

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Палеоинформативность естественной остаточной намагниченности некоторых траппов ЯкутииЖ. Р. Мбеле^а, В. И. Максимочкин, В. И. Трухин*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики Земли. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: ^а jr.mbele@physics.msu.ru*

Статья поступила 13.07.2011, подписана в печать 20.07.2011

Исследована возможность определения направления и величины древнего геомагнитного поля ($H_{ан}$) по естественной остаточной намагниченности (I_n) девяти ориентированных образцов траппов Мало-Ботуобинского района Якутии возрастом 260 млн лет.

Наклонение I_n пяти образцов (Пи-10, К-4, К-6, 315-13, Ки-2) было отрицательным, на четырех образцах (№ 334-5, 331-2, 315-11, 299-2) — положительным, т.е. совпадало с полярностью современного геомагнитного поля в этом районе.

Ферримагнитная составляющая образцов с обратной полярностью I_n оказалась довольно разнообразной: были выявлены образцы К-4 и К-6 с низкими точками Кюри ($T_c \approx 200^\circ\text{C}$) ферримагнитной фазы, образец Ки-2 содержал однофазно-окисленный титаномагнетит с $T_c \approx 310^\circ\text{C}$, образец Пи-10 с $T_c = 540^\circ\text{C}$.

Сделан вывод, что первичная остаточная намагниченность первых двух образцов образовалась в поле обратной полярности. Эти образцы также могут использоваться для определения палеонапряженности ГМП. Свойства траппов, содержащих однофазно-окисленный титаномагнетит (обр. Ки-2) и распавшийся титаномагнетит (обр. Пи-10), требуют дополнительных исследований.

На образцах с положительной полярностью I_n обнаружено явление самообращения при терморазмагничивании естественной остаточной намагниченности, обусловленной, вероятно, наличием в ферримагнитных зернах структур распада титаномагнетита. Палеоинформативность I_n этих образцов вызывает сомнение.

Ключевые слова: геомагнитное поле, палеонапряженность, траппы, самообращение, метод Телье.

УДК: 550.384. PACS: 91.25.-г, 91.25.N-, 91.25.Ng.

Введение

Горные породы во время своего образования намагничиваются в геомагнитном поле ($H_{ан}$), которое было в это геологическое время. Содержащиеся в горных породах, в небольших количествах магнитоупорядоченные минералы, обнаруживающие свойства «магнитной памяти», приобретают естественную остаточную намагниченность (I_n), которая несет информацию о направлении и напряженности древнего геомагнитного поля ($H_{ан}$) эпохи образования породы [1]. Зная величину и направление первичной I_n породы, можно решать обратную задачу о величине и направлении древнего геомагнитного поля. Палеомагнитные исследования, выполненные в последние пятьдесят лет, дали информацию о намагничивании древних горных пород, возраст которых достигал 400 млн лет, и прежде всего о направлении их намагниченности относительно направления современного геомагнитного поля (ГМП). Было обнаружено, что направление намагниченности древних горных пород изменялось от направления, близкого к современному ГМП, до противоположного направления. Такие палеомагнитные данные имели глобальный характер. Был сделан вывод о том, что различные направления намагниченности древних горных пород вызваны тем, что ГМП начиная с древних времен

(400–600 млн лет назад) и до наших дней изменяло свою полярность с такой же периодичностью, которая наблюдалась на направлении намагниченности горных пород разного возраста [2–4].

Наблюдаемое на поверхности Земли современное ГМП может быть создано электрическим током, текущим в ядре Земли, интенсивностью в 600 млн ампер. В процессе переплюсовки (инверсии ГМП) такой громадный ток должен изменить направление на противоположное. Для этого необходима огромная энергия. Откуда берется эта энергия, пока совершенно неясно.

Исследования магнитных свойств ферримагнитных минералов горных пород показали, что ферримагнитные минералы, входящие в состав горных пород, могут обладать таким свойством, как намагничивание против намагничивающего поля. Этот эффект наблюдается на некоторых горных породах при их лабораторном термонамагничивании. Явление намагничивания ферримагнетиков антипараллельно намагничивающему полю называется «самообращением намагниченности». Таким образом, следует проводить специальные исследования, чтобы определить причину обращенной по отношению к современному ГМП намагниченности горных пород: за счет инверсий ГМП или «самообращения намагниченности»?

Исследование инверсий ГМП в режиме реального времени невозможно в связи с тем, что, согласно палеомагнитным данным, смена полярности ГМП происходит один раз в 0.5–1.0 млн лет, а продолжительность инверсии составляет около 5000 лет. Это стало поводом для проведения тщательных исследований альтернативного инверсиям ГМП механизма образования антипараллельной самообращенной намагниченности горных пород. В зависимости от вероятности существования явления «самообращения намагниченности» горных пород можно будет рассчитать вероятность действия инверсий ГМП.

Многочисленные исследования по магнетизму горных пород свидетельствуют о том, что в течение геологической жизни породы ее первичная намагниченность может изменяться как за счет магнитовязких процессов, так и за счет химических процессов в ферримагнитных минералах — носителях I_n .

Важной задачей при определении характеристик $H_{ан}$ является оценка природы I_n и доказательство ее палеоинформативности. При решении задачи определения характеристик древнего геомагнитного поля существенной проблемой, как уже было отмечено, является доказательство соответствия направления первичной намагниченности горных пород с направлением $H_{ан}$. Известно, что при лабораторном моделировании явления термонамагничивания горные породы иногда намагничиваются антипараллельно приложенному полю, т.е. наблюдается самообращение намагниченности [5, 6]. Решение этой проблемы на конкретных образцах определенного возраста позволяет ответить на вопрос, является ли обратная намагниченность древних горных пород свидетельством их образования в геомагнитном поле обратной полярности или она образовалась в процессе самообращения.

Настоящая работа посвящена изучению возможности определения величины и направления древнего магнитного поля ($H_{ан}$) по естественной остаточной намагниченности I_n траппов Якутии и относится к циклу ранее опубликованных нами работ, посвященных исследованию особенностей намагничивания ферримагнитных минералов.

1. Магнито-минералогические свойства траппов Якутии (по литературным данным)

Подробное изучение траппов Мало-Ботубинского района Якутии проводилось ранее [7]. В этом районе наблюдается неоднородное и сложное аномальное геомагнитное поле, обусловленное особенностями строения и намагниченностью трапповых образований. Определение параметров, характеризующих естественное магнитное состояние ферримагнитной фракции траппов, было проведено без ее выделения из породы. Для оценки характера доменной структуры зерен ферримагнитной фракции траппов использовалось отношение остаточной намагниченности насыщения к намагниченности насыщения I_{rs}/I_s . Согласно работе [7], в изученных траппах наблюдались значительные колебания величин магнитных параметров. По особенностям ферримагнитной фракции траппы были разделены на пять групп.

