

ПАРАМАГНЕТИЗМ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ ДОЛЕРИТОВ ВНУТРИПЛАСТОВЫХ ИНТРУЗИЙ ТРАППОВ ЗАПАДА ЯКУТИИ КАК ОСНОВА КОРРЕЛЯЦИИ ДОЛЕРИТОВ

© 2020 г. Ш. З. Ибрагимов¹, *, Д. М. Кузина¹, **, И. И. Нугманов¹, ***

¹Институт геологии и нефтегазовых технологий, г. Казань, Россия

*E-mail: shamil.ibragimov.1955@mail.ru

**E-mail: di.kuzina@gmail.com

***E-mail: ilmir.nugmanov@kpfu.ru

Поступила в редакцию 29.06.2019 г.

После доработки 23.11.2019 г.

Принята к публикации 27.01.2020 г.

Показано, что значение удельной парамагнитной восприимчивости долеритов зависит от минерального состава породообразующих минералов. Предложены способы расчета удельной парамагнитной восприимчивости пород по кривой термомагнитного анализа (ТМА) и по кривой зависимости $M_i(B)$. Сопоставление значений парамагнитной восприимчивости коллекции образцов, рассчитанных двумя способами, показали хорошую сходимость результатов. Применение предложенной методики на образцах долеритов из керна скважин показало, что по удельной парамагнитной восприимчивости можно проводить корреляцию силлов траппов. В качестве вспомогательного параметра для корреляции силлов можно использовать состав титаномагнетитов в долеритах.

Ключевые слова: долериты, удельная парамагнитная восприимчивость, титаномагнетиты, силл, термомагнитные кривые.

DOI: 10.31857/S0002333720050038

ВВЕДЕНИЕ

Силл – пластообразное тело интрузивных горных пород, залегающее согласно с напластованием вмещающих осадочных. Силлы выполнены долеритами и габро-долеритами. Долериты состоят примерно на 50% из плагиоклаза, на 35–40% из клинопироксена и имеют переменное количество оливина, максимально достигающее 12% [Кутолин, 1972].

Плагиоклазы – твердые растворы, конечными членами ряда которых являются альбит и анортит. Оливины – твердые растворы, конечные члены ряда – форстерит и фаялит. Моноклинные пироксены (клинопироксены) чаще представлены рядами диопсид–геденбергит и авгит–эгирин.

В строении долеритовых силлов отчетливо выделяются верхняя и нижняя приконтактные зоны (ВПЗ и НПЗ), сложенные обычно микро- и мелкозернистыми долеритами, и расслоенная серия (РС), заполняющая основной объем интрузивов. По данным [Феоктистов и др., 1975] в верхней и нижней приконтактной зонах интрузий отмечается повышенное содержание плагиоклазов, в центральной части интрузии преобладают оливины и пироксены.

Закономерности пространственного строения интрузивов определяются динамикой процесса дифференциации и непосредственно отражают законы перераспределения в пространстве магматической камеры компонентов затвердевающего и эволюционирующего по составу расплава [Френкель и др., 1988; Арискин, Бармина, 2000]. Следовательно, основным фактором, определяющим пространственное строение силлов, является распределение температур в интрузии. А это, в первую очередь, будет определяться мощностью интрузии. Т.е. строение маломощных интрузий будет различаться от строения мощных не только соотношением ВПЗ и НПЗ к РС, но и строением, и минеральным составом расслоенной серии. Важнейшей закономерностью строения РС является наблюдаемое изменение их состава от высокотемпературных в нижних частях разрезов к низкотемпературным в верхних. В нижних частях РС будут преобладать оливин-пироксеновые долериты с подчиненным содержанием плагиоклаза, а в верхних частях характерно преобладание плагиоклаза над оливином и пироксеном [Френкель и др., 1988; Арискин, Бармина, 2000]. Динамика процесса остывания интрузии определяет также и не-

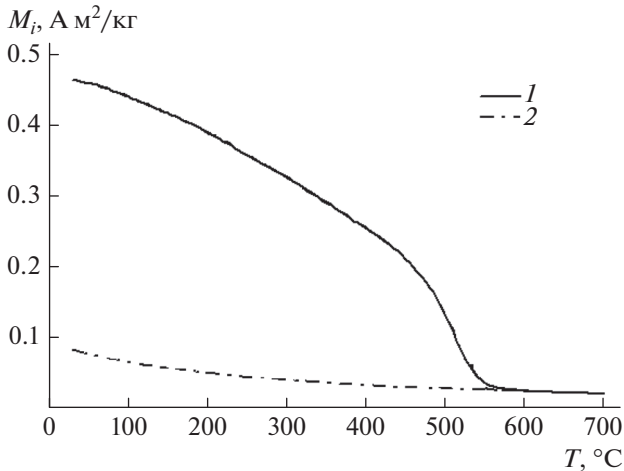


Рис. 1. Выделение парамагнитного фона на кривой $M_i(T)$ первого нагрева для образца долерита 10-186, отобранного из обнажения на р. Ыгыатта (левый приток р. Виллой). Кривая получена в поле $H = 3.2 \times 10^5$ А/м ($B = 400$ мТ). Условные обозначения: 1 — экспериментальная кривая; 2 — парамагнитная составляющая.

