

УДК 550.383, PACS 91.25. NG

ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ ТАРХАНСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ В РАЗРЕЗЕ УРОЧИЩА СКЕЛЯ (КЕРЧЕНСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

Ольга Валентиновна Пилипенко¹, Юлиана Валерьевна Ростовцева^{2✉},
Наталья Викторовна Сальная³

¹ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН; Геофизический центр РАН, Москва, Россия; pilipenko@ifz.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Геофизический центр РАН, Москва, Россия; rostovtseva@list.ru

³ Геологический институт РАН; Геофизический центр РАН; Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; natasavi@inbox.ru

Аннотация. Выполнено петромагнитное и палеомагнитное исследование отложений тарханского региона разреза урочище Скеля (Керченский п-ов, Восточный Паратетис). Основным носителем естественной остаточной намагниченности в аргунских слоях тарханского региона — титаномагнетит, в отложениях терских и кувинских слоев, помимо титаномагнетита, присутствует сульфид железа (моноклинный пирротин и/или грейгит). Палеомагнитный тест складки направлений естественной остаточной намагниченности, записанной в породах аргунских толщ, положительный, что свидетельствует о доскладчатом возрасте образования намагниченности. Сопоставление с магнитохронологической шкалой GTS 2020 показывает, что интервал прямой полярности в нижней части аргунских отложений предположительно можно сопоставить с хроном C5Bn, интервал обратной полярности в верхней части аргунских отложений — с C5ADr, возраст границы C5Bn/C5ADr можно оценить в ~14,7 млн лет.

Ключевые слова: миоцен, тарханский регионарус, петромагнетизм, палеомагнетизм, магнитостратиграфия

Для цитирования: Пилипенко О.В., Ростовцева Ю.В., Сальная Н.В. Палеомагнетизм тарханских отложений в разрезе урочище Скеля (Керченский полуостров) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 4. С. 62–76.

PALEOMAGNETISM OF TARKHANIAN SEDIMENTS OF THE SECTION SKELYA (KERCH PENINSULA)

Ol'ga V. Pilipenko¹, Yuliana V. Rostovtseva^{2✉}, Natalia V. Salnaia³

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS; Geophysical Center RAS, Moscow, Russia; pilipenko@ifz.ru

² Lomonosov Moscow State University; Geophysical Center RAS, Moscow, Russia; rostovtseva@list.ru

³ Geological Institute RAS; Geophysical Center RAS; Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia; natasavi@inbox.ru

Abstract. With the goal to correlate the magnetostratigraphic data of the Eastern Paratethys obtained by researchers in different years a rockmagnetic and paleomagnetic investigations of the Tarkhanian sediments of the Skelya section was carried out. The main carrier of the natural remanent magnetization is titanomagnetite in the Argunian beds of the Tarkhanian regional stage; in addition to titanomagnetite there is iron sulfide (monoclinic pyrrhotite and/or greigite) in the deposits of the Terskian and Kuvinian beds. The paleomagnetic fold test of natural remanent magnetization directions, recorded in the rocks of the Argunian beds, is positive, which indicates a pre-folding age of the magnetization formation. A comparison with the magnetochronological scale GTS 2020 shows that the normal polarity interval in the lower part of the Argunian beds can presumably be compared with the C5Bn chron. The reversal polarity interval in the upper part of the Argunian beds is with C5ADr. The age of the C5Bn/C5ADr boundary can be estimated as ~14.7 Ma.

Key words: Miocene, Tarkhanian regional stage, rockmagnetism, paleomagnetism magnetostratigraphy

For citation: Pilipenko O.V., Rostovtseva Yu.V., Salnaia N.V. Paleomagnetism of Tarkhanian sediments of the section Skelya (Kerch Peninsula). *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 4: 62–76. (In Russ.).

Введение. Достоверность датирования стратиграфических границ регионарусов опирается на магнитостратиграфическую корреляцию разрезов. В береговых обнажениях Керченского п-ова, в разрезах Коп-Такыл, урочище Скеля, в разрезе Малый Камышлак вскрыты отложения верхов майкопа, тархана и низов чокрака миоценового возраста. В последние годы авторы статьи вплотную зани-

маются петромагнитными и палеомагнитными исследованиями пород тарханского региона разреза Коп-Такыл, расположенного на Черноморском побережье Керченского п-ова (рис. 1) [Pilipenko et al., 2020, 2021]. В результате исследований установлено, что глинистые отложения тархана в основном характеризуются прямой полярностью намагниченности, за исключением единичных точек обратной



Рис. 1. Схематическая карта исследуемого района. На врезке показано расположение исследуемого района на географической карте

и неопределенной полярности, расположенных в верхах нижнего и в кровле среднего тархана (рис. 2). Образование грейгита в результате сульфатредукции не исключает возможности развития процессов разрушения первичной естественной остаточной намагниченности (NRM) и образования вторичной химической остаточной намагниченности (CRM), вследствие чего могло произойти полное или интервальное перемангничивание этих пород. Полученные направления намагниченности для нижней части верхнего тархана в разрезе Коп-Такыл согласуются с результатами М.А. Певзнера [Певзнер, 1986] (рис. 2), который отобрал образцы из 125-метровой толщи глин, залегающих между средним тарханом

(тарханским мергелем) и низами чокрака (био-гермными мшанковыми известняками) в разрезе ур. Склея (Керченский п-ов, Азовское побережье) (рис. 1). Разрез ур. Склея представляет собой восточное крыло Камышлакской антиклинали. В ходе работ М.А. Певзнер отобрал образцы с шагом ~5 м, что могло привести к пропуску границ магнитозон [там же].

Отложения мощностью 75 м, подстилающие мшанковые биогермные известняки чокрака и вскрытые в разрезе ур. Склея, также были отобраны и изучены В.М. Трубиным (шаг отбора 5 м). В ходе этих рекогносцировочных исследований установлено, что переходные слои тархана-чокрака

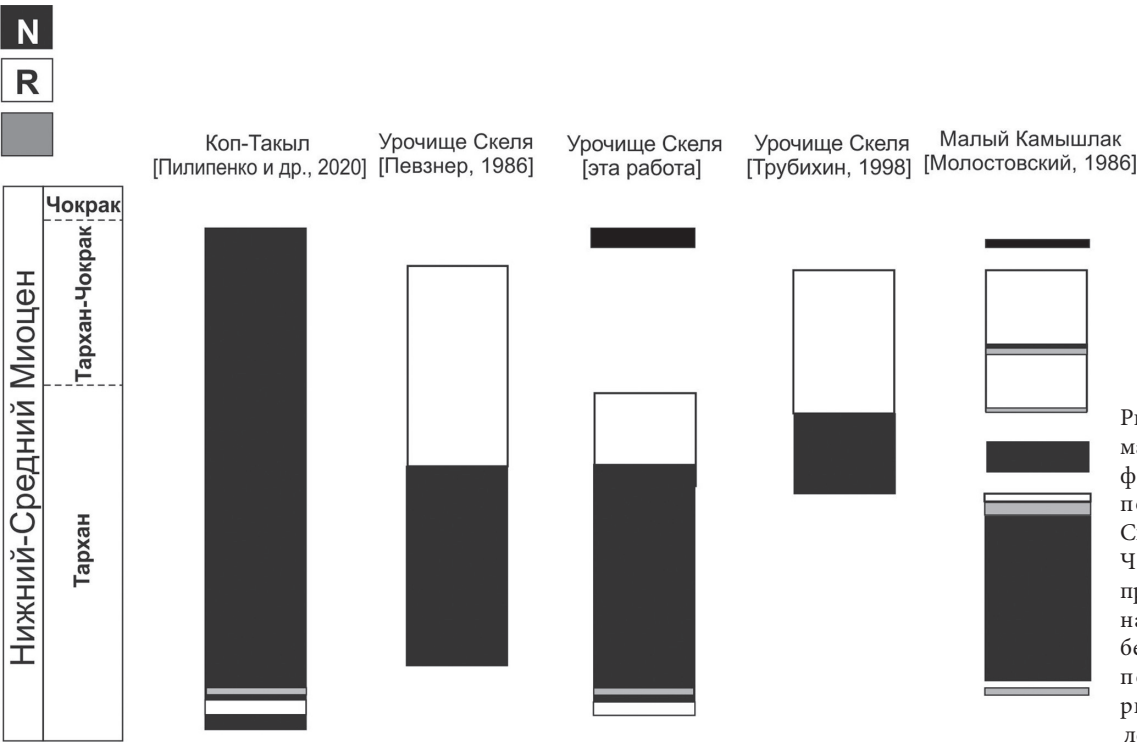


Рис. 2. Корреляция магнитостратиграфических колонок по разрезам ур. Склея и Коп-Такыл. Черный цвет — прямая полярность намагниченности, белый — обратная полярность, серый — неопределенная полярность

намагниченны обратно, а средняя часть верхнего тархана — прямо (устное сообщение В.М. Трубикина) (рис. 2). Обобщенные результаты палеомагнитных исследований отложений миоцена Восточного Паратетиса [Трубкин, 1998] были представлены в тезисной форме. Такая форма представления материалов затрудняет анализ полученных данных и не позволяет использовать их для построения магнитостратиграфической шкалы изучаемых отложений Керченского п-ова.

В работе [Молостовский, 1986] приведены результаты исследований намагниченности пород тарханского региона, вскрытых в разрезе Малый Камышлак, соседнем с разрезом ур. Склея. Разрез Малый Камышлак приурочен к западному крылу Камышлакской антиклинали.

