

УДК 550.382.3+551.217.24

А. Г. Зубов

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, 683 006;
e-mail: zubov@kscnet.ru

Использование методов термомагнитного анализа для идентификации вулканических пеплов

Опробуется термомагнитный метод с цифровой записью магнитной восприимчивости в процессе нагрева и охлаждения с целью выявления признаков для идентификации пеплов-маркёров, используемых при проведении тефростратиграфических работ. Кривые записи для пеплов разных извержений вулкана Шивелуч оказались похожими, значимых различий между ними выявить не удалось. Особенности формы кривых для разных вулканов позволяют их разделять. Опробованы различные способы определения точек Кюри.

Введение

Задача поиска и использования методов идентификации вулканических пеплов является актуальной и в настоящее время [2, 3, 7]. К сожалению, магнитные методы пока ещё не заняли в этой практике достойное место.

Ранее с целью поиска магнитных идентифицирующих признаков в ИВГиГ на универсальном вибромагнитометре производства ДВГУ нами были изучены температурные кривые индуктивной намагниченности $J_i(T)$ некоторых голоценовых вулканических пеплов, фракционированных по размерам зерна. За основу была взята идея о том, что магматические породы всегда содержат титаномагнетиты разнообразного состава, а значит и с разными температурами Кюри (T_C). Выбрав в качестве инструмента анализа индуктивную намагниченность, мы рассчитывали и на проявление эффекта Гопкинсона, выражающегося в наличии чёткого пика и резкого спада кривой в точке Кюри (рис. 1, тип 1, магнетит) на кривых $J_i(T)$. Этот эффект проявляется при термомагнитном анализе (ТМА) в слабых полях и повышает чувствительность метода. Из-за поломки вибромагнитометра довести работу до конца не удалось, но уже получившиеся результаты были опубликованы [5]. Правда, из-за ошибки редактора в статью вошла только часть демонстрационного рисунка, представляющего типы получившихся кривых. Приведём этот рисунок здесь полностью (рис. 1). К сожалению, в тех исследованиях удалось проанализировать, в основном, только самые тонкие фракции пеплов, которые нас интересовали, в первую очередь, из-за их наибольших ареалов рассеяния. Важный для наших целей результат заключался в обнаружении двух и более фаз магнетиков в некоторых изученных пробах пеплов (рис. 1, тип 3). Многофазность магнетиков в эффузивах камчатских вулканов была ранее выявлена О. М. Алыповой [1].

Позднее та же коллекция камчатских пеплов В. Ю. Кирьянова изучалась другими исследователями [4]. В качестве основного параметра для анализа они выбрали температурную кривую намагничен-

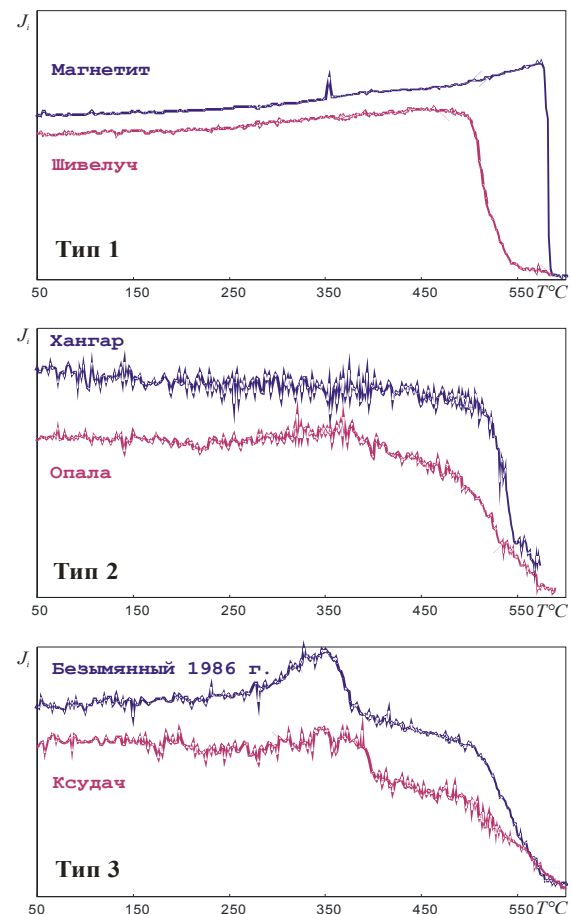


Рис. 1. Исправленный рисунок результатов ТМА пеплов по $J_i(T)$ из работы [5].