которые магнитные свойства долеритов [Метелкин и др., 2019].

Распределение силлообразных интрузий в траппах запада Якутии следующее: силлы мощностью менее 50 метров составляют около 68%, мощностью от 50 до 150 м — 21%, от 150 до 300 м — 11% [Шарапов, 2001].

Были проведены экспериментальные исследования стабильности магнетита и титаномагнетита в силикатных системах. В работе [Snyder et al., 1993] отмечено, что температура кристаллизации титаномагнетита не превышает 1130°C и сильно зависит от окислительно-восстановительных условий. Выделение магнетита из расплавов приводит к резкому обеднению расплава железом и обогащению SiO_2 . В работе [Thy, Lofgren, 1994] сделан вывод о том, что независимо от состава силикатов начальные температуры появления магнетита в кристаллизационной последовательности составляют 1105°C . В работе [Toplis, Carroll, 1995] показано, что высоким температурам кристаллизации магнетита отвечает повышенная окисленность железа в расплавах.

ПАРАМАГНЕТИЗМ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ

Безжелезистые породообразующие минералы (плаггиоклазы, эпидот, хлорит и т.д.) диамагнитны или слабо парамагнитны. Парамагнитная восприимчивость железосодержащих силикатов связана, главным образом, с двух- и трехвалентным железом [Физические..., 1984]. Двух- и трехвалентное железо, входя в состав оливинов и пи-

роксенов, создает повышенную парамагнитную восприимчивость.

Переменный минеральный состав долеритов (плаггиоклазы, клинопироксены и оливины), близкие значения удельной парамагнитной восприимчивости оливинов и клинопироксенов делают невозможным использование удельной парамагнитной восприимчивости для идентификации долеритов. Но тем не менее, увеличенное содержание плаггиоклазов в долеритах будет надежно регистрироваться. Таким образом, анализ удельной парамагнитной восприимчивости долеритов позволит надежно разделять внутрипластовые интрузии на приконтактовые зоны (ВПЗ и НПЗ) и на расслоенную серию.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Терромагнитные кривые по индуктивной намагниченности $M_i(T)$ были получены на установке дифференциального терромагнитного анализа (ДТМА) [Буров, Ясонов, 1981]. Объем пробы в держателе составлял примерно $8-10$ мм³, магнитное поле при измерениях 0.4 Тл, скорость нагрева пробы 100 град/мин, диапазон температур от 20 до 800°C .

Зависимости значений индуктивной намагниченности $M_i(B)$ от приложенного магнитного поля измерялись на коэрцитивном спектрометре (КС) [Yasonov et al., 1998]. Гистерезисные параметры были получены в магнитном поле до 500 мТл.

Магнитная восприимчивость (α) обусловлена содержанием в породе ферромагнитных минералов. Ферромагнитные минералы (магнетит, титаномагнетиты) обладают повышенной магнитной восприимчивости, на четыре–пять порядков превышающую значения для парамагнитных породообразующих минералов. Выделить вклад парамагнитных породообразующих минералов в измеряемый магнитный момент пробы можно двумя способами.

1. На кривой ТМА первого нагрева при температуре, большей, чем максимальная температура Кюри ферромагнетика, измеряемый магнитный момент пробы $M_i(T)$ обусловлен парамагнетизмом породообразующих минералов:

$$M_i = \alpha HV,$$

где: α — магнитная восприимчивость образца; H — напряженность магнитного поля в установке ТМА; V — объем пробы.

Произведение αH есть индуктивная намагниченность пробы J_i , а произведение $J_i V$ — магнитный момент пробы M_i . В установке ТМА измеряется магнитный момент пробы, нормированный на ее вес — M_i/P . Чтобы получить значение M_i , необходимо измеренный параметр M_i/P умножить

на вес пробы. Тогда $\varkappa = M_i P / (HV)$. Чтобы получить значения удельной парамагнитной восприимчивости χ , которая имеет размерность $\text{м}^3/\text{кг}$, надо безразмерное \varkappa умножить на V/P . Следовательно,

$$\chi = M_i / H.$$

Значение M_i в данном случае – это измеряемое на установке ТМА значение магнитного момента пробы (нормированного на вес пробы).

Чтобы сравнивать значение удельной парамагнитной восприимчивости χ с табличными значениями χ минералов, необходимо знать значение χ при комнатной температуре. Для этого в диапазоне температур выше T_c ферромагнетиков определяют постоянную C парамагнетика, исходя из закона Кюри для парамагнетиков:

$$M_i = C / T.$$

Для реальных парамагнетиков используют закон Кюри–Вейса:

$$M_i = C / (T + W),$$

где W – постоянная Вейса. В температурном диапазоне, где определяется постоянная C , выполняется условие $T \gg W$, поэтому постоянную C определяют по закону Кюри. Значение, полученное при комнатной температуре по кривой, построенной с заданным коэффициентом C и будет искомым χ .