Отсутствие сходимости в приведенных послыжных описаниях пород разреза Малый Камышлак и разреза ур. Склея затрудняет сопоставление результатов исследования Э.А. Молостовского с данными, полученными М.А. Певзнером и В.М. Трубикиным для соседних аналогичных отложений.

Таким образом, в силу приведенных причин возникла необходимость в получении собственных оригинальных петромагнитных и палеомагнитных данных по породам тарханского региона, имеющим лучшую обнаженность в разрезе ур. Склея на Керченском п-ове.

Объект исследования. Разрез ур. Склея, находящийся на восточном крыле Камышлакской антиклинали [Певзнер, 1986], расположен на Азовском побережье Керченского п-ова ($45^{\circ}45'$ с. ш., $36^{\circ}46'$ в. д.), в 2,5 км западнее пос. Юркино (рис. 1). Здесь в береговом обрыве обнажаются породы верхов майкопа, тархана и низов чокрака. Отложения верхов майкопа и тархана представлены преимущественно глинами,

содержащими отдельные прослои карбонатных пород и конкреций. Над глинами тархана залегают образования нижнего чокрака, представленные в основном водорослево-мшанковыми биогермными известняками. Далее на восток в береговых обрывах азовского побережья в сторону пос. Юркино фрагментарно прослеживаются выходы толщ верхнего чокрака и карагана, представленные чередованием глин с прослоями карбонатных пород.

В отобранных отложениях снизу вверх выделяются следующие слои (рис. 3, 4) [Ростовцева, 2012].

1. Глины темно-серые (до черных), тонкослоистые, с вторичными выделениями ярозита, в нижней части закрытые оползнем (кувинские отложения тархана). Мощность ~1,5 м.

2. Карбонатный светло-серый прослой сливного вида, тонкозернистый, линзовидный, с раковинами моллюсков *Lentipecten corneus denudatus*, известный как тарханский мергель (терские слои тархана). Этот прослой — хороший литологический и палеонтологический маркер, поскольку является бронирующим и содержит обильную и разнообразную морскую фауну. Мощность ~0,2 м,

3. Глины темно-серые, тонкослоистые, с очаговой пиритизацией, в основании известковистые (3–4 м), с редкими раковинами моллюсков, в средней части бескарбонатные и слабоизвестковистые, в верхах с отдельными карбонатными прослоями (аргунские слои тархана). Мощность ~63 м.

4. Глины серо-зеленоватые, тонкослоистые, с песчаной и алевроитовой примесью, в верхней части с прослоем тонкозернистого песчаника толщиной 0,3 м (аргунские слои тархана). Мощность ~23 м.

5. Глины серо-зеленые, тонкослоистые, с прослоями карбонатных пород, в верхней части с обилием раковин птеропод (тархан-чокракские отложения),



Рис. 3. Общий вид тарханских отложений в разрезе ур. Склея

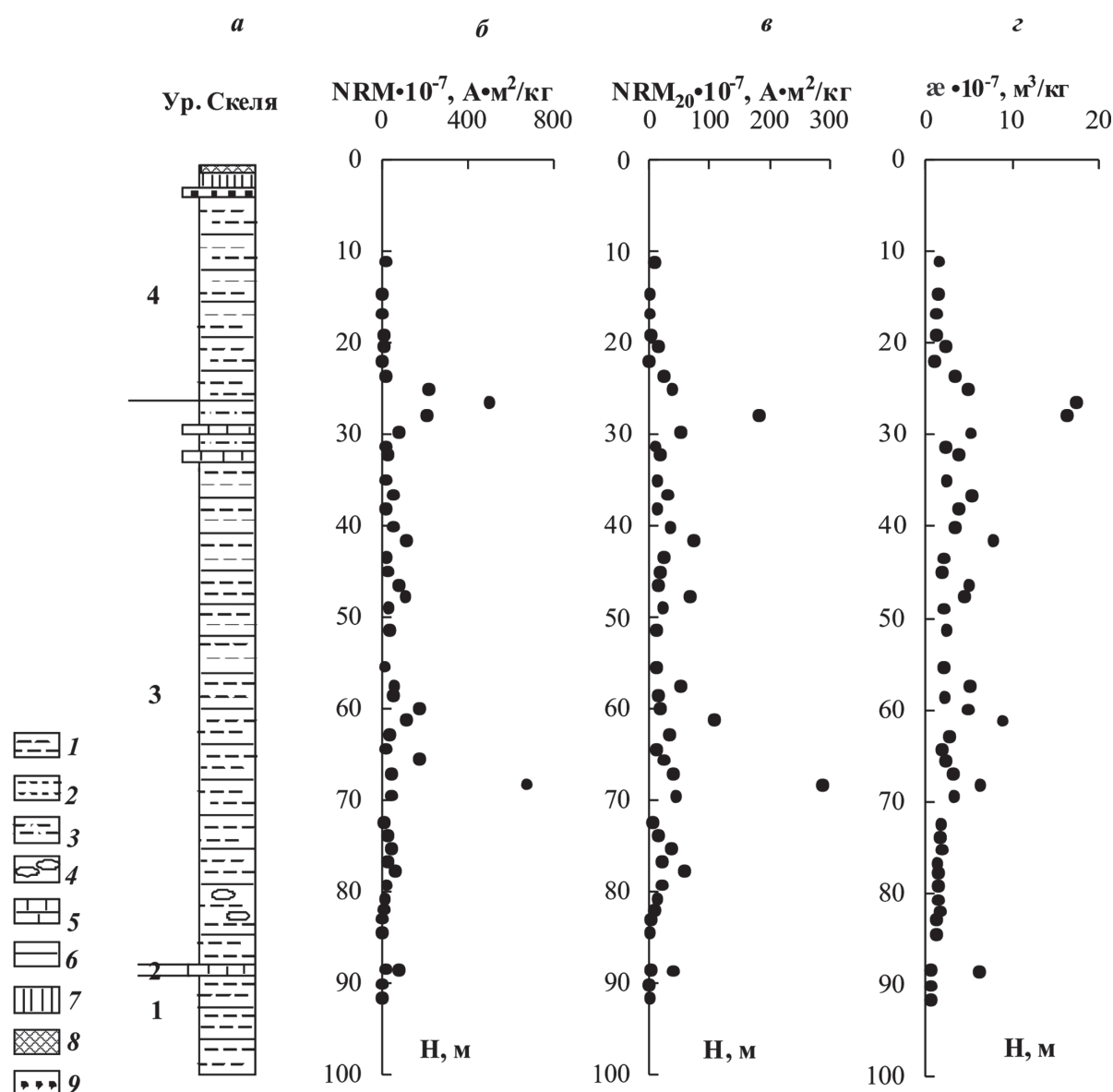


Рис. 4. Литологическая колонка разреза ур. Склея (а): 1 — глины, 2 — глины известковистые, 3 — глины с тонкими песчаными прослоями, 4 — карбонатные конкреции, 5 — карбонатные прослои, 6 — границы слоев, 7 — лёссовидные суглинки, 8 — современная почва, 9 — пески. Цифры 1–4 около литологической колонки обозначают выделенные слои. Кривые изменения магнитных характеристик от глубины разреза Н: естественная остаточная намагниченность NRM (б), естественная остаточная намагниченность NRM₂₀ после чистки переменным магнитным полем 20 мТл (в), магнитная восприимчивость χ (г)

закрытые в основном оползневymi массами. Мощность ~15–20 м.

6. Частое переслаивание тонкопесчаных и глинистых прослоев (тархан-чокракские отложения). Мощность ~0,35 м.

7. Мшанковые биогермные известняки (чокрак). Мощность ~4–5 м.

Объем тархана в этом районе различные исследователи понимают по-разному [Андрусов, 1890; Барг и др., 1975; Жижченко, 1940; Носовский и др., 1976]. Мы склоняемся к оценке, сделанной в работах [Барг и др., 1975; Носовский и др., 1976], и относим к тархану 3,5 м глин, подстилающих тарханский мергель, собственно слой тарханского мергеля и ~80 м вышележащих глин. Отложения, залегающие между слоем тарханского мергеля и мшанковыми

биогермными известняками чокрака, из-за присутствия в них спирателл известны в литературе как спиралисовые глины.

Материалы и методы исследований. Отбор коллекций образцов. Для петромагнитных и палеомагнитных исследований отобрано 49 ориентированных штуфов из верхней части нижнетарханских (кувинских слоев) (в ~150 см под тарханским мергелем) до верхнетарханских (аргунских слоев) отложений. Общая мощность отобранных отложений ~80 м с интервалом ~1,5 м. Ориентированные штуфы взяты в основном по напластованию коренных пород из свежерасчищенных вертикальных стенок разреза. Затем штуфы были распилены на горизонтальные пластины, из которых изготовлены ориентированные кубические образцы объемом 8 cm^3 (по

2–3 образца с уровня). Число изученных образцов составило 160. Для проведения термомагнитного анализа выпилены образцы объемом 1 см^3 , по 2 образца с уровня. Для снятия коэрцитивных спектров выпилены образцы объемом $\sim 2\text{ см}^3$.