Первая группа состояла из образцов траппов, содержащих титаномагнетит со структурами распада (самая поздняя стадия распада), который при термообработке до точки Кюри T_c подвергается регомогенизации, и ильменитом, не обладающим ферримагнитными свойствами при комнатной температуре. Эта группа образцов характеризовалась высокими значениями остаточной намагниченности насыщения I_{rs} , отношения к намагниченности насыщения I_{rs}/I_s , коэрцитивной силы H_c , остаточной коэрцитивной силы H_{cr} .

Образцы второй группы, кроме того, содержат хромшпинелиды, возможно, не обладающие магнитными свойствами в естественном состоянии. На основе минералогического анализа [7] было также обнаружено наличие сульфидов железа, которые при нагреве могут превращаться в магнетит, а ферришпинелиды обогащаются ионами железа, т.е. имеют более сложный состав ферримагнитной фракции. Траппы данной группы имели выпуклые кривые $I_s(T)$ как при нагреве, так и при охлаждении, причем кривые $I_s(T)$ имели точку пересечения в области низких температур. Кривая охлаждения в основном идет выше кривой нагрева. Величины I_n , Q_n и I_s для траппов данной группы максимальны.

Образцы третьей группы содержат титаномагнетит в состоянии незавершенного распада (самая ранняя стадия) твердого раствора и ильменит. Термообработка также приводит такие образцы к регомогенизации твердых растворов. Данные образцы имеют вогнутые кривые $I_s(T)$ как при нагреве, так и при охлаждении, причем кривые $I_s(T)$ при охлаждении идут ниже кривых нагрева.

Образцы четвертой группы испытали однофазное окисление титаномагнетита в природных условиях и поэтому содержат титаномагнетит. У этих образцов не было обнаружено сульфидов железа.

В ферримагнитную фракцию образцов пятой группы кроме ильменита входит титаномагнетит в стадии незавершенного распада (промежуточная стадия между первой и третьей стадиями), но эта стадия более поздняя, чем у образцов третьей группы. Большинство образцов группы 5 характеризуются вогнутыми кривыми $I_s(T)$ при их нагреве и охлаждении.

Таким образом было установлено, что основным компонентом ферримагнитной фракции траппов следует считать титаномагнетит на различных стадиях распада твердого раствора, от самой ранней (более редко) до более поздней стадии, что и отражает специфику формирования траппов в их последующей геологической истории.

В этой же работе [7] траппы Мало-Ботубинского района были разделены на петромагнитные комплексы (ПМК1 и ПМК2), образцы которых имели разную полярность I_n (n — погнал) соответственно по отношению к современному ГМП.

Однако природа I_n не была изучена, не была оценена сохранность первичной остаточной намагниченности траппов. Остается неясным, насколько величина и направление I_n отражают величину и направление $H_{ан}$.

Определение $H_{ан}$ по I_n траппов, ферримагнитная фракция которых сильно изменена, проблематично

и требует дополнительных, более тщательных исследований.

2. Объекты и методы исследования

Для выяснения возможности определения параметров древнего геомагнитного поля по траппам Якутии были исследованы ориентированные образцы траппов (№ Пи-10, К-4, 334-5, К-6, 315-13, Ки-2, 331-2, 299-2 и 315-11), имеющие возраст 260 млн лет [7] и отобранные на территории от г. Чернышевский до г. Мирный (Мало-Ботуобинский район). Проводилось определение параметров, характеризующих естественное магнитное состояние ферромагнитной фракции траппов без ее выделения из породы: естественная остаточная намагниченность I_n , начальная магнитная восприимчивость χ_0 , фактор Кенигсбергера $Q_n = I_n/(\chi_0 H_r)$, где $H_r = 40$ А/м (r — reverse). Исследовались свойства I_n путем размагничивания образцов переменным магнитным полем. Был проведен фазовый термомагнитный анализ и оценены точки Кюри T_c ферромагнитной фазы образцов.

Для оценки доменной структуры также определялись магнитные параметры насыщения (I_s и I_{rs}) и коэрцитивные параметры (H_c и H_{cr}).

3. Приборы и методика экспериментов

Измерения величины и направления остаточной намагниченности образцов относительно выбранной системы координат при комнатной температуре проводились на магнитометре JR-6 на ориентированных образцах, где направление оси x совпадало с направлением горизонтальной составляющей ГМП в месте отбора образцов. Величина магнитной восприимчивости χ_0 измерялась на приборе KLY-2. Точка Кюри определялась по кривым зависимости намагниченности от температуры (по пересечению прямой резкого спада намагниченности с осью температур) в магнитном поле $H = 0.24$ Тл и в слабом поле $H = 0.25$ мТл. Образец предварительно размагничивался переменным магнитным полем $h_{\max} = 80$ мТл, т.е. приводился в нулевое состояние (НС).

Гистерезисные и термомагнитные свойства исследовались на вибрационном магнитометре ВМА-1 [8].

H_c и H_{cr} определялись по «спинке» размагничивания петли гистерезиса после предварительного намагничивания образца в поле $H = 0.4$ Тл. С помощью микровеберметра по методу Вейса и Форрера измерялась намагниченность насыщения I_s в поле $H = 0.4$ Тл.

4. Результаты исследований

Естественные параметры I_n , χ_0 и Q_n представлены в табл. 1, а параметры насыщения I_s , I_{rs} и H_c , H_{cr} — в табл. 2. Точки Кюри, полученные по термовисимостям намагниченности $I(T)$ в сильно магнитном поле $H = 0.24$ Тл и в поле $H = 0.25$ мТл (рис. 3 и 4 соответственно), представлены в табл. 2.

Таблица 1

Естественные магнитные характеристики траппов Якутии

Траппы	$I_{nx}/I_{ny}/I_{nz}$, А/м I_n , А/м	Полярность	χ_0 , 10^{-2} ед. СИ	Q_n
ПИ-10	0.156/−0.359/−1.655 1.701	R	0.94	4.52
К-4	1.14/1.95/−5.05 5.527	R	1.95	7.06
334-5	−0.2/2.39/6.41 6.844	N	3.00	5.7
К-6	1.853/−1.275/−1.447 2.674	R	3.3	2.03
315-13	1.86/−8.22/0.53 8.44	?	3.47	6.08
Ки-2	0.605/−0.001/−1.183 1.328	R	0.83	3.99
331-2	−0.12/0.19/4.4 4.409	N	1.58	6.99
299-2	−0.97/6.01/6.55 8.942	N	2.69	8.30
315-11	0.87/0.69/2.18 2.447	N	2.15	2.85

