

В. А. Шашканов, А. А. Костеров, К. Н. Ананичев, А. А. Бачурин

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОРИЕНТАЦИОННОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Магнитная анизотропия осадочных горных пород

Магнитная анизотропия осадочных горных пород известна довольно давно. Еще в 1942 г. Изинг [1] установил, что магнитной восприимчивости скандинавских ленточных глин свойственна вертикальная магнитная анизотропия: $\chi_{\parallel}/\chi_{\perp} = 1,1 \div 1,5$, где χ_{\parallel} и χ_{\perp} — магнитные восприимчивости, измеренные в плоскости напластования осадка и в перпендикулярном ей направлении соответственно. В последующем магнитная анизотропия осадков изучалась по отношению как к индуктивной, так и к остаточной намагниченности (идеальной и нормальной) [2–16]. Предложены различные теоретические модели, позволившие приблизиться к пониманию природы и механизма образования магнитной анизотропии осадочных горных пород [2, 17–19].

Наибольшее внимание уделялось вертикальной магнитной анизотропии, которая широко распространена в естественных осадках. Была выявлена корреляция ее с элементами залегания осадочных горных пород, указывающая на то, что причина формирования вертикальной магнитной анизотропии тесно связана с процессом седиментогенеза. Среди теоретических моделей, предложенных с целью понять конкретный механизм образования вертикальной анизотропии, отметим модель Р. Кинга [2], где причиной ее возникновения принимается уплощенная форма части зерен магнетика осадка; модели В. И. Белокопя [17] и наша [18], в которых возникновение вертикальной магнитной анизотропии связывается с неоднородным распределением частиц магнетика по объему осадка и, как следствие, анизотропным магнитостатическим взаимодействием между частицами.

Однако, в силу ориентации магнитных моментов частиц магнетика осадка под действием магнитного поля в процессе седиментации, магнитная анизотропия осадков должна, помимо вертикальной компоненты, включать в себя и составляющую, обусловленную непосредственно этой ориентацией. По аналогии с ориентационной намагниченностью, эту компоненту магнитной анизотропии принято называть ориентационной анизотропией.

Теоретическое исследование ориентационной магнитной анизотропии проводилось в работах [20–22]. Используя формализм диаграммы Прейзаха–Нееля для вычисления идеальных намагниченностей и вводя вытекающее из постулатов кластерной теории магнетизма осадков [18] предположение, что направления магнитных моментов частиц, осажженных в некотором внешнем магнитном поле H , следуют фишеровскому распределению [23] с параметром ориентации (кучностью) K , прямо пропорциональным внешнему полю, авторы [22] вычислили, в зависимости от K и для произвольной относительной ориентации поля идеального намагничивания относительно оси фишеровского распределения, идеальные намагниченности для ансамблей частиц с заданным числом осей легкого намагничивания. Показано, что вид полевых зависимостей идеальной намагниченности фишеровских ансамблей определяется внутренней анизотропией (магнитной осностью) частиц ансамбля. Соответственно, и вид полевой зависимости показателя ориентационной анизотропии,

определенного как отношение идеальных намагниченностей, созданных вдоль оси фишеровского распределения и перпендикулярно ей, тоже определяется магнитной осностью частиц ансамбля.

Зависимость показателя ориентационной магнитной анизотропии от кучности и поля термонамагничивания магнетика осадка исследовалась экспериментально [24, 25] для искусственных осадков, содержащих в качестве магнитной фракции зерна магнетита, размер которых не превышал 10 мк. В обоих случаях ориентационная анизотропия осадков, полученных в максимально достижимых в лаборатории полях осаждения (50 Э), стремилась к насыщению, но показатели анизотропии в этих полях существенно превышали теоретические значения для ансамблей многоосных частиц. Сопоставление этого факта с видом полевых зависимостей ориентационной намагниченности тех же осадков приводит к заключению [26], что наиболее вероятной причиной такого поведения является присутствие в изученных осадках двух подансамблей частиц, характеризующихся существенно различной степенью выровненности. В свою очередь, само появление этих подансамблей непосредственно связано с особенностями формирования исходного термомагнитного состояния магнетика осадка. В этой связи представлялось интересным изучить влияние прогревов на уже готовые осадки, обладающие той или иной магнитной анизотропией.

