

УДК 550.382.3

## ОБОГАЩЕНИЕ ОСАДКОВ ГИДРООКИСЛАМИ ЖЕЛЕЗА НА ГРАНИЦЕ МЕЗОЗОЯ И КАЙНОЗОЯ: ОБОБЩЕНИЕ ПЕТРОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ

© 2008 г. Д. М. Печерский

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

*E-mail: diamar1@front.ru*

Поступила в редакцию 26.09.2006 г.

В статье обобщаются результаты петромагнитного изучения эпиконтинентальных отложений у границы мезозоя/кайнозоя ( $K/T$ ). Из полученных результатов следует, что граница  $K/T$  отмечена резким подъемом содержания гидроокислов железа. При этом, наиболее высокое их содержание находится в основании пограничного слоя и к верхней его части понижается более чем вдвое. В отличие от гидроокислов железа накопление других магнитных минералов идет по-разному, отражая разное их происхождение и местные условия накопления терригенного материала: например, космогенные шарики металлического железа и никеля, перенос по воздуху зерен титаномагнетита вулканического происхождения, терригенный снос продуктов размыва – магнетита, ильменита.

PACS: 91.25.F-

### ВВЕДЕНИЕ

Граница мезозоя и кайнозоя ( $K/T$ ) по многим данным фиксируется повышенной магнитной восприимчивостью океанских и морских отложений. Анализ непрерывных разрезов осадков океана, захватывающих границу  $K/T$ , показал [Pechersky, Garbuzenko, 2005], что граница  $K/T$  нередко отмечается пиком магнитной восприимчивости  $\chi$ . Высокие значения  $\chi$ -пика часто приурочены к эпицентрам активных плюмов. Процесс накопления магнитного материала в осадках растянут во времени от первых десятков тысяч лет (чаще) до сотен тысяч лет, и там, где он наблюдается, этот интервал включает границу  $K/T$  и располагается, главным образом, выше границы  $K/T$ . Исследователи обычно связывают рост восприимчивости с притоком в осадки терригенного материала, т.е. следовало бы ожидать более высоких значений магнитной восприимчивости океанских осадков близ континентов. Однако в колонках осадков, наиболее близких к континентам,  $\chi$ -пик часто вообще отсутствует.

До последнего времени анализировалось лишь поведение магнитной восприимчивости осадков на границах эр и почти не изучались другие магнитные свойства. Соответственно, практически ничего не было известно о природе пика восприимчивости на границах эр. Этот существенный недостаток восполнен детальными магнитолито-логическими и магнитоминералогическими исследованиями ныне обнажающихся на суше и доступных для непосредственного изучения эпиконтинентальных отложений у границы  $K/T$ . В частности,

изучены разрезы Кошак (Мангышлак) [Печерский и др., 2006], Гамс (Австрия) [Grachev et al., 2005; Pechersky et al., 2006], Тепловка (Поволжье) [Molostovsky et al., 2006], Тетрицкаро (Грузия) [Adamia et al., 1993]. Обобщению результатов этих исследований посвящена настоящая статья.

Методика петромагнитных исследований перечисленных разрезов подробно описана в вышеупомянутых статьях. Остановлюсь только на определении содержаний магнитных минералов и парамагнитной намагниченности.

По данным термомагнитного анализа в осадках перечисленных разрезов обнаружены гидроокислы железа типа гётита, гемоильменит, магнетит, титаномагнетит и металлическое железо. Для оценки их концентрации по кривой  $M_i(T)$  определялся вклад в величину  $M_i$  данного магнитного минерала, и эта величина делилась на удельную намагниченность насыщения этого минерала. Принимались следующие величины  $M_s$  [Багин и др., 1988; Нагата, 1965]: для магнетита и титаномагнетита  $\sim 90$  Ам<sup>2</sup>/кг, для железа  $\sim 200$  Ам<sup>2</sup>/кг, для гемоильменита с  $T_c$  выше  $300^\circ\text{C}$  –  $4$  Ам<sup>2</sup>/кг и с  $T_c \approx 250\text{--}260^\circ\text{C}$  –  $10$  Ам<sup>2</sup>/кг, для гётита –  $0.25$  Ам<sup>2</sup>/кг (это средняя удельная намагниченность насыщения гётита, которая варьирует в зависимости от их агрегатного состояния от  $0.02$  до  $0.5$  Ам<sup>2</sup>/кг). Полученные оценки концентрации магнитных минералов, конечно, достаточно условны, но их относительные изменения отражают истинную картину.

“Полная” парамагнитная + диамагнитная часть намагниченности определена по кривой изотермического намагничивания выше поля насыще-

ния при комнатной температуре. Если известна парамагнитная намагниченность при комнатной температуре, то по закону Кюри–Вейса можно рассчитать парамагнитную намагниченность при 800°C. Диамагнитная намагниченность практически не зависит от температуры [Вонсовский, 1971]. Если учесть, что все измерения сделаны в одном внешнем магнитном поле или приведены к одному полю (в таких случаях мы принимаем линейную зависимость величины парамагнитной и диамагнитной намагниченности от поля), то из простых уравнений можно рассчитать парамагнитную намагниченность при комнатной температуре:

$$M_p + M_d = M_{20},$$

$$M_p/3.644 + M_d = M_{800},$$

где  $M_p$  – парамагнитная намагниченность при комнатной температуре,  $M_d$  – диамагнитная намагниченность при комнатной температуре,  $M_{20}$  – парамагнитная + диамагнитная намагниченность, она определена по кривой изотермического намагничивания образца при комнатной температуре выше поля насыщения магнитных (магнитоупорядоченных) минералов, присутствующих в образце,  $M_{800}$  – измеренная в том же поле, что и  $M_{20}$  величина намагниченности образца при температуре 800°C. Делитель  $M_p$  (3.644) – это отношение температур 1075K/295K.

