыли. Выпадение частиц железа на Землю нерегулярно, и, видимо, отражает разные источники частиц железа в пыли, о чем говорит бимодальное распределение их концентраций (рис. 11).

В отличие от частиц железа, частицы Ni-Fe сплава встречаются очень редко, их количество не коррелирует с содержанием частиц железа ($r = -0.059$). Заметная корреляция с содержанием в осадках магнетита и титаномагнетита ($r = 0.61$) говорит о том, что либо часть этих частиц – это не Ni-Fe сплав, а земные минералы (титаномагнетит, гематит) полностью сохранившиеся после нагрева до 800°C (что маловероятно), либо это частицы Ni-Fe сплава, переотложенные вместе с земными минералами.

Столь резкое различие в количестве и условиях накопления между частицами железа и Ni-Fe сплава и отсутствие между их содержаниями корреляции, скорее всего, объясняется разными их источниками. Если первые, главным образом, продукты выпадения на Землю космической пыли, то вторые, более вероятно, связаны с импактными событиями. Во всяком случае, независимо от степени надежности предлагаемого нами фиксирования частиц Ni-Fe сплава, можно однозначно утверждать, что в космической пыли частицы Ni-Fe сплава практически отсутствуют, точнее говоря (на уровне чувствительности ТМА), их возможная концентрация в пылевом облаке ниже $10^{-5}\%$.

Состав металлических частиц. Вариации состава частиц железа, выраженные в их точках Кюри, изменяются во всех разрезах примерно в одних пределах от 680 до 780°C , что соответствует примеси никеля от 22% до нуля. Верхний предел содержания никеля (22%) условный и определяется тем, что далее точки Кюри Fe-Ni сплава перекрываются с точками Кюри гематита, магнетита, гематитов и титаномагнетитов, их разделение возможно, но требует специальных экспериментов, а это не входило в нашу задачу. Пока выделена серия образцов, возможно, содержащих частицы Ni-Fe сплава в интервале точек Кюри 360 – 500°C . Содержание никеля в таких частицах варьирует от 67 до 100% (табл. 3). Возможны ошибки в наших определениях Ni-Fe сплава, так что случаев обнаружения Ni-Fe сплавов может быть только еще меньше.

Заметных закономерностей в распределении точек Кюри железа по латерали (между разрезами) не отмечается (рис. 3–рис. 8): частицы железа по составу образуют обширное облако, что, очевидно, естественно для космической пыли. На сводном рисунке 13а видны два интервала, примерно, 130 – 105 Ма и 78 – 74 Ма, в которых нижний предел точек Кюри выше (720 – 730°C), т.е. примесь никеля меньше, чем в остальном времени. Это лучше видно на данных ТМА, пересчитанных на содержание никеля в частицах железа и осредненных (рис. 13б–13г). С увеличением степени сглаживания четче проявляется закономерный тренд (рис. 13г): спад среднего содержания никеля в интервале от 130 до 124 Ма, затем очень слабый плавный подъем до 87 Ма и новый спад до 78 Ма, новый подъем до 68 Ма и последующий спад до 60 Ма. Обращает на себя внимание интервал почти постоянного среднего содержания никеля, практически *совпадающий с гиперхроном Джалал*, нижняя и верхняя границы которого отмечены спадом содержания никеля в частицах железа. Такое закономерное поведение среднего состава частиц железа, очевидно, характеризует частицы железа,



Рис. 13. Распределение точек Кюри в сводном разрезе Кавказ-Кара-Кала (а); пересчет точек Кюри в содержание никеля (%) в частицах железа, интервал осреднения 1 млн. лет (б); интервал осреднения 5 млн. лет (в) и интервал осреднения 9 млн. лет (г).

выпадавшие из пылевого облака космической пыли, через которое в это время проходила наша планета. Состав частиц железа в среднем плавно и равномерно меняется во времени. Подчеркнем, что в отличие от общей концентрации железа в осадках, на которую влияет возможное переотложение, последнее не влияет на состав зерен железа.

Корреляция содержания частиц железа с содержанием в них примеси никеля отсутствует ($r = -0.024$). При этом на рис. 14 виден явный пик повышенного содержания железа с практически постоянной примесью никеля 5% независимо от

места и возраста осадка, содержащего это железо. Даже в осадках Крыма, где содержание железа очень низкое, отмечено повышенное содержание железа с примесью никеля именно 5% (рис. 14в). Т.е. это некий глобальный эффект. Содержание железа в осадках быстро падает как в сторону роста, так и уменьшения примеси никеля (рис. 14а). Но есть и региональная особенность: в осадках Кара-Калы практически отсутствуют зерна железа, содержащие меньше 5% никеля, тогда как в осадках Крыма и особенно Кавказа заметна доля зерен, содержащих меньше 5% никеля вплоть до чистого железа.