Влияние термомагнитной обработки на магнитную анизотропию искусственных осадков

В наших экспериментах изучались искусственные осадки с различными показателями ориентационной анизотропии [24], содержащие частицы магнетита (месторождение Юпока) в концентрации 0,7 вес. %. Также исследовались и специально приготовленные образцы, созданные на основе этих частиц.

Образцы последовательно нагревались до все более высоких температур (вплоть до точки Кюри магнетита) с последующим охлаждением в различных (в частности, и нулевом) магнитных полях ($H = 0, 4, 11, 14, 50$ и 150 Э), направленных как вдоль оси ориентационной анизотропии (X), так и перпендикулярно ей (оси Y или Z), и после каждого прогрева измерялись величины идеальных намагниченностей, наведенных вдоль осей X, Y и Z . Результа-

ты исследования некоторых образцов приведены в табл. 1-3. На рис. 1 приведены графики зависимостей показателей ориентационной и вертикальной магнитной анизотропии для образца, температурная обработка которого проводилась в нулевом поле (табл. 1). Видно, что ориентационная анизотропия монотонно убывает с ростом температуры прогрева, в то время как вертикальная анизотропия остается практически неизменной. Тот же эффект обнаруживается и при термомагнитной обработке сильноанизотропных образцов в ненулевых внешних полях (табл. 2).

Т а б л и ц а 1

Образцы с сильной анизотропией. Охлаждение в нулевом внешнем поле

$T, ^\circ\text{C}$	$I_{\text{ri},X}$	$I_{\text{ri},Y}$	$I_{\text{ri},Z}$	P_{xy}	P_{xz}	P_{yz}	P_0
20	692	155	141	4,47	4,91	1,10	4,68
240	575	137	128	4,20	4,49	1,07	4,34
394	377	153	136	2,46	2,77	1,13	2,61
520	254	149	135	1,71	1,88	1,10	1,79
628	186	140	131	1,33	1,42	1,07	1,37

Величины идеальных намагниченностей даны в условных единицах; P_{xy} , P_{xz} и P_{yz} — отношения идеальных намагниченностей, наведенных вдоль соответствующих осей; $P_0 = I_{\text{ri},X} / [0,5(I_{\text{ri},Y} + I_{\text{ri},Z})]$.

Каким же образом можно объяснить полученные результаты? Ввиду того, что уменьшение анизотропии не сопровождается уменьшением идеальных намагниченностей вдоль осей Y и Z (происходит лишь уменьшение $I_{гi}$ вдоль X), можно попытаться связать спад анизотропии с "выгоранием" при прогреве сильно выровненных вдоль оси X одноосных частиц. Действительно, пусть эти частицы до прогрева обуславливали большую величину $I_{гi}$ вдоль X (причем, естественно, в данном случае при создании идеальных намагниченностей вдоль Y и Z одноосные частицы вклада почти не вносят), и в результате прогрева до точки Кюри все они выгорели. Остались только слабо выровненные частицы, и, естественно, результирующая анизотропия такого образца уменьшится.

Т а б л и ц а 2

Образцы с сильной анизотропией. Охлаждение в ненулевых внешних полях

$T, ^\circ\text{C}$	$I_{гi,X}$	$I_{гi,Y}$	$I_{гi,Z}$	P_{xy}	P_{xz}	P_{yz}	P_0
$H = 14 \text{ Э}, H \parallel X$							
20	711	194	182	3,67	3,91	1,07	3,78
406	498	192	173	2,59	2,88	1,11	2,73
620	265	203	182	1,31	1,46	1,12	1,38
$H = 4 \text{ Э}, H \perp X$							
20	575	169	146	3,40	3,94	1,16	3,65
402	291	138	116	2,11	2,51	1,18	2,29
620	135	121	89	1,12	1,52	1,36	1,29

Принимая эту гипотезу, можно попытаться оценить долю сильно выровненных одноосных частиц в общей массе магнетика осадка. Согласно [22], для одноосных частиц при увеличении кучности K полная идеальная намагниченность, созданная в направлении оси фишеровского распределения, растет вплоть до своего максимального значения ($I_{гi\parallel}(K = \infty) = 3 \times I_{гi\parallel}(K = 0)$), а намагниченность, созданная перпендикулярно этой оси, уменьшается до нуля. Для наших осадков [24] кучность довольно высока: $K = 9$ — и, соответственно, невелик вклад одноосных частиц в намагниченности $I_{гi,Y}$ и $I_{гi,Z}$.