ности насыщения $J_s(T)$. Они выявили, что самая мелкая фракция пеплов непригодна для идентификации, поскольку титаномагнетиты в них оказались полностью разрушенными, по их мнению, ещё в момент остывания. Зато более крупные фракции пеплов дали отличающиеся для разных вулканов диапазоны T_C титаномагнетитов и специфические формы их термокривых. Магнитные минералы в пробах показали неплохую устойчивость к нагревам, которая проявлялась в стабильности кривых при повторных нагревах. Следует заметить, что при ТМА с такими параметрами как намагниченность насыщения J_s или остаточная намагниченность насыщения J_{rs} , величина T_C определяется как точка наивысшего спада на кривой $J_s(T)$ или $J_{rs}(T)$ или иначе, как точка минимума их производных $J'_s(T)$ или $J'_{rs}(T)$. Производные обычно получают аппаратными методами прямо на выходе измерительной установки. Стоит добавить, что преимущество ТМА по остаточным намагниченностям (к которым относится вышеупомянутая J_{rs}) в том, что результат отражает только доопытный минералогический состав проб. А при иных видах ТМА в процессе нагрева и охлаждения все новые температурные минералогические изменения магнетиков (преобразование, разрушение и синтез новых) тут же отражаются на кривых, что затрудняет анализ.

Исследованный этой командой такой магнитный структурно-чувствительный параметр как коэрцитивность H_c в качестве идентифицирующего был забракован. По результатам этого исследования становится понятным, почему в нашей работе [5] различия в результатах по разным пеплам были небольшими, кроме случаев с двумя явными пиками на кривых (рис. 1, тип 3). В мелких фракциях, которые, в основном, исследовались, всё подавляет магнетитовая компонента, образовавшаяся после выхода породы на поверхность.

Новые результаты

Поскольку в ИВиС и в сотрудничестве с другими организациями проводится немало работ с использованием тедфростратиграфического метода, где обязательно задействуются пеплы-маркёры, автор решил продолжить начатую работу по применению способов ТМА для идентификации маркирующих пеплов. На этот раз для диагностики был применён принадлежащий ВНИГРИ (Санкт-Петербург) чешский каппа-мост с печью, управляемой компьютером. Изучалась температурная зависимость начальной магнитной восприимчивости $\chi_0(T)$ некоторых маркирующих пеплов почвенно-пирокластического чехла района Ключевской группы вулканов при нагревах в воздушной среде. Из-за линейной связи $J_i = \chi_0 H$ в малых полях ранее полученные кривые $J_i(T)$ и новые $\chi_0(T)$ должны оказаться подобными.

Существует немало способов определения точки Кюри. Ввиду того, что результаты по ним получаются неоднозначные, будем называть практически получаемые точки просто критическими темпера-

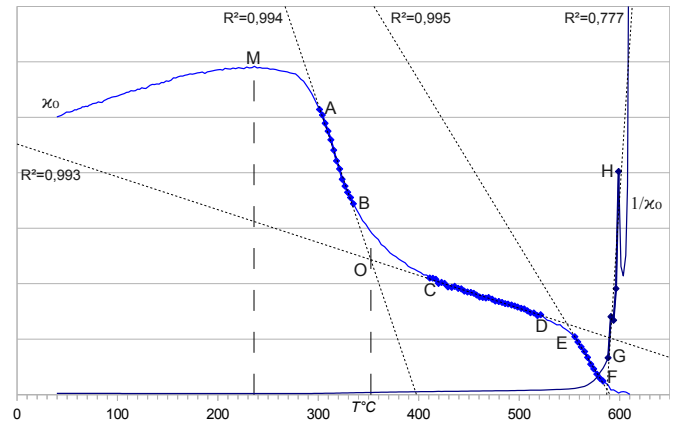


Рис. 2. Примеры графического анализа критических температур по записи 2-го охлаждения при ТМА пробы КС₁. R^2 — коэффициент детерминации для аппроксимируемого участка кривой. Комментарии в тексте на стр. 41.

