

УДК 550.382

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ ТИТАНОМАГNETИТСОДЕРЖАЩИХ БАЗАЛЬТОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАЛЕОНАПРЯЖЕННОСТИ МЕТОДОМ ТЕЛЬЕ

© 2016 г. С.К. Грибов

Геофизическая обсерватория “Борок” ИФЗ РАН, пос. Борок, Ярославская обл., Россия

На образцах лабораторно распавшихся базальтовых титаномагнетитов с отдельно созданными химической (*CRM*) или парциальной термоостаточной (*pTRM*) намагниченностями (либо их комбинацией *CRM+pTRM*) выполнены эксперименты по моделированию методики Телье в версии Коэ для определения палеонапряженности.

Показано, что метод Телье позволяет определить величину магнитного поля образования “чистой” *pTRM* с погрешностью, не превышающей 10 %. Оценка поля тем же методом по *CRM* оказалась заниженной относительно истинного значения на 40–60 %. При этом, однако, установлено, что по графическим построениям Араи–Нагата нагревной процедуры Телье–Коэ *CRM* не отличается от *TRM*. В палеомагнитном аспекте это означает, что изверженные породы, содержащие магнетит, образовавшийся при окисраспаде сильно окисленных катиондефицитных титаномагнетитов и несущий термохимическую намагниченность, могут быть источником существенной ошибки при определении палеонапряженности геомагнитного поля методом Телье, когда природная *CRM* не распознана как таковая, а интерпретируется как *TRM*.

Ключевые слова: титаномагнетиты, окислительный распад, химическая остаточная намагниченность, метод Телье, палеонапряженность.

Введение

По современным представлениям, достоверные определения палеонапряженности древнего магнитного поля Земли (H_{anc}), которое является важнейшим источником информации об эволюции нашей планеты и ее оболочек, можно получить только на таких изверженных породах, чья естественная остаточная намагниченность (*NRM*) имеет термоостаточную природу (*TRM*), т.е. когда намагниченность приобреталась синхронно образованию породы в процессе первоначального остывания от температуры Кюри (T_C) кристаллизовавшихся из магматического расплава магнитных минералов (главными из которых являются акцессорные титаномагнетиты (*TM*)) за счет блокирования в геомагнитном поле магнитных моментов их зерен. Вместе с тем общеизвестно, что значительная по величине и весьма стабильная остаточная намагниченность может быть создана и в результате химических преобразований минералов как в ходе первичного охлаждения изверженной породы, так и при повторных ее прогревах в течение геологической жизни, если температура вторичных наложенных процессов химических превращений ниже T_C вновь образованных магнетитов. Такой вид остаточной намагниченности принято называть термохимической (*TCRM*). В экспериментах по определению H_{anc} эта намагниченность как хронологически вторичная является “паразитной”, искажающей первичную палеомагнитную информацию. Однако в данном случае ситуация усложняется тем, что зачастую *TRM* и *TCRM* могут быть подобны по спектрам блоки-

рующих температур [Dunlop, Özdemir, 1997; Draeger et al., 2006] и, следовательно, должны быть неразличимы при определении величины H_{anc} по методике Телье [Thellier, Thellier, 1959], что неизбежно приведет к ложным результатам. К сожалению, до сих пор все еще чрезвычайно мало опубликованных исследований роли TCRM в формировании ошибки определения палеонапряженности методом Телье, а представленные в ряде работ результаты весьма неоднозначны. Так, согласно [Grommé et al., 1979], оценки методом Телье величины H_{anc} по подводным базальтам хребта Хуан де Фука (Восточно-Тихоокеанское поднятие), содержащим зерна ТМ, затронутые в природных условиях процессом низкотемпературного однофазного окисления (титаномагнетитизации), показывают по сравнению с образцами первично-магматогенных ТМ заниженные примерно вдвое значения при степенях окисления Z выше 0.3, тогда как по данным [Carvallo, Özdemir, Dunlop, 2004] на образцах подводных базальтов Императорского хребта (Тихий океан) с *in situ* магнетитизированными ТМ занижение величины H_{anc} при работе по методике Телье составило 1.5–7 раз относительно неокисленных ТМ. В то же время результаты, представленные в [Максимочкин, Целебровский, 2015], указывают на трех–четырёхкратное занижение палеонапряженности, определенной методом Телье по метахронной компоненте NRM химического происхождения, по сравнению с величиной H_{anc} , рассчитанной по ее компоненте термоостаточной природы для образцов океанических базальтов Атлантики, содержащих реликты первичного ТМ и продукты его низкотемпературного однофазного окисления.

С другой стороны, результаты, приводимые, например, в [Yamamoto, Tsunakawa, Shibuya, 2003], свидетельствуют об исключительно завышенных (на 20–70 %) относительно ожидаемых величин значениях H_{anc} , полученных методом Телье по естественной TCRM образцов исторических базальтовых лав вулкана Килауэа (Гавайи), титаномагнетитовая фракция которых имела структурные признаки высокотемпературного неоднородного (промежуточного) окисления, соответствующего третьей (образование густой сетки пластинчатых выделений ильменита в титаномагнетитовой матрице с низким содержанием титана) – четвертой (начало замещения матрицы титаногематитом) стадии в классификации С. Хаггерти [Haggerty, 1991].

В публикации [Draeger et al., 2006] представлены результаты, указывающие лишь на незначительное (не более чем на 12 %) завышение величины “палеонапряженности”, определенной методом Телье по искусственной TCRM, созданной на петрографически свежих образцах четвертичных базальтов (Южная Франция) в процессе окислительного распада входящих в их состав зерен ТМ при лабораторном охлаждении породы со скоростью 0.1 °С/мин в постоянном магнитном поле 100 мкТл в интервале 560–400 °С. Выполненные этими авторами на том же природном материале определения по методике Телье поля образования изотермических, собственно химических остаточных намагниченностей (CRM), полученных в результате 32-часовых отжигов образцов при температурах 400–500 °С в полях 25–100 мкТл, показали 11–70-процентное занижение его величины относительно истинных значений.