Из уравнений получается

$$M_p = 1.378(M_{20} - M_{800}).$$

Парамагнитная намагниченность фактически определяется общим содержанием железа в породах, сосредоточенного в нашем случае в парамагнитных гидроокислах железа, в гидроокислах железа, обладающих слабым ферромагнетизмом (в первую очередь это минералы группы гётита) и глинистых минералах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕТРОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как отмечалось во введении, многими исследователями зафиксирован пик магнитной восприимчивости на или близ границы  $K/T$  как в эпиконтинентальных, так в морских и океанских осадках. Среди известных разрезов непрерывных отложений океанских осадков в трети колонок фиксируется рост магнитной восприимчивости у границы  $K/T$ , от очень узкого пика восприимчивости до длительного времени повышенного накопления железа в осадках, охватывающего многие сотни тысяч лет [Pechersky, Garbuzenko, 2005]. Аномальное поведение магнитной восприимчивости в пограничном слое на границе  $K/T$  распространено в эпиконтинентальных осадках, по крайней мере, регионально, а возможно и гло-

бально, отражая особенности накопления в осадках железа и магнитных минералов. Оно встречается в двух вариантах в зависимости от литологического типа разреза: 1) карбонатные отложения маастрихта сменяются песчано-глинистыми отложениями дания, в этом случае отмечается резкий всплеск восприимчивости в пограничном слое, и выше, в песчано-глинистых отложениях дания ее величина остается повышенной по сравнению с отложениями маастрихта; например, разрезы Гамса (Австрия) [Pechersky et al., 2006], Тепловки (Поволжье) [Molostovsky et al., 2006], Кубалач (Крым) [Ямпольская и др., 2004]; 2) карбонатные отложения близ границы  $K/T$  включают тонкие прослой глины, в частности, на границе  $K/T$ , в таких разрезах отмечается только резкий пик восприимчивости, приуроченный к слою пограничной глины, например, разрезы Кошака (Мангышлак) [Печерский и др., 2006], Тетрицкаро (Грузия) [Adamia et al., 1993; Pechersky et al., in press], Абат (Оман) [Ellwood et al., 2003]. При этом большинство исследователей склоняются к одному объяснению  $\chi$ -пика: это результат терригенного сноса и накопления магнитных минералов [Молостовский, 1986; Ellwood et al., 2003; Ямпольская и др., 2004 и др.]. В анализируемых разрезах, действительно, во всех случаях фиксируется скачок восприимчивости на границе  $K/T$  (рис. 1). Однако вклад в восприимчивость магнитных минералов различен, а чаще преобладает вклад парамагнитного материала, что видно по корреляции величин магнитной восприимчивости и парамагнитной намагниченности (рис. 2). Распределение магнитных минералов наглядно демонстрирует распределение по разрезам остаточной намагниченности насыщения (рис. 3), которое определяется в первую очередь суммарной концентрацией магнитных минералов в осадках, подобно ведет себя и намагниченность насыщения. Из рис. 3 видно, что четко выделяется по  $M_{rs}$  пограничный слой только в разрезе Тетрицкаро, где в восприимчивости преобладает вклад магнитных минералов. Интересно, что в разрезе Кошак пограничный слой по  $M_{rs}$ , и  $M_s$  совершенно не выделяется, тогда как в находящемся выше на 60 см прослое глины резко возрастают и  $M_{rs}$ , и  $M_s$  [Печерский и др., 2006], т.е. концентрация магнитных минералов. Таким образом, явно общим для пограничного слоя (граница  $K/T$ ) для всех приведенных разрезов является только резко повышенная парамагнитная намагниченность (рис. 4), определяемая во всех случаях в первую очередь содержанием гидроокислов железа. Как видно из рис. 4, содержание гидроокислов железа в разрезах варьирует слабо. При этом, непосредственно в пограничном слое наиболее высокая парамагнитная намагниченность в нижней его части, она достигает 0.06 Ам<sup>2</sup>/кг (разрезы Гамс и Тетрицкаро) и падает в верхней части слоя более чем в два раза, т.е. от-