турами, соответствующими теоретической точке Кюри, при которой ферромагнетик переходит в парамагнетик. Самый простой способ определения — по максимуму эффекта Гопкинсона на кривых $J_i(T)$ или $\chi_0(T)$ как в работе [11]. Но этот максимум в горных породах не всегда проявляется (например, рис. 1, тип 2). При таких исследованиях, чаще применяется метод касательных, предложенный авторами статьи [9], в котором используется прямолинейный участок резкого спада на кривой после пика Гопкинсона. Этот метод позволяет получать критические температуры нередко даже при присутствии нескольких магнитных фаз. И, наконец, для ТМА с помощью магнитной восприимчивости чешские исследователи рекомендуют использовать «парамагнитную» критическую точку, получаемую при линейной аппроксимации зависимости $1/\chi_0(T)$ на основании закона Кюри-Вейсса [10]. В последнем способе можно анализировать либо только единственную присутствующую магнетоминералогическую компоненту, либо существенную по вкладу компоненту с максимальной точкой Кюри. Все эти способы опробованы на полученных в этой работе кривых (пример на рис. 2), а результаты представлены в таблице на стр. 39.

Кривые трёх проб (Ш₂-низ, фракция 0,25–0,5 мм; Ш₂-верх, фракция 0,25–0,5 мм; Ш₃-верх, нефракционирована) продемонстрировали классическую форму эффекта Гопкинсона на кривой ТМА магнитной восприимчивости $\chi_0(T)$ (рис. 3 на стр. 40). Эти 3 пробы взяты из маркирующих отложений пепла вулкана Шивелуч, но пеплы принадлежат разным извержениям (Ш₂–Ш₃) или разным фазам одного извержения (низ или верх прослоя) с различной морфологией отложения. Действительно, такие формы кривых наблюдались в наших ранних исследованиях современных пеплов вулкана Шивелуч (рис. 1, тип 1, Шивелуч), проведённых по другому параметру.

Критические температуры, полученные по кривым ТМА разными методами.

пробы/ фракции	метод определения	1-ый нагрев	1-е охла- ждение	2-ой нагрев	2-е охла- ждение
Ш ₂ -низ 0,25–0,5 мм	максимум	422	428	423	423
	касательные ТМ	476	480	487	482
	1/ χ_0	510	510	520	515
	начало минер. изменений	459		нет	
Ш ₂ -верх 0,25–0,5 мм	максимум	424	412	417	415
	касательные ТМ	476	460	462	457
	касательные М	580	593	588	597
	1/ χ_0	550	574	565	570
Ш ₃ -верх нефракциони- рованная	максимум	429	398	426	431
	касательные ТМ	557	489	547	512
	касательные М	582	584	590	594
	1/ χ_0	нет	576	572	575
КС ₁ нефракциони- рованная	максимум	259	234	226	236
	касательные ТМ		345		352
	касательные М		590		590
	1/ χ_0		585		587
ОП 1–2 мм	начало минер. изменений	300		320	
	нет				

Методы определения критических температур: максимум — по максимуму эффекта Гопкинсона, касательные ТМ и касательные М — метод касательных для титаномагнетитовой и магнетитовой составляющих, 1/ χ_0 — парамагнитный метод. Ш₂, Ш₃, КС₁, ОП — обозначения маркирующих пеплов вулканов Шивелуч, Ксудач и Опала. Обозначения «низ» и «верх» — отбор из соответствующих морфологически разных частей горизонта.