Разумеется, при столь неоднозначных и даже противоречивых литературных данных становится очевидной необходимость проведения дальнейших экспериментальных исследований по оценке влияния химической составляющей намагниченности продуктов магнетитоминералогического превращения титаномагнетитов на определение напряженности магнитного поля методом Телье. Результаты исследований по данному направлению, несомненно, могут иметь решающее значение при оценке достоверности определений H_{anc} с использованием метода Телье по изверженным горным породам, содержащим преобразованную *in situ* титаномагнетитовую фракцию.

В настоящей статье представлены результаты лабораторного моделирования методики Телье на базальтовых образцах с однофазно окисленными в естественных условиях зернами титаномагнетитов, которые в процессе относительно длительных изотермических экспериментов претерпели окислительный распад и несут химические остаточные намагниченности или парциальные термоостаточные намагниченности (либо их комбинации), лабораторно индуцированные в слабых постоянных магнитных полях.

Объекты исследования

Первичным материалом служили пермотриасовые базальты из коллекции сибирских эффузивных траппов, содержащие катиондефицитные ТМ (титаномаггемиты – ТМГ) с основной точкой Кюри ~ 300 °С, степень окисления $Z \sim 0.5$, мольной долей ультравошинелевого компонента $x_{ulv} \sim 0.6$. Предварительно на воздухе в течение 200 ч при фиксированных температурах 400, 450, 500 и 530 °С была проведена термообработка исходных образцов, свидетельствующая об их магнитоминералогической нестабильности к лабораторным нагревам и указывавшая на достаточно быстрый “выход” T_C новообразованных фаз за пределы температуры отжига даже при относительно низких ее значениях. В совокупности с достаточно низкими исходными значениями T_C это стало определяющим при выборе названного материала в качестве объекта, на котором при довольно умеренных температурах были бы возможны эксперименты по моделированию процесса химического намагничивания природных образцов из терморазмагниченного состояния, т.е. выше температуры Кюри титаномаггемитов, содержащихся в базальте.

Результаты комплексного детального изучения продуктов изотермического преобразования исходной ТМГ-фракции отожженных образцов с применением методов оптической и растровой электронной микроскопии, локального рентгеноспектрального микроанализа, порошковой рентгеновской дифрактометрии, а также терромагнитного анализа и измерения параметров петель магнитного гистерезиса на разных этапах их температурной выдержки были представлены ранее в [Грибов, Долотов, Цельмович, 2014]. В данной статье лишь кратко отметим, что анализ совокупности полученных экспериментальных данных свидетельствовал об одновременном с однофазным доокислением оксираспаде некоторой части зерен ТМГ в первые же минуты изотермической выдержки исходных образцов при $T \leq 450$ °С с образованием шпинельной фазы, близкой к магнетиту. При этом согласно магнитометрическим измерениям по мере развития распада происходил переход новообразованных суперпарамагнитных магнетитовых выделений в однодоменное состояние и лишь отчасти дальнейший их рост в пределах однодоменности.

Характер процесса преобразования зерен естественных ТМГ при 500 °С на воздухе менялся – начинал преобладать окислительный распад; рентгенофазовый анализ уже фиксировал появление ильменитовой фазы, решетчатые выделения которой, ограничивающие богатые магнетитом ячейки, становились видимыми при электронной микроскопии. По результатам рентгенометрического исследования также было установлено, что увеличение длительности отжигов при $T \geq 500$ °С сопровождалось приводящим к изменению состава ильменитовой фазы (вплоть до содержания в ней гематитовой компоненты ~ 0.3 – 0.4) окислением межламельного магнетита, а также выделениями псевдобрукита и рутила.

При тех же температурно-временных режимах на дублях исходных базальтовых образцов кубической формы с ребром 10 мм было выполнено моделирование приобре-

тения химической остаточной намагниченности при воздействии постоянного магнитного поля 50 мкТл. Полученные графические зависимости $J_{CRM}=f(t)$ при каждой температуре создания CRM также приведены в упоминаемой выше работе [Грибов, Долотов, Цельмович, 2014].

Дополнительно отметим, что была выявлена четкая прямая корреляция между изменением во времени величины CRM и намагниченностью насыщения продуктов гетерофазного преобразования ТМГ-фракции отожженных образцов. Отметим, что независимо от длительности выдержки при температуре создания CRM последняя образовывалась исключительно по направлению внешнего магнитного поля.

Методика экспериментов

В рамках настоящей работы помимо собственно “чистой” CRM, индуцированной в течение 200-часовых выдержек исходных образцов при каждой заданной температуре T_{CRM} (400, 450, 500 или 530 °C) в поле $H_{CRM}=50$ мкТл [Грибов, Долотов, Цельмович, 2014] и выделенной при последующем их охлаждении до комнатной температуры ($T_0=25$ °C) в отсутствие магнитного поля, на дубликатах отожженных образцов были созданы комбинации CRM и pTRM. Последняя по истечении 200-часовых изотермических выдержек накладывалась на уже смоделированную CRM при последующем остывании образца в поле $H_{pTRM}=30$ мкТл. Дополнительно отдельные (“чистые”) pTRM создавались на образцах, предварительно отожженных при тех же фиксированных температурах в течение 200 ч без поля, в процессе их охлаждения до T_0 опять-таки в поле 30 мкТл.

На всех образцах с лабораторно распавшимися зёрнами ТМГ, несущими искусственно созданные остаточные намагниченности (CRM, pTRM либо CRM+pTRM), проводилась процедура Телье [Thellier, Thellier, 1959] в модификации Коэ [Coe, 1967] определения палеонапряженности (парные нагревы на воздухе до последовательно возрастающих температур). Процедура включает два шага: первый шаг (нагрев-охлаждение) проводится в нулевом поле, второй – нагрев в нулевом поле, последующее охлаждение в лабораторном поле $H_{лаб}$, равном 30 или 50 мкТл, с обязательным выполнением через каждые два температурных шага дополнительных возвратных нагревов до более низких температур для проверки величины образуемой в четных температурных циклах Телье парциальной термоостаточной намагниченности (так называемая процедура “check-points”; см., например, [Coe, Gromme, Mankinen, 1978; Prévot et al., 1983]). Выполнение теста pTRM-check-points позволяет по расхождению между первоначальными и контрольными значениями pTRM установить сам факт химических изменений в ферромагнитных зёрнах образцов, которые происходят при работе методом Телье. В целом каждый эксперимент Телье включал в себя 18–20 парных нагревов до последовательно возрастающих вплоть до 600 °C температур и 8–10 возвратных нагревов.