Оборудование и методы исследования. Измерены и исследованы стандартные магнитные параметры: естественная остаточная намагниченность (NRM), массовая магнитная восприимчивость (χ); остаточная коэрцитивная сила (B_{cr}), остаточная намагниченность насыщения SIRM, созданная в постоянном магнитном поле 0,6 Тл, безгистерезисная остаточная намагниченность (ARM), созданная в переменном магнитном поле 1,2 Тл в присутствии постоянного магнитного поля 50 мкТл. Измерения NRM и ARM выполнены на SQUID-магнитометре (2G Enterprises, США, чувствительность прибора составляет около 10^{-7} А/м), расположенном в немагнитной комнате (Lodestar Magnetics, США). Чистка переменным магнитным полем от 0 до 130 мТл осуществлялась на SQUID-магнитометре. Изотермическая остаточная намагниченность насыщения (SIRM) создана на установке импульсного намагничивания Impulse Magnetizer IM-100 (ASC Scientific, США). Измерения SIRM выполнены на магнитометре JR-6 (AGICO, Чехия, чувствительность прибора составляет $2\cdot 10^{-6}\text{ А/м}$). Магнитная восприимчивость, анизотропия магнитной восприимчивости (AMS) измерены на каппаметре Multi-Function Kappabridge MFK1-FA (AGICO, Чехия). Остаточная коэрцитивная сила измерена на коэрцитивном спектрометре J-Meter (Россия).

На образцах со всех отобранных уровней сняты петли магнитного гистерезиса и кривые обратного разрушающего поля на вибромагнитометре VSM (PMC Micro Mag 3900, США) и определены коэрцитивные отношения B_{cr}/B_c и M_{rs}/M_s , где M_s — магнитный момент насыщения, M_{rs} — остаточный магнитный момент насыщения, B_c — коэрцитивная сила. Выполнено два вида термомагнитного анализа: по температурной зависимости магнитного момента насыщения ($M_s(T)$) и по температурной зависимости остаточного магнитного момента ($M_{rs}(T)$). Термомагнитный анализ $M_s(T)$ выполнен на вибромагнитометре конструкции Ю.К. Виноградова (Орион, Россия), термомагнитный анализ $M_{rs}(T)$ — на трехкомпонентном термомагнитометре (Орион, Россия). Все образцы перед началом исследований взвешены на весах CAUY120 (CAS-electronic balance, Япония). Измерения выполнены в Центре коллективного пользования петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН.

Для всех образцов объемом 2 см^3 со всех уровней отбора сняты коэрцитивные спектры нормального и обратного остаточного индуктивного намагничивания на коэрцитивном спектрометре J-Meter в лаборатории палеоклиматологии, палеоэкологии, палеомагнетизма Института геологии и нефтега-

зовых технологий Казанского (Приволжского) Федерального университета. Коэрцитивные спектры проанализированы и разложены вейвлет-анализом, в качестве базисной функции разложения использовался вейвлет «мексиканская шляпа».

Результаты исследований и их обсуждение.
Магнитные свойства пород. NRM до чистки измерена и нормирована на плотность образцов. Средняя по трем образцам величина NRM изменяется в широком диапазоне $(2,1\text{—}678,7)\cdot 10^{-7}\text{ А}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$ (рис. 4, б). В интервале глубины 25–28 м (кровля слоя 3) наблюдаются несколько повышенные значения NRM.

Величина магнитной восприимчивости в целом демонстрирует низкие значения по разрезу: среднее значение объемной магнитной восприимчивости для первых дублей образцов составляет $\sim 5,7\cdot 10^{-4}$ ед. СИ. Это свидетельствует о том, что ферромагнитная и парамагнитная фракции контролируют величины магнитной восприимчивости и магнитную анизотропию пород [Tarling, Hrouda, 1993]. Средняя по трем дублям с уровня величина χ варьирует по разрезу от $0,76\cdot 10^{-7}$ до $17,49\cdot 10^{-7}\text{ м}^3/\text{кг}$, что свидетельствует об изменении магнито-минералогического состава по разрезу. Изменения χ коррелируют с изменениями NRM (рис. 4, з): коэффициент линейной корреляции (r) между числовыми рядами NRM и χ до чистки для участвующих в сравнении 49 пар точек высокосignификантный и равен 0,66 [Тейлор, 1985].

Остаточная коэрцитивная сила B_{cr} изменяется в диапазоне 34–68 мТл (рис. 5, б). Величина отношения M_{rs}/M_s по изученной части разреза изменяется в диапазоне 0,06–0,65, за исключением трех образцов. Таким образом, основным носителем намагниченности в данных породах служит низкокоэрцитивный магнитный минерал.

Для изучения состава магнитных минералов — носителей естественной остаточной намагниченности — была отобрана демонстрационная коллекция, состоящая из 11 образцов объемом $\sim 1\text{ см}^3$ каждый, в скобках — глубина отбора (H , м: № 1 ($H=90,05$), № 2 ($H=88,55$), № 3 ($H=88,4$), № 15 ($H=68,2$), № 20 ($H=61,1$), № 32 ($H=41,5$), № 41 ($H=26,4$), № 43 ($H=25$), № 48 ($H=16,7$), № 49 ($H=14,6$), № 50 ($H=11$), на которой выполнен термомагнитный анализ по зависимости $M_s(T)$ в магнитном поле 0,7 Тл. Термомагнитный анализ образцов № 1, 3, 32, 41, 43, 48, 49, 50 по зависимости $M_s(T)$ показал, что после 400–450 °C наблюдается перегиб и, как правило, небольшой рост величины магнитного момента (рис. 6). Рост магнитного момента после 400 °C связан с образованием магнетита из немагнитных соединений. После нагрева до 600 °C на кривой первого нагрева появляется точка перегиба в районе температуры Кюри магнетита. Даже при температуре 700 °C магнитный момент полностью не разрушается и остается парамагнитная составляющая. Кривые второго нагрева проходят много выше кривых первого нагрева и имеют перегиб при температуре $\sim 580\text{ °C}$, что свидетельствует об образовании магнетита в ходе

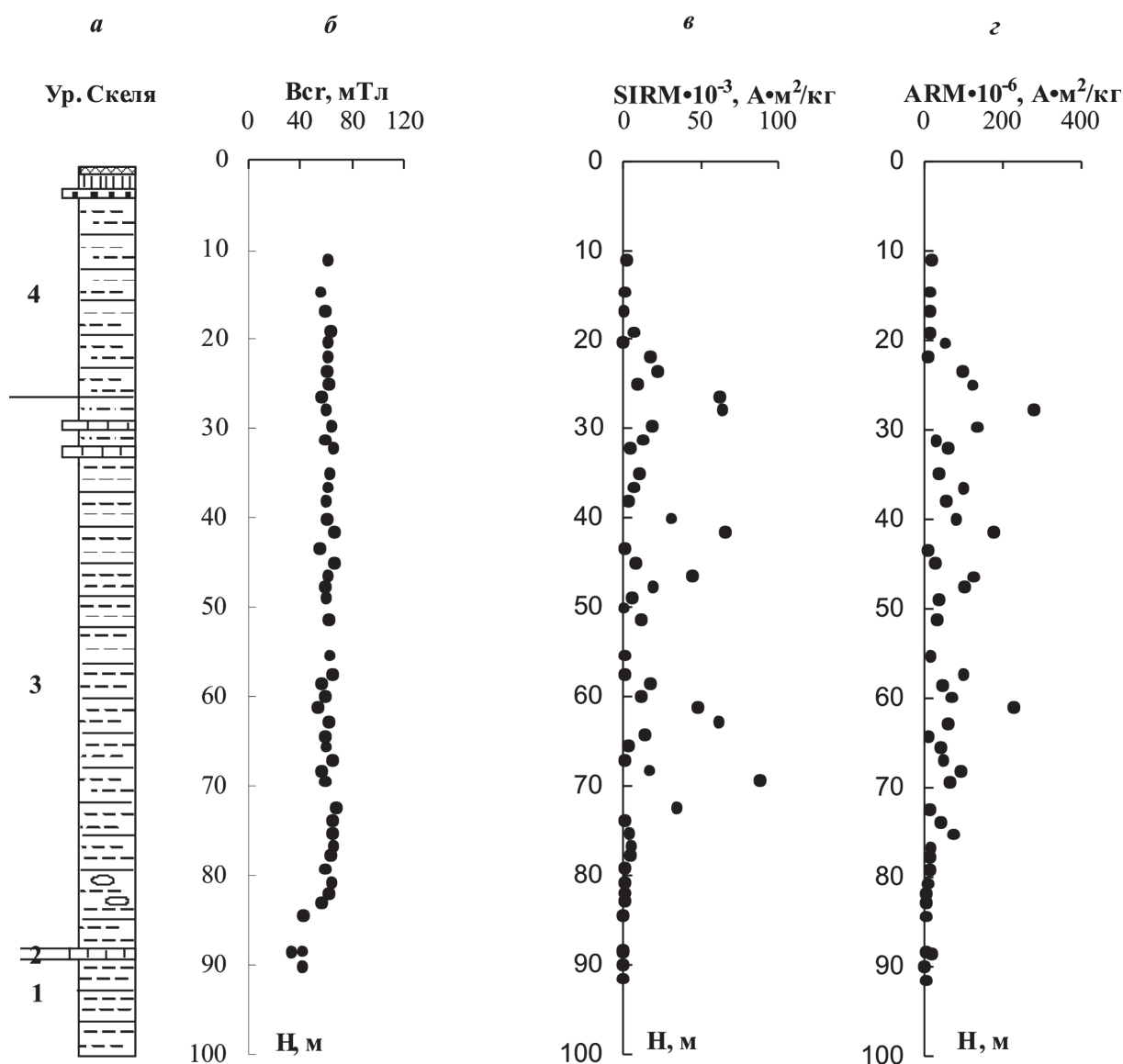


Рис. 5. Литологическая колонка разреза урочище Склея (а); кривые изменения магнитных характеристик от глубины разреза Н: остаточная коэрцитивная сила B_{cr} (б), остаточная намагниченность насыщения $SIRM$ (в), безгистерезисная остаточная намагниченность ARM (г). Условные обозначения см. на рис. 4

нагрева. Также на кривых второго нагрева иногда остаются пики в области $\sim 500^\circ\text{C}$, характеризующие образование магнетита.