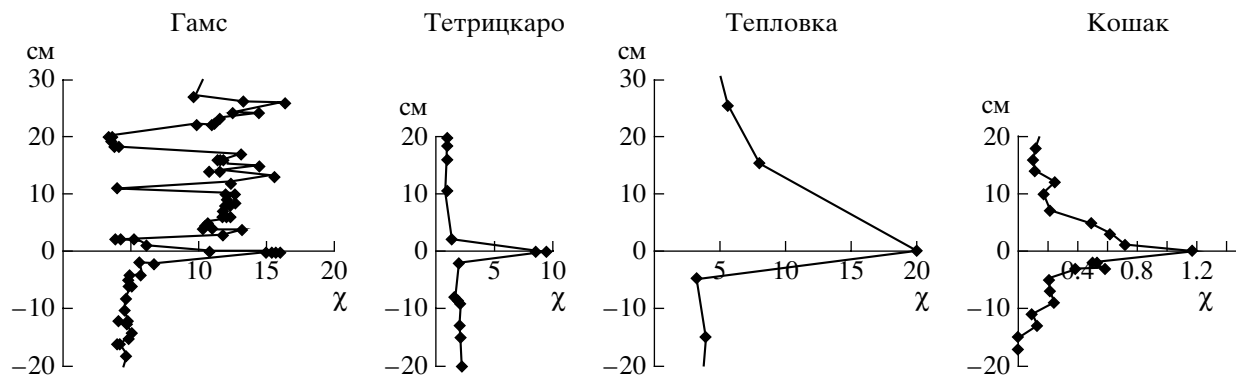


Рис. 1. Поведение магнитной восприимчивости ( $\chi$ ,  $10^{-9}$  м<sup>3</sup>/кг) в разрезах Гамс, Тетрицаро, Тепловка и Кошак.

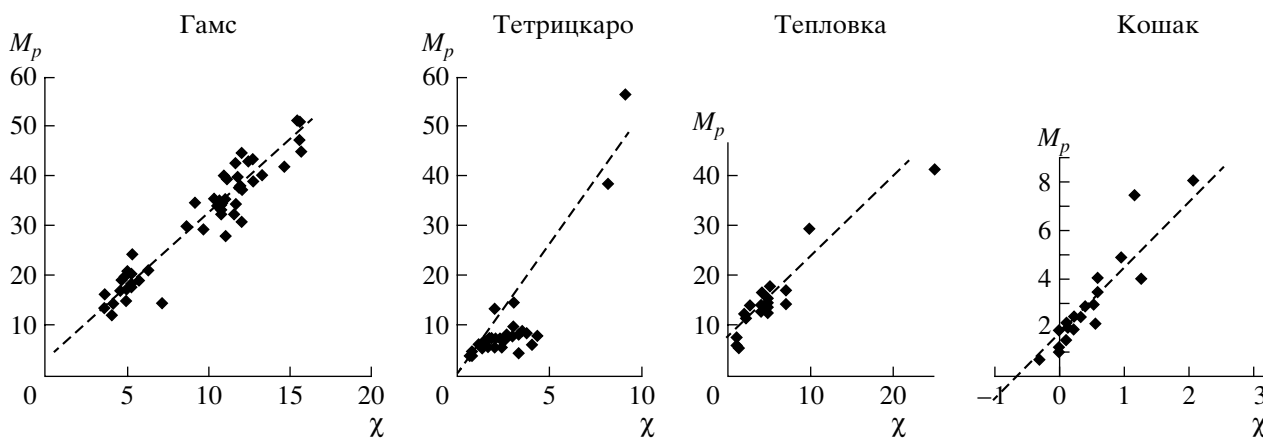


Рис. 2. Корреляция между магнитной восприимчивостью ( $\chi$ ,  $10^{-9}$  м<sup>3</sup>/кг) и парамагнитной намагниченностью ( $M_p$ ,  $10^{-3}$  Ам<sup>2</sup>/кг), разрезы Гамс, Тетрицаро, Тепловка и Кошак.

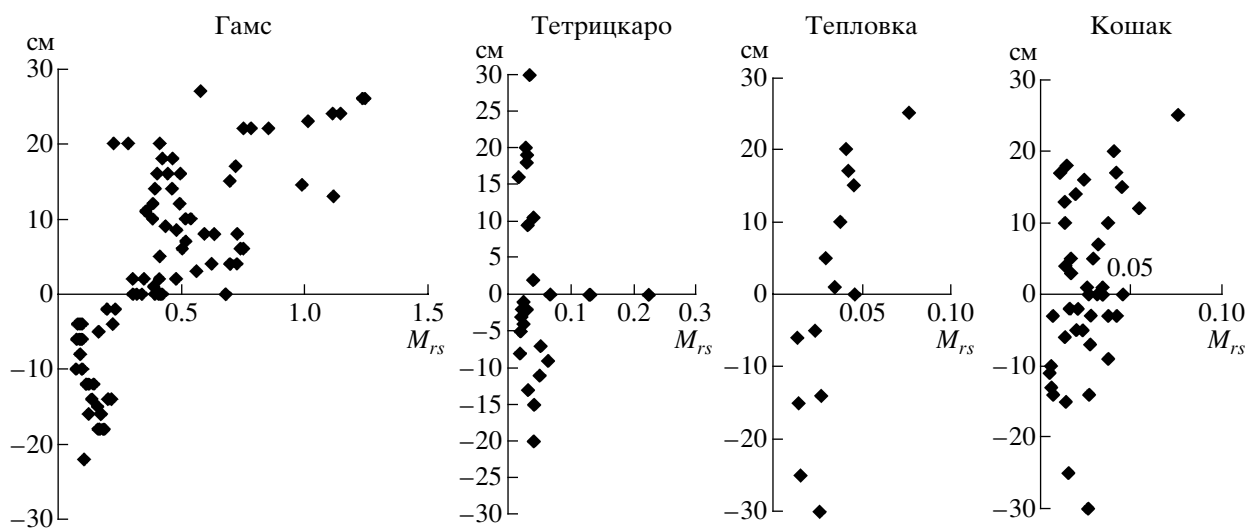


Рис. 3. Поведение остаточной намагниченности насыщения ( $M_{rs}$ ,  $10^{-3}$  Ам<sup>2</sup>/кг) в разрезах Гамс, Тетрицаро, Тепловка и Кошак.