Результаты измерений в процессе выполнения процедуры Телье–Коэ представлялись в виде диаграмм Араи–Нагата [Nagata, Arai, Momose, 1963], по которым рассчитывались кажущиеся напряженности полей образования всех моделируемых остаточных намагниченностей. Сравнение рассчитанных значений поля ($H_{расч}$) с истинной его величиной дает возможность оценить достоверность определений методом Телье напряженности поля, в котором создавались CRM и pTRM. Вместе с тем непосредственное сопоставление диаграмм Араи–Нагата, получаемых на образцах с лабораторными химической и термоостаточной намагниченностями, позволяет оценить возможность или бесперспективность их различения по графическим построениям нагревной методики Телье–Коэ.

Результаты

Ниже приводятся диаграммы Арай–Нагата, построенные автором для образцов с отдельно созданными $pTRM$ (рис. 1) и CRM (рис. 2), а также с их комбинацией $CRM+pTRM$ (рис. 3). По осям ординат представлено падение исходных остаточных намагниченностей, по оси абсцисс – рост соответствующих намагниченностей в ходе циклов Телье. Все намагниченности нормированы на первичное значение соответствующей исходной остаточной намагниченности. Кружками отмечено положение репрезентативных точек при каждом цикле первичного нагрева (цифры у кружков – температура нагрева), треугольниками – положение *check-points*. Непрерывная прямая аппроксимирует экспериментальные данные в температурном интервале, по которому оценивалось искомое поле образования исходных остаточных намагниченностей.

Полная сводка выполненных определений полей образования CRM , $pTRM$, $CRM+pTRM$ методом Телье–Коэ представлена в таблице на с. 44 вместе с соответствующими статистическими параметрами.

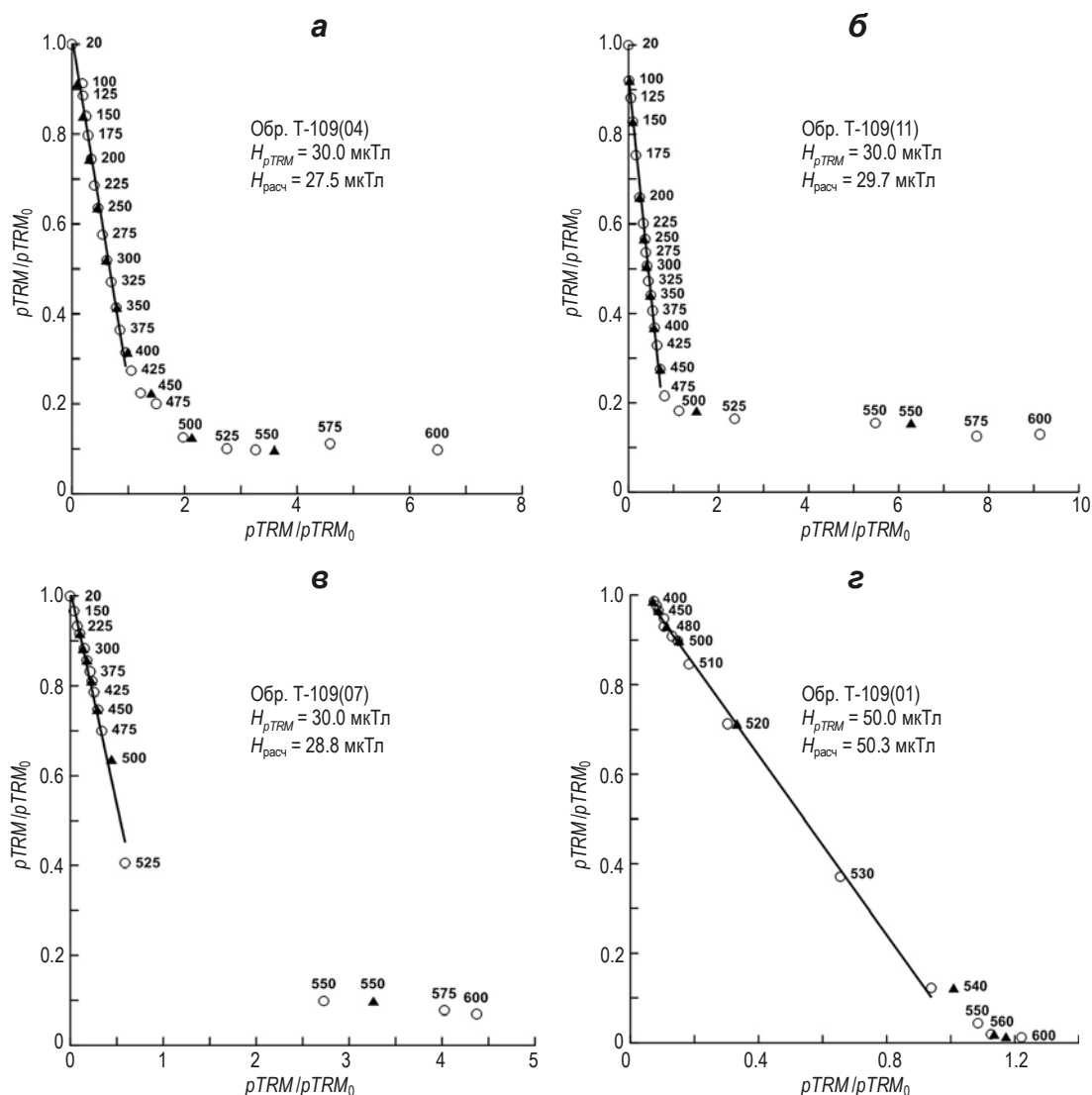


Рис. 1. Диаграммы Арай–Нагата, построенные по результатам применения процедуры Телье–Коэ для четырех образцов с “чистыми” $pTRM$, индуцированными в полях H_{pTRM} после предварительных изотермических отжигов в отсутствие поля. Время отжига – 200 ч; температура отжига – 400 °C (а), 450 °C (б), 500 °C (в), 530 °C (з)