Таблица 2

Магнитные характеристики траппов Якутии

Траппы	I_{rs} , А/м	I_s , А/м	H_{cr} , мТл	H_c , мТл	I_{rs}/I_s	H_{cr}/H_c	$h_{1/2}$, мкТл	$T_{c, \max}$, °С (при нагр., $H = 0.25$ мТл)	$T_{c, \max}$, °С (при нагр., $H = 240$ мТл)
ПИ-10	174	2035	20.4	9.6	0.09	2.13	13	542	540
К-4	312	2613	13.9	6.2	0.12	2.23	14	300	195
334-5	449	4565	17.3	8.8	0.1	1.98	11.5	517	520
К-6а	426	2943	8.9	3.8	0.15	2.34	10.5	234	190
315-13	402	6050	14.0	6.2	0.07	2.25	6.5	492	420
Ки-2	306	2283	15.3	11.0	0.13	1.39	13.5	500	310
331-2	753	4125	49.6	28.2	0.18	1.76	35.5	528	350
299-2	228	3410	11.7	5.0	0.07	2.36	3.5	295	275; 580
315-11	418	4125	18.5	10.6	0.10	1.75	—	—	480

4.1. Естественная остаточная намагниченность и ее свойства

В табл. 1 указана величина I_n и ее составляющие по осям x, y, z (I_{nx}, I_{ny}, I_{nz}), которые позволяют определить направление I_n породы в выбранной системе координат относительно современного поля. Величины I_n изученных образцов варьируют от 1.33 А/м до 8.94 А/м, а величины χ_0 — от $0.83 \cdot 10^{-2}$ до $3.47 \cdot 10^{-2}$ ед. СИ. Фактор Кенигсбергера меняется от 2.03 до 8.30. Будем считать, как в работе [7], что если z -компонента положительна, то I_n таких пород имеет нормальную полярность (образцы N-типа); если z -компонента отрицательна, образцы будут R-типа. Как видно из табл. 1, образцы траппов Пи-10, К-4, К-6 и Ки-2 имеют обратную полярность I_n (R-типа), т.е. z -компонента перечисленных образцов траппов отрицательна. Образцы 334-5, 331-2, 299-2, и 315-11 имели положительную z -компоненту I_n , т.е. образцы N-типа. Образец 315-13 имел положительную компоненту z . Однако его восточная y -компонента отрицательна, причем $|I_{ny}| \gg |I_{nz}|$. Вероятно, направление горизонтальной составляющей ГМП было нанесено на образцы этого номера неправильно.

На рис. 1 представлены кривые разрушения I_n в относительных единицах (I_{nr}/I_{no}) при размагничивании образцов переменным магнитным полем. Видно, что все образцы траппов после воздействия переменного магнитного поля с максимальной амплитудой $h_{max} = 80$ мТл размагничиваются на 90–95%. Диаграммы Зейдервильда, полученные при размагничивании образцов переменным магнитным полем, представлены на рис. 2.

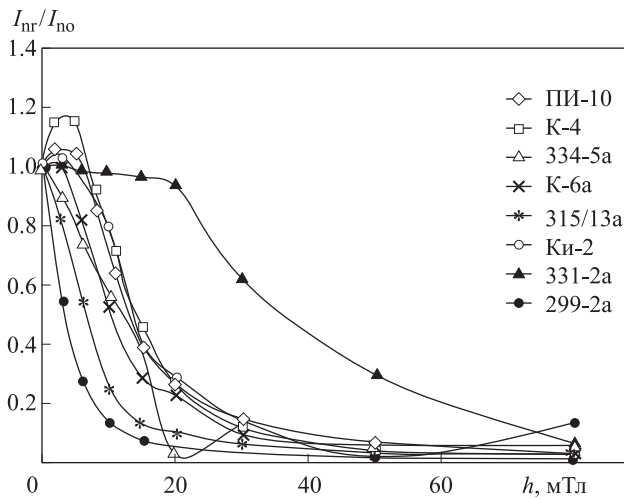


Рис. 1. Кривые разрушения I_n в относительных единицах при размагничивании образцов траппов Якутии переменным магнитным полем

В начале процесса размагничивания I_n (в интервале $h = 4-5$ мТл, рис. 1) для образца К-4 (образец R-типа) заметно увеличение значения остаточной намагниченности на 18%. Вероятно, это связано с размагничиванием компоненты намагниченности, направленной противоположно общему вектору намагниченности. По-видимому, данная намагниченность имеет вязкую природу, поскольку неустойчива и после воз-

действия переменного поля $h = 8$ мТл (рис. 1 и 2, б) размагничивается. Образцы Пи-10 и Ки-2, вероятно, также имеют неустойчивую компоненту намагниченности вязкой природы (рис. 1, 2, а, е), но ее вклад меньше (5–7% от I_n), чем для образца К-4. Наиболее вероятное направление вязкой намагниченности I_{rv} соответствует современному направлению ГМП. На образце 334-5 также была обнаружена (рис. 1 и 2, в) обратная по отношению к основной части естественной остаточной намагниченности компонента I_n , однако эта компонента более устойчива и размагничивается при $h = 40$ мТл.

Для образца К-6 (рис. 2, е) можно предполагать, что существует магнитомягкая компонента намагниченности I_n , которая направлена обратно общему вектору намагниченности и разрушается уже после воздействия размагничивающего поля примерно в 6 мТл.

Образец 331-2 отличается от всех других большей устойчивостью ее I_n при размагничивании переменным полем. Действительно, поле $h_{1/2}$, в котором разрушается половина I_n , равно 35.5 мТл (табл. 2), тогда как значение $h_{1/2}$ для всех других образцов меньше 14 мТл. Образец 331-2 также имеет наибольшее значение коэрцитивной силы ($H_c = 28.2$ мТл, табл. 2).

Как видно из диаграмм Зейдервильда (рис. 2), образцы 334-5 и 331-2 (рис. 2, в, ж) имеют однокомпонентную намагниченность, которая плавно размагничивается при увеличении значения размагничивающего переменного поля.

На образцах 315-13, Ки-2 и 299-2 (рис. 2, д, е, и) вклад в I_n вязкой и менее стабильной компоненты более значителен, чем для остальных изученных в работе образцах.

4.2. Результаты термомагнитного анализа. Гистерезисные характеристики

Для оценки фазового состояния ферромагнитной фракции был проведен термомагнитный анализ исследуемых образцов. Снимались зависимости намагниченности от температуры при нагреве образцов от комнатной температуры до 600°С и их охлаждения в полях $H = 0.24$ Тл и $H = 0.25$ мТл. Результаты представлены на рис. 3 и 4.