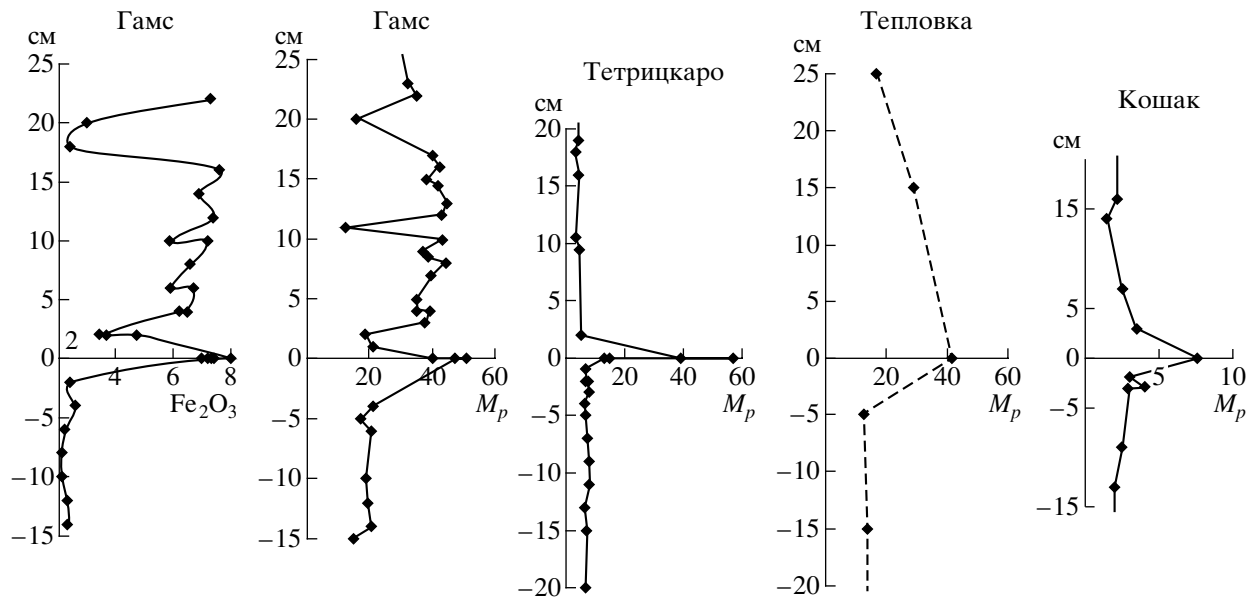


Рис. 4. Поведение парамагнитной намагниченности ( $M_p$ ,  $10^{-3}$  Ам<sup>2</sup>/кг) в разрезах Гамс, Тетрицкаро, Тепловка и Кошак и валового содержания железа в форме  $Fe_2O_3$  по данным химического анализа (Гамс) [Grachev et al., 2005].

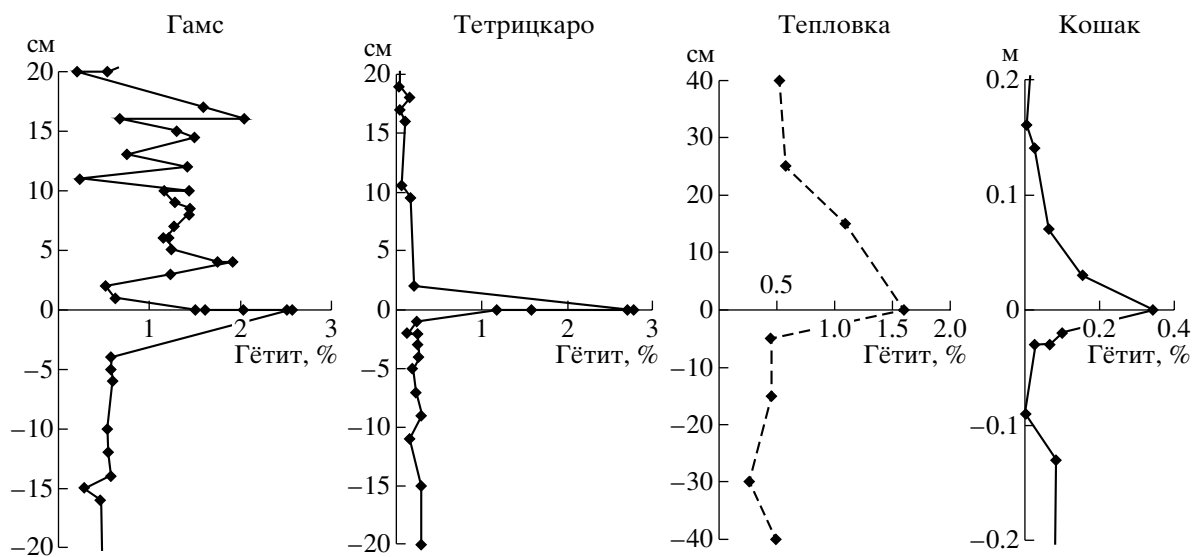


Рис. 5. Поведение гётита в разрезах Гамс, Тетрицкаро, Тепловка и Кошак.