Терромагнитный анализ образца № 20 показал наличие двух перегибов, соответствующих $\sim 420^\circ\text{C}$ и температуре Кюри магнетита $\sim 580^\circ\text{C}$ на кривой первого нагрева. Перегиб около 420°C связан с образованием магнетита из немагнитных соединений, например, пирита. Кривая второго нагрева проходит заметно ниже кривой первого нагрева, имеет перегиб при температуре $\sim 580^\circ\text{C}$ и соответствует маггемиту, образовавшемуся в ходе нагрева.

На трехкомпонентном терромагнитометре по зависимости остаточного магнитного момента M_{rs} , созданного в поле $0,6\text{ Тл}$, от температуры на образцах глиен объемом 1 см^3 с достаточно высокими начальными значениями NRM (№ 15 ($H = 68,20\text{ м}$), № 20 ($H = 61,10\text{ м}$), № 32 ($H = 41,50\text{ м}$), № 41 ($H = 25,40\text{ м}$), № 43 ($H = 25,00\text{ м}$)) выполнен терромагнитный ана-

лиз $M_{rs}(T)$ (рис. 7). Анализ для других образцов не представлялся возможным из-за низких начальных значений NRM и, как следствие, низких значений остаточного магнитного момента.

Терромагнитный анализ $M_{rs}(T)$ образцов показал, что кривые первого нагрева $M_{rs}(T)$ имеют выпуклый вид и содержат слабо выраженный перегиб около $\sim 300\text{--}320^\circ\text{C}$. Остаточный магнитный момент полностью разрушается при температуре $\sim 430\text{--}460^\circ\text{C}$. Кривые второго нагрева проходят много выше кривых первого нагрева и имеют перегиб при температуре $\sim 580^\circ\text{C}$, что свидетельствует об образовании магнетита в ходе нагрева. Таким образом, в образце, возможно, присутствуют сульфид железа с температурой блокирования $\sim 320^\circ\text{C}$ (моноклинный пирротин или грейгит) и титаномagnetит с температурой блокирования $\sim 430\text{--}460^\circ\text{C}$. Сильное увеличение магнитного момента на кривой второго нагрева, скорее всего, связано с образованием магне-

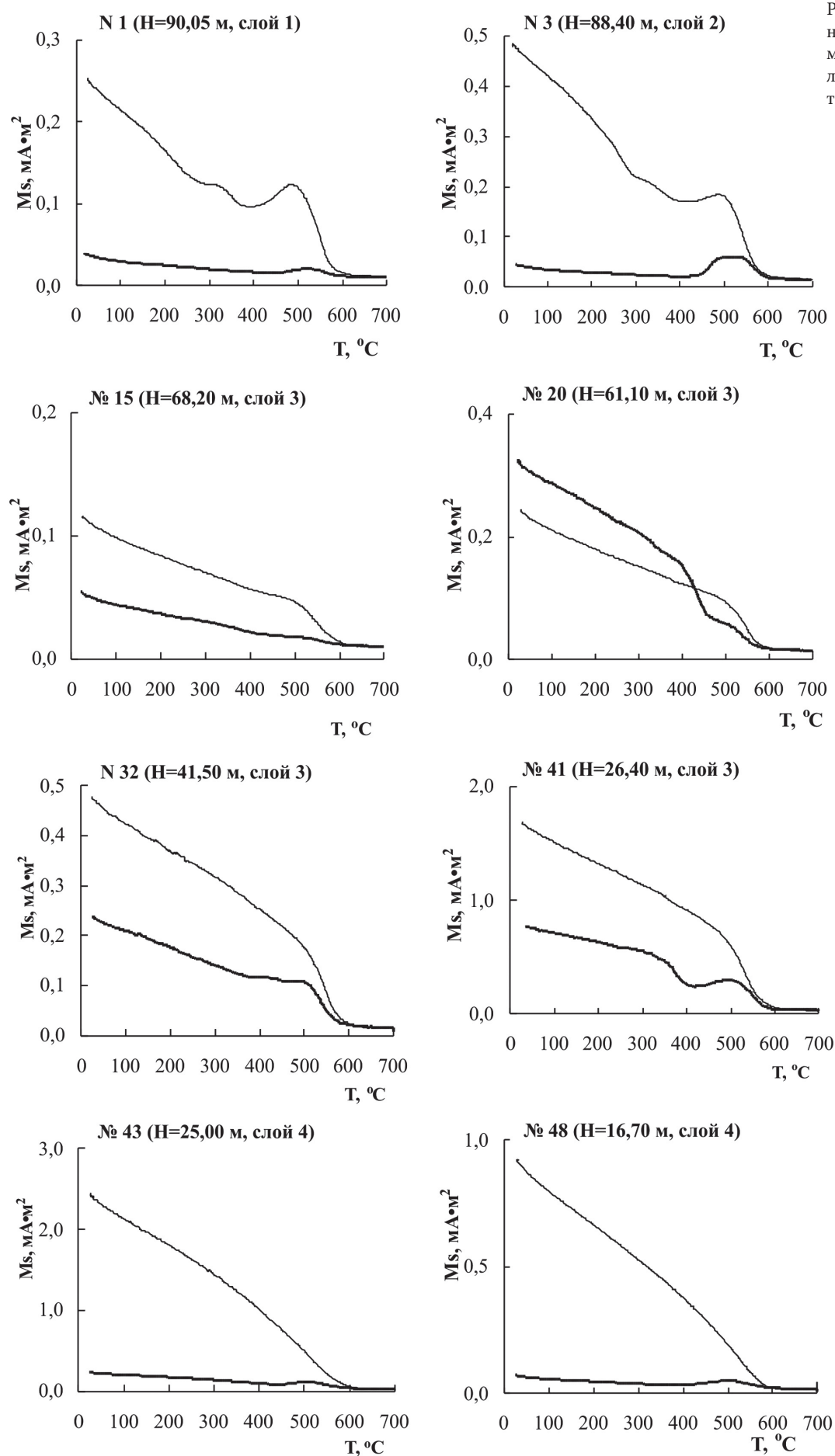
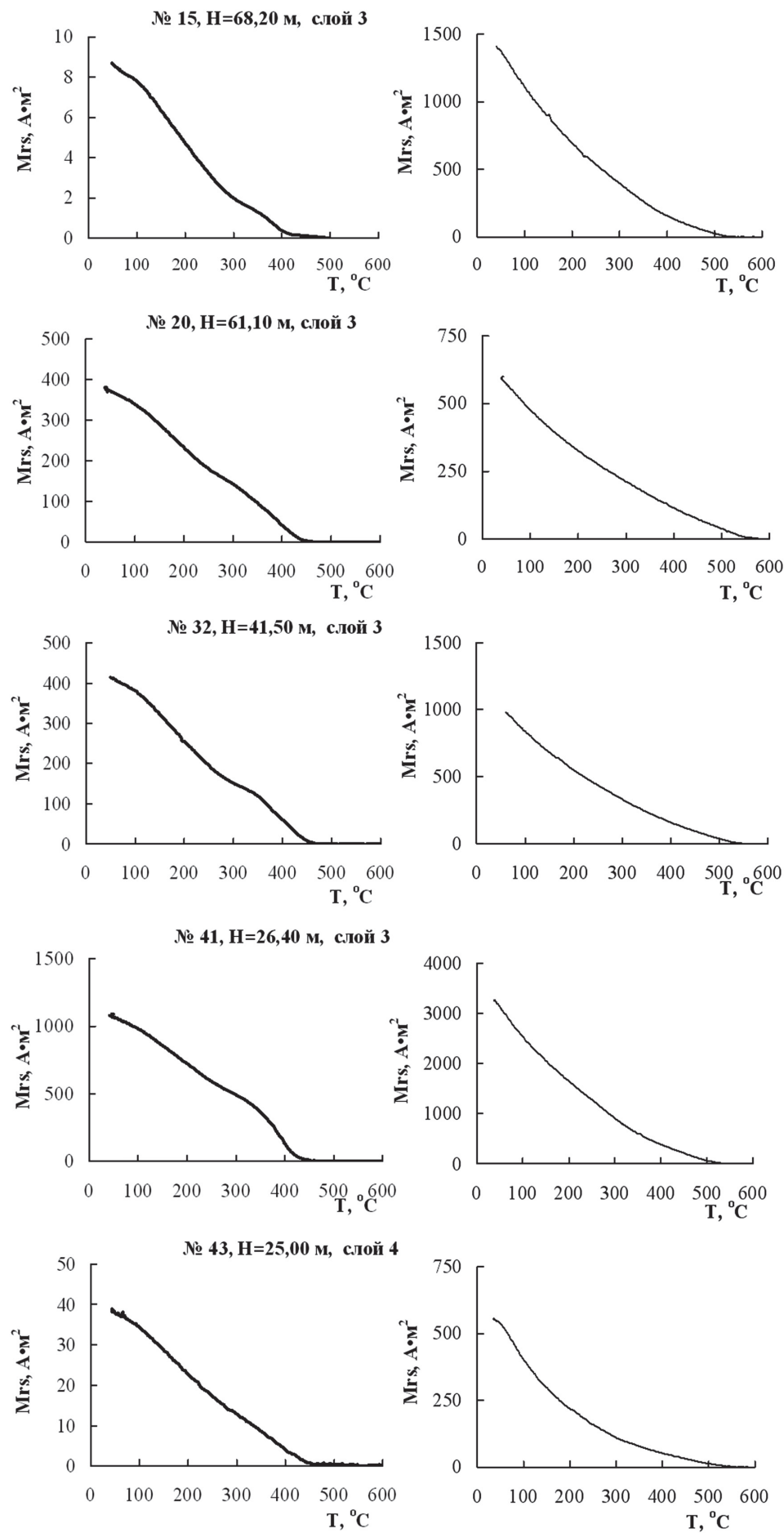