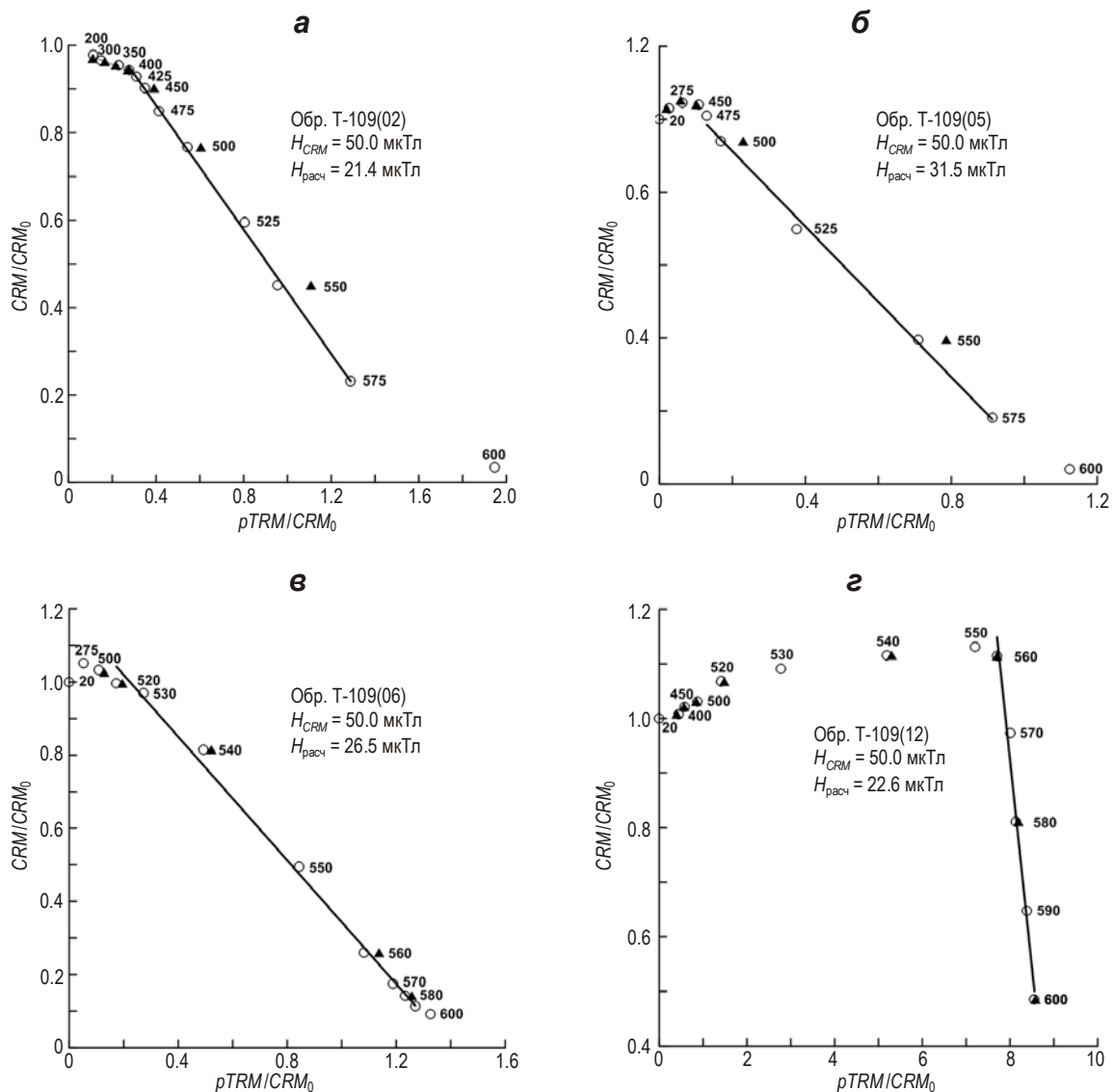


Рис. 2. Диаграммы Арай–Нагата, построенные по результатам применения процедуры Телье–Коэ для четырех образцов с “чистыми” CRM, смоделированными при разных значениях T_{CRM} : 400 °C (а); 450 °C (б); 500 °C; 530 °C (г). Время создания CRM (в поле $H_{CRM}=50$ мкТл) – 200 ч

На вышеприведенных диаграммах Арай–Нагата зависимости $J_{pTRM, CRM, CRM+pTRM} = f(J_{pTRM})$ имеют в той или иной степени вогнутый вид. Тем не менее, на них присутствуют протяженные квазипрямолинейные участки, кривизна которых почти незаметна, что позволяет выполнить формальную процедуру определения “палеонапряженности” по формуле $H_{расч} = |k| \cdot H_{лаб}$, где k – коэффициент линейной аппроксимации данных на диаграмме Арай–Нагата. При этом полученные значения $H_{расч}$ (см. таблицу) в основном удовлетворяют критериям “качества” (надежности) данных по определению методом Телье $H_{анс}$, предложенным в работе [Coe, Gromme, Mankinen, 1978].

Согласно нашим оценкам, выполненным для образцов с “чистой” $pTRM$, погрешность определения поля ее образования с использованием диаграммы Арай–Нагата (см. рис. 1 и таблицу, колонки 13, 14) не превышает 10 %. В то же время для образцов с “чистой” CRM аналогичная оценка по соответствующим диаграммам Арай–Нагата (см. рис. 2) оказалась на ~40–60 % занижена относительно истинного значения (см. таблицу, колонки 12–14).