ложение осадков на границе  $K/T$  начинается с резкого обогащения парамагнитными гидроокислами железа.

Рассмотрим поведение разных групп магнитных минералов в перечисленных разрезах.

**Гётит** (рис. 5). Во всех разрезах поведение гётита практически повторяет поведение парамагнитной намагниченности и содержания железа (рис. 4). Содержание гётита и величина парамагнитной намагниченности определены независимо, первое по вкладу магнитной фазы с  $T_c = 100-150^\circ\text{C}$  (гётита) в  $M_i(T)$ , второе по сочетанию  $M_{20}$  и  $M_{800}$  (см. Введе-

ние), поэтому такая корреляция свидетельствует об их тесной связи. Об этом же свидетельствует тесная положительная корреляция парамагнитной намагниченности и валового содержания железа в осадках разреза Гамс по данным химического анализа, а эта информация совершенно независима от петромагнитных оценок. Отсюда можно заключить, что парамагнитный материал состоит в первую очередь из гидроокислов железа. Следовательно, обогащение гидроокислами железа, как в парамагнитной, так и слабой фер-

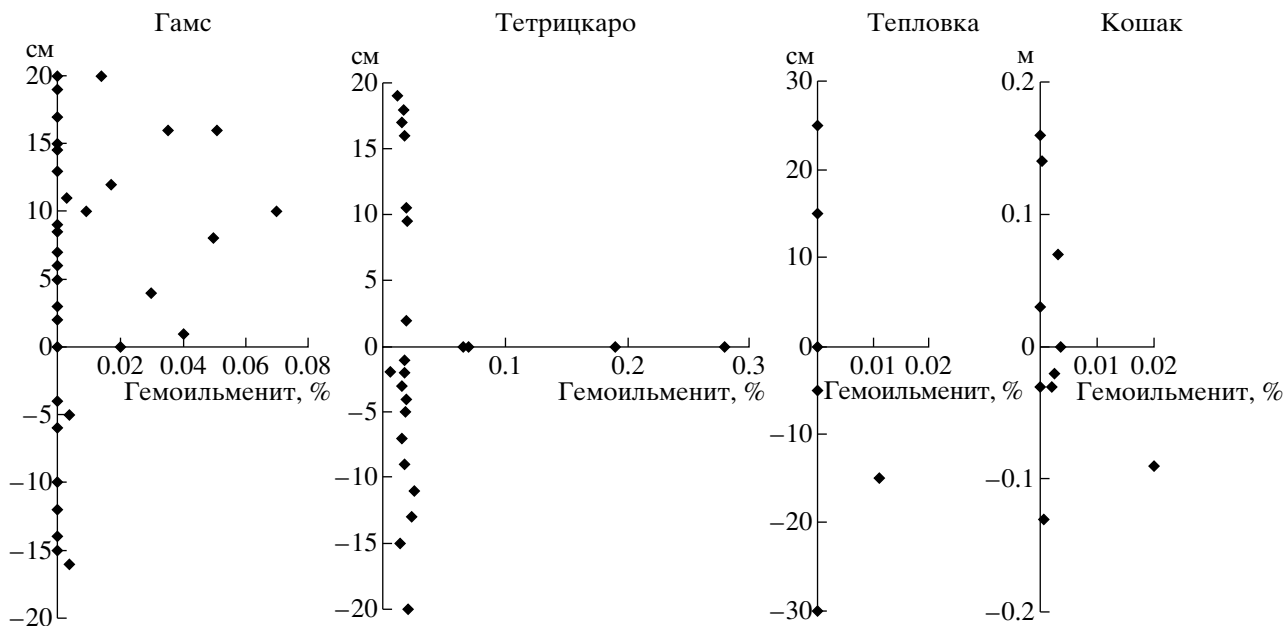


Рис. 6. Поведение гемоильменита в разрезах Гамс, Тетрицкаро, Тепловка и Кошак.

