

О техногенной намагниченности пород геопространства СГ-3

В.А. Тюремнов^{1,2}

¹ Геологический институт КНЦ РАН, Анапиты

² Анапитский филиал МГТУ

Аннотация. Приведены некоторые результаты исследования воздействия ударных и статических нагрузок, моделирующих процессы бурения, а также взрывных нагрузок на магнитные свойства горных пород. Делается вывод о необходимости учета образующейся техногенной намагниченности пород при палеомагнитных реконструкциях и при изучении аномальных магнитных полей импактных структур.

Abstract. The influence of impact and static loads modelling drilling processes and explosion loads on the rock magnetic properties have been investigated and the results of the study are presented. The resulting man-caused rock magnetization in the palaeomagnetic reconstructions and study of anomalous magnetic fields in impact structures should be taken into account.

1. Введение

Исследование магнитных свойств пород и их природы имеет большое значение для решения фундаментальной проблемы – формирования магнитоактивного слоя литосферы. Известно, что горные породы верхних слоев земной коры находятся в сложном поле тектонических напряжений и деформаций. При этом давление является одним из основных термодинамических параметров, влияющих на физические (в том числе, магнитные) свойства геологической среды. Интенсивность наблюдаемого геомагнитного поля определяется, в первую очередь, магнитными свойствами горных пород и особенностями ферромагнитных минералов, зависящими от их вещественного состава, морфогенетических, структурных и других факторов, в том числе от магнитоупругой анизотропии минералов.

Локальные аномалии магнитного поля, как установлено, могут вызываться тектономагнитными эффектами как природного, так и техногенного происхождения (*Горяинов и др.*, 1990; *Сковородкин*, 1985). В связи с этим интересно было изучить изменение магнитных свойств пород под влиянием механических воздействий, создаваемых при проходке Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3).

2. Результаты исследования

подавляющая часть пород протерозойско-архейского комплекса в геопространстве СГ-3 является слабомагнитными. Исключение составляют metabазальты с сульфидным оруденением, железистые кварциты, некоторые образования ждановской свиты, обогащенные рудными минералами, а также metabазальты пиргтийярвинской свиты. Последние содержат магнетит, определяющий общее магнитное состояние пород и неоднородность величины их естественной остаточной намагниченности (ЕОН), которая зависит, с одной стороны, от соотношения в породе магнетита и пирротина, а с другой – от реакции этих ферромагнетиков на механические напряжения, возникающие в породе. Уже при механической обработке образцов-гомологов с поверхности было отмечено, что ЕОН пород изменяется в широких пределах, но преимущественно в сторону повышения (табл. 1).

Максимальное увеличение ЕОН (до 400 %) отмечено в железистых кварцитах. Это явление объясняется возникновением термоупругих напряжений в объеме образца, имеющего значительную величину ЕОН (*Валеев, Абсалямов*, 1988). В принципе любое механическое воздействие, сопровождаемое нагревом и последующим охлаждением породы в магнитном поле, способно создавать устойчивую магнитную текстуру в ферромагнитных зернах. Установлено, что при термомеханической обработке материалов образуется, в основном, текстура смещения, т.е. текстура, при которой вектора спонтанной намагниченности доменов ориентируются в направлении осей лёгкого намагничивания кристаллитов, ближайших к плоскости, перпендикулярной направлению сжатия. Величина оптимальной нагрузки, при которой будет наблюдаться наиболее устойчивая магнитная текстура, зависит от состава ферромагнитного вещества, температуры разогрева и охлаждения и от предистории горной породы. Уже при полировке одной из граней кубиков пород наблюдаются изменения магнитных параметров образцов, обусловленные термомеханической обработкой и возникающими термоупругими напряжениями (табл. 2).

При этом направление вектора ЕОН также меняется в пределах объема породы (штуфа). В этом случае среднеквадратичное отклонение вектора ЕОН от среднего направления может достигать 40°, и только в породах лучломпольской свиты этот параметр варьирует в пределах 1-5°. Пределы изменений величины и углов наклонов вектора ЕОН образцов, отобранных с поверхности и из скважины,

существенно различаются. По-видимому, при бурении происходит образование динамической намагниченности пород под влиянием ударного воздействия бурового инструмента. Отмечаемая неоднородность ЕОН пород из разреза СГ-3 и их разная реакция на термодинамические нагрузки свидетельствует о том, что наблюдаемая намагниченность является векторной суммой различных видов ЕОН с их разной стабильностью по отношению к механическим напряжениям и переменным магнитным полям.