Т а б л и ц а 3

Образцы со слабой анизотропией. Охлаждение в ненулевых внешних полях

$T, ^\circ\text{C}$	$I_{гi,X}$	$I_{гi,Y}$	$I_{гi,Z}$	P_{xy}	P_{xz}	P_{yz}	P_0
$H = 11 \text{ Э}, H \parallel X$							
20	852	849	745	1,004	1,14	1,14	1,07
620	753	814	696	0,93	1,08	1,17	1,00
$H = 50 \text{ Э}, H \parallel X$							
20	577	560	415	1,03	1,39	1,35	1,18
620	536	560	479	0,96	1,12	1,17	1,03
$H = 14 \text{ Э}, H \perp X$							
20	1032	983	812	1,05	1,27	1,21	1,15
620	892	851	769	1,05	1,16	1,11	1,10

Из табл. 1 видно, что в результате нагрева до точки Кюри идеальная намагниченность $I_{гi,X}$ уменьшается на 506 условных единиц, в то время как намагниченности в перпендикулярных направлениях остаются практически неизменными. Если бы лег-

кие оси одноосных частиц были распределены сферически симметрично, то вдоль каждого направления в образце одноосные частицы давали бы вклад в идеальную намагниченность, равный $506 : 2,4 = 211$ усл. ед. (При кучности $K = 9$ идеальная намагниченность одноосных частиц вдоль фишеровской оси возрастает, по сравнению с $K = 0$, в 2,4 раза.) Этот вклад превышает вклад слабо выровненных частиц, составляющий максимум 140 усл. ед. (это величина идеальной намагниченности вдоль направления, перпендикулярного оси X , т. е. в действительности вклад слабо выровненных частиц еще меньше). Таким образом, сильно выровненные одноосные частицы должны были бы составлять около 60 % общей массы магнетика.

Отсюда вытекает, что для объяснения обнаруженного уменьшения ориентационной магнитной анизотропии необходимо допустить полное "выгорание" при прогреве всего сильно выровненного одноосного магнетика (60 % частиц). А что происходит в действительности? — Прогревы до точки Кюри образцов осадков из тех же серий (т. е. с магнетиком в тех же исходных магнитных состояниях), но с невысокой начальной ориентационной анизотропией ($P_0 = 1,01 \div 1,10$) показали, что в этих осадках идеальная намагниченность, независимо от направления, убывает в результате прогрева не более чем на 15 % (табл. 3). Таким образом, объяснить уменьшение ориентационной анизотропии "выгоранием" сильно выровненных одноосных частиц не удается.

Можно ли объяснить понижение анизотропии за счет изменения с прогревом внутренней магнитной анизотропии частиц магнетика? Допуская, что реальные частицы магнетика могут быть многоосными (например, трехосными), а одна из осей легкого намагничивания является преимущественной (легчайшей) по сравнению с другими, можно объяснить обнаруженные значения ориентационной анизотропии (вплоть до $P_0 = 4,5 \div 4,7$) эффектом сильной выделенности легчайших осей по отношению к прочим. Тогда естественно допустить, что спад анизотропии при прогревах может объясняться уменьшением этой выделенности.

Однако ясно (см. например, [22]), что уменьшение анизотропии в этом случае произойдет за счет увеличения идеальной намагниченности в направлениях, перпендикулярных оси выравнивания легчайших осей (в нашем случае — направлениях Y и Z), в то время как намагниченность вдоль оси X останется практически неизменной. На опыте же наблюдается прямо противоположное (см. табл. 1 и 2): спад ориентационной анизотропии всецело обусловлен спадом намагниченности $I_{n,x}$.