Рассмотрим сначала образцы R-типа. Как видно из рис. 3, е, в образце Ки-2 имеется ферромагнитная фаза с точкой Кюри $T_c = 310$ °С. После нагрева образца до 600°С намагниченность насыщения увеличивалась в 2 раза, а зависимость $I_s(T)$ имела выпуклую форму. Такое поведение $I_s(T)$ характерно для титаномаггемита, при нагреве которого выше 400°С происходит его распад и однофазное окисление с образованием фазы, близкой по составу к магнетиту. Точка Кюри образованной в результате лабораторного нагрева ферромагнитной фазы оказалась равной 560°С. Данный образец может быть отнесен к четвертой группе траппов, согласно классификации [7]. Таким образом, согласно термомагнитному анализу, можно сделать вывод, что исходная ферромагнитная фаза образца Ки-2 *in situ* была подвергнута низкотемпературному однофазному окислению, в результате которого первичная I_{no} могла сильно измениться. Вероятно, эти образцы не могут быть использованы для определе-

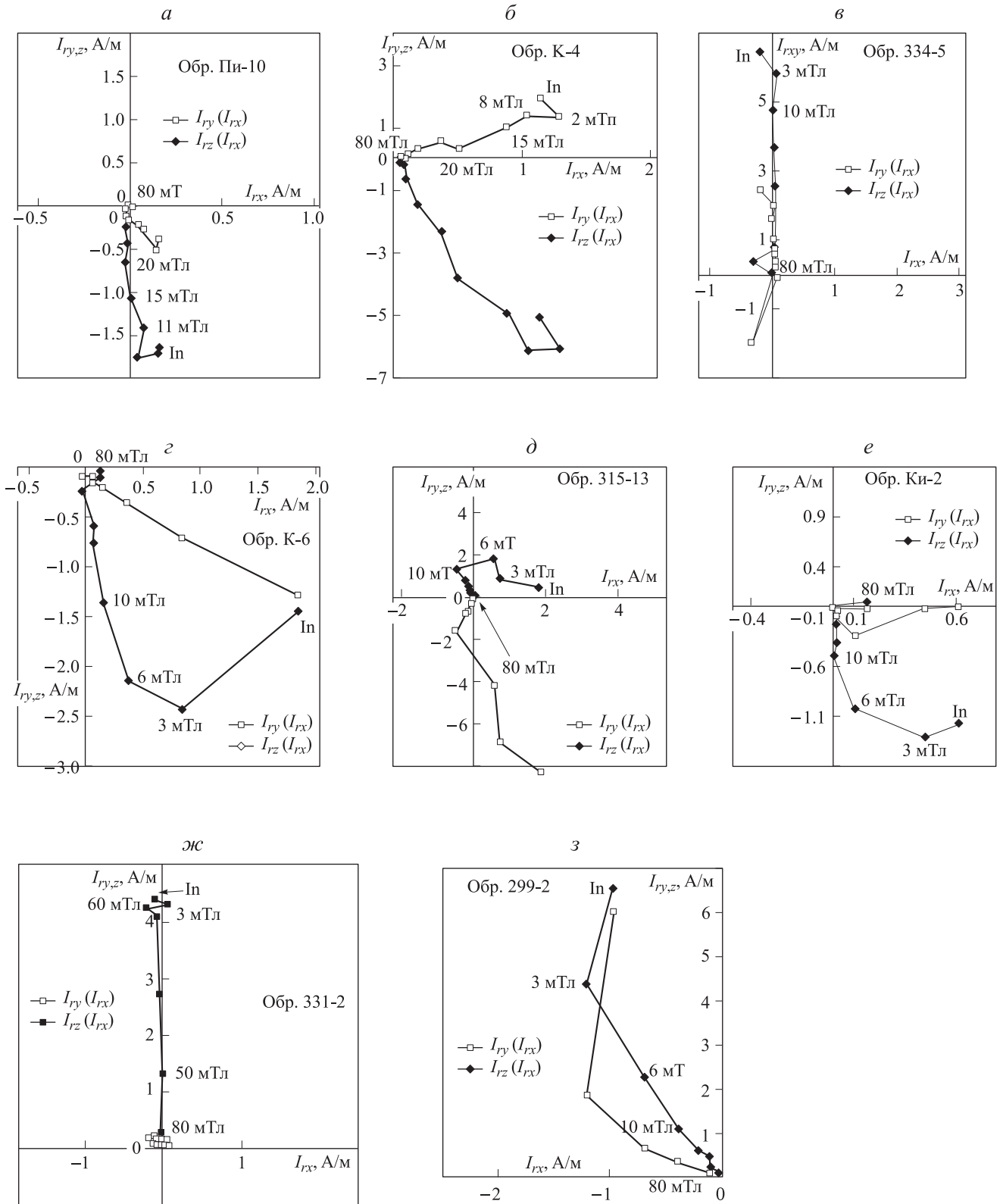


Рис. 2. Диаграммы Зейдervильда, полученные при размагничивании образцов переменным магнитным полем из естественного состояния (число рядом с точкой соответствует значению максимальной амплитуды размагничивающего переменного поля для этой точки)

ния величины $H_{ан}$. Для более однозначного ответа на этот вопрос необходимо оценить степень однофазного окисления.

Образцы К-4 (рис. 3, б) и К-6 (рис. 3, г), в отличие от образца Ки-2 (рис. 3, е), имеют вогнутые кривые

$I_s(T)$ при нагреве и охлаждении. Это может свидетельствовать о широком спектре точек Кюри, значения которых лежат для образца К-4 в интервале от 200 до 400°С, а для образца К-6 — в интервале 200–300°С. Зависимость $I_s(T)$ при охлаждении идет выше, чем