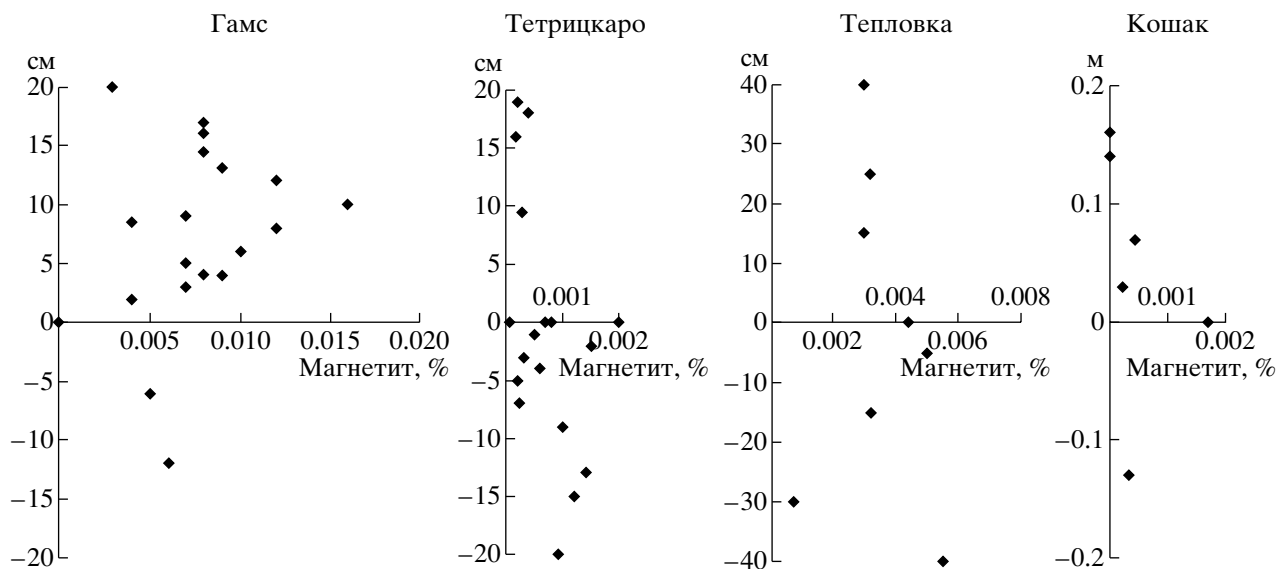


Рис. 7. Поведение магнетита в разрезах Гамс, Тетрицкаро, Тепловка и Кошак.

ромагнитной форме, закономерно происходит на границе *K/T*.

**Гемоильменит** (рис. 6). Гемоильменит присутствует в изученных осадках в виде тонких ламелей в ильмените [Pechersky et al., 2006]. Его содержание в разных разрезах различно, отражая разную степень окисления ильменита, т.е. разные местные условия появления гемоильменита. Только в разрезе Тетрицкаро содержание гемоильменита резко растет в пограничном слое, где его содержание достигает 0.3%, тогда как в остальной

части разреза Тетрицкаро и других разрезах оно менее 0.05%.

**Магнетит** (рис. 7). Содержание магнетита варьирует в широких пределах, примерно от 0.0005 до 0.02%, отчасти согласуясь с литологическими особенностями разрезов: более высокие его концентрации в песчано-глинистых отложениях. Несколько выделяются относительно повышенным содержанием магнетита пограничные слои в разрезах Тетрицкаро и Кошак. В общем, как и в слу-

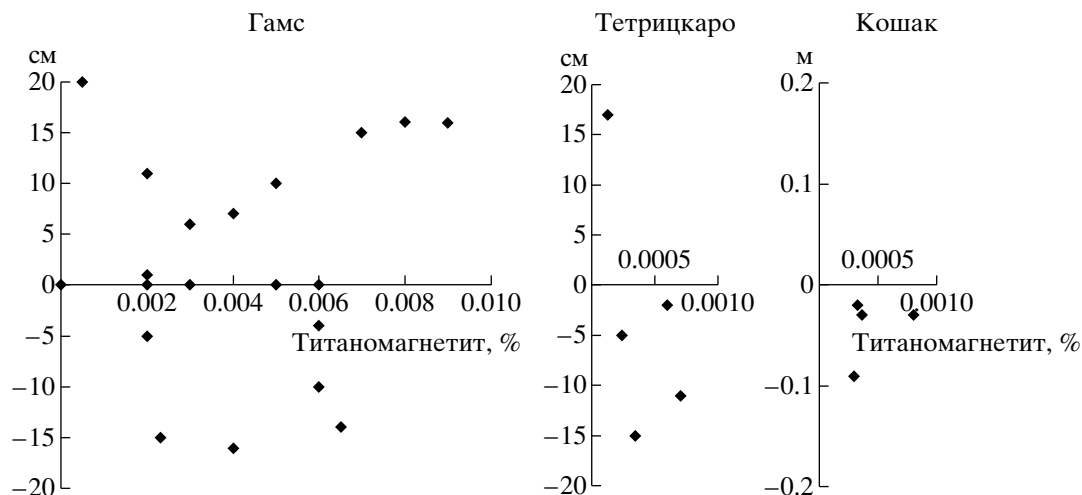


Рис. 8. Поведение титаномагнетита в разрезах Гамс, Тетрицкаро и Кошак.