Все виды ЕОН отражают и сохраняют в своей памяти события как историко-геологического, так и техногенного характера. Среди последних наименее изучено магнитное поле, создаваемое буровым инструментом, однако его можно оценить, если воспользоваться формулой:

$$H_z = 2\pi I [z/(a^2 + z^2)^{0.5} - z/(b^2 + z^2)^{0.5}] + H_{z0},$$

где a, b – внешний и внутренний радиусы бурового инструмента (в данном случае $a = 214$ мм, $b = 80$ м), z – расстояние бурового инструмента по оси от забоя, H – напряженность земного магнитного поля, I – намагниченность материала ($\alpha = 90$ ед.СИ) (Крутиховская и др., 1964). Расчеты показали, что эта намагниченность может превышать 10 кА/м на расстоянии 7-10 см от забоя и, следовательно, породы могут подвергаться значительному магнитному воздействию бурового инструмента.

Нами изучено влияние ударных, взрывных и статических нагрузок в присутствии магнитного поля на различные виды остаточной намагниченности (ОН) пород – нормальную I_n , естественную I_n , термоостаточную I_{n0} , идеальную I_{ni} , динамическую I_{nd} . Эти виды намагниченности могут значительно превышать индуктивную намагниченность, особенно у пород с сульфидным оруденением, и определять их общее магнитное состояние. Как правило, породы с пирротином, обладающим относительно низкой магнитной восприимчивостью, но значительной остаточной намагниченностью, характеризуются высоким значением коэффициента Кенигсбергера ($Q \gg 1$).

Таблица 1. Влияние механической обработки горных пород с поверхности и времени выдержки образцов в лабораторном поле в течение 190 суток на их остаточную намагниченность

Номер штуфа	Порода	Штуфы			Образцы			Образцы после выдержки в лабораторном поле		
		I_n , А/м	α°	J°	I_n , А/м	α°	J°	I_n , А/м	α°	J°
<i>Матертьская свита</i>										
203	Метабазальт	1.45	74	19	1.56	77	16	1.52	78	16
203	То же	1.45	74	19	1.06	77	27	1.02	76	28
219	>>	1.90	9	28	1.56	7	34	2.20	7	34
219	>>	1.90	9	28	1.58	5	35	2.23	5	35
228	>>	1.14	23	71	1.18	41	52	1.10	38	44
<i>Ждановская свита</i>										
84	Филлит, сланец	0.66	293	8	0.70	284	10	0.70	284	11
84	То же	0.66	293	8	0.47	279	14	0.46	280	16
6992	>>	2.15	27	4	4.70	353	30	4.50	356	28
4208	Метакрилит	35.5	105	55	122.00	100	82	120.00	104	82
74	Серпентинит	5.40	41	75	6.70	62	85	6.10	52	82
74	То же	5.40	41	75	6.75	43	65	6.20	41	68
<i>Пирттиярвинская свита</i>										
5	Метапорфирит	1.20	2	0	1.30	0	-16	1.20	357	-18
9	Метатрахит	0.65	270	0	1.55	296	-35	1.45	295	-32
26	Метабазальт	0.29	240	41	0.55	200	76	0.53	202	72

Примечание: в качестве образцов использовали, как правило, по два кубика с длиной ребра 24 мм, изготовленных из одного штуфа. I_n – ЕОН породы, α° и J° – углы склонения и наклона вектора ЕОН, соответственно.

Таблица 2. Влияние полировки одной из граней кубиков пород из разреза СГ-3 и с поверхности на пределы относительного изменения величины и угла наклона вектора ЕОН

№ п/п	Свита, толща	Кол-во образцов	I_{ni}/I_{no}	Пределы J°
1	Матертьская	4*	0.95-1.47	-0.3 ± 1.9
2	То же	8	0.80-3.27	-20.5 ± 14.6
3	Заполянная	3	0.93-2.32	-25.3 ± 30.3
4	Лучломпольская	5	0.82-1.30	1.0 ± 5.0
5	Пирттиярвинская	11	0.71-4.19	-3.14 ± 17.0
6	Архей	4	0.79-2.33	-32.0 ± 16.7

*Образцы с поверхности.