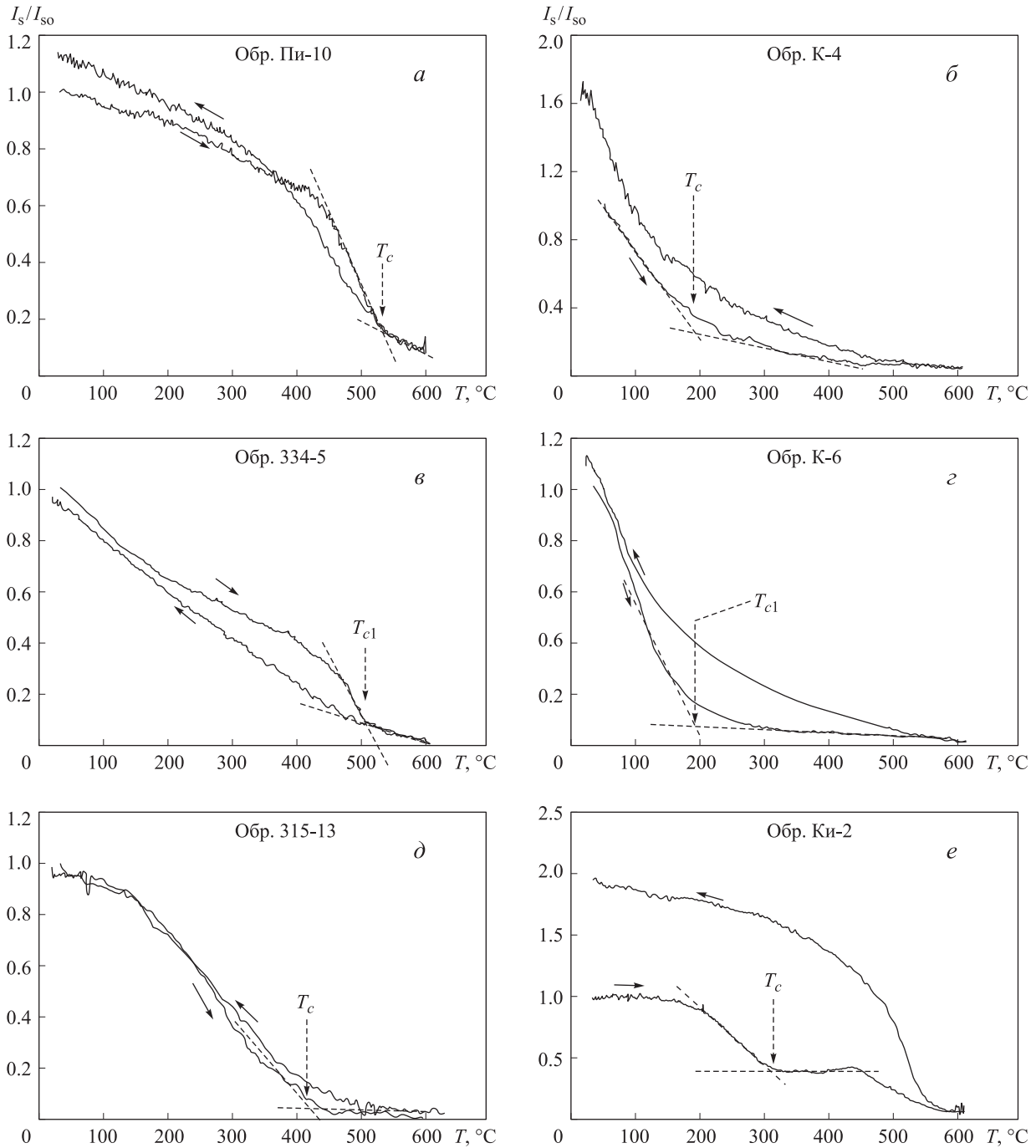


Рис. 3. Термомангнитные кривые траппов Якутии в поле $H = 0.24$ Тл

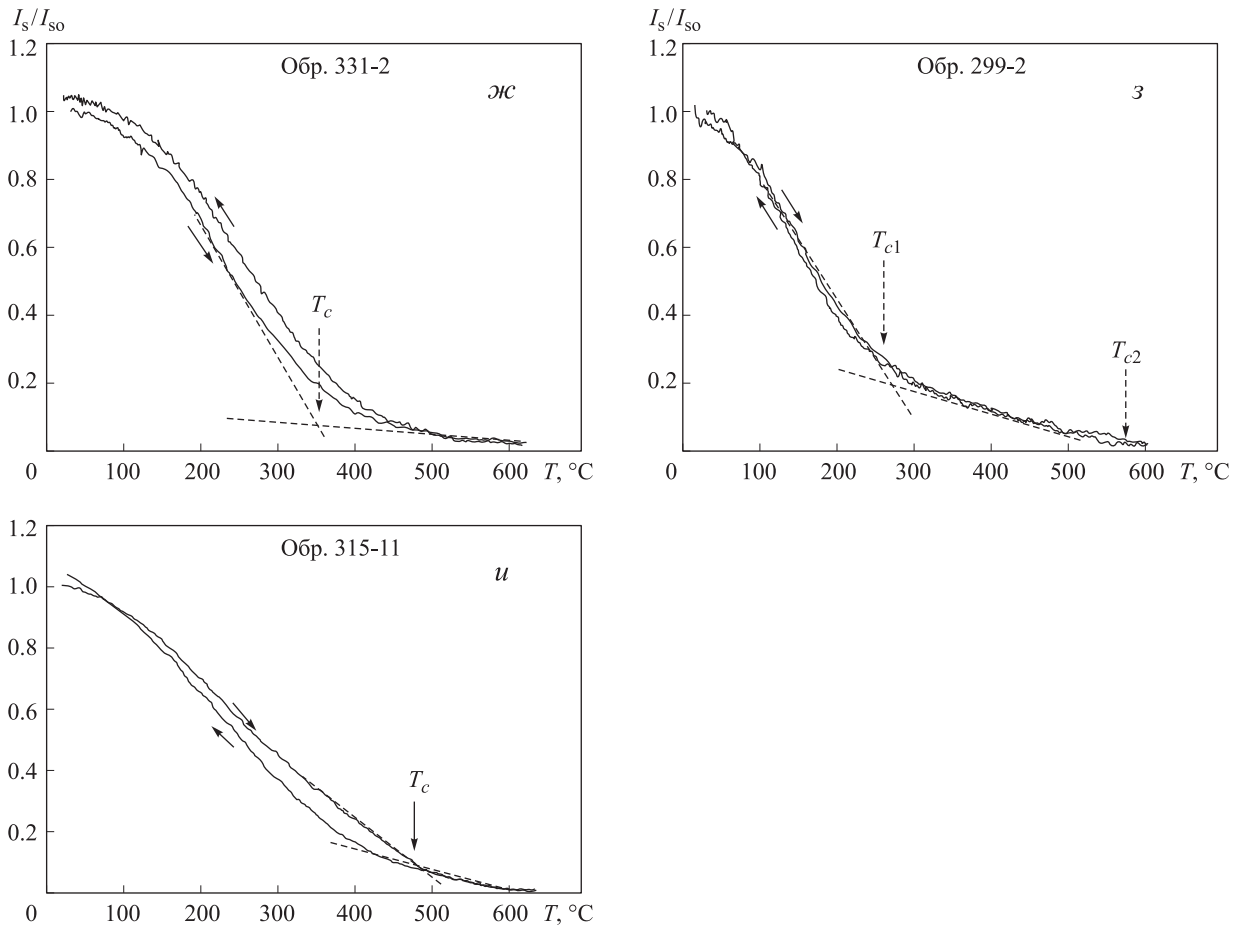
$I_s(T)$ при нагреве, т.е. происходят фазовые изменения с образованием фазы с более высокими T_c . Такое поведение $I_s(T)$, вероятно, может свидетельствовать о незавершенном распаде исходной ферромагнитной фазы. Как было предположено в работе [7], эти образцы можно отнести к пятой группе.

Образец 331-2 (рис. 3, ж), в отличие от образца К-6 (рис. 3, з), имеет более высокие точки Кюри $350\text{--}400^\circ\text{C}$. Также значения I_{rs} , I_{rs}/I_s , H_{cr} повышены (табл. 2), и поэтому он, вероятно, относится к первой группе.