Наличие небольших несовпадений кривых $\chi_0(T)$ нагрева и охлаждения, а также кривых повторных нагревов, говорящих о проходящих при высоких температурах слабых изменениях основных магнитных минералов, не мешает вести диагностику состава магнетиков. На всех трёх кривых при первом нагреве, а на кривых Ш₃ — и при втором, в той или иной степени проявляется температурный магнитный гистерезис (ТМГ), выражающийся в появлении петли на кривых из-за лёгких выгибаний кривой нагрева вверх, начиная с определённой температуры («начало минер. изменений» в таблице) и в отсутствии этого эффекта при охлаждении. Причина гистерезиса кроется в минералогических изменениях основного магнитного минерала титаномагнетита. После каждого следующего нагрева амплитуда ТМГ уменьшается, а величина χ_0 между прогревами варьирует, становясь то больше, то меньше предшествующей (рис. 3), что свидетельствует о прошедших небольших необратимых, ми-

нералогических изменениях, вероятно связанных с окислением. О минералогических изменениях говорит и то, что некоторые пробы после первого нагрева темнели, а после второго опять светлели. Большая минералогическая устойчивость пепла Ш₂ при первом нагреве и отсутствии температурного гистерезиса при втором нагреве, вероятно, связана с удалением из этих проб при фракционировании наименее устойчивой мелкой фракции.

Для анализа критических температур использовались результаты, получаемые по менее искажённым термоизменениями кривым охлаждения. В итоге обнаружилось, что критические температуры проб всех пеплов вулкана Шивелуч близки (Ш₂-низ → 480–482° С, Ш₂-верх → 460–457° С и Ш₃-верх → 489–512° С). То есть различия по критическим температурам внутри одного прослоя пепловых отложений примерно такие же, как различия между пробами пепла двух разных извержений одного конкретного вулкана. Для сравнения: грубая