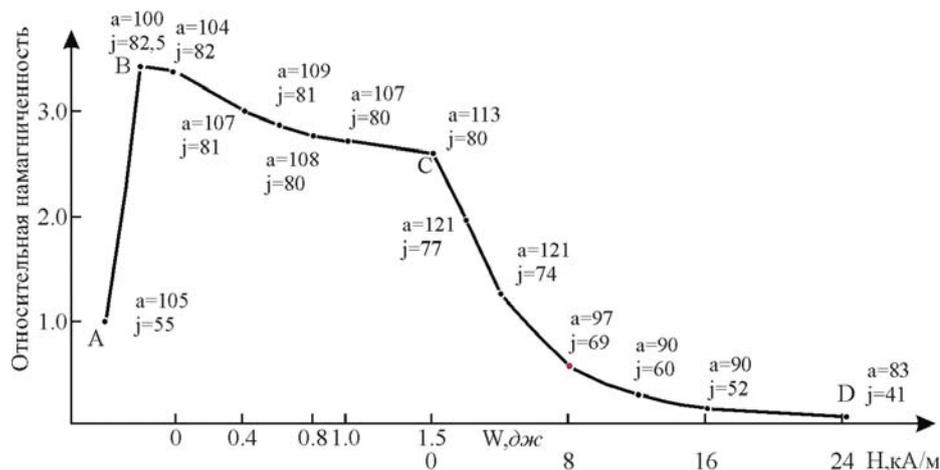


Рис. 1. Влияние ударного воздействия W и напряженности магнитного поля H на относительную намагниченность пироксенита ($I_n = 35.0$ А/м; $\chi = -60 \cdot 10^{-3}$ СИ):

a, j – углы склонения и наклона вектора ОН (в град.).

Точка А соответствует штуфу породы, точка В – образцу, изготовленному из этого штуфа; интервалы ВС и СД характеризуют процесс размагничивания образца под влиянием ударного воздействия и переменного магнитного поля.

У магнетитсодержащих пород этот параметр всегда меньше единицы, их ОН менее стабильна к воздействию переменных магнитных полей, температуры и динамических нагрузок. Поэтому для экспериментов были выбраны метастабильные породы, к которым относятся большинство пород Печенгской структуры и, в частности, железистые кварциты. Кроме того, использовались некоторые интрузивные образования типа габбро, с достаточно жёсткой намагниченностью. Измеряли магнитные характеристики образцов-кубиков с длиной ребра 24 мм магнитометром МА-21 и рок-генератором ИОН-1. Статическое осевое давление создавалось с помощью прессы из немагнитного материала (бронзы) в магнитном поле лаборатории (10 А/м). Ударные воздействия моделировались с применением немагнитного копра. Взрывы осуществлялись капельными детонаторами и ВВ массой 0.5-1.0 г, которые помещали на одной из граней образца. Эффекты размагничивания и намагничивания пород достигались с помощью магнитных полей, создаваемых кольцами Гельмгольца и соленоидом. В первую очередь были поставлены эксперименты по изучению зависимости величины ЕОН породы от масштабного фактора (размера образцов, получаемых методом механического дробления). Установлено, что если для сильномагнитных пород, в частности, серпентинитов с магнетит-хромитовым оруденением, величина ОН возрастает с уменьшением объёма образца, то для серпентинитов, намагниченность которых на порядок ниже, такой корреляции не наблюдается. В большинстве случаев зависимость намагниченности пород от их объёма отмечается и при распиловке керна на кубики. При этом изменяется не только величина намагниченности образцов, но и её направление (рис. 1, табл. 1). Влияние динамических нагрузок в виде ударного воздействия на величину ОН наиболее наглядно было смоделировано на образцах железистых кварцитов, предварительно полностью размагниченных.

При выбуривании образца из штуфа пироксенита алмазной коронкой его намагниченность увеличивается более чем в три раза (точка В, рис. 1), под ударным воздействием она несколько уменьшается (интервал ВС), хотя направление вектора ОН остается практически постоянным. Под влиянием переменного магнитного поля (интервал СД) происходит резкое изменение ОН породы по величине и направлению за счет разрушения нестабильных компонент.

Динамическая намагниченность железистых кварцитов возрастает с повышением напряженности магнитного поля при постоянной энергии удара и с увеличением энергии ударного воздействия в постоянном магнитном поле (рис. 2).

Эта динамическая намагниченность, образующаяся в результате одновременного воздействия переменных механических напряжений и постоянного магнитного поля, всегда является составной частью ЕОН пород. По сравнению с другими видами ОН эта намагниченность по своей природе оказывается менее стабильной к тем же воздействиям, при которых она образуется (рис. 3), и к размагничиванию переменным магнитным полем.

Наиболее жёсткой является термоостаточная намагниченность пород. ЕОН занимает среднее положение, отражая тем самым свою сложную природу и реакцию по отношению к механическим напряжениям.