II. Определение парамагнитной составляющей по кривой $M_i(B)$. В больших полях ферромагнетика достигают насыщения, и дальнейший линейный

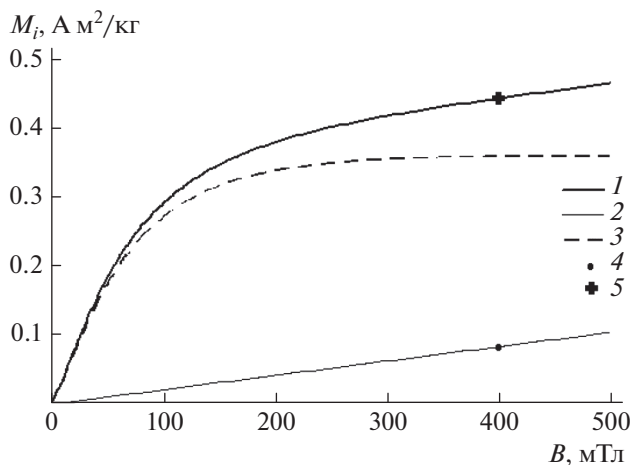


Рис. 2. Разложение кривой $M_i(B)$ образца долерита 10–186 на ферромагнитную и парамагнитную составляющие. Условные обозначения: 1 – экспериментальная кривая; 2 – парамагнитная составляющая; 3 – ферромагнитная составляющая; 4 – значение парамагнитной составляющей в поле 400 мТл (поле в установке ТМА); 5 – значение M_i в поле 400 мТл.

рост намагниченности обусловлен ростом значений для парамагнитной составляющей. На рис. 2 показано разложение кривой $M_i(B)$ того же образца долерита 10–186 на ферромагнитную и парамагнитную составляющие.

Методика разложения кривой $M_i(B)$ на составляющие довольно проста: в интервале от 400 до 500 мТл участок кривой $M_i(B)$ аппроксимируется прямой линией с достоверностью аппроксима-

Таблица 1. Удельная магнитная восприимчивость породообразующих минералов долерита

Название	Формула	Удельная магнитная восприимчивость χ , $10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$	
		*)	**)
Плагиоклазы			
Альбит	$\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	–0.12	
Анортит	$\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$	–0.12	
Клинопироксены			
Авгит	$\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})[(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6]$		2.20
Эгирин	$\text{NaFe}[\text{Si}_2\text{O}_6]$		2.50
Диопсид	$\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$		0.20
Геденбергит	$\text{CaFe}[\text{Si}_2\text{O}_6]$		2.80
Оливины			
Форстерит	$\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$		0.3
Фаялит	$\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$		6.3
Амфиболы			
	$(\text{Mg}, \text{Fe})_7[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$	3.5–11	4.5–11

Примечание: символами *) и **) обозначены источники данных; *) – [Новый справочник..., 2002]; **) – [Ефимов, 1964].

Таблица 2. Результаты расчетов парамагнитной составляющей по данным ТМА и КС по образцу 10-186

$M_i(T): T = 20^\circ\text{C}, B = 400 \text{ мТ}$			$M_i(B): T = 20^\circ\text{C}, B = 400 \text{ мТ}$			M_p средн.	χ (10^{-7} , м ³ /кг)
M_{i_T}	M_{i_f}	M_{p_T}	M_{i_B}	M_{i_f}	M_{p_B}		
0.463	0.397	0.079	0.445	0.361	0.084	0.082	2.507

Таблица 3. Результаты расчетов парамагнитной составляющей по данным ТМА и КС по долеритам силлов

№	M_{i_T}/M_{i_B}	M_{p_T}	M_{p_B}	M_p средн.	Относит. погрешность, %	χ (10^{-7} , м ³ /кг)	
						среднее	+/-
1	1.832	0.033	0.026	0.029	13.1	0.93	0.12
2	0.780	0.078	0.048	0.063	23.9	1.98	0.47
3	1.113	0.056	0.050	0.053	5.7	1.67	0.10
4	1.134	0.182	0.203	0.192	4.8	6.03	0.31
5	0.821	0.064	0.064	0.064	0.0	2.01	0.00
6	1.126	0.073	0.080	0.077	4.4	2.41	0.11
7	1.691	0.058	0.096	0.077	24.6	2.42	0.59
8	0.810	0.101	0.104	0.102	1.5	3.22	0.05
9	0.973	0.102	0.132	0.117	12.6	3.68	0.46
10	1.151	0.081	0.104	0.093	12.2	2.91	0.36
11	1.470	0.063	0.092	0.078	18.6	2.44	0.45
12	1.130	0.082	0.124	0.103	20.5	3.23	0.66
13	1.135	0.063	0.072	0.068	6.5	2.12	0.14

ции не меньше 0.98. Если достоверность аппроксимации ниже этой величины, то ферромагнитная составляющая не достигла насыщения, поэтому необходимо увеличить максимальное поле до 1000 или 1500 мТ.