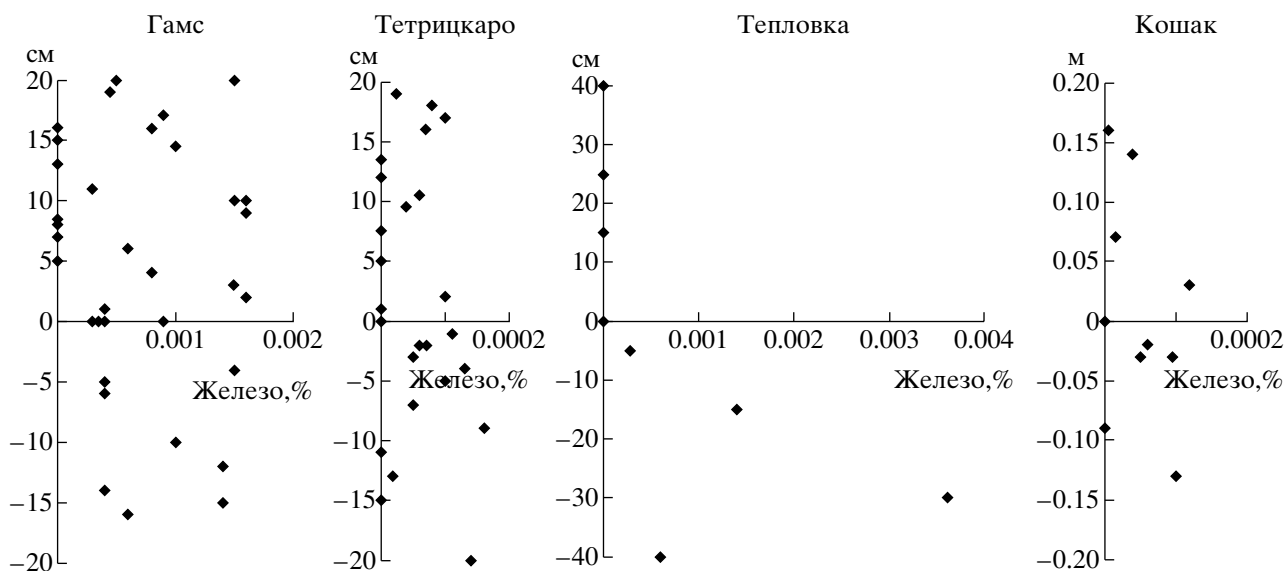


Рис. 9. Поведение металлического железа в разрезах Гамс, Тетрицкаро, Тепловка и Кошак.

чае гемойльменита, содержание магнетита не является закономерным признаком границы  $K/T$ .

**Титаномагнетит** (рис. 8). Еще меньше ощущается литологический контроль в накоплении зерен титаномагнетита. Его содержание широко варьирует от разреза к разрезу. Так, в разрезе Тепловка титаномагнетит не обнаружен, в разрезах Тетрицкаро и Кошак его содержание менее 0.001% в отложениях маастрихта, а в отложениях дания он не обнаружен, в разрезе Гамс оно колеблется от менее 0.001 до 0.01% независимо от литологии. Титаномагнетит, очевидно, вулканического происхождения, его состав типичен для базальтов [Grahev et al., 2005]

**Металлическое железо** (рис. 9). Содержание металлического железа широко варьирует от разреза к разрезу. Так, в разрезах Тетрицкаро и Кошак его содержание менее 0.0002%, в разрезе Гамс колеблется от менее 0.0001 до 0.0015%, в этих трех разрезах распределение железа довольно равномерно, а в разрезе Тепловка в отложениях маастрихта, близ границы  $K/T$  содержание железа достигает ~0.004%, при этом в отложениях дания оно вообще не обнаружено. Таким образом, и про металлическое железо можно сказать об отсутствии какой-либо единой закономерности в его распределении, в частности – о приуроченности к границе  $K/T$ . Частицы металлического железа в изученных осадках, очевидно, космического происхождения.

**Металлический никель и его сплав с железом.** В верхней части пограничного слоя разреза Гамс в единичных кусочках обнаружены металлический никель и его сплав с железом, как и металлическое железо, вероятнее всего, космического происхождения. В других разрезах никель вообще не обнаружен. Т.е. на сегодня это явление уникальное.

Таким образом, лишь обогащение гидроокислами железа можно рассматривать как глобальное закономерное явление, связанное с границей *K/T*. Все остальные магнитные минералы отражают происхождение этих минералов (например, космогенные шарики металлического железа и никеля, или вулканогенные зерна титаномагнетита) или местные особенности накопления терригенного материала (например, магнетита, ильменита). Магнитная слоистая текстура осадков свидетельствует о детритном отложении и гидроокислов железа и других магнитных минералов, причем для осадков разреза Гамс, обогащенных гидроокислами железа, характерна инверсионная магнитная текстура, что может быть связано исключительно с присутствием в осадках заметного количества кристаллического гётита [Pechersky et al., 2006].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из обобщения петромагнитных результатов по четырем разрезам эпиконтинентальных отложений, включающих границу мезозоя/кайнозоя, следует:

1) на границе *K/T* происходит резкое накопление гидроокислов железа и этот эффект носит, скорее всего, глобальный характер, он не связан с местными физико-географическими особенностями накопления терригенного материала в осадках. “Глобальный характер” не означает, что везде на границе *K/T* скапливаются гидроокислы железа. Это означает широкое проявление этого эффекта как на суше, так и в океане. И эта закономерность не имеет обратной силы, т.е. скопление гидроокислов железа в осадках происходит не только на границе *K/T*, но на границе мезозоя и кайнозоя это явление закономерное. Накопление гидроокислов железа, видимо, подобно процессу образования металлоносных осадков и железистых микроконкреций в результате вулканической и гидротермальной деятельности [Гурвич, 1998]. Этот процесс существенно отличается от терригенного накопления магнитных минералов. В пользу глобальности накопления гидроокислов железа на границе *K/T* говорит их синхронное накопление, по крайней мере, в пределах Европы, о чем свидетельствуют магнитостратиграфические данные: в разрезах Губбио (Италия) [Roschia et al., 1990], Гамс (Австрия) [Mauritsch, 1986] и Тетрицкаро (Грузия) [Adamia et al., 1993] граница *K/T* нахо-

дится внутри магнитохрона *S29g* практически на одном и том же уровне.