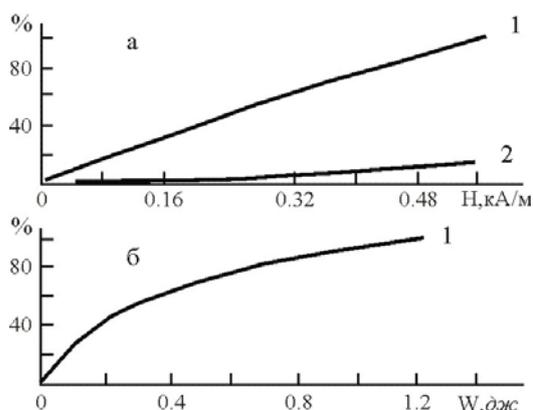


Рис. 2. Изменение остаточной динамической намагниченности I_{rd} образцов железистых кварцитов в зависимости от напряженности магнитного поля H (а) при постоянной энергии удара $W = 1$ Дж (1) и без ударного воздействия (2), а также от энергии удара W (б) в постоянном магнитном поле.

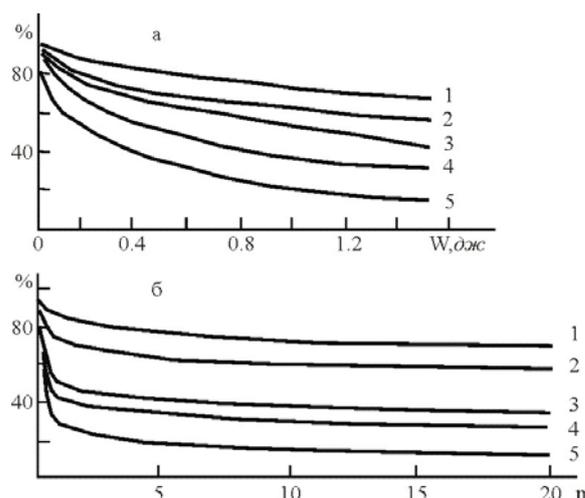


Рис. 3. Изменение остаточной намагниченности железистых кварцитов в зависимости от энергии удара W (а) и числа ударов n (б): 1 – I_{rd}^{600} ; 2 – I_{ri} ; 3 – I_n ; 4 – I_r ; 5 – I_{rd} .

Взрывное воздействие накладными зарядами приводит к существенной сжимаемости пород и изменению их магнитного состояния. Возникающая намагниченность при взрывах по своей природе также относится к динамической. При этом в магнитоустойчивых породах с высоким параметром Q и содержащих тонкодисперсный магнетит образующаяся намагниченность, в данном случае взрывная, сопровождается уменьшением суммарной ОН, однако в породах менее стабильных ($Q < 10$) с сульфидным оруднением тот же заряд ВВ вызывает увеличение ОН и более интенсивный спад этой намагниченности во времени (рис. 4).

При взрыве ВВ на образцах железистых кварцитов наблюдается как возрастание первичной намагниченности, так и её уменьшение (табл. 3).

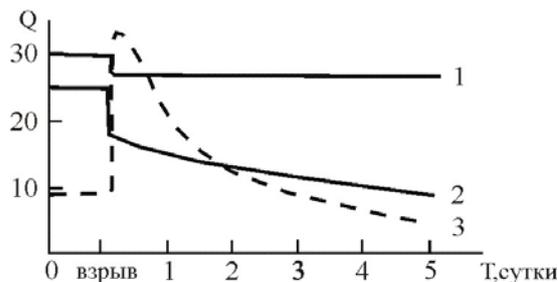


Рис. 4. Характер изменения намагниченности образцов габброноритов при взрыве 0.5 г ВВ в зависимости от соотношения остаточной и индуктивной намагниченностей (Q). 1-3 – номера образцов с различным начальным значением Q .

Таблица 3. Изменение во времени относительной величины ЕОН и ее направления у образцов железистых кварцитов после взрывных воздействий