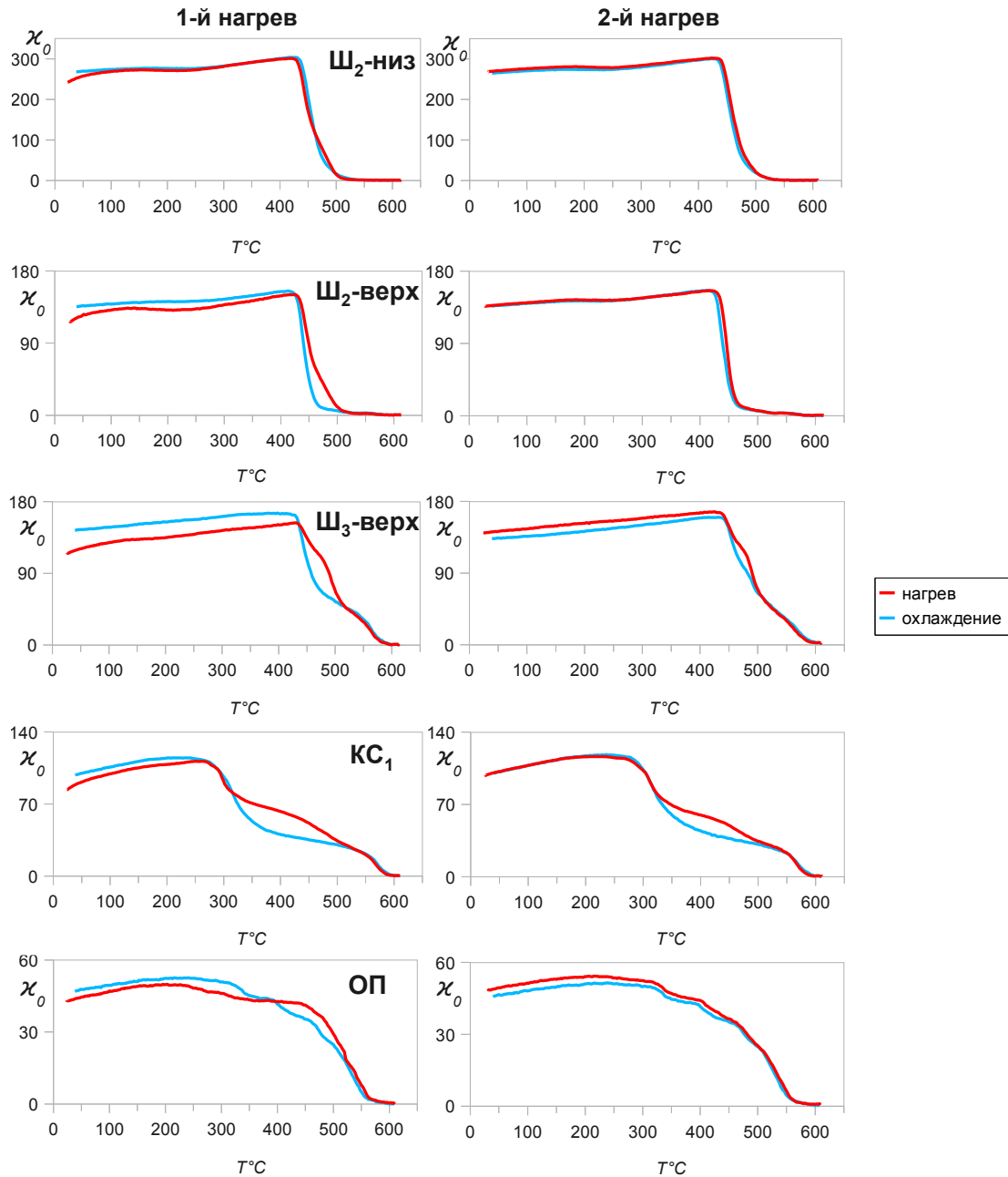


Рис. 3. Результаты ТМА маркирующих пеплов по $\chi_0(T)$. Левый столбец — первый цикл нагрева, правый — второй. Разъяснения обозначений см. в таблице на стр. 39. Размерность по оси χ_0 в условных единицах.

фракция шивелучских пеплов в работе [4] дала диапазон T_C 430–450° С. Исследованные пробы пеплов Ш₂ и Ш₃ существенно отличаются по присутствию магнетитовой составляющей (по справочным данным [8] у магнетита $T_C = 578^\circ$ С): довольно заметное содержание магнетитовой составляющей в Ш₃, слабо различимое в пробе Ш₂-верх, и не выделяемое в Ш₂-низ. Причина этого понятна, поскольку в изученных естественных пробах Ш₃, в отличие от фракционированных Ш₂, немало мелкой фракции, в которой титаномагнетитовая составляющая менее устойчива и легче переходит в формы, близкие к магнетиту. И ещё раз уместно обратить внима-

ние на то, что в отличие от проб пепла Ш₃, во втором нагреве пепла Ш₂ ТМГ уже не проявляется.

Отличия кривых ТМА маркирующего нефракционированного пепла КС₁ от кривых шивелучских пеплов заметны с первого взгляда. На кривых КС₁ не такой острый максимум, и критические температуры значительно ниже шивелучских (345–352° С). Такой же вид кривых получался и при наших предшествующих исследованиях тонкой (63–125 мкм) фракции (рис. 3, тип 3, Ксудач). А ведь довольно долго этот реперный горизонт в статьях вулканологов маркировался как Ш₄, и ошибочно относился к пеплам вулкана Шивелуч из-за внешней схожести

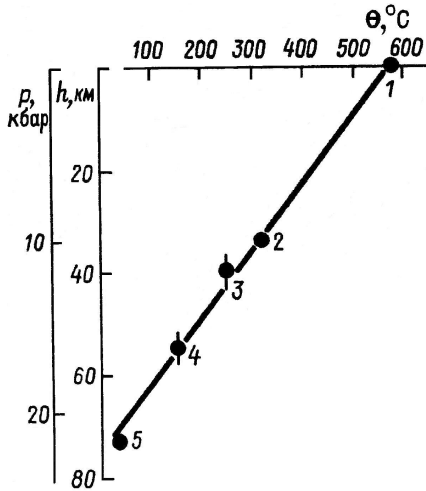


Рис. 4. Зависимость точек Кюри титаномагнетитов $T_C \equiv \Theta$ основных магматических пород от давления (глубины очага вулканов). 1 — магнетит; 2, 5 — опытные данные; 3, 4 — средняя глубина очага вулканов Толбачик и Килауэа по сейсмологическим данным. Взято из [8].