При аппроксимации получают уравнение прямой $M = kB + M_0$, где угловой коэффициент отвечает за парамагнитную составляющую, а M_0 – значение M_i насыщения ферромагнитной составляющей. Строится график $M_p = kB$ – парамагнитная составляющая, и график $M_i(B) = M_i(B) - M_p(B)$ – ферромагнитная составляющая (рис. 2). Чтобы сопоставить значение M_p , полученные по кривой ТМА, со значением M_p по кривой $M_i(B)$ необходимо по кривой $M_i(B)$ вычислить значение M_p в поле 400 мТ (поле установки ТМА). Для контроля вычисляются также значение M_i при 400 мТл, которое сопоставляется со значением M_i при начальной температуре нагрева в установке ТМА. Значение χ по кривой $M_i(B)$ вычисляется так же, как и в случае термомагнитных кривых, потому что измеряемый магнитный момент пробы также нормируется на вес образца.

Результаты расчетов по образцу 10–186 приведены в табл. 2.

Для проверки предложенной методики использовалась коллекция интрузивных пород (до-

лериты), отобранных из силлов. Если методика расчета удельной парамагнитной восприимчивости верна, то полученные значения χ по кривым $M_i(T)$ и $M_i(B)$ должны совпадать. Результаты расчетов χ показаны в табл. 3.

В табл. 3 в столбце “ M_{i_T}/M_{i_B} ” приведены значения отношений M_i по ТМА (M_{i_T}) и по кривой $M_i(B)$ (M_{i_B}), полученных при $T = 20^\circ\text{C}$ и $B = 400 \text{ мТл}$. Это отношение, в основном, определяется ферромагнитными компонентами образцов и колеблется в пределах от 0.8 до 1.2, с отдельными значениями 1.8 и 0.78. Такое различие в отношении M_{i_T}/M_{i_B} можно объяснить малым объемом пробы в установке термомагнитного анализа – случайным образом в пробу может попасть на одно зерно ферромагнетика больше или меньше. Следует отметить, что не наблюдается какой-либо зависимости от содержания ферромагнетика и соотношения параметров M_{p_T} и M_{p_B} . Например, в образце 1 $M_{i_T}/M_{i_B} = 1.8$ и $M_{p_T} > M_{p_B}$, а в образце 2 $M_{i_T}/M_{i_B} = 0.78$ и $M_{p_T} > M_{p_B}$. В большинстве случаев $M_{p_T} < M_{p_B}$ – это можно объяснить влиянием суперпарамагнитных частиц. В некоторых случаях $M_{p_T} > M_{p_B}$ – наиболее вероятная причина: окисление двухвалентного железа до трехвалентного в результате нагрева пробы.

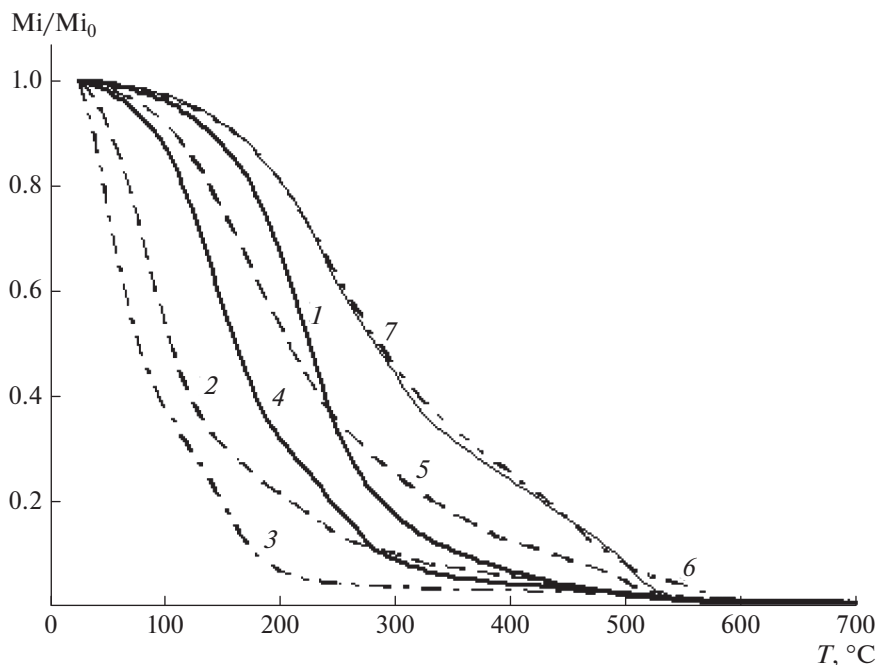


Рис. 3. Нормированные кривые термомагнитного анализа первого нагрева образцов долеритов из скважины. Номера обозначены кривые образцов, отобранных с глубин: 1 – 6 м; 2 – 12 м; 3 – 23 м; 4 – 30 м; 5 – 40 м; 6 – 50 м; 7 – 55 м.

