

Производственный опыт

УДК 550.838.5

*А. Л. Пискарев
ВНИИОкеангеология
Д. В. Элькина*

Санкт-Петербургский государственный университет

СКОРОСТЬ ПЛИОЦЕН-ЧЕТВЕРТИЧНОГО ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В РАЙОНЕ ПОДНЯТИЯ МЕНДЕЛЕЕВА (СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН) ПО ДАННЫМ ПАЛЕОМАГНИТНОГО ИЗУЧЕНИЯ КОЛОНОК ДОННЫХ ОСАДКОВ

Изучены колонки донных осадков, отобранных на поднятии Менделеева. Во всех колонках уверенно определена граница смены полярности вектора остаточной намагниченности, соответствующая границе хронов Брюнес–Матуяма. В трех колонках определена граница Матуяма–Гаусс, а в самой длинной, отобранной в рейсе 2012 г. шестиметровой колонке, на глубине 531 см определена граница Гаусс–Гилберт.

Направление первичной остаточной намагниченности образцов донных осадков выявлено с применением пошагового размагничивания переменным магнитным полем и терморазмагничивания.

Средняя скорость осадконакопления в районе поднятия Менделеева со времени, близкого к началу плиоцена (4–4,5 млн лет), не превышала 1–1,5 мм/тыс лет.

Ключевые слова: Арктика, палеомагнетизм, донные осадки, скорость осадконакопления, поднятие Менделеева.

В последнее десятилетие проводятся широкие геолого-геофизические исследования в Северном Ледовитом океане в связи с проблемой обоснования внешней границы континентального шельфа (ВГКШ) Российской Федерации. В ряде экспедиций соб-

раны материалы о геологическом строении подводных хребтов и возвышенностей, в частности поднятия Менделеева. Обсуждаются состав и происхождение донных осадков этого региона, источники и направление сноса при осадконакоплении, соотношение донно-каменного материала, привнесенного в результате ледового разноса, и обломков коренных пород. Особое значение имеет определение скорости осадконакопления в плиоцен-четвертичное время. Низкая скорость осадконакопления свидетельствует о тектонической стабильности земной коры поднятия Менделеева и сопряженных с поднятием котловин. Медленное осадконакопление способствует также хорошей сохранности на дне или вблизи его поверхности обломков коренных пород. Однако в литературе последнего десятилетия стала превалировать точка зрения о сравнительно высокой скорости осадконакопления в регионе.

При бедности разреза микрофауной, определение возраста донных осадков глубоководной области Северного Ледовитого океана опирается на палеомагнитные данные и на результаты определения абсолютного возраста по изотопам углерода. Однако радиоуглеродный метод дает уверенное определение абсолютного возраста только для самой верхней части разреза, охватывающей период в десятки тысяч лет, а результаты палеомагнитных исследований не всегда могут трактоваться однозначно.

Впервые низкие скорости осадконакопления в глубоководной части Северного Ледовитого океана были получены в результате палеомагнитных исследований на участке хребта Менделеева, расположенном севернее 83° с. ш., где в восьми колонках донных осадков скорость осадконакопления, вычисленная по положению границы Брюнес–Матуяма, была определена в пределах от 0,8 до 1,6 мм/тыс лет [8]. Впоследствии эти данные были подвергнуты пересмотру, и в недавних публикациях преобладает точка зрения, что скорость осадконакопления в центральных областях Северного Ледовитого океана, включая и поднятие Менделеева, превышает 1 см/тыс лет [13].

Вите и Кент [15] подвергли сомнению результаты Кларка с соавторами [8] на том основании, что в процессе исследований не производилась магнитная чистка образцов путем размагничивания. В основу ряда других публикаций легли данные, полученные по осадкам хребта Ломоносова [10], перенесенные без достаточных

оснований на район поднятия Менделеева. Признавая определение низкой скорости осадконакопления в районе поднятия Менделеева ошибочным, авторы [6, 7, 12] опираются либо на радиоуглеродные данные, характеризующие только самую верхнюю часть разреза донных осадков, либо на биостратиграфические корреляции, мало-пригодные для районов хребтов Менделеева–Альфа ввиду бедности донных осадков фауной.