Из этих же рассуждений вытекает вывод о невозможности объяснить наблюдаемое уменьшение ориентационной анизотропии предположением, что при прогревах происходит замена в частицах одних преимущественных легких осей другими. Яс-

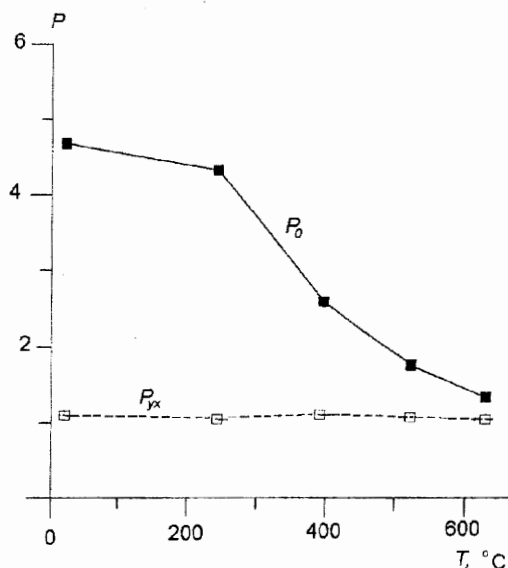


Рис. 1. Зависимость показателей магнитной анизотропии от температуры.

Термообработка в нулевом поле.

но, что подобное перераспределение главных осей в частицах также должно было сопровождаться увеличением намагниченностей $I_{гi,y}$ и $I_{гi,z}$.

Магнитные частицы осадков перед осаждением подвергались предварительному термонамагничиванию [24], т. е. наши прогревы осадков в связи с изучением магнитной анизотропии являются по отношению к их магнетиту уже, по крайней мере, повторными. Ясно, что было бы интересно создать искусственные осадки из этого же магнетита, но взятого в его "исходном" магнитном состоянии (в нашем случае — состояние частиц, прошедших магнитную сепарацию и дробление до субмикронного размера) — т. е. без предварительного прогрева. Это дало бы возможность исследовать поведение выровненных частиц при их первом прогреве и, соответственно, изучить сам процесс формирования преимущественных осей в частицах.

Т а б л и ц а 4

Влияние первого прогрева на магнитную анизотропию модельных осадков

Магнитное состояние	$I_{гi,x}$	$I_{гi,y}$	$I_{гi,z}$	P_{xy}	P_{xz}	P_{yz}	P_0
Охлаждение при $H=10, 50 \text{ Э}$, $H \parallel X$, образец С							
до TRM	504	466	433	1,16	1,18	1,02	1,17
$H = 10 \text{ Э}$	438	405	376	1,08	1,17	1,08	1,12
$H = 50 \text{ Э}$	427	376	360	1,14	1,19	1,04	1,16
Охлаждение при $H=100 \text{ Э}$, $H \parallel X$, образец В							
до TRM	515	494	413	1,16	1,18	1,02	1,17
$H = 100 \text{ Э}$	431	415	347	1,04	1,24	1,20	1,13
Охлаждение при $H=14 \text{ Э}$, $H \parallel X$, $H \perp X$, образец Н							
до TRM	363	298	315	1,22	1,15	0,95	1,18
$H = 14 \text{ Э}$	304	267	275	1,14	1,11	0,97	1,12
$H \parallel X$							
$H = 14 \text{ Э}$	259	219	243	1,18	1,07	0,90	1,12
$H \perp X$							

Для ускорения эксперимента вместо искусственных осадков был получен ряд образцов, позволяющих, как нам представляется, провести экспериментальную проверку собственно температурных превращений магнитных частиц использованного нами магнетита (магнетита Юпока). Для этого была приготовлена влажная (густая) смесь этих частиц с глиной и мелом в той же весовой пропорции, что и в рассмотренных выше искусственных осадках (0,7 вес. % частиц магнетита в массе взятых поровну глины и мела); после тщательного размешивания из нее было сформировано 10 кубических образцов. Образцы были высушены на воздухе, после чего изучены по следующей методике: 1) были измерены идеальные намагниченности $I_{гi,x}$, $I_{гi,y}$, $I_{гi,z}$ и, соответственно, "ориентационная магнитная анизотропия" всех образцов — с целью проконтролировать "чистоту" исходных состояний; 2) образцы группами и поодиночке подвергались различным термомагнитным обработкам для выявления возможных эффектов наведения магнитной анизотропии непосредственно под действием прогревов.

Результаты этих исследований приведены в табл. 4, а полевая зависимость термоостаточной намагниченности для этих образцов — на рис. 2.