Рассмотрим диаграммы Арай–Нагата, построенные автором для четырех образцов с суммарными остаточными намагниченностями $CRM+pTRM$ (рис. 3).

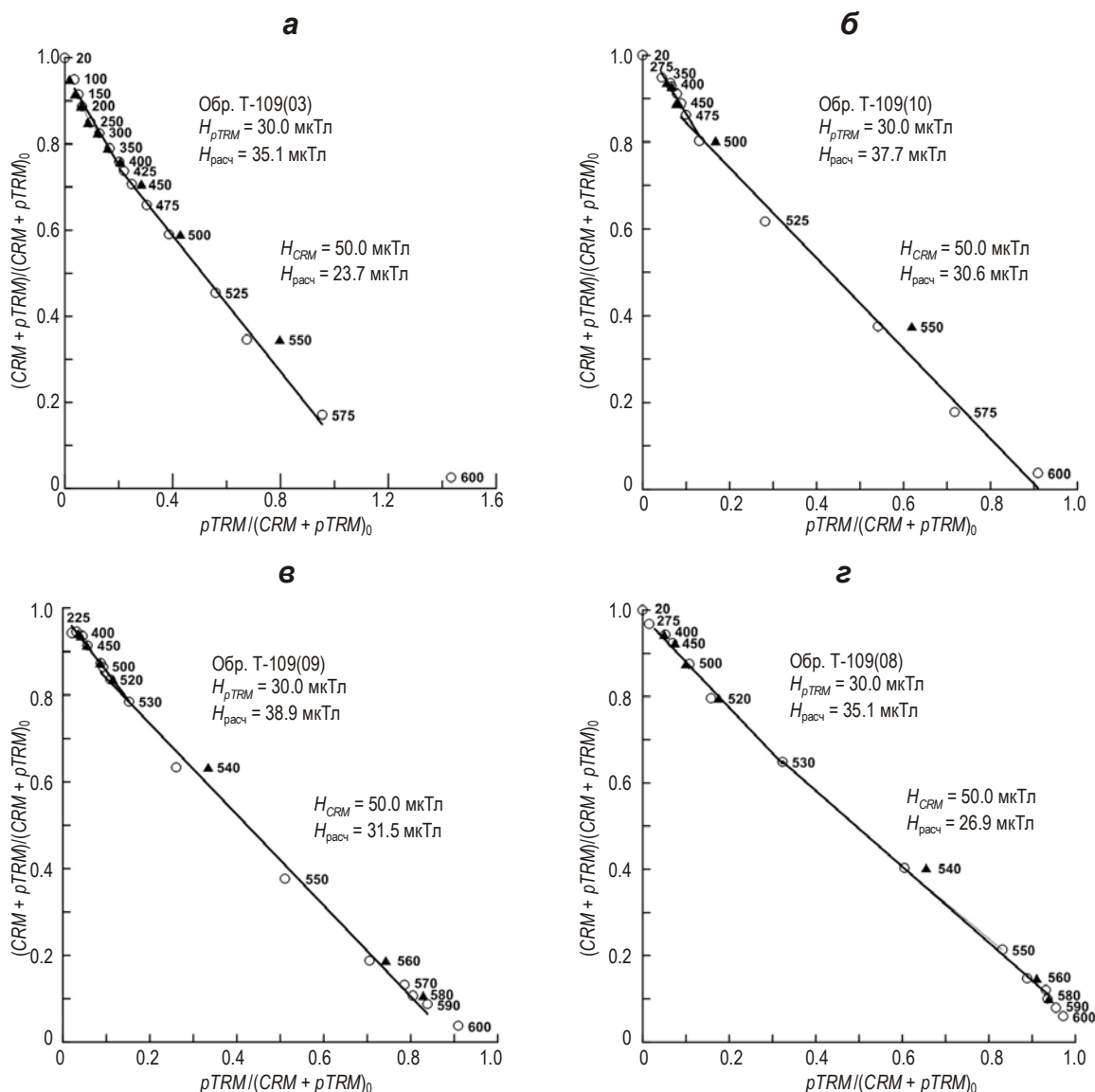


Рис. 3. Диаграммы Арай–Нагата, построенные по результатам применения процедуры Телье–Коэ для четырех образцов с суммарными остаточными намагниченностями $CRM+pTRM$, смоделированными при разных значениях T_{CRM} : 400 °C (а); 450 °C (б); 500 °C (в), 530 °C (г). Время создания CRM (в поле $H_{CRM}=50$ мкТл) – 200 ч; $pTRM$ наложена в процессе последующего охлаждения от T_{CRM} до 20 °C в поле $H_{pTRM}=30$ мкТл

Как следует из рис. 3, для образцов с комбинацией $CRM+pTRM$ зависимость $J_{CRM+pTRM} = f(J_{pTRM})$ на диаграммах Арай–Нагата может быть аппроксимирована двумя линейными участками с разными углами наклона и точкой “излома”, приходящейся на температуру создания CRM . В этих случаях занижение величины напряженности магнитного поля, определенной по собственно химической части намагниченности (т.е. рассчитанной по высокотемпературному линейному сегменту диаграмм Арай–Нагата), практически совпало с оценкой, полученной при определении поля образования отдельно смоделированной химической намагниченности. Вместе с тем на этих же образцах величина поля, вычисленная по температурному интервалу, в котором на первоначально

созданную CRM накладывалась парциальная термоостаточная намагниченность, на ~17–30 % превысила действительное ее значение (т.е. оказалась значительно дальше от расчетной величины напряженности магнитного поля, определенной по образцам с “чистой” *pTRM*), что, скорее всего, связано с тем, что в данных экспериментах $H_{CRM} > H_{pTRM}$.