Рис. 6. Кривые термомагнитного анализа зависимости $M_s(T)$. Жирная линия — первый нагрев, тонкая линия — второй нагрев

Рис. 7. Кривые термомагнитного анализа зависимости $M_{rs}(T)$. Колонка слева — первый нагрев, колонка справа — второй нагрев



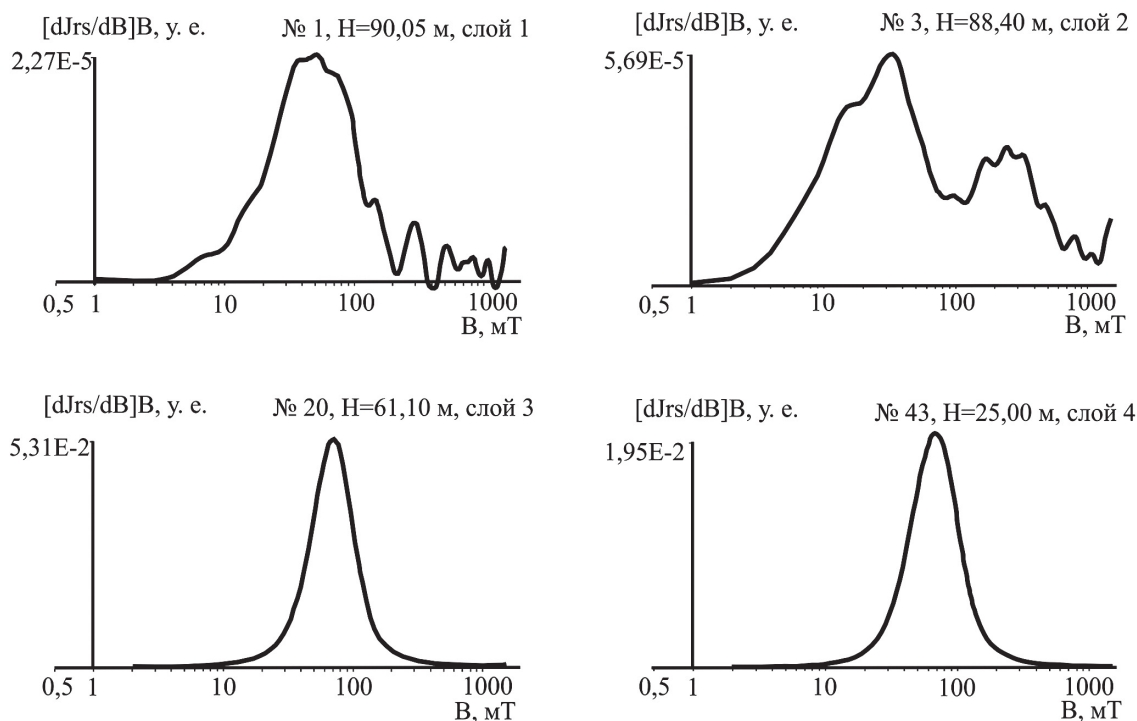


Рис. 8. Коэрцитивные спектры прямого намагничивания

тата из немагнитных соединений, например пирита, или с гетерофазным разложением титаномагнетита на магнетит Fe_3O_4 и ильменит.

Для разделения магнитных минералов по жесткости были сняты коэрцитивные спектры нормального и обратного остаточного индуктивного намагничивания на коэрцитивном спектрометре J-Meter конструкции П.Г. Ясонова [Буров и др., 1986; Нургалиев, Ясонов, 2009] для образцов объемом 2 см^3 со всех уровней отбора. Вейвлет-анализ спектров, снятых на образцах, которые отобраны из слоев 1 и 2 вейвлет-преобразованием «мексиканская шляпа», показал наличие перекрывающихся трех-четырех пиков, соответствующих минералам с разной магнитной жесткостью (рис. 8). Спектры образцов, отобранных из слоев 3 и 4, напротив, представляют собой отдельные гауссоиды, соответствующие единственному минералу.

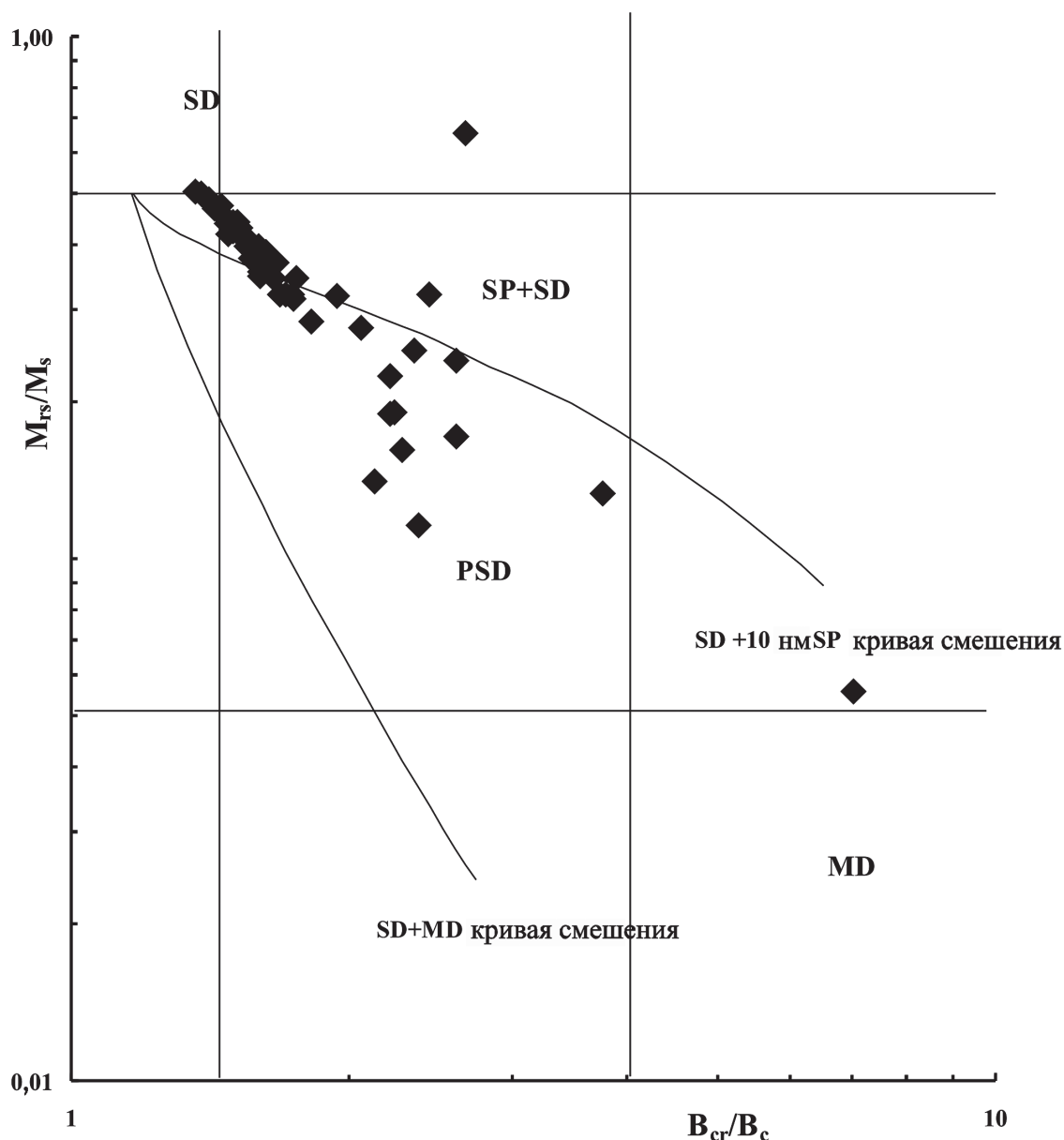
Таким образом, основной магнитный минерал — носитель естественной остаточной намагниченности — в породах изученной части разреза представлен титаномагнетитом. В породах слоев 1, 2 помимо титаномагнетита присутствует сульфид железа (моноклинный пирротин и/или грейгит).

Поскольку основной магнитный минерал в изученном разрезе — титаномагнетит, можно оценить доменную структуру магнитных зерен с помощью диаграммы Дэй–Данлопа [Day et al., 1977; Dunlop, 2002a,b]. Большинство изученных образцов содержит зерна титаномагнетита псевдооднодоменной структуры (PSD) и смесь однодоменных (SD) и суперпарамагнитных (SP) зерен (рис. 9).

Для определения относительного изменения размера зерен по разрезу были использованы от-

ношения магнитных параметров SIRM/α и ARM/α . Деление остаточных намагниченностей SIRM и ARM, зависящих от размера зерна и концентрации зерен-носителей NRM, на магнитную восприимчивость дает параметр, независимый от концентрации. Мелкие частицы, чей размер лежит в однодоменной SD и псевдооднодоменной PSD областях, будут достигать более высоких отношений SIRM/α и ARM/α в областях, где имеет место обилие этих частиц. На рис. 10 (б, в) видно, что в слое 1, 2 и нижней части слоя 3, а также в верхней части пачки 4 имеют место интервалы, характеризующиеся пониженными величинами отношений SIRM/α и ARM/α . Таким образом, в этих частях разреза присутствуют крупные частицы титаномагнетита.