2) В отличие от гидроокислов железа накопление других магнитных минералов идет по-разному, очевидно, отражая происхождение этих минералов (космогенные шарики металлического железа и никеля или вулканогенные зерна титаномагнетита) или местные условия накопления терригенного материала (например, магнетита, ильменита); магнитная слоистая текстура осадков свидетельствует о детритном отложении и гидроокислов железа, и других магнитных минералов;

3) основание пограничного слоя на границе *K/T* (разрез Гамс) обогащено обломками титаномагнетита вулканического происхождения; возможно, совпадение времени накопления титаномагнетита и гидроокислов железа говорит об общем источнике их накопления, а именно, титаномагнетит – продукт разноса по воздуху и выпадения в виде осадка продуктов извержения вулканов, тогда как гидроокислы железа – продукт гидротермальной деятельности, связанной с тем же вулканизмом, что-то типа металлоносных осадков; при этом процесс эруптивной деятельности короткий, а накопление гидроокислов железа более растянуто во времени;

4) скачок накопления гидроокислов железа в пограничном слое не имеет отношения к импактным событиям. Так, в разрезе Гамс признаки импактного события (появление металлического никеля и сплава с железом, аномалия содержания иридия) приходятся на верхи пограничного слоя на границе *K/T*, тогда как скачок накопления гидроокислов железа и титаномагнетита приходится на основание этого слоя, в разрезе Тетрицкаро аномалия содержания иридия приходится на низы пограничного слоя. Более того, резкий рост содержания гидроокислов железа отмечен во всех перечисленных разрезах, тогда как металлический никель отмечен только в разрезе Гамс. И ни в одном из изученных разрезов не отмечается обогащения на границе *K/T* частицами космогенного металлического железа. Таким образом, граница *K/T* не отмечается прямыми признаками импактного события.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Багин В.И., Гендлер Т.С., Авилова Т.А. Магнетизм  $\alpha$ -окислов и гидроокислов железа. М.: Изд. ИФЗ АН СССР. 1988. 180 с.
- Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука. 1971. 1032 с.
- Гурвич Е.Г. Металлоносные осадки Мирового океана. М.: Научный мир. 1998. 337 с.
- Молостовский Э.А. Скалярные магнитные характеристики пород как показатели условий седиментации. Использование магнетизма горных пород при геологической съемке / Под ред. Л.Е. Шолпо, Б.Ш. Русинова, М.Г. Илаева и др. Л.: Недра. 1986. С. 58–73.

- Нагата Т.* Магнетизм горных пород. М.: Мир. 1965. 348 с.
- Печерский Д.М., Нургалиев Д.К., Шаронова З.В.* Магнитолитологическая и магнитоминералогическая характеристика отложений на границе мезозоя и кайнозоя: разрез Кошак (Мангышлак) // *Физика Земли*. 2006. № 11. С. 99–112.
- Ямпольская О.Б., Пименов М.В., Фомин В.А., Гужиков А.Ю., Яковичина Е.В., Бронникова Ю.А.* Предварительные результаты изучения магнитных свойств пограничных отложений мела-палеогена Горного Крыма. Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент. Материалы Международного семинара. Казань: Изд-во Казанского ун-та. 2004. С. 276–279.
- Adamia Sh., Salukadze N., Nazarov M., Gongadze G., Gvartadze T., Kilasonia E., Asanidze B.* Geological events at the Cretaceous-Paleogen boundary in Georgia (Caucasus) // *Geologica Carpathica*. 1993. V. 23. № 3. P. 35–43.
- Ellwood B.B., MacDonald W.D., Wheeler C., Benoist S.L.* The K-T boundary in Oman: identified using magnetic susceptibility field measurements with geochemical confirmation // *EPSL*. V. 206. 2003. P. 529–540.
- Grachev A.F., Korchagin O.A., Kollmann H.A., Pechersky D.M., Tselmovich V.A.* A new look at the nature of the transitional layer at the K/T boundary near Gams, Eastern Alps, Austria, and the problem of the mass extinction of the biota // *Russ. J. Earth Sci.* 2005. V. 7. ES6001. doi:10.2205/2005ES000189.
- Mauritsch H.J.* Der Stand der palaomagnetischen Forschung in den Ostapfen // *Leobner Hefte für Angewandte Geophysik*. 1986. V. 1. P. 141–160.
- Pechersky D.M., Garbuzenko A.V.* The Mesozoic-Cenozoic Boundary: Paleomagnetic Characteristic // *Russian J. Earth Sci.* 2005. V. 7. № 2.
- Pechersky D.M., Grachev A.F., Nourgaliev D.C., Tselmovich V.A., Sharonova Z.V.* Magnetolithologic and magnetomineralogical characteristics of deposits at the Mesozoic/Cenozoic boundary: Gams section (Austria) // *Russ. J. Earth Sci.* 2006. V. 8. № 3. ES3001, doi: 10.2205/2006ES000204.
- Rocchia R., Boclet D., Bonte Ph., Jehanno C., Chen Y., Courtillot V., Mary C., Wezel F.* The Cretaceous-Tertiary boundary at Gubbio revisited: vertical extent of the Ir anomaly // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1990. V. 99. P. 206–219.