Видно, что ни первый прогрев, ни все последующие разнообразные термомагнитные обработки не изменяют сколько-нибудь значительно показателей анизотропии. Наблюдается лишь обычное уменьшение величин всех идеальных намагниченностей $I_{г1,x}$, $I_{г1,y}$ и $I_{г1,z}$ после каждого прогрева образцов — независимо от того, какова была магнитная часть термообработки.

Чтобы выяснить, восстановится ли уменьшившаяся в результате термообработки анизотропия, если осадок переосадить, был поставлен следующий эксперимент. Из медной пластины толщиной 0,5 мм был изготовлен контейнер кубической формы с длиной ребра 28 мм, в который в сухом виде помещалась смесь протертой в порошок (до размера зерен не крупнее 250 мк) обожженной голубой протерозойской глины и субмикронных частиц магнетита. Концентрация магнетика по отношению к немагнитной основе составляла 1,5 вес. %. Затем смесь была уплотнена (вручную) и зафиксирована для исключения движения частиц в процессе опыта. Получившийся образец был изучен по следующей методике (см. также табл. 5).

1. Измерялись идеальные намагниченности $I_{г1,x}$, $I_{г1,y}$, $I_{г1,z}$; вычислялись показатели магнитной анизотропии. Из табл. 5 видно, что уплотнение материала смеси привело к возникновению довольно сильной вертикальной магнитной анизотропии: $P_{xz} = 1,66$.

2. Образец приводился в АНС (абсолютное нулевое состояние — нагрев до точки Кюри с последующим остыванием в нулевом внешнем поле). Это вызвало резкое увеличение идеальных намагниченностей во всех направлениях, а особенно вдоль Z (в среднем, в 3,5 раза вдоль X и Y и в 7 раз вдоль Z), что привело к исчезновению вертикальной магнитной анизотропии — все показатели имеют теперь примерно одинаковое значение (около единицы).

3. Для создания в частицах магнетика магнитных моментов образец снова приводился в АНС (в [24] было установлено, что образующиеся при этом в частицах данного магнетика случайные моменты довольно велики и сопоставимы с моментами, возникающими при термонамагничивании в полях $H_t \approx 5 \div 6$ Э).

4. Далее проводилось выравнивание магнитных осей частиц, для чего уплотненную смесь разрыхлили и потрясли в течение минуты в постоянном магнитном поле $H = 45$ Э, параллельном оси X образца. После этого смесь вновь была уплотнена. В результате такой обработки возникла ориентационная анизотропия с показателем $P_{xy} = 1,57$. Ориентационная анизотропия возросла за счет увеличения $I_{г1,x}$ (с одно-

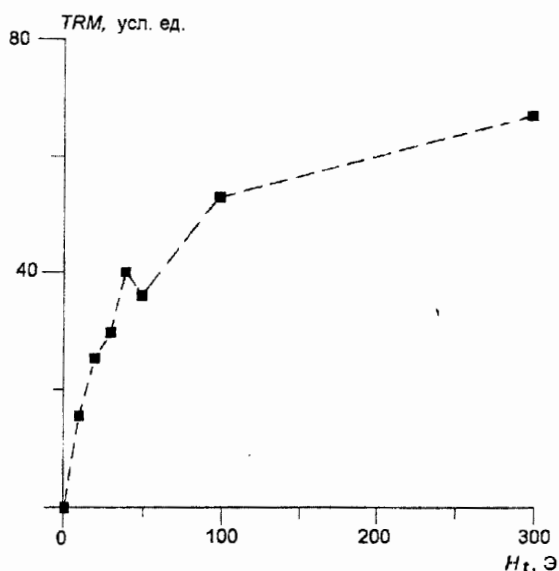


Рис. 2. Полевая зависимость термоостаточной намагниченности образцов, полученных размешиванием магнетита во влажной немагнитной матрице.

временным уменьшением $I_{гi,Y}$), однако в результате опыта сильно возросла и $I_{гi,Z}$ (примерно на ту же величину, что и $I_{гi,X}$). Таким образом, после этого эксперимента трудной осью в частицах магнетика стала Y .

5. Образец был снова приведен в АНС. Из табл. 5 видно, что уменьшение $I_{гi,X}$ сопровождается менее сильным уменьшением $I_{гi,Z}$ и небольшим увеличением $I_{гi,Y}$. Показатель ориентационной магнитной анизотропии P_{xy} , соответственно, тоже уменьшился.