Исследование анизотропии магнитной восприимчивости. Для определения сохранности формы магнитных минералов в условиях складкообразования на всех образцах коллекции изучена анизотропия магнитной восприимчивости (AMS). Результаты исследования AMS показали, что в географической системе координат направления минимальной оси эллипсоида магнитной восприимчивости имеют западное склонение и расположены по одну сторону от оси складки (азимут складки $\sim 45^\circ$). В стратиграфической системе координат минимальная ось эллипсоида анизотропии направлена вертикально, что отвечает картине осадконакопления в спокойных условиях. Значения параметра формы эллипсоида анизотропии (Т) на графике зависимости Т от степени анизотропии магнитной восприимчивости (Р) указывают на преобладание плоскостного типа анизотропии магнитной восприимчивости в образцах. Такая картина распределения осей магнитной

Рис. 9. Диаграмма
Дэя–Данлопа

восприимчивости свидетельствует о сохранении первичной формы магнитных минералов в условиях складкообразования (рис. 11).

Результаты палеомагнитных исследований.

Для получения направлений намагниченности, записанной в осадочных породах разреза ур. Скеля, авторы использовали чистку переменным полем — по 3 образца с уровня отбора. Для выделения характеристической компоненты намагниченности для всех образцов сняты кривые размагничивания от первоначальной NRM_0 до 60 мТл с шагом 5 мТл (рис. 12). На диаграммах Зийдервельда видно, что выделяются две компоненты намагниченности. Переменным магнитным полем ~5 мТл снимается вязкая низкокоэрцитивная компонента намагниченности. Помимо вязкой компоненты, на диаграммах Зийдервельда выделяется одна компонента, идущая в ноль, направление которой принимается за характеристическое.

Величины склонения (D) и наклонения (I) намагниченности, полученные после чистки переменным магнитным полем и проведения компонентного анализа по программе R.J. Enkin PMGSC-Paleomagnetism Data Analysis (ver. 4.2) [Enkin, 2003], удовлетворительно согласуются для 3 образцов с одного уровня (средняя степень ориентировки — кучность распределения направлений трех векторов естественной остаточной намагниченности ~366), что позволяет усреднить и построить кривые I и D по разрезу (рис. 13, б, в).

Пересчет величин угловых компонент характеристической намагниченности на координаты виртуального геомагнитного полюса и исключение из рассмотрения единичных точек обратной полярности показали, что самый верх слоя 1 можно отнести к R-горизонту; слои 2 и 3 — к горизонту прямой N полярности; слой 4 несет запись геомагнитного поля обратной полярности R (рис. 13).

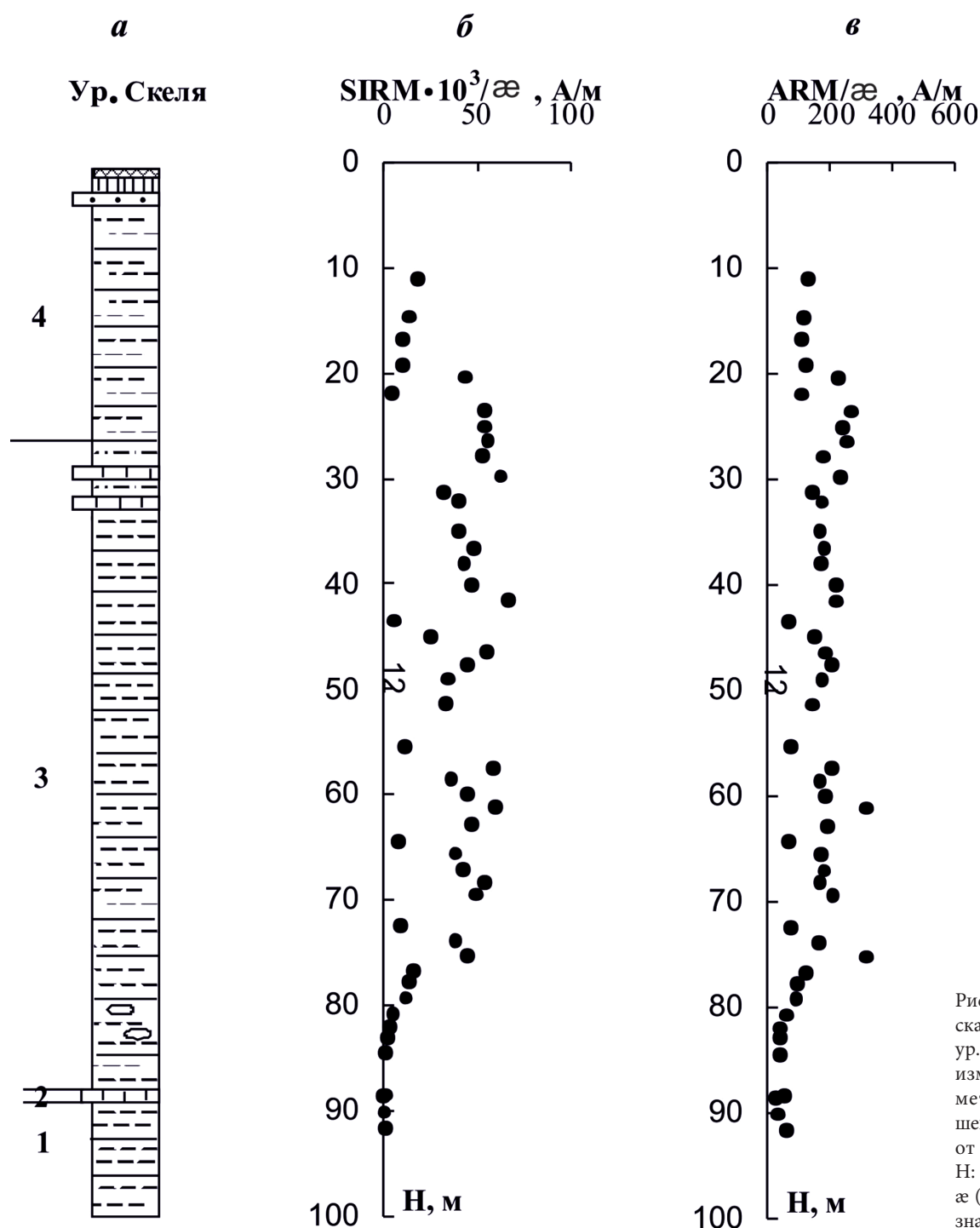


Рис. 10. Литологическая колонка разреза ур. Склея (*a*); кривые изменения гранулометрических отношений в зависимости от глубины разреза *H*: $SIRM/\alpha$ (*б*), ARM/α (*в*). Условные обозначения см. на рис. 4

Палеомагнитный тест складки направлений намагниченности, записанных в породах аргунских толщ (слои 3 и 4), выполненный по программе PMGSC (Paleomagnetic Data Analysis, ver. 4.2) [Enkin, 2003], дал положительный результат (Optimal untilting at $78,3 \pm 50,1\%$ untilting, test positive), что свидетельствует о доскладчатом возрасте образования намагниченности.

Обратно намагниченные породы в изученной части разреза Склея залегают сразу под тарханским мергелем в верхней части кувинских слоев, а также захватывают целиком слой 4 аргунских отложений. Породы слоя 3 аргунских отложений намагничены

прямо. Согласно данным [Palcu et al., 2019], тарханский регионарус расположен в средней части среднего миоцена, соответствует лангию Средиземноморья и локализован в пределах хрона C5Bn. Если не принимать во внимание единичную точку неопределенной полярности в терских слоях, то интервал прямой полярности, приходящийся на слои 2 и 3, можно сопоставить с хроном C5Bn. Слой 4 в верхней части аргунских отложений, характеризующийся обратной полярностью, можно сопоставить с C5ADr. Предположительно возраст границы C5Bn/C5ADr по магнитохронологической шкале GTS 2020 можно оценить в $\sim 14,7$ млн лет [Gradstein et al., 2020].