Номер образца	I_{ni}/I_{n0}					J°					
	после взрыва	через, сутки				до взрыва	после взрыва	через, сутки			
		2	7	15	25			2	7	15	25
<i>Взрывчатое вещество (0.5 г)</i>											
1797 [*]	1.01	–	1.22	1.32	0.95	20	19	–	–4	0	–11
1797	1.56	–	0.5	0.34	0.32	6	–1	–	21	35	23
1747 [*]	1.05	–	0.53	0.61	0.78	–9	10	–	22	17	13
1747	0.3	–	1.48	1.55	1.48	70	72	–	–45	–44	–48
1789	0.22	–	0.24	0.22	0.24	–12	–66	–	–54	–34	–40
1791	0.86	–	0.67	0.8	0.63	–76	10	–	25	68	68
<i>Капельный детонатор</i>											
42(1)	0.32	0.34	–	–	–	1.5	60.5	55.2	–	–	–
42(2)	0.46	0.49	–	–	–	6.2	–15.2	–9.5	–	–	–
55(1)	0.55	0.44	–	–	–	75.7	43.4	73.6	–	–	–
55(2)	0.21	0.2	–	–	–	71.5	42	38	–	–	–
57(1)	0.71	0.71	–	–	–	2	4.7	4.5	–	–	–

57(2)	0.86	0.86	-	-	-	-0.5	2.2	2.2	-	-	-
-------	------	------	---	---	---	------	-----	-----	---	---	---

Увеличение намагниченности отмечается у образцов, у которых взрывы производились в плоскости слоистости пород и где условия распространения взрывной волны отличаются от других направлений, т.е. в анизотропных средах. При взрыве накладными зарядами в образце образуется так называемая камуфлетная зона, или полость, равная примерно двойному диаметру заряда. В этой зоне происходит максимальное уплотнение породы под влиянием температуры и давления, а также отмечается развитие трещиноватости с последующим разрушением породы. Под воздействием одноосного давления (100 МПа) в предварительно размагниченных образцах в присутствии постоянного магнитного поля (10 А/м) также возникает динамическая (пьезоостаточная) намагниченность.

В процессе снятия давления величина ОН несколько уменьшается вследствие упругих и необратимых магнитных изменений в породе. При ортогональной ориентировке оси давления относительная величина необратимых изменений и намагничивающего поля составила 0.82-0.92. При совпадении ориентировки указанных факторов она несколько выше – 0.95-1.05, т.е. в этом случае намагниченность образцов после снятия нагрузки возрастает и так же, как при взрывном воздействии, изменяется в зависимости от времени воздействия постоянной нагрузки в постоянном магнитном поле. Известно, что при наложении одноосного давления на образец, находящийся в магнитном поле, к свободной энергии кристалла добавляется магнитостатическая энергия. В результате происходит преимущественный рост объёма доменов, магнитные моменты которых составляют меньший угол с внешним полем, за счёт их вращения в направлении внешнего магнитного поля и за счёт смещения доменных границ. Это приводит к образованию пьезоостаточной намагниченности пород.

Таким образом, в процессе проходки скважины под влиянием динамических и статических нагрузок, а также переменных и постоянных магнитных полей может возникнуть значительная техногенная намагниченность пород, особенно у пород, содержащих ферромагнитные минералы. Величина техногенной намагниченности пород может превышать в несколько раз первичную и природную вторичную намагниченности. Для палеомагнитных реконструкций и надёжной интерпретации данных магнитного каротажа необходима оценка магнитной жесткости и стабильности пород. Результаты этих исследований могут быть использованы при интерпретации магнитных полей и изучении магнитных свойств пород в районах импактных кратеров, которые образовались под влиянием ударных волн и сильных электромагнитных полей.

3. Выводы

При механической обработке пород их естественная остаточная намагниченность изменяется в широких пределах, но преимущественно в сторону повышения. Пределы изменений величины и наклонов вектора ЕОН образцов, отобранных с поверхности и из скважины, существенно различаются.

Благодарности. Автор выражает благодарность кандидатам г.м. наук *Ю.П. Смирнову, Ю.Н. Яковлеву, Ж.А. Федотову* за консультации и полезные советы и особенно доктору техн. наук *Д.М. Губерману* за поддержку постановки данной работы.

Литература

- Валеев К.А., Абсалямов С.С.** Магнитные свойства горных пород при высоких термодинамических параметрах. *Саратов, изд. Саратов. ун-та*, 210 с., 1988.
- Горяинов П.М., Балабонин Н.Л., Тюремнов В.А.** Типы железорудных ансамблей и их геомагнитная систематика. *Апатиты, КНЦ АН СССР*, 170 с., 1990.
- Крутиховская З.А., Завойский В.Н., Подолянко С.М., Савенко Б.Я.** Намагниченность пород железорудных формаций Большого Кривого Рога и КМА. *Киев, Наукова Думка*, 178 с., 1964.
- Сковородкин Ю.П.** Изучение тектонических процессов методами магнитометрии. *М., изд. ИФЗ АН СССР*, 197 с., 1985.