6. Образец привели в АНС.

7. Далее, чтобы проверить, наведется ли ориентационная магнитная анизотропия вновь при выравнивании осей частиц, был повторен опыт п. 4. Однако ожидания не оправдались: видно, что величина $I_{гi,X}$ осталась неизменной, а увеличение $I_{гi,Y}$ и $I_{гi,Z}$ привело к окончательному исчезновению ориентационной анизотропии ($P_{xy} \cong 1$).

Т а б л и ц а 5

Изменение магнитной анизотропии при последовательных переориентациях частиц магнетика осадка

№ опыта	$I_{гi}(X)$	$I_{гi}(Y)$	$I_{гi}(Z)$	P_{xy}	P_{xz}	P_{yz}	P_0
1	544	598	327	0,91	1,66	1,83	1,18
			АНС				
2	2021	2042	2273	0,99	0,89	0,90	0,94
3			АНС				
			Переориентация				
4	2661	1698	2722	1,57	0,98	0,62	1,20
			АНС				
5	2264	1892	2582	1,20	0,88	0,73	1,01
6			АНС				
			Переориентация				
7	2287	2345	3035	0,98	0,75	0,77	0,85

В итоге, хотя результаты проведенного эксперимента весьма интересны, на их основании нельзя сделать каких-либо однозначных выводов. Действительно, с одной стороны, после выравнивания (ориентации) в магнитном поле осей частиц магнетика образуется ориентационная магнитная анизотропия, и последующая термообработка в нулевом поле уменьшает ее. С другой стороны, не ясно, почему анизотропия не наводится после второго выравнивания (объяснить это выгоранием частиц под действием многократных нагревов нельзя, поскольку из табл. 5 видно, что идеальные намагниченности не только не уменьшаются, но даже увеличиваются после термообработок). Вместе с тем, и объяснить результаты эксперимента изменением внутренней анизотропии частиц магнетика [22] не представляется возможным, так как неизвестна кучность, достигаемая в процессе такой ориентации.

В заключение отметим, что проведенное исследование было направлено на то, чтобы максимально полно проанализировать причины и механизмы понижения ориентационной магнитной анизотропии осадочных горных пород, сопровождающего их прогревы. Экспериментально проверены три гипотезы о механизме этого эффекта, вытекающие из существующей модели формирования ориентационной магнитной анизотропии [22]: выгорание сильно выровненных одноосных частиц магнетика; изменение вида внутренней магнитной анизотропии частиц; перераспределение главных осей в частицах в пользу других легких направлений (осей). Оказалось, что ни

одна из этих гипотез не может количественно объяснить наблюдаемые проявления эффекта. Таким образом, попытки даже феноменологического анализа процессов в магнетике породы, вызывающих понижение ориентационной магнитной анизотропии осадков при их прогреве, в рамках современных представлений о магнетизме осадков приводят к заключению, что сами эти представления еще далеко не полны.