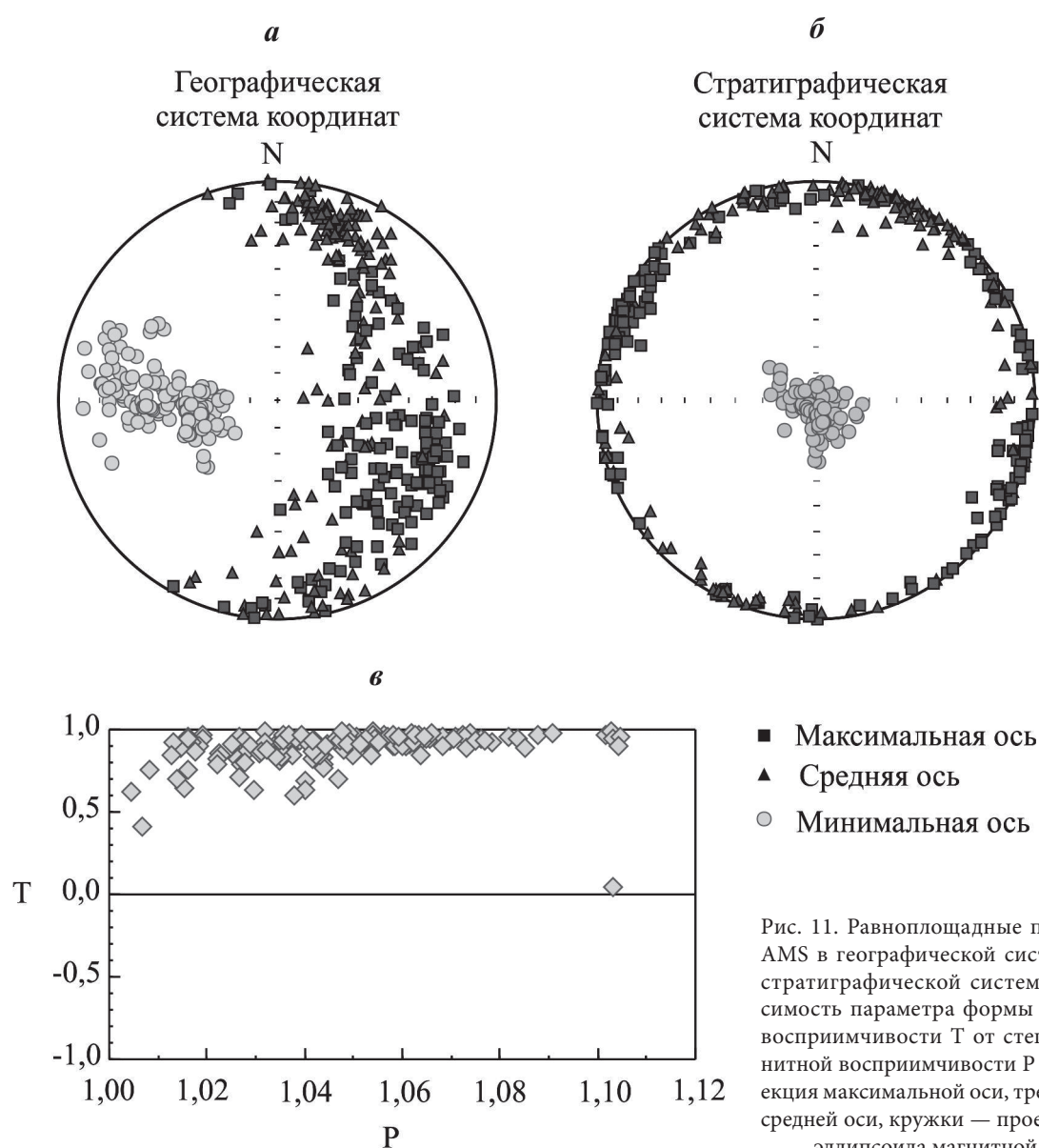


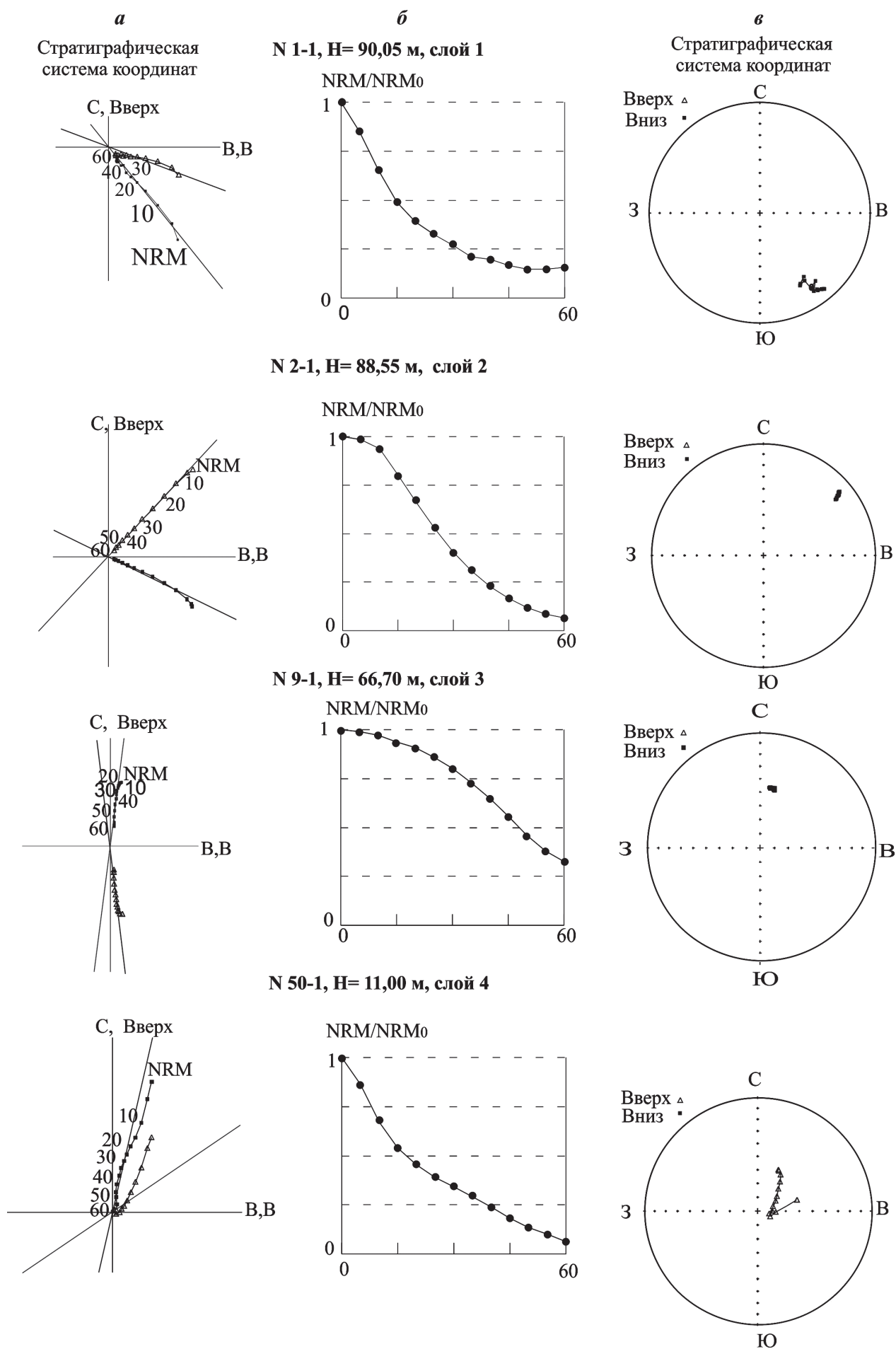
Рис. 11. Равноплощадные проекции главных осей AMS в географической системе координат (*a*) и в стратиграфической системе координат (*б*); зависимость параметра формы эллипсоида магнитной восприимчивости *T* от степени анизотропии магнитной восприимчивости *P* (*в*). Квадратики — проекция максимальной оси, треугольники — проекция средней оси, кружки — проекция минимальной оси эллипсоида магнитной восприимчивости

Таким образом, исследование магнитных минералов по жесткости путем разложения вейвлет-преобразованием коэрцитивных спектров прямого и обратного намагничивания показало, что слои 3 и 4 содержат единственный минерал-носитель естественной остаточной намагниченности. Термомагнитный анализ зависимости остаточного магнитного момента насыщения от температуры на образцах из этих слоев выявил титаномагнетит. Размер зерен титаномагнетита лежит в однодоменной и псевдооднодоменной областях. Наличие зерен титаномагнетита в морских осадочных толщах обычно свидетельствует о наличии терригенного сноса с суши: зерна титаномагнетита были принесены с осадками, поступающими со стоком рек и сносимыми с мелководья, поэтому естественная остаточная намагниченность имеет седиментационную природу. В слоях 3 и 4 надежно выделяется характеристическая компонента намагниченности. Палеомагнитный тест складки положительный. Нижняя часть аргунских отложений (нижняя часть

слоя 3) представлена преимущественно глинами, которые формировались в относительно глубоководных условиях при наличии связи бассейна с открытыми морскими водами. Верхняя часть аргунских отложений (слой 4) образовывалась в условиях обмеления бассейна при усилении поступления обломочного материала [Ростовцева, 2012].

В маломощных слоях 1 и 2 присутствует несколько ферромагнитных минералов-носителей NRM: титаномагнетит и сульфид железа — моноклинный пирротин и/или грейгит. Низкие величины гранулометрических отношений $SIRM/\alpha$, ARM/α в слоях 1 и 2 и в нижней части слоя 3 свидетельствуют о наличии крупной фракции, т. е. о близости источников сноса.