Образцы Пи-10 (рис. 3, а) и 334-5 (рис. 3, в) имеют ферромагнитные фазы, близкие к магнетитовой с $T_c = 530^\circ\text{C}$. Кривые нагрева и охлаждения образца

Пи-10 выпуклые и пересекаются. Поэтому данный образец относится к второй группе. Что касается образца 334-5 (рис. 3, в), имеются признаки процесса регомогенизации исходной фазы со смешением точек Кюри в области низких температур. Данный образец имеет также высокие значения I_n , I_s , и I_{rs}/I_s (табл. 2) и может быть отнесен к первой группе.

Образцы 315-13 ($T_c = 360\text{--}450^\circ\text{C}$, рис. 3, д) и 299-2 ($T_c = 275^\circ\text{C}$, рис. 3, у) отличаются тем, что их ферромагнитные фазы являются более устойчивыми к нагреву. Действительно, их кривые $I_s(T)$ при нагреве и охлаждении мало отличаются. Образец 315-11 имеет высокие значения I_{rs} и I_s (группа 1). Образец 299-2 (группа 2) имеет размытый спектр точек Кюри, харак-



Окончание рис. 3

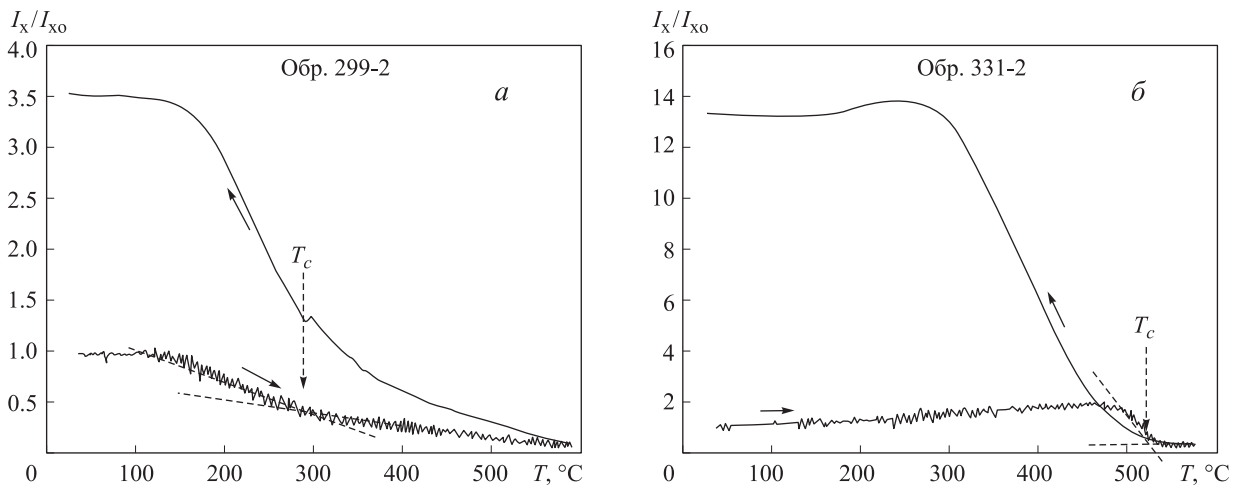


Рис. 4. Термомагнитные кривые образцов траппов 299-2 и 331-2 в поле $H = 0.25$ мТл

терный для титаномагнетита в стадии незавершенного распада, но ближе к конечной стадии.

На рис. 4 представлены термомагнитные кривые образцов траппов 299-2 и 331-2 в поле $H = 0.25$ мТл. Образцы нагревались из размагниченного состояния от комнатной температуры до $T = 600$ °С и охлаждались в поле. Для образца 299-2 (рис. 4, а) точка Кюри по кривой нагрева равна 295 °С, а по кривой охлаждения T_c — несколько выше. Точки Кюри образцов Пи-10, К-4, 334-5, К-6, 315-13, Ки-2, и 331-2 также определены

по термомагнитным кривым в поле $H = 0.25$ мТл и представлены в табл. 2.

На образце 331-2 были обнаружены признаки самообращения. В процессе охлаждения (рис. 4, б) в поле $H = 0.25$ мТл в интервале температур от $T = 250$ до 150 °С наблюдалось уменьшение намагниченности. Соответствие направления I_n направлению $H_{ан}$ вызывает сомнения. Поэтому данный образец, вероятно, нельзя использовать для определения характеристик $H_{ан}$.

Можно предположить, что образцы, описанные вы-

ше и имеющие высокие точки Кюри (Пи-10, рис. 3, а, 334-5, рис. 3, в), т. е. те, у которых исходная фаза распалась с образованием фазы, близкой к магнетитовой ($T_{c, Fe_3O_4} = 580^\circ C$), не могут быть использованы для определения $H_{ан}$.

Однако если распад произошел при $T < T_c$ магнетита, то их более стабильная часть I_n имеет термоостаточную природу и, следовательно, несет информацию о $H_{ан}$.

Что касается образцов К-4 (рис. 3, б), 334-5 (рис. 3, в), К-6 (рис. 3, з), 315-13 (рис. 3, д), 299-2 (рис. 3, и), 315-11 (рис. 3, к), то они в общем содержат ферримагнитную фазу с низкими точками Кюри $200\text{--}300^\circ C$, и можно предположить, что их ферримагнитная фаза образовалась во время формирования породы, и остаточная намагниченность I_r , имеющая термоостаточную природу, несет информацию о $H_{ан}$.

Отношения I_{rs}/I_s и H_{cr}/H_c , характеризующие доменную структуру изучаемых траппов, лежат соответственно в интервалах от 0.07 до 0.18 и от 1.39 до 2.36. Согласно критерию Дея, эти траппы имеют ферримагнитные зерна с псевдооднодоменной структурой.

Все описанные данные свидетельствуют о сложном составе ферримагнитной фракции траппов и о большом разнообразии ее зерен.

4.3. Определение палеонапряженности геомагнитного поля

На некоторых образцах траппов была предпринята попытка определения величины $H_{ан}$ по стандартной методике Телье. Метод заключается в сравнении величины разрушенной первичной естественной остаточной намагниченности I_n термоостаточной природы при нагреве образца в отсутствие магнитного поля с величиной парциальной термоостаточной намагниченности (I_{rpt}), образованной в лабораторном поле при охлаждении образца до комнатной температуры [10, 11].

Для определения древнего поля были выбраны образцы более устойчивые к нагреву (315-11, рис. 3, к, и 299-2, рис. 3, и) и имеющие низкотемпературные точки Кюри, т. е. образцы, у которых сохранилась исходная фаза.