В целом, получено неплохое соответствие удельных парамагнитных восприимчивостей, рассчитанных по данным термомагнитного анализа и коэрцитивных спектров. По мнению авторов, результаты расчетов по термомагнитному анализу более достоверны, чем расчеты по кривым $M_i(B)$, что связано с влиянием суперпарамагнитных зерен.

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ КОРРЕЛЯЦИИ ВНУТРИПЛАСТОВЫХ ИНТРУЗИЙ (СИЛЛ)

Из скважины, пробуренной по телу межпластовой интрузии, с разных глубин были отобраны образцы керна, по полевому описанию в интервале 1.2–56.2 м скважиной вскрыты долериты. Отбор проб на исследование проводился с глубин 6, 12, 23, 30, 40, 50 и 55 м, выбирались образцы без следов выветривания. По всем образцам был проведен термомагнитный анализ. Кривые ТМА образцов (первый нагрев) показаны на рис. 3. Каждая кривая ТМА нормирована на значение магнитного момента при 20°C (M_{i0}). Следует отметить, что значения M_{i0} термомагнитных кривых различаются незначительно. во всех образцах регистрируется две ферромагнитные компоненты, за исключением одного, отобранного с глубины 23 м. Первая компонента (С1), с температурой Кюри от 160 до 320°C, обусловлена титаномагнетитом. Вторая

компонента (С2), с температурой Кюри от 550 до 580°C, обусловлена магнетитом. Для выделения компонент на термомагнитной кривой применена методика, описанная в работе [Ибрагимов и др., 1999]. В результате обработки кривой ТМА были получены количественные оценки компонент С1 и С2 – значения магнитного момента первой и второй компоненты при 20°C.

На рис. 4а показан результат расчета удельной парамагнитной восприимчивости по образцам из скважины. В начале и в конце интервала отмечаются пониженные значения удельной парамагнитной восприимчивости. Это соответствует верхней и нижней приконтактным зонам. По мнению авторов [Френкель, 1988; Арискин, Бармина, 2000], мощность нижней приконтактной зоны не превышает первых десятков сантиметров, так что можно считать удачей регистрацию НПЗ. Мощность верхней приконтактной зоны – первые метры, с большой долей вероятности, образец с глубины 6 м, отобран в зоне перехода от ВПЗ к РС. Расслоенная серия, вследствие повышенного содержания клинопироксенов и оливина, отмечается повышенными значениями удельной парамагнитной восприимчивости.

Для сопоставления ферромагнитных минералов со строением интрузии были рассчитаны два параметра. Первый параметр x отражает состав титаномагнетитов. Титаномагнетиты являются твердым раствором, крайними членами ряда этого твердого раствора являются магнетит Fe_3O_4 и

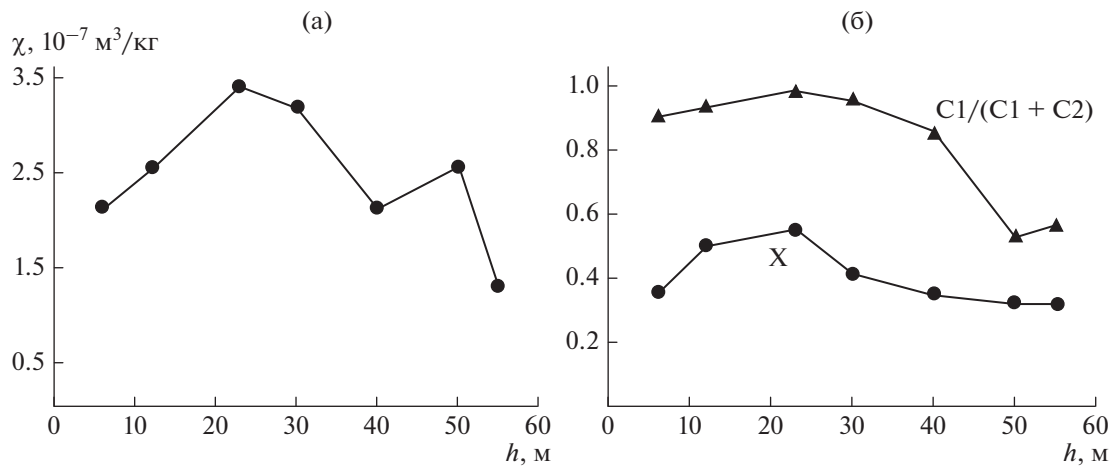


Рис. 4. Удельная парамагнитная восприимчивость χ (4а), состав титаномагнетитов первой компоненты и вклад первой компоненты в измеряемый магнитный момент образцов (4б).