Результаты определения полей образования CRM, *pTRM*, CRM+*pTRM* методом Телье–Козэ и соответствующие статистические параметры

Образец	$T_{отж}$, °C	(T_1, T_2) , °C	N	g	q	f	K	$\sigma(k)$	$DRAT^1$, %		$H_{лаб}$, мкТл	$H_{ист}$, мкТл	$H_{расч}$, мкТл	Намагниченность
									макс.	ср.				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
T-109(02)	400	400–575	8	0.78	32.2	0.71	0.71	0.01	12.4	5.3	30	50	21.4	CRM
T-109(03)		400–575	8	0.80	16.5	0.59	0.79	0.02	9.1	5.8	30	50	23.7	CRM+pTRM
T-109(03)		20–400	14	0.90	4.0	0.24	1.17	0.06	6.0	2.6	30	30	35.1	CRM+pTRM
T-109(04)		20–400	14	0.92	29.2	0.69	0.92	0.02	6.7	2.7	30	30	27.5	pTRM
T-109(05)	450	450–575	6	0.73	19.8	0.86	1.05	0.03	6.5	4.1	30	50	31.5	CRM
T-109(10)		475–600	6	0.77	16.6	0.83	1.02	0.04	6.5	3.5	30	50	30.6	CRM+pTRM
T-109(10)		275–450	8	0.75	0.3	0.06	1.25	0.08	8.3	3.2	30	30	37.7	CRM+pTRM
T-109(11)		20–450	16	0.92	22.4	0.72	0.99	0.03	1.6	0.7	30	30	29.7	pTRM
T-109(06)	500	530–590	7	0.74	34.9	0.86	0.88	0.02	5.2	3.4	30	50	26.5	CRM
T-109(09)		500–590	10	0.78	27.8	0.79	1.05	0.02	6.8	2.6	30	50	31.5	CRM+pTRM
T-109(09)		275–500	10	0.80	1.3	0.08	1.29	0.06	9.7	3.5	30	30	38.9	CRM+pTRM
T-109(07)		20–525	19	0.81	16.5	0.59	0.96	0.03	4.1	1.3	30	50	28.8	pTRM
T-109(12)	530	560–600	5	0.75	6.0	0.63	0.75	0.06	4.9	2.3	30	50	22.6	CRM
T-109(08)		530–600	8	0.71	21.3	0.59	0.90	0.02	4.8	2.2	30	50	26.9	CRM+pTRM
T-109(08)		275–530	13	0.69	5.3	0.29	1.17	0.04	4.5	1.8	30	30	35.1	CRM+pTRM
T-109(01)		400–540	11	0.73	34.5	0.86	1.01	0.02	5.9	1.6	50	50	50.3	pTRM

Примечания: $T_{отж}$ – температура образования CRM в течение 200-часовых выдержек образцов либо верхняя температура интервала образования *pTRM* также после 200-часовых отжигов образцов; (T_1, T_2) – температурный интервал диаграммы Арай–Нагата, по которому проводилась аппроксимация для оценки величины искомого поля; N – число репрезентативных точек в этом интервале. Обозначения $H_{расч}$ и $H_{ист}$ относятся соответственно к рассчитанным и истинным значениям напряженности магнитного поля образования соответствующих остаточных намагниченностей (CRM либо *pTRM*). В случае суммарной намагниченности значения $H_{расч}$ и $H_{ист}$ относятся собственно к компоненте, выделенной в прописи CRM+pTRM (столбец 15) жирным шрифтом. Параметры g , q , f , σ рассчитаны согласно [Coe, Gromme, Mankinen, 1978] и характеризуют качество полученных результатов: g определяет однородность распределения репрезентативных точек в выбранном температурном интервале; $q=k \cdot f \cdot g / \sigma(k)$ отражает интегральную оценку качества данного определения $H_{расч}$ (здесь коэффициент $k=H_{расч}/H_{лаб}$ – тангенс угла наклона линии аппроксимации на диаграмме Арай–Нагата); f обозначает долю первичной намагниченности, использованную для линейной аппроксимации; $\sigma(k)$ – стандартная ошибка; $H_{лаб}$ – лабораторное поле, в котором выполнялась процедура Телье. Согласно [Coe, Gromme, Mankinen, 1978], заслуживающими доверия признаются определения палеонапряженности, для которых $q \geq 5$. $DRAT_{макс}$ – оценка максимального отклонения значений *pTRM-check-points* от линии аппроксимации в выбранном температурном интервале, $DRAT_{ср}$ – оценка среднего отклонения тех же значений [Selkin, Tauxe, 2000].

¹ Параметр *DRAT* (от англоязычного *Difference RATIO* [Selkin, Tauxe, 2000]) используется для количественной оценки смещения *pTRM-checks-points*.

На диаграммах Араи–Нагата четко видно, что в интервале от комнатной температуры до температуры создания *CRM* (или же до температуры предварительного отжига образцов в случае индуцирования отдельной *pTRM*) для всех образцов характерны достаточно хорошо воспроизводимые “*pTRM-check-points*”. При нагревах до более высоких температур, как правило, наблюдается заметный сдвиг *check-points* относительно позиции начальных *pTRM*, что указывает на дальнейшие минералогические изменения вещества образцов в ходе последующих нагревательных циклов Телье. При этом, судя по сдвигу *check-points* вправо, блокирующие температуры зерен – носителей *pTRM* – смещаются в область более низких температур. Последнее подтверждается ходом кривых терморазмагничивания *TRM(T)*, снятых по завершению полной процедуры Телье.

Для количественной оценки смещения *pTRM-check-points* мы воспользовались параметром *DRAT* ([Selkin, Tauxe, 2000]), отражающим в процентах величину отклонения *check-points* на диаграмме Араи–Нагата от линии аппроксимации, нормированную на длину ее сегмента, по которому определяется величина искомого магнитного поля. Рассчитанные для каждого исследованного образца средние и максимальные значения этого параметра представлены в таблице соответственно в колонках 10 и 11. Как видно, на температурном интервале определения поля создания *CRM* среднее отклонение *pTRM-check-points* от линии аппроксимации по разным образцам составило 2.2–5.8 % при $DRAT_{\text{макс}}=4.9\text{--}12.4\%$.