Результаты в виде диаграмм Арай–Нагаты представлены на рис. 5. Цифры около точек на диаграммах показывают, до какой температуры нагревался образец в цикле нагрев–охлаждение. Образование парциальной термоостаточной намагниченности (I_{rpt}) проводилось в поле $H = 6.25 \cdot 10^{-2}$ мТл (40 А/м). На рис. 5, а видно, что зависимость $I_n = f(I_{rpt})$ невозможно описать линейной функцией, как следует из теории [10, 12]. Вероятно, это обусловлено тем, что при нагреве образца 315-11 до $T = 364^\circ C$ и выше наблюдались признаки самообращения I_n . Для иллюстрации этого явления на рисунке б представлены кривые $I_n(T)$ при охлаждении образца от $T = 450$ и от $T = 500^\circ C$ в отсутствие магнитного поля. Сначала остаточная намагниченность увеличивается (при охлаждении от 450 до $300^\circ C$), затем уменьшается. При нагреве образца до $500^\circ C$ и последующем охлаждении в $H = 0$ образуется остаточная намагниченность обратного знака.

Из-за наличия вышеописанных признаков самообращения точки на диаграмме Арай–Нагаты, полученные при нагреве образца выше $T = 364^\circ C$, не могут быть использованы для оценки палеонапряженности геомагнитного поля. По точкам получены при $T < 364^\circ C$, величина коэффициента линейной аппроксимации получилась равной $k = 2.9$. Однако этот коэффициент не может быть использован для определения $H_{ан}$, так как при $T < 300^\circ C$, вероятнее всего, мы сравниваем разрушение вязкой компоненты I_n с образованием I_{rpt} , что неправомерно.

Аналогичный результат был получен на образце 299-2. Признаки частичного и полного самообращения обнаруживались при нагреве и охлаждении образца начиная с $T = 300^\circ C$. На рис. 6, б проиллюстрированы частичное самообращение при охлаждении образца от $T = 400^\circ C$ и полное самообращение при охлаждении от $T = 506^\circ C$. Оценка палеонапряженности геомагнитного поля получена с точками, для которых не обнаружены (до $T = 208^\circ C$, рис. 5, б), признаки самообращения I_n дают значение $H_{ан} = 40 \text{ А/м} \cdot 2.34 = 93.6 \text{ А/м}$ (0.117 мТл).

Таким образом, полученные данные о величине древнего геомагнитного поля в Мало-Ботуобинском районе недостоверны, поскольку было обнаружено яв-

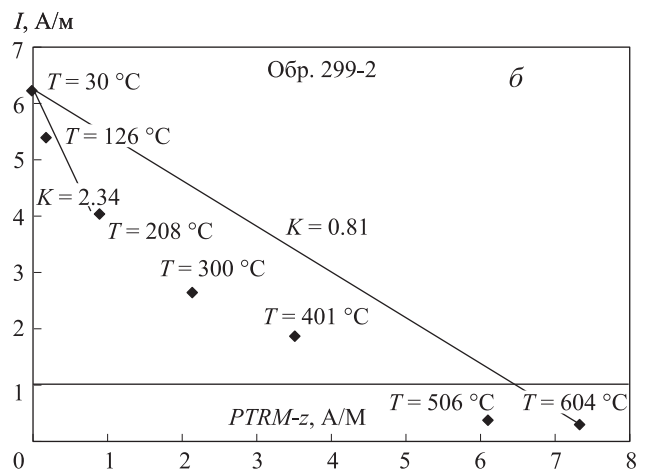
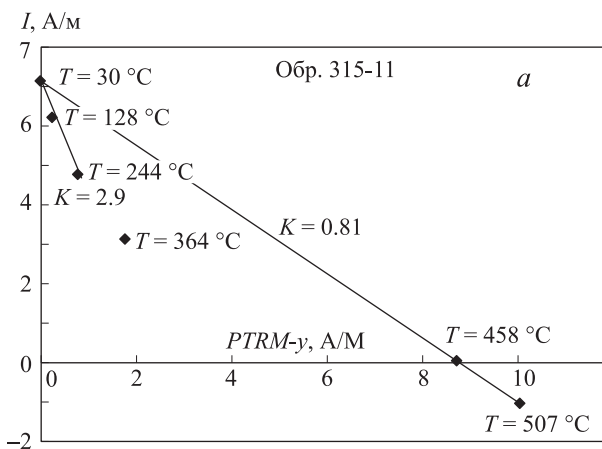


Рис. 5. Диаграммы Арай–Нагаты образцов траппа 315-11 и 299-2. Цифры около точек показывают, до какой температуры нагревался образец в цикле

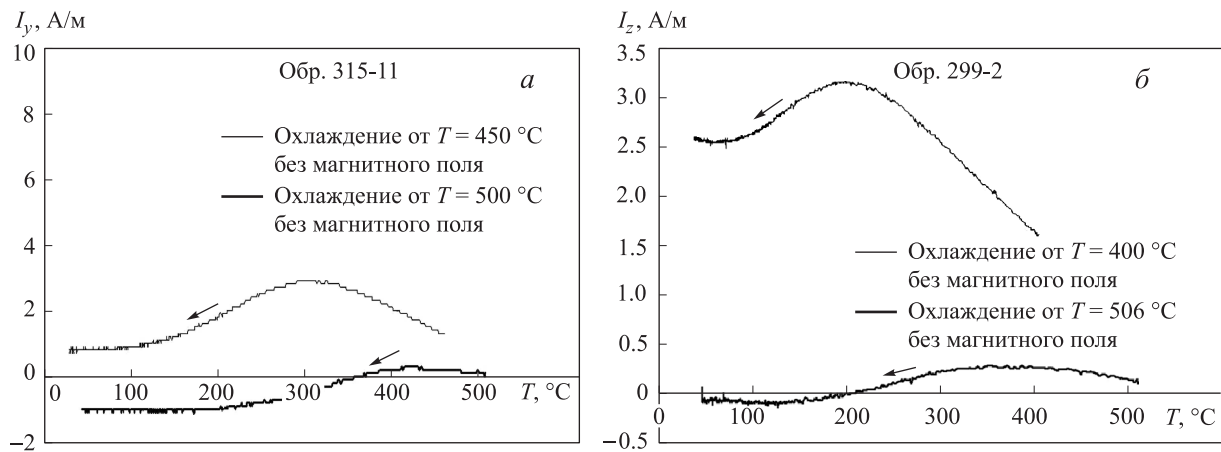


Рис. 6. Кривые охлаждения образцов траппа 315-11 и 299-2 получены при построении диаграммы Арай–Нагаты

ление самообращения при циклическом нагреве образцов. Возможно, вогнутый характер кривой на диаграмме Арай–Нагаты связан с тем, что данные траппы имеют псевдооднодоменные ферримагнитные частицы. Согласно [12], при определении $H_{ан}$ методом Телье на образцах, имеющих псевдооднодоменные ферримагнитные частицы, они должны нагреваться сразу до высоких температур, минуя промежуточные нагревы. Если только учитывать для траппа 315-11 начальную точку $T = 30^\circ\text{C}$ и точку, полученную при нагреве до 507°C , то получим $H_{ан} = 40 \text{ A/m} \cdot 0.81 = 32.4 \text{ A/m}$. Такая же величина $H_{ан}$ получается для траппа 299-2.