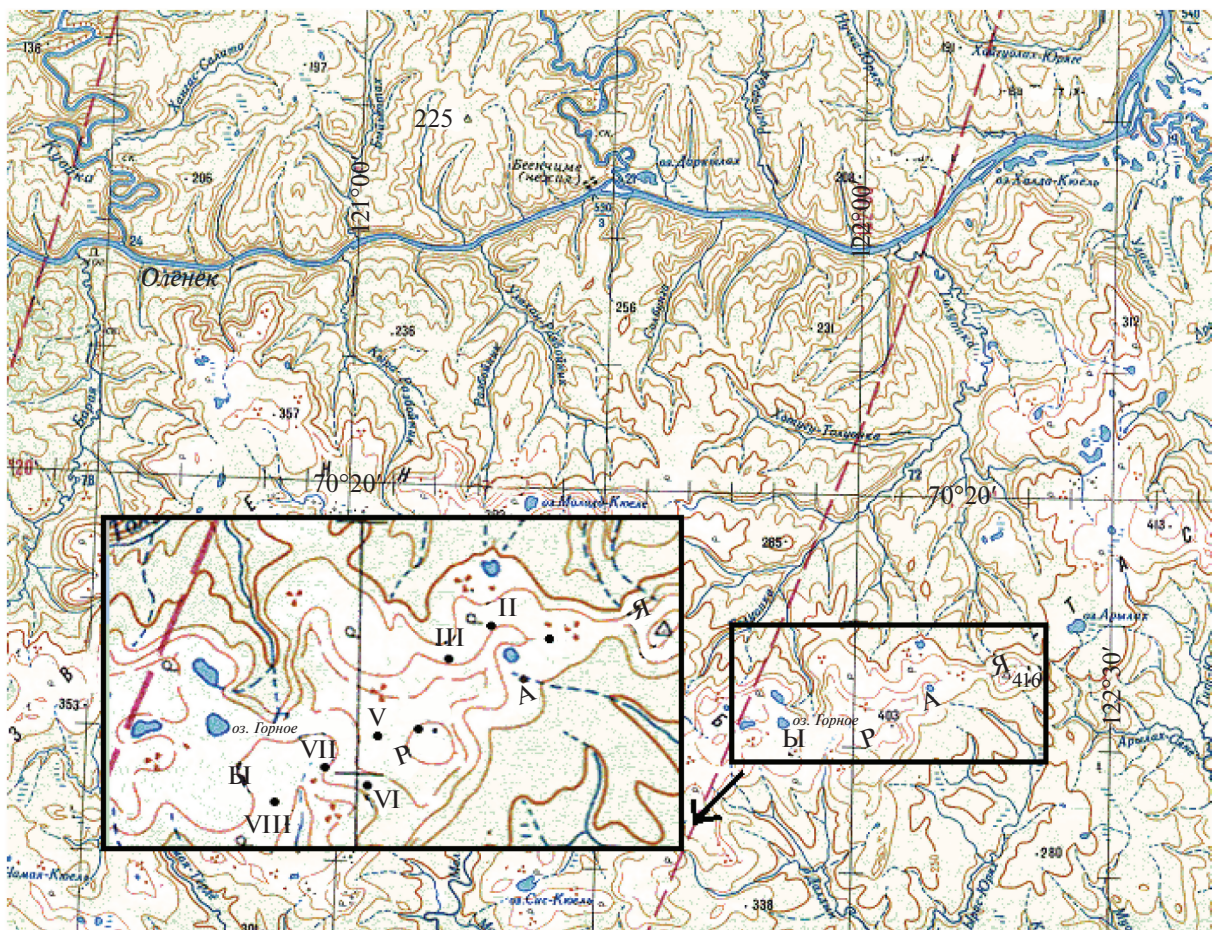


Рис. 5. Расположение бурового профиля из 8 скважин. Малым прямоугольником показана территория, на которой расположен буровой профиль. В большом прямоугольнике – в более крупном масштабе показана территория малого прямоугольника, точками и римскими цифрами показаны скважины.