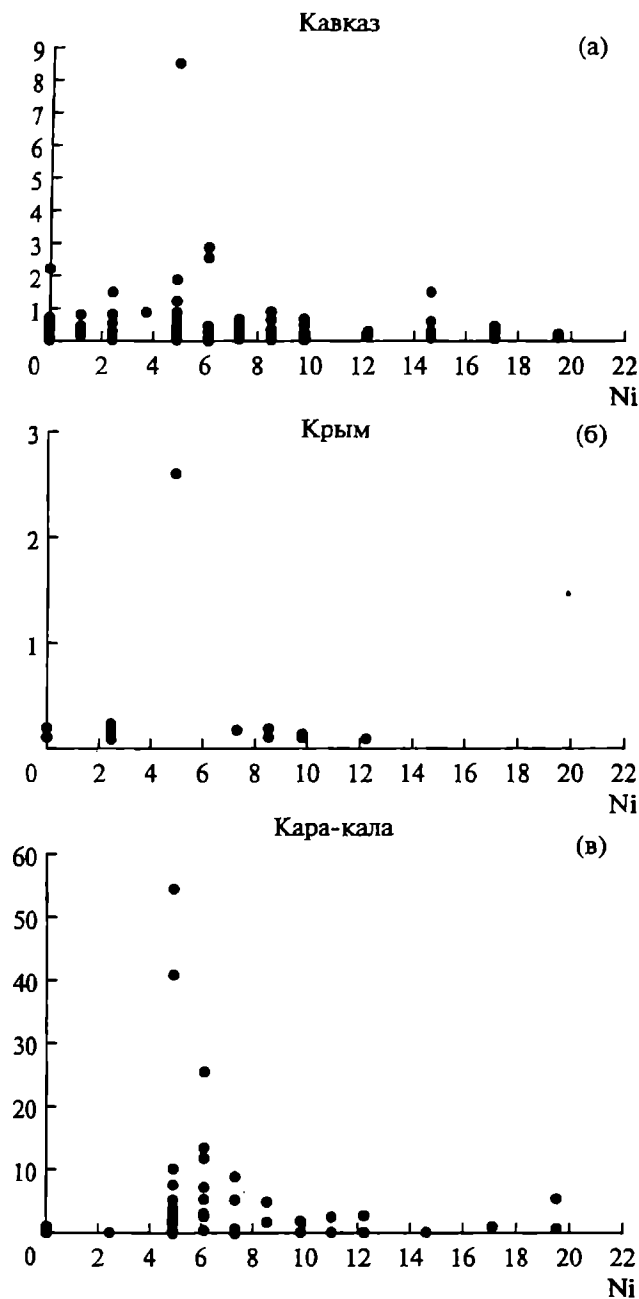


Рис. 14. Примесь никеля (%) в частицах железа ($10^{-3}\%$): (а) – Кавказ, (б) – Крым, (в) – Кара-Кала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря использованию термомагнитного анализа до 800°C получена детальная картина распределения частиц металлического железа в пространстве времени, в меловом периоде и дании, чего методом “прямого наблюдения” достичь не удастся.

Главные результаты исследований:

1). Частицы металлического железа часто встречаются в количестве от $10^{-5}\%$ до 0.05% , как в изучен-

ных осадках, так и в разрезах Австрии, России (Поволжье), Грузии и Туркмении, от мела до миоцена. Независимо от возраста осадков, их распределение образует две совокупности. Первая совокупность с “нулевой” модой – это осадки, в которых железо отсутствует (не обнаружено ТМА), распределение таких осадков в изученных разрезах закономерно, отражая, очевидно, неравномерность попадания частиц железа в осадки. Вторая совокупность имеет логнормальное распределение с модой в интервале $0.04\text{--}0.15$ ($10^{-3}\%$).

2). Зафиксировано региональное обогащение частицами железа в осадках сантона в 5 разрезах Кавказа и разрезе Кара-Калы примерно в интервале $84\text{--}86$ Ма, удаленных друг от друга на 1000 км. Максимальное содержание от разреза к разрезу варьирует от 0.2×10^{-3} до $2.9 \times 10^{-3}\%$. Верхняя граница этого интервала практически совпадает с верхней границей гиперхрона Джалал и фиксируется спадом содержания железа около 84 Ма.

3). Вариации состава частиц железа выражаются в их точках Кюри. Они изменяются во всех разрезах, как мела, так дания и миоцена от 690 до 780°C , отражая колебания примеси никеля, очевидно, характеризую колебания состава частиц железа в облаке космической пыли. При сглаживании четко выделяется интервал $123\text{--}86$ Ма почти постоянного среднего содержания никеля, практически совпадающий с гиперхромом Джалал, нижняя и верхняя границы которого отмечены спадом примеси никеля в частицах железа.

4). Во всех изученных разрезах на фоне очень низких содержаний частиц железа с заметными вариациями примеси никеля зафиксирован пик повышенного содержания железа с практически постоянной величиной примеси никеля 5% независимо от места и возраста осадка, содержащего это железо, т.е. это некий глобальный эффект.