Заключение

В статье экспериментально установлены новые данные о терромагнитных свойствах исследованных образцов траппов Мало-Ботубинского района. Установлено, что магнитные свойства образцов очень разнообразны. Они изменяются в широких пределах. Тем не менее дополнительная информация об особенностях магнетизма образцов траппов является полезной для решения основных задач наших исследований.

Были выявлены образцы (Ки-2), первичная ферримагнитная фаза которых изменена процессами однофазного окисления. Свойства такого типа траппов очень похожи на свойства подводных базальтов. Первичная остаточная намагниченность этих образцов может быть достаточно сильно разрушена. Для решения вопроса об использовании этих образцов для задач палеомагнетизма необходимы дополнительные исследования по оценке степени окисления, а также по влиянию этого окисления на самообращение естественной остаточной намагниченности. Возможно, что отрицательное наклонение I_n этих образцов не является свидетельством образования их в геомагнитном поле обратной полярности.

Можно утверждать, что первичная ферримагнитная фаза образцов К-4 и К-6 с низкими T_c достаточно хорошо сохранилась. Учитывая, что z -компонента I_n этих образцов отрицательна, а вязкая компонента составляет с более стабильной частью естественной намагниченности угол больше, чем 90° , можно утверждать, что первичная остаточная намагниченность образовалась в поле обратной полярности по отношению

к современному геомагнитному полю в этом районе. Эти образцы, вероятно, можно использовать также для оценки направления и величины древнего магнитного поля.

Ферримагнитная фракция другой части образцов (315-13, 299-2, 331-2, 315-11) представлена структурами распада титаномагнетита и довольно стабильна к лабораторным нагревам в атмосфере воздуха. При терромагнитных исследованиях двух образцов (299-2 и 315-11) обнаружены признаки самообращения естественной остаточной намагниченности, обусловленной, вероятно, наличием структур распада. Если распад титаномагнетита произошел при температуре выше 580°C , то I_n этих образцов имеет термоостаточную природу и несет информацию о величине $H_{ан}$. Наклонение I_n этих образцов положительно, однако обнаруженное в лабораторных экспериментах явление самообращения на образцах 299-2 и 315-11 не позволяет сделать однозначный вывод о том, геомагнитное поле какой полярности было во время формирования первичной намагниченности этих траппов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 10-05-00396 и 11-05-740).

Список литературы

1. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л., 1978.
2. Саврасов Д.И., Камышева Г.Г. К вопросу о применимости палеомагнитного метода для оценки возраста Сибирских траппов // Магнетизм горных пород и палеомагнетизм. Красноярск, 1963.
3. Шрейдер А.А., Шрейдер Ал.А., Варга П., Денис К. // Океанология. 2005. **45**, № 5. С. 785.
4. Шрейдер А.А., Трухин В.И., Сычев В.А. и др. // Океанология. 1982. **XXII**, № 3.
5. Трухин В.И., Безаева Н.С.. Самообращение намагниченности природных и синтезированных ферримагнетиков.
6. Трухин В.И., Гаранин В.К., Жилева В.А., Кудряцева Г.П. Ферримагнетизм минералов. М., 1983.
7. Трухин В.И., Жилева В.А., Зинчук Н.Н., Романов Н.Н. Магнетизм кимберлитов и траппов. М., 1989.
8. Максимочкин В.И., Трухин В.И., Гарифуллин Н.М., Хасанов Н.А. // Приб. и техн. эксперимента. 2003. № 5. С. 1.

9. Трухин В.И., Жилыева В.А., Курочкина Е.С. // Физика Земли. 2004. **40**, № 6. С. 42.
10. Nagata T. Магнетизм горных пород, М., 1965.
11. Thellier E., Thellier O. // Ann. Geophys. 1959. **15**.
12. Щербакова В.В., Щербаков В.П., Виноградов Ю.К., Хайдер Ф. О свойствах PTRM многодоменных зерен и о применимости в этих случаях методики Телье определения палеонапряженности.

Paleo-descriptiveness natural remanent magnetization of some traps in Yakutia

J. R. Mbele^a, V. I. Maksimochkin, V. I. Trukhin

Department of Physics of the Earth, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^ajr.mbele@physics.msu.ru.

The possibility of determining the direction and the value of antic geomagnetic field H_a was investigated using the natural remanent magnetization I_n nine oriented samples traps Little Botuoba district of Yakutia wish age 260 million years.

Inclination of I_n five samples (PI-10, K-4, K-6, 315-13, Ki-2) was negative and positive for four samples (No. 334-5, 331-2, 315-11, 299-2), that is coincided with the polarity of the current geomagnetic field in the area.

Ferrimagnetic component samples with reversed polarity I_n was quite varied: samples were identified with low Curie points (No. K-4 and K-6, $T_c \approx 200$ °C) ferrimagnetic phase, the sample Ki-2, which contained a single phase oxidized titanomagnetite with $T_c \approx 310$ °C, and the sample Pi-10 with a Curie point $T_c = 540$ °C.

It is more probably that the primary remanent magnetization of the first two samples was formed in the reverse polarity. These samples can also be used to determine the paleointensity geomagnetic field. Properties of traps containing a single-phase-oxidized titanomagnetite (sample Ki-2) and disintegrated titanomagnetite (sample Pi-10) require additional research.

In the samples with positive polarity I_n , the phenomenal of self-reverse was detected during thermal demagnetization natural remanent magnetization probably because of the collapse of the structures of titanomagnetite in the ferrimagnetic grains.

Paleo-descriptiveness I_n these samples is questionable. Evaluation of the paleointensity of geomagnetic field using the Tellier metod ($H_{old} = 94-116$ A/m) has a low degree of confidence.

Keywords: geomagnetic field, paleointensity, traps, self-reversal, Tellier method.

PACS: 91.25.-r, 91.25.N-, 91.25.Ng.

Received 13 July 2011.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2011).

Сведения об авторах

1. Мбеле Жан-Реми — аспирант, тел. (495) 939-48-81, e-mail: jr.mbele@physics.msu.ru.
2. Максимочкин Валерий Иванович — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-48-81, e-mail: maxvi@physics.msu.ru.
3. Трухин Владимир Ильич — докт. физ.-мат. наук, профессор, декан; тел.: (495) 939-16-82, e-mail: dean@phys.msu.ru.