В настоящей работе использованы палеомагнитные данные, полученные по колонкам донных осадков, отобраным в 2000 г. в рейсе НИС “Академик Федоров” вдоль профиля, пересекающего поднятие Менделеева от впадины Менделеева до котловины Подводников [4]. Эти данные основаны на изучении 2–3-метровых колонок донных осадков с использованием при проведении магнитной чистки ограниченных по амплитуде переменных полей. Шестиметровая колонка, отобранная в 2012 г. во время экспедиции Арктика-2012 [3], позволила охарактеризовать гораздо более длительный интервал осадконакопления. Кроме того, исследование образцов осадков из этой колонки произведено на новейшем лабораторном оборудовании с использованием самых современных технологий, что принципиально повышает достоверность полученных результатов.

Точки отбора проб в районе поднятия Менделеева в двух рейсах с разницей в 12 лет показаны на рис. 1. Серия из семи колонок была извлечена во время рейса НИС “Академик Федоров” в 2000 г., и одна длинная колонка – в 2012 г. во время экспедиции Арктика-2012.

Отбор образцов из колонок производился методом, описанным в работе В. В. Кочегуры [2]. Дискретные образцы для дальнейших исследований получены сплошным отбором, для чего в недеформированный осадок ближе к осевой части колонки последовательно вдавливались стеклянные цилиндры со средним диаметром 22 мм, ориентированные относительно координат колонки. Измерения естественной остаточной намагниченности проводились для всех образцов на спиннер-магнитометрах JR-4 и JR-6A, AGICO для коллекций 2000 и 2012 гг. соответственно. Естественная остаточная намагниченность J_n , как наиболее важный параметр, содержащий направление древнего геомагнитного поля, в то же время является совокупностью нескольких компонент, каждая из которых имеет свою историю приобретения. Для выявления стабильной компоненты намагниченности и удаления вязкой, наведенной современным

магнитным полем Земли, производилась магнитная чистка образцов из обоих рейсов. При работе с образцами рейса 2000 г. интенсивность переменного магнитного поля не превышала 12,3 мТл и была недостаточна для полной чистки, хотя суммарная кривая размагничивания анализировалась и давала дополнительные основания для определения полярности естественной остаточной намагниченности образцов. Магнитная чистка для выборки 2012 г. осуществлялась в более полном объеме: разные группы образцов размагничивались пошагово, как при помощи переменного поля в диапазоне от 5 до 100–160 мТл, так и при помощи температуры – от 130 до 450–500 °С. Далее методом компонентного анализа [11] была вычислена характеристическая компонента естественной остаточной намагниченности вместе с максимальным угловым отклонением.

Измерения магнитной восприимчивости для серии образцов 2000 г. осуществлялись каппаметром KLY-2с, а для колонки 2012 г. – каппаметром КТ-5, сенсорным прибором MS2E, Bartington и при помощи каппаместа MFK1-FA, AGICO. Литологический анализ колонок позволил произвести сопоставления состава и строения осадков и изучаемых палеомагнитных параметров.

Все колонки извлечены в пунктах, относительно близких к Северному полюсу. На высоких широтах именно наклонение вектора намагниченности становится наиболее важным палеомагнитным параметром. Склонение в нашей работе не рассматривается из-за произвольной ориентировки образцов керна в горизонтальной плоскости.

При изучении образцов из колонок 2000 г. по кривым наклонения и величины естественной остаточной намагниченности во всех колонках определена граница смены полярности земного магнитного поля Брюнес–Матуяма. Основным признаком инверсии магнитного поля является характерная смена высоких положительных наклонений отрицательными. Дополнительным признаком смены полярности служит уменьшение величины вектора J_n в интервалах обратной полярности (рис. 2). Такое уменьшение для интервалов обратной полярности по сравнению с прямой указывает на присутствие вязкой намагниченности, наведенной современным магнитным полем Земли, так как при векторной сумме с вектором прямой полярности итоговая намагниченность увеличивается, а при обратной – уменьшается.