В этой связи напомним, что в литературе (см., например, [Selkin, Tauxe, 2000; Laj et al., 2002; Kissel, Laj, 2004; Herrero-Bervera, Valet, 2009]) при использовании метода Телье для получения удовлетворительных по качеству определений палеонапряженности рекомендуются значения $DRAT_{\text{cp}} \leq 3.5\text{--}5\%$ и $DRAT_{\text{макс}} \leq 5\text{--}10\%$. В нашем случае, как это следует из таблицы, наименьшие значения параметров *DRAT*, отвечающие этим критериям, наблюдаются в основном у образцов, исходная ТМГ-фракция которых претерпела окислительный распад в течение наложенных 200-часовых изотермических выдержек при $T_{\text{CRM}} \geq 500\text{ }^\circ\text{C}$. Это, впрочем, вполне ожидаемо и, как известно, связано с большей (в отличие от титаномаггемита) устойчивостью к температурным воздействиям структур его распада. Однако в нашем случае ошибка определения действовавшего при образовании *CRM* магнитного поля составила ~40–55 %. Это, естественно, дает основание заключить, что низкие значения *DRAT* по результатам экспериментов Телье еще не гарантируют истинности оценки величины “палеополя” в случае, когда *CRM* не распознана как таковая, а ошибочно принята за *TRM*.

Заключение

Результаты опробования методики Телье–Коэ на лабораторно гетерофазно окисленных природных титаномаггемитах, с одной стороны, свидетельствуют о хорошей работоспособности метода Телье на образцах с смоделированной “чистой” термонамагниченностью. Однако, с другой, они указывают на то, что применение этой методики на том же материале, но несущим остаточную намагниченность химической природы, приводит к существенному несоответствию расчетного поля тому, в котором намагниченность создавалась в лаборатории. Причем в экспериментах Телье *CRM* хорошо имитирует *TRM* – на всех диаграммах Араи–Нагата выделяется протяженный квазилинейный участок в интервале от некоторой температуры, превышающей температуру создания *CRM*, до температур, близких к точке Кюри, что позволяет выполнить формальную процедуру определения “палеонапряженности”, удовлетворяющую современным критериям качества.

Отмеченные обстоятельства, несомненно, следует учитывать в палеомагнитной практике, поскольку полученные нами экспериментальные данные позволяют предположить, что нераспознанная вовремя химическая остаточная намагниченность может привести к заниженной в разы оценке палеонапряженности методом Телье на образцах базальтов с окисленными ТМ. Поэтому для получения в экспериментах Телье достоверной величины напряженности древнего геомагнитного поля по магматическим горным образованиям, содержащим преобразованную *in situ* титаномагнетитовую фракцию, в каждом конкретном случае необходимо доказывать отсутствие в породе естественной химической остаточной намагниченности.

Благодарности

Автор выражает признательность Российскому фонду фундаментальных исследований (РФФИ) за финансовую поддержку данного исследования (грант № 14-05-00365).

Литература

- Грибов С.К., Долотов А.В., Цельмович В.А. Особенности магнитоминералогического преобразования природных титаномагнетитов на воздухе в изотермических условиях // Учен. Зап. Казан. ун-та. Естеств. науки. 2014. Т. 156. Кн. 1. С.64–78.
- Максимочкин В.И., Целебровский А.Н. Влияние химической намагниченности океанических базальтов на определение палеонапряженности геомагнитного поля методом Телье // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2015. № 6. С.134–142.
- Carvallo C., Özdemir Ö., Dunlop D. Paleointensity determinations, palaeodirections and magnetic properties of basalts from the Emperor seamounts // Geophys. J. Int. 2004. V. 156, N 1. P.29–38.
- Coe R.S. The determination of paleointensities of the Earth's magnetic field with special emphasize on mechanisms which could cause nonideal behavior in Thellier method // J. Geomag. Geoelectr. 1967. V. 19, N 3. P.157–179.
- Coe R.S., Gromme C.S., Mankinen E.A. Geomagnetic paleointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific nondipole low // J. Geophys. Res. 1978. V. 83, N B4. P.1740–1756.
- Draeger U., Prévot M., Poidras T., Riisager J. Single-domain chemical, thermochemical and thermal remanences in a basaltic rock // Geophys. J. Int. 2006. V. 166, N 1. P.12–32.
- Dunlop D., Özdemir Ö. Rock magnetism: fundamentals and frontiers. New York: Cambridge Univ. Press, 1997. 573 p.
- Grommé S., Mankinen E., Marshall M., Coe R.S. Geomagnetic paleointensities by the Thelliers' method from submarine pillow basalts: effects of seafloor weathering // J. Geophys. Res. 1979. V. 84, N B7. P.3553–3575.
- Haggerty S.E. Oxide textures: a mini-atlas // Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance. Mineral. Soc. Amer. 1991. V. 25, N 1. P.129–219.
- Herrero-Bervera E., Valet J.P. Testing determinations of absolute paleointensity from the 1955 and 1960 Hawaiian flows // Earth Planet. Sci. Lett. 2009. V. 287. P.420–433.
- Kissel C., Laj C. Improvements in procedure and paleointensity selection criteria (PICRIT-03) for Thellier and Thellier determinations: application to Hawaiian basaltic long cores // Phys. Earth Planet. Inter. 2004. V. 147, N 2/3. P.155–169.
- Laj C., Kissel C., Scao V., Beer J., Thomas D.M., Guillou H., Muscheler R., Wagner G. Geomagnetic intensity and inclinations at Hawaii for the past 98 kyr from core SOH-4 (Big Island): a new study and a comparison with existing contemporary data // Phys. Earth Planet. Inter. 2002. V. 129, N 3/4. P.205–243.
- Nagata T., Arai Y., Momose K. Secular variation of the geomagnetic total force during the last 5000 years // J. Geophys. Res. 1963. V. 68, N 18. P.5277–5281.

- Prévoit M., Mankinen E., Grommé S., Lecaille A.* High paleointensities of the geomagnetic field from thermomagnetic studies on rift valley pillow basalts from the Mid-Atlantic Ridge // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88, N B3. P.2316–2326.
- Selkin P.A., Tauxe L.* Long-term variations in palaeointensity // *Philos. Trans. R. Soc. London, ser. A.* 2000. V. 358, N 1768. P.1065–1088.
- Thellier E., Thellier O.* Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique // *Ann. Geophys.* 1959. V. 15. P.285–376.
- Yatamoto Y., Tsunakawa H., Shibuya H.* Palaeointensity study of the Hawaiian 1960 lava: implications for possible causes of erroneously high intensities // *Geophys. J. Int.* 2003. V. 153, N 1. P.263–276.