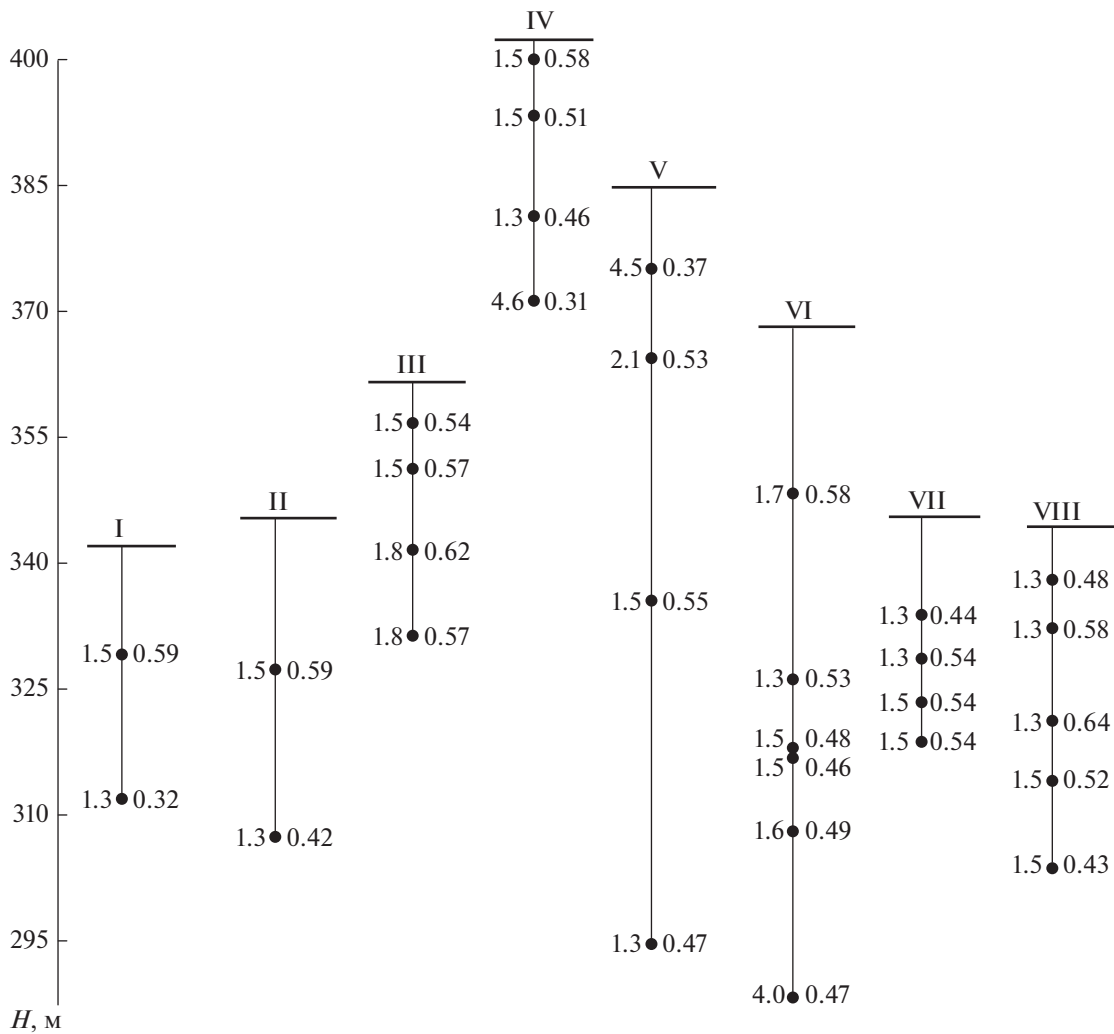


Рис. 6. Скважины (I–VIII), пробуренные по буровому профилю. Глубина H приведена в абсолютных высотах. Точками обозначены места отбора керна, цифрами рядом с точками отбора показаны: справа – состав титаномагнетита (x); слева – значения удельной парамагнитной восприимчивости χ ($n \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$).

ульвошпинель Fe_2TiO_4 . Состав титаномагнетита можно записать как $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$, где $1 \geq x \geq 0$. Температура Кюри титаномагнетита однозначно связано с его составом [Dunlop, Ozdemir, 1997]. Поэтому через температуру Кюри рассчитывается состав титаномагнетита (x). Второй параметр $C1/(C1 + C2)$ отражает вклад титаномагнетита в измеряемый магнитный момент при 20°C . На рис. 4б показаны распределения этих двух параметров по скважине. До глубины 40 м основной вклад в намагниченность образцов вносят титаномагнетиты, где x варьирует от 0.35 до 0.56. В подошве интрузии вклад титаномагнетита почти равен вкладу магнетита, причем состав титаномагнетита $x = 0.3$.

Состав и количество титаномагнетита зависит от окислительно-восстановительных условий. Как было сказано выше, высоким температурам

кристаллизации магнетита отвечает повышенная окисленность железа в расплавах и выделение магнетита из расплавов приводит к резкому обеднению расплава железом. Можно предположить, что вначале из расплава выделяется магнетит, у которого в составе есть трехвалентное железо. Затем образуется титаномагнетит, который в составе имеет двухвалентное железо и четырехвалентный титан. Чем меньше остается железа в расплаве после образования магнетита, тем больше параметр x титаномагнетита.

Для опробования методики корреляции интрузий траппов были проведены исследования образцов из кернов 8 скважин. Территория, где расположены скважины, относится к водоразделу бассейнов р. Оленек и р. Лена (рис. 5). Всеми скважинами были вскрыты долериты межпластовых интрузий позднепермского – раннетриасо-

вого возраста. По всем образцам керна скважин был проведен термомагнитный анализ. Результаты обработки термомагнитных кривых образцов показаны на рис. 6.

На гипсометрическом уровне 360–295 м во всех скважинах отмечаются титаномагнетиты с составом $0.41 < x < 0.52$, удельная парамагнитная восприимчивость – в пределах $(1.3–1.7) \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$. Такая однородность магнитных параметров позволяет сделать предположение о едином геологическом теле (силле), который располагается в интервале 295–360 м.

В двух скважинах (IV и V) на гипсометрическом уровне 370–380 м вскрываются долериты с иными магнитными параметрами: состав титаномагнетитов 0.63 и 0.69; удельная парамагнитная восприимчивость $(4.5 \text{ и } 4.6) \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$. Можно предположить, что долериты, вскрытые в скважинах IV и V на гипсометрическом уровне 370–380 м, принадлежат к другому силлу.