Указатель литературы

1. *Izing G.* On the magnetic properties of varved clay // *Arkiv Mat. Astron. Fys.* 1942. Vol. 29A. P. 1-37.
2. *King R. F.* The remanent magnetism of artificially deposited sediments // *Mon. Not. R. Astr. Soc., Geophys. Suppl.* 1955. Vol. 7. P. 115-134.
3. *Rees A. I.* The effect of water current on the magnetic remanence and anisotropy of susceptibility of some sediments // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 1961. Vol. 5. P. 235-251.
4. *Власов А. Я., Коваленко Г. В.* Магнитная анизотропия искусственных осадков // *Изв. АН СССР. Сер. геофиз.* 1964. № 8. С. 1206-1213.
5. *Власов А. Я., Коваленко Г. В.* Магнитная анизотропия осадочных пород // *Изв. АН СССР. Сер. геофиз.* 1964. № 12. С. 1789-1800.
6. *Rees A. I., von Rad U., Shepard F. P.* Magnetic fabric of sediments from the La Jolla submarine canyon and fan // *Mar. Geol.* 1968. Vol. 6. P. 145-178.
7. *Blow R. A., Hamilton N.* Effect of compaction on the acquisition of a detrital remanent magnetization in fine-grained sediments // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 1978. Vol. 52. P. 13-23.
8. *McCabe C., Jackson M., Ellwood Br.* Magnetic anisotropy in the Trenton Limestone: Results of a new technique of anisotropy of anhysteretic susceptibility // *Geophys. Res. Lett.* 1985. Vol. 12. P. 333-336.
9. *Anson G. L., Kodama K. P.* Compaction-induced inclination shallowing of the post-depositional remanent magnetization in a synthetic sediment // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 1987. Vol. 88. P. 673-692.
10. *Jackson M., Gruber W., Marvin J., Banerjee S. K.* Partial anhysteretic remanence and its anisotropy: Applications and grain size dependence // *Geophys. Res. Lett.* 1988. Vol. 15. P. 440-443.
11. *Шашканов В. А., Новоселов А. И., Смирнов А. В.* Природа магнитной анизотропии и ошибок наклона ориентационной намагниченности в осадочных горных породах // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли.* 1989. № 1. С. 59-69.
12. *Deamer G. A., Kodama K. P.* Compaction-induced inclination shallowing in synthetic and natural clay-rich sediments // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95. P. 4511-4530.
13. *Jackson M., Banerjee S. K., Marvin J., Lu R., Gruber W.* Detrital remanence, inclination errors and anhysteretic remanence anisotropy: quantitative model and experimental results // *Geophys. J. Int.* 1991. Vol. 104. P. 95-103.
14. *Kodama K. P., Sun W.-W.* Magnetic anisotropy as a correction for compaction-caused paleomagnetic inclination shallowing // *Geophys. J. Int.* 1992. Vol. 111. P. 465-469.
15. *Sun W.-W., Kodama K. P.* Magnetic anisotropy, SEM, and x-ray pole figure goniometry study of inclination shallowing in a compacting clay-rich sediment // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. P. 19599-19615.
16. *Hodych J. P., Vijaksana S.* Can remanence anisotropy detect paleomagnetic inclination shallowing due to compaction? A case study using Cretaceous deep-sea limestones // *J. Geophys. Res.* 1993. Vol. 98. P. 22429-22441.
17. *Белоконь В. И.* Оценка влияния магнитостатического взаимодействия на ориентационную намагниченность крупнозернистых осадков // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли.* 1980. № 11. С. 107-109.

18. Шашканов В. А., Новоселов А. И., Смирнов А. В. Механизмы седиментационного намагничивания магнетитсодержащих осадочных горных пород // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1989. № 8. С. 45–55.
19. Arason P., Levi S. Models of inclination shallowing during sediment compaction // J. Geophys. Res. 1990. Vol. 95. P. 4481–4500.
20. Шашканов В. А., Костеров А. А. Зависимость магнитной анизотропии осадочных горных пород от поля осаждения // Изв. РАН. Сер. Физика Земли. 1994. № 1. С. 83–88.
21. Костеров А. А., Шашканов В. А., Смирнов А. В. Ориентационная магнитная анизотропия в осадочных горных породах и их идеальное намагничивание // Изв. РАН. Сер. Физика Земли. 1996. № 1. С. 85–89.
22. Kostrov A. A., Shashkanov V. A. A phenomenological model of orientational magnetic anisotropy of sediments // Geophys. J. Int. 1996. Vol. 125. P. 149–162.
23. Fisher R. Dispersion on a sphere // Proc. R. Soc. Lond. A. 1953. Vol. 217. P. 295–305.
24. Самсонов И. В. Изучение ориентационного намагничивания и магнитной анизотропии осадочных горных пород в зависимости от исходного магнитного состояния: Магистр. дис. СПбГУ. СПб., 1996. 37 с.
25. Саушкина Е. А. Магнитное состояние, доменная структура магнитных частиц и процесс ориентационного намагничивания осадочных горных пород: Магистр. дис. СПбГУ. СПб., 1997. 28 с.
26. Шашканов В. А., Смирнов А. В., Костеров А. А. Полевые зависимости ориентационного намагничивания осадочных горных пород при разных магнитных состояниях частиц осаждаемого магнетита // Тез. докл. Всероссийского семинара “Палеомагнетизм и магнетизм горных пород”. Борок, 1997. С. 84–85.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 96-05-64619.