Сведения об авторе

ГРИБОВ Сергей Константинович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Геофизическая обсерватория “Борок” Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 142. Тел.: +7(48547) 24-631. E-mail: gribov@borok.yar.ru

THE EFFECT OF CHEMICAL MAGNETIZATION ON THE PALEOINTENSITY DETERMINED BY THE THELLIER METHOD: EXPERIMENTAL STUDY ON TITANOMAGNETITE-CONTAINING BASALTS

S.K. Gribov

*Borok Geophysical Observatory of Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
Borok (Yaroslavl region), Russia*

Abstract. The simulation of the Thellier–Coe paleointensity experiments was performed on laboratory oxyexsolved titanomaghemite-bearing basaltic samples with either a separately created chemical remanent magnetization (CRM) or a partial thermoremanent magnetization (pTRM) or a combination of both.

It is shown that the Thellier method makes it possible to determine the magnetic field of ‘pure’ pTRM with an error not exceeding 10 %. In contrast, the field estimate for CRM by this method is understated by 40–60 % relative to the true value. At the same time, however, CRM cannot be distinguished from TRM on the Arai–Nagata graphical construction of the stepwise heating Thellier–Coe procedure. In the paleomagnetic aspect, all of this means that igneous rocks containing magnetite formed through oxyexsolution of highly cation-deficient titanomagnetites and carrying thermochemical magnetization may be the source of a significant error in determination of the paleointensity of geomagnetic field by the Thellier method when a natural CRM is not recognized and is mistakenly interpreted as a TRM in the Thellier-type experiments.

Keywords: titanomagnetites, oxyexsolution, chemical remanent magnetization, Thellier method, paleointensity.

References

- Carvallo C., Özdemir Ö., and Dunlop D. Paleointensity determinations, palaeodirections and magnetic properties of basalts from the Emperor seamounts, *Geophys. J. Int.*, 2004, vol. 156, no. 1, pp. 29–38.
- Coe R.S. The determination of paleointensities of the Earth’s magnetic field with special emphasize on mechanisms which could cause nonideal behavior in Thellier method, *J. Geomag. Geoelectr.*, 1967, vol. 19, no. 3, pp. 157–179.
- Coe R.S., Gromme C.S., and Mankinen E.A. Geomagnetic paleointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific nondipole low, *J. Geophys. Res.*, 1978, vol. 83, no. B4, pp. 1740–1756.

- Draeger U., Prévot M., Poidras T., and Riisager J. Single-domain chemical, thermochemical and thermal remanences in a basaltic rock, *Geophys. J. Int.*, 2006, vol. 166, no. 1, pp. 12-32.
- Dunlop D. and Özdemir Ö. *Rock magnetism: fundamentals and frontiers*. New York: Cambridge Univ. Press, 1997.
- Gribov S.K., Dolotov A.V, and Tselmovich V.A. Peculiarities of magnetic and mineralogical transformation of natural titanomagnetites in air under isothermal conditions, *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki* (Scientific Notes of the Kazan' State University, Natural Sciences), 2014, vol. 156, no. 1, pp. 64-78.
- Grommé S., Mankinen E., Marshall M., and Coe R.S. Geomagnetic paleointensities by the Thelliers' method from submarine pillow basalts: effects of seafloor weathering, *J. Geophys. Res.*, 1979, vol. 84, no. B7, pp. 3553-3575.
- Haggerty S.E. Oxide textures: a mini-atlas. In: D.H. Lindsley (ed). *Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance. Mineral. Soc. Am.*, 1991, vol. 25, no. 1, pp. 129-219.
- Herrero-Bervera E. and Valet J.P. Testing determinations of absolute paleointensity from the 1955 and 1960 Hawaiian flows, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2009, vol. 287, pp. 420-433.
- Kissel C. and Laj C. Improvements in procedure and paleointensity selection criteria (PICRIT-03) for Thellier and Thellier determinations: application to Hawaiian basaltic long cores, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2004, vol. 147, no. 2-3, pp. 155-169.
- Laj C., Kissel C., Scao V., Beer J., Thomas D.M., Guillou H., Muscheler R., and Wagner G. Geomagnetic intensity and inclinations at Hawaii for the past 98 kyr from core SOH-4 (Big Island): a new study and a comparison with existing contemporary data, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2002, vol. 129, no. 3-4, pp. 205-243.
- Maksimochkin V.I. and Tselebrovskiy A.N., The influence of the chemical magnetization of oceanic basalts on determining the geomagnetic field paleointensity by the Thellier method, *Moscow University Physics Bulletin*, 2015, vol. 70, no. 6, pp. 566-576
- Nagata T., Arai Y., and Momose K. Secular variation of the geomagnetic total force during the last 5000 years, *J. Geophys. Res.*, 1963, vol. 68, no. 18, pp. 5277-5281.
- Prévot M., Mankinen E., Grommé S., and Lecaille A. High paleointensities of the geomagnetic field from thermomagnetic studies on rift valley pillow basalts from the Mid-Atlantic Ridge, *J. Geophys. Res.*, 1983, vol. 88, no. B3, pp. 2316-2326.
- Selkin P.A. and Tauxe L. Long-term variations in palaeointensity, *Philos. Trans. R. Soc. London*, ser. A. 2000, vol. 358, no. 1768, pp. 1065-1088.
- Thellier E. and Thellier O. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, *Ann. Geophys.*, 1959, vol. 15, pp. 285-376.
- Yamamoto Y., Tsunakawa H., and Shibuya H. Palaeointensity study of the Hawaiian 1960 lava: implications for possible causes of erroneously high intensities, *Geophys. J. Int.*, 2003, vol. 153, no. 1, pp. 263-276.