Скважиной V на уровне ниже 290 м вскрываются долериты третьего типа: у них $\chi = 4.0 \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$, но состав титаномагнетита 0.53. Из-за единичности образца делать выводы о третьем силле преждевременно.

ВЫВОДЫ

Предложена и опробована методика выделения удельной парамагнитной восприимчивости долеритов на фоне содержания ферромагнитных минералов.

Показано, что удельная парамагнитная восприимчивость долеритов зависит от их состава. Состав породообразующих минералов долеритов внутрипластовых интрузий зависит как от состава исходного расплава, так и от динамики кристаллизации. Это является основанием для корреляции интрузивов.

Показано, что состав титаномагнетитов в силлах подчиняется определенной закономерности. В верхней части интрузии преобладают титаномагнетиты со значительным содержанием титана, в нижней части – титаномагнетиты, обедненные титаном, и значительная часть намагниченности обеспечивается магнетитом.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арискин А.А., Бармина Г.С.* Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: Наука. 2000. 363 с.
- Ефимов Ф.Н.* Магнитно-фракционно-минералогический анализ (МФМА) горных пород. М.: Недра. 1964. 224 с.
- Ибрагимов Ш.З., Ясонов П.Г., Денисов И.Г.* Разложение на компоненты кривых температурной зависимости намагниченности насыщения многофазной ферримагнитной фракции образцов горных пород // Физика Земли. 1999. № 12. С. 65–69.
- Кутолин В.А.* Проблемы петрохимии и петрологии базальтов. Новосибирск: Наука. 1972. 208 с.
- Метелкин Д.В., Лавренчук А.В., Михальцов Н.Э.* О возможности записи инверсий геомагнитного поля в долеритовых силлах Норильского района: результаты математического моделирования // Физика Земли. 2019. № 6. С. 24–33.
- Минералогия траппов юга Сибирской платформы. Новосибирск: Наука. 1975. 87 с.
- Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. Ч. I. С.-Пб.: АНО НПО “Мир и семья”, АНО МПО “Профессионал”. 2002. 988 с.
- Феоктистов Г.Д., Уцаповская З.Ф., Васильев В.К., Ляхно Т.А., Елизарьева Т.И.* Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика / Под ред. Н.Б. Дортман. 2-е изд. (перераб. и доп.). М.: Недра. 1984. 455 с.
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. М.: Недра. 1984. 455 с.
- Френкель М.Я., Ярошевский А.А., Арискин А.А., Бармина Г.С., Коптев-Дворников Е.В., Киреев Б.С.* Динамика внутрикамерной дифференциации базитовых магм. М.: Наука. 1988. 216 с.
- Шарапов В.Н., Мазуров М.П., Перепечко Ю.В.* Модельный анализ трапповых мантийно-коровых рудно-магматических систем Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 12. С. 1205–1226.
- Dunlop D.J., Ozdemir O.* Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers. Cambridge University Press. Cambridge and New York. 1997. 573 p.
- Snyder D., Carmichael I.S.E., Wiebe R.A.* Experimental study of liquid evolution in a Fe-rich, layered mafic intrusion: constraints of the Fe–Ti oxide precipitation on the T - fO and T - r paths of tholeiitic magmas. Contrib. Mineral. Petrol. 1993. V. 113. P. 73–86.
- Thy P., Lofgren G.E.* Experimental constraints on the low-pressure evolution of transitional and mildly alkalic basalts: the effect of Fe–Ti oxide minerals and the origin of basaltic andesites // Contrib. Mineral. Petrol. 1994. V. 116. P. 340–351.
- Toplis M.J., Carroll M.R.* An experimental study of the influence of oxygen fugacity on Fe–Ti oxide stability, phase relations, and mineral-melt equilibria in ferro-basaltic systems // J. Petrol. 1995. V. 36. P. 1137–1170.

Paramagnetism of Rock-Forming Dolerite Minerals of Intraformational Trap Intrusions in West Yakutia as the Basis for Dolerite Correlation

Sh. Z. Ibragimov^{a, *}, D. M. Kuzina^{a, **}, and I. I. Nugmanov^{a, ***}

^a*Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan, 420008 Russia*

^{*}*e-mail: shamil.ibragimov.1955@mail.ru*

^{**}*e-mail: di.kuzina@gmail.com*

^{***}*e-mail: Ilmir.Nugmanov@kpfu.ru*

It is shown that specific paramagnetic susceptibility of dolerites depends on mineral composition of the rock-forming minerals. The methods for calculating the specific paramagnetic susceptibility of rocks from thermomagnetic (ТМА) curve and from the curve of $M_i(B)$ dependence are proposed. The paramagnetic susceptibility estimates of the collection of samples calculated by the two proposed methods demonstrates good convergence of the results. The application of the suggested approach on dolerite samples from the well cores has shown that specific paramagnetic susceptibility can be used as a basis for correlating the trap sills. Titanomagnetite composition in dolerites can be used as an auxiliary parameter in sill correlation.

Keywords: dolerites, specific paramagnetic susceptibility, titanomagnetites, sill, thermomagnetic curves