Несмотря на хорошее совпадение полярности намагниченности, полученной в нижней части разрезов ур. Скеля и Коп-Такыл (рис. 2), не исключено перемагничивание нижних слоев разреза ур. Скеля. Таким образом, однородные по составу магнитных минералов-носителей естественной остаточной на-



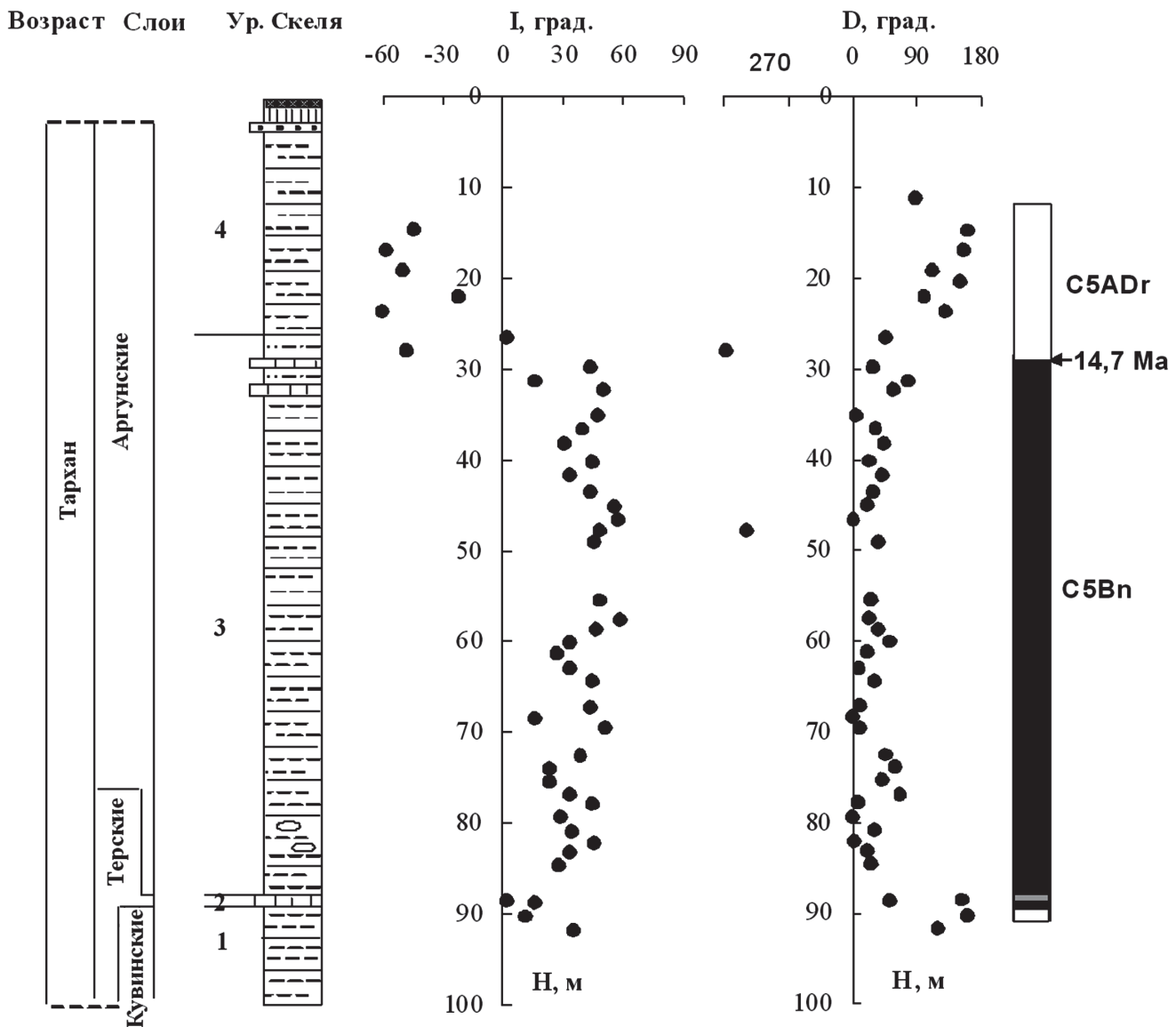


Рис. 13. Литологическая колонка (а); кривые зависимости средних значений наклоения I (б) и склонения D (в) от мощности разреза Н после чистки переменным магнитным полем и применения компонентного анализа. Черное — прямая полярность намагниченности, белое — обратная полярность, серое — неопределенная полярность

магничности слои 3 и 4 общей мощностью ~73 м пригодны для дальнейших циклостратиграфических исследований методами спектрального анализа временных рядов как магнитной восприимчивости, так других магнитных параметров, чувствительных к изменению климата.

Заключение. В ходе петромагнитных и палеомагнитных исследований отложений тарханского региона мiocена разреза ур. Склея установлено, что основной ферромагнитный минерал в отложениях пород аргунских слоев представлен титаномангнетитом. Аргунские отложения на заключительном этапе накопления формировались при увеличении поступления обломочного материала со стоком рек. Природа намагниченности седиментационная.

Выделенный интервал прямой полярности намагниченности в нижней части аргунских слоев можно сопоставить с хроном C5Bn.

Интервал обратной полярности намагниченности, приходящийся на верхнюю часть аргунских слоев, сопоставим с хроном C5ADr. Предположительно возраст границы C5Bn/C5ADr можно оценить в ~14,7 млн лет по магнитохронологической шкале GTS 2020. Отложения кувинских и терских слоев содержат несколько минералов-носителей естественной остаточной намагниченности — титаномангнетит и грейгит (моноклинный пирротин). Химическая природа намагниченности грейгита предполагает аккуратное отношение к выделенным направлениям намагниченности.

Рис. 12. Диаграммы Зийдервельда (а), цифры обозначают величину переменного магнитного поля в мТл; кривые размагничивания NRM/NRM₀ демонстрационных образцов переменным магнитным полем (б); стереографические проекции вектора NRM в стратиграфической (древней) системе координат (в)

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность руководителю проекта А.И. Рыбкиной за всестороннюю помощь в организации полевой и исследовательской работы, С.Д. Меркулову, А.А. Одинцовой за помощь в отборе образцов и подготовке коллекции к экспериментальным исследованиям, Д.М. Кузиной и В.В. Антоненко за

организацию и содействие в работе на коэрцитивном спектрометре в лаборатории палеоклиматологии, палеоэкологии, палеомагнетизма Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) Федерального университета.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-77-10075).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андрусов Н.И. Известняки Керчи и их фауна // Зап. имп. Санкт-Петербургского минерал. об-ва. 1890. Т. 2, № 26. С. 193–345.

Барг И.М., Григорович А.С., Носовский М.Ф. Про стратиграфичне положення спіралісових глин Криму // Тектоніка і стратиграфія. Вып. 7. Київ: Наук. думка, 1975. С. 62—65.

Буров Б.В., Нурғалиев Д.К., Ясонов П.Г. Палеомагнитный анализ. Казань: Изд-во Каз. гос. ун-та, 1986. 167 с.

Жижченко Б.П. Нижний и средний миоцен // Стратиграфия СССР. Т. 12. Неоген. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940. С. 11–227.

Молостовский Э.А. Шкала магнитной полярности мезозоя и кайнозоя и ее значение для стратиграфии: по материалам западной части СССР: Докт. дисс. Саратов, 1986. 401 с.

Носовский М.Ф., Барг И.М., Пишванова Л.С., Андреева-Григорович А.И. Об объеме тарханского яруса на юге СССР // Стратиграфия кайнозоя Северного Причерноморья и Крыма. Днепрпетровск: Изд-во ДГУ, 1976. С. 22–31.

Нурғалиев Д.К., Ясонов П.Г. Полезная модель «Коэрцитивный спектрометр»: патент № 81805 // Государственный реестр полезных моделей Российской Федерации. 2009. 27 марта.

Певзнер М.А. Стратиграфия среднего миоцена — плиоцена Юга Европы (по палеомагнитным данным): Автореф. докт. дисс. М., 1986.

Ростовцева Ю.В. Седиментогенез в бассейнах среднего и позднего миоцена Восточного Паратетиса (стратотипический Керченско-Таманский регион): Автореф. докт. дисс. М., 2012.

Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985. 272 с.

Трубихин В.М. Палеомагнитная шкала и стратиграфия неоген-четвертичных отложений Паратетиса // Опорные разрезы неогена Восточного Паратетиса (Таманский полуостров). Волгоград; Тамань, 1998. С. 13–17.

Day R., Fuller M.D., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetite: Grain size and composition dependence // Phys. Earth Planet. Inter. 1977. Vol. 13. P. 260–266.

Dunlop D.J. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc). 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data // J. Geophys. Res. 2002a. Vol. 107, Iss. B3, 2056, 10.1029/2001JB000486.

Dunlop D.J. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc). 2. Application to data for rocks, sediments, and soils // J. Geophys. Res. 2002b. Vol. 107, Iss. B3, 2057, 10.1029/2001JB000487.

Egli R. Analysis of the field dependence of remanent magnetization curves // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108, Iss. B2. P. 1–25.

Enkin R.J. The direction-correction tilt test: an all-purpose tilt/fold test for paleomagnetic studies // Earth Plan. Sci. Lett. 2003. Vol. 212, N 1–2. P. 151–161.

Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. The geologic time scale 2020, Vol. 2. Amsterdam: Elsevier, 2020. P. 1141–1215.

Palcu D.V., Popov S.V., Golovina L.A. et al. The shutdown of an anoxic giant: Magnetostratigraphic dating of the end of the Maikop Sea // Gondwana Res. 2019. Vol. 67. P. 82–100.

Peters C., Thompson R. Magnetic identification of selected natural iron oxides and sulphides // J. Magnetism and Magnetic Materials. 1998. Vol. 183. P. 365–374.

Pilipenko O.V., Filina E.V., Rostovtseva Yu.V., Novruzov Z. Petromagnetism and paleomagnetism of the Tarkhanian sediments in Kop-Takyl section (the Kerch Peninsula) // Russ. J. Earth Scie. 2020. Vol. 20. ES3003. DOI: 10.2205/2020ES000712.

Pilipenko O.V., Salnaya N.V., Rostovtseva Yu.V., Novruzov Z. Rock-magnetic studies of the Tarkhanian sediments in Kop-Takyl section (the Kerch peninsula) // Russ. J. Earth Scie. 2021. Vol. 21. ES2005. DOI:10.2205/2021ES000765.

Tarling D.H., Hrouda F. The magnetic anisotropy of rocks. London; Glasgow; N.Y.; Tokyo; Melbourne; Madras: Chapman & Hall, 1993. 277 p.

Статья поступила в редакцию 14.12.2021, одобрена после рецензирования 09.03.2022, принята к публикации 31.08.2022