5). Глобальный характер и продолжительность повышенного содержания железа в осадках, примесь никеля, близкая к постоянной, скорее всего, характеризуют облако космической пыли, через которое пролетала в это время Земля.

6). В изученных нами многих разрезах осадков мела и кайнозоя частицы Ni-Fe сплава и чистого никеля встречаются очень редко, их концентрации не коррелируют с содержанием частиц железа. Столь резкое различие в количестве и условиях накопления между частицами железа и Ni-Fe сплава, скорее всего, объясняется разными их источниками. Если первые, главным образом, продукты выпадения на Землю космической пыли, то вторые, вероятно, связаны с импактными событиями. Во всяком случае, независимо от степени надежности предлагаемого нами фиксирования частиц Ni-Fe сплава, можно однозначно утверждать, что в космической пыли возможная концентрация частиц Ni-Fe сплава ниже $10^{-5}\%$ (уровень чувствительности ТМА).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев А.С., Венгерцев В.С., Копачевич Л.Ф., Кузьмичева Т.А.* Литология и микропалеонтология пограничных отложений сеномана–турона Юго-Западного Крыма. Тр. Крымского геологич. научно-учебного центра им. А.А. Богданова. 1997. Вып. 1. С. 54–73.
- Атабекян А.А., Лихачева А.А.* Верхнемеловые отложения Западного Копетдага. Проблемы нефтегазоносности Средней Азии. Тр. ВСЕГЕИ. Н.С. Т. 62. Вып. 10. Л.: Гостоптехиздат. 1961. 242 с.
- Барабощкин Е.Ю., Гужиков А.Ю., Муттерлоуз Й., Ямпольская О.Б., Пименов М.В., Гаврилов С.С.* Новые данные о стратиграфии баррем-аптских отложений Горного Крыма в связи с обнаружением аналога хрона М0 в разрезе с. Верхоречье // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2004. № 1. С. 10–20.
- Бозорт Р.М.* Ферромагнетизм. М.: Мир. 1956. 784 с.
- Буров Б.В., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г.* Палеомагнитный анализ. Казань: изд-во Казанского государственного университета. 1986. 167 с.
- Верхний мел юга СССР/ Под ред. Алиева М.М., Крылова Н.А., Павловой М.М. и др. М.: Наука. 1986. 232 с.
- Диграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Лякишева Н.П.* М.: Машиностроение. 1997. Т. 3 (книга 1). 872 с.
- Меловые отложения обрамления Каспийского моря. М.: Наука. 1980. 241 с.
- Пергамент М.А.* Стратиграфия и иноцерамы верхнего мела Северного полушария. Тр. ГИН АН СССР. 1978. Вып. 322. 190 с.
- Ренгартен В.П.* Опорные разрезы верхнемеловых отложений Дагестана. Л.: Наука. 1975. 99 с.
- Brownlee D.E.* Morphological, chemical and mineralogical studies of cosmic dust // *Phil. Trans. Roy. Soc. London.* 1987. A323. P. 305–309.
- Grachev A.F., Korchagin O.A., Kollmann H.A., et al.* The K/T boundary of Gams (Eastern Alps, Austria) and the nature of terminal Cretaceous mass extinction. *Abhandlungen der geologischen Bundesanstalt. Wien.* 2009. 199 p.
- Gradstein F.M., Ogg J., van Kranendonk M.* On the Geological Time Scale 2008 // *Newsletters on stratigraphy.* 2008. V. 43/1. P. 5–13.
- Nagata T., Funaki M.* Tetraenaite phase in Antarctic meteorites // *Memory National Inst. Polar Res., Spec. Issue.* 1987. V. 46. P. 242–251.
- Nagata T., Danon J., Funaki M.* Magnetic properties of Ni-rich iron meteorites // *Mem. National Inst. Polar Res., Spec. Issue.* 1987. V. 46. P. 263–282.
- Nagata T., Ishikawa Y., Kinoshita H., et al.* Magnetic properties of Lunar samples // *Science.* 1970. V. 167. P. 703–722.
- Novakova A.A., Gendler T.S.* Metastable structural-magnetic transformations in sulfides in course of oxidation // *J. of Radioanalyt. and Nuclear Chem.* 1995. V. 190. № 2. P. 363–368.
- Parkin D.W.* Cosmic dust in Antarctic // *British Antarctic Survey Bull.* 1964. V. 23. P. 1–18.
- Pechersky D.M.* Metallic iron in sediments at the Mesozoic-Cenozoic (K/T) boundary // *Russ. J. Earth Sci.* 2008. V. 10. ES6006, doi:10.2205/2005ES000304.
- Pechersky D.M., Nourgaliev D.K., Trubikhin V.M.* Native iron in Miocene sediments // *Russ. J. Earth Sci.* 2008. V. 10. ES6004, doi:10.2205/2008ES000306.
- Shima M., Yabuki H.* Study of the extraterrestrial material in Antarctica // *National Inst. Polar Res.* 1988. № 3. P. 53–67.