этих отложений и встречаемости $КС_1$ с довольно солидной мощностью во всём ареале распространения пеплов Шивелуча. На рис. 2 на примере кривой второго охлаждения продемонстрированы приёмы получения критических температур разными методами. Видно, что широкая вершина кривой даёт по методу максимума через точку M критическую температуру значительно ниже всех других. По методу касательных находится точка пересечения O аппроксимирующей прямой на самом крутом участке AB титаномагнетитового спада кривой и аналогичной прямой на самой пологой CD магнетитовой части кривой. Проекция этой точки O на температурную ось даёт титаномагнетитовую критическую температуру. А аппроксимирующая прямая на крутом магнетитовом участке EF даёт на пересечении с осью магнетитовую критическую температуру. Парамагнитный метод тоже даёт в точке пересечения аппроксимирующей прямой линейного участка GH кривой $1/\chi_0(T)$ с осью магнетитовую критическую температуру, близкую к предыдущей. Уместно опять обратить внимание на повторяющийся как у $Ш_3$ устойчивый ТМГ при втором нагреве (рис. 3, $КС_1$).

Кривая ТМА для пепла ОП (фракция 1–2 мм) не позволяет выделить другие магнетоминеральные составляющие кроме магнетита, но по особенностям на кривой можно сделать вывод о сложном составе магнитной фракции. После кривой первого прогрева все последующие кривые ТМА выглядят одинаково, и это означает, что практически все минералогические изменения произошли при первом нагреве и минералогический состав стабилизировался. Характерные небольшие четыре зубчика на стабилизировавшейся кривой могут стать идентифицирующими признаками для пепла вулкана Опала. На ме-

нее качественной записи ТМА предыдущих наших исследований тонкой фракции (63–125 мкм) такие особенности кривой не просматриваются (рис. 1, тип 2, Опала).

Из-за инертности минералогических изменений в магме состояние титаномагнетитов в выброшенном материале продолжает, в основном, соответствовать термодинамическим условиям их кристаллизации в глубине. Поэтому информация о точках Кюри входящих в состав магматических пород титаномагнетитов, может дать нам представления об условиях в очаге вулкана. Это даёт основания надеяться на использование температур Кюри титаномагнетитов в качестве геобарометра (рис. 4).

Список литературы

1. Алыпова О. М. Термомагнитное изучение вулканических пород Камчатки // Бюлл. вулканологических станций. 1969. № 45. С. 61–66
2. Базанова Л. И., Брайцева О. А., Дирксен О. В., Сулержицкий Л. Д., Данхара Т. Пеллопады крупнейших голоценовых извержений на траверсе Усть-Большерецк-Петропавловск-Камчатский: источники, хронология, частота. // Вулканология и сейсмология. 2005. № 6. С. 30–46
3. Брайцева О. А., Кирьянов В. Ю., Сулержицкий Л. Д. Маркирующие прослои голоценовой тephры восточной вулканической зоны Камчатки. // Вулканология и сейсмология. 1985. № 5. С. 80–96
4. Гендлер Т. С., Диденко А. Н., Кирьянов В. Ю., Земцов А. Н. Магнитная минералогия пеплов Камчатки; возможность идентификации вулканических событий // Тез. докл. VI международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». Москва, 3–5 октября 2005 г. М.: ИФЗ, 2005. С. 16–18
5. Зубов А. Г., Кирьянов В. Ю. О возможности использования термомагнитных параметров для идентификации вулканических пеплов. Сб. «Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы». ИВГиГ ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 2001. С. 267–273.
6. Храмов А. Н., Гончаров Г. И., Комиссарова Р. А. и др. Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. 312 с.
7. Braitseva O. A., Ponomareva V. V., Sulerzhitsky L. D., Melekestsev I. V., Bailey J. Holocene Key-Marker Tephra Layers in Kamchatka, Russia // Quaternary Research. J. 1997. Vol. 47. Pp 125–139
8. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во Ленингр. Ун-та, 1978. 592 с.
9. Grommé C. S., Wright T. L., Peck D. L. Magnetic properties and oxidation of iron-titanium oxide minerals in Alae and Makaopuhi lava lakes, Hawaii // J. Geophys. Res. 1969 Vol. 74. Pp 5277–5294.
10. Petrovský E., and Kapička A. On determination of the Curie point from thermomagnetic curves // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111. 10 p.
11. Wehland F., Alt-Epping U., Braun S., Appel E. Quality of pTRM acquisition in pyrrhotite bearing contact-metamorphic limestones: possibility of a continuous record of Earth magnetic field variations // Phys. Earth Planet. Inter. 2005. Vol. 148. Pp 157–173