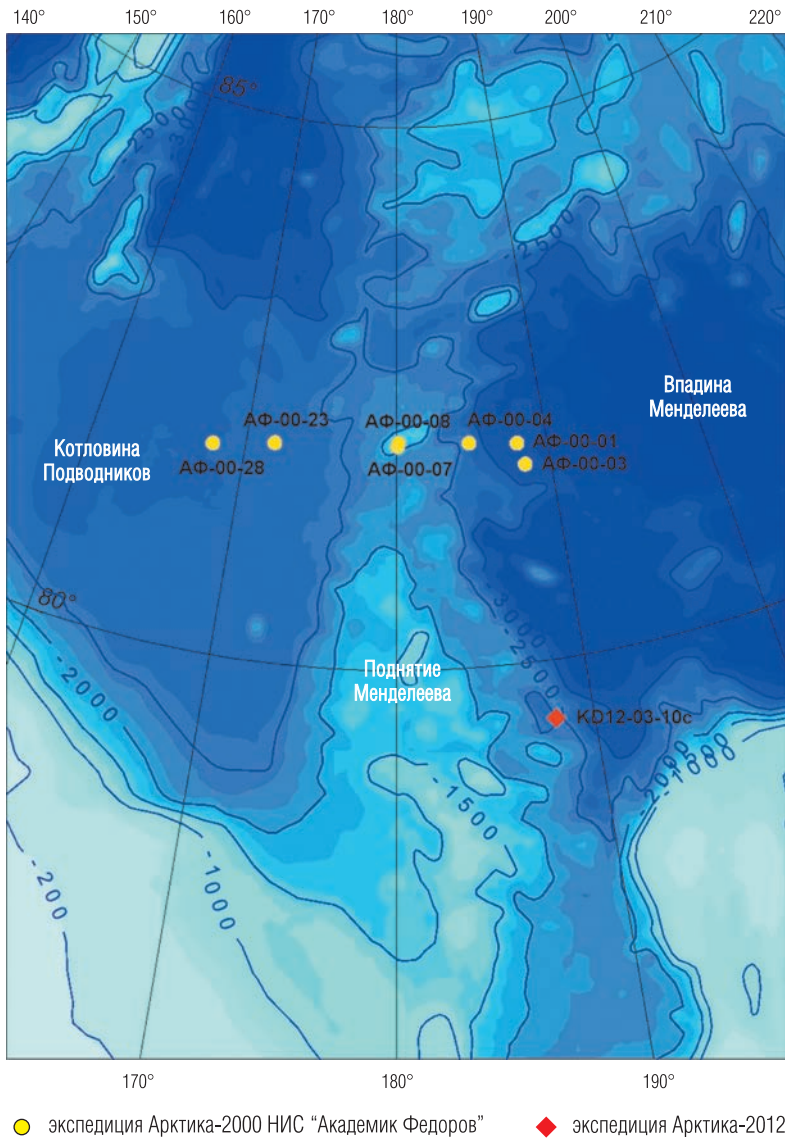


Рис. 1. Обзорная карта мест отбора изученных колонок донных осадков в рейсах Арктика-2000 и Арктика-2012

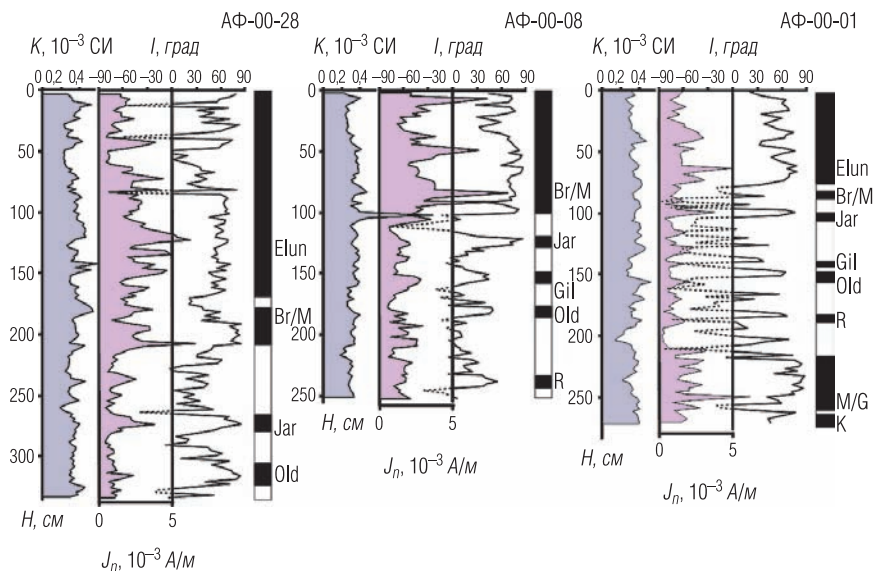


Рис. 2. Палеомагнитная корреляция донных осадков в колонках рейса Арктика-2000 (НИС “Академик Федоров”)

Для возрастной привязки зафиксированных изменений полярности использованы известные шкалы палеомагнитных хронов и субхронов, незначительно различающиеся в определении возрастов субхронов [5, 9]:

- нижняя граница хрона (эпохи) Брюнес (**Br**) прямой полярности – 0,78 млн лет;
- нижняя граница хрона (эпохи) Матуяма (**M**) обратной полярности – 2,58 млн лет;
- нижняя граница хрона (эпохи) Гаусс (**G**) прямой полярности – 3,58 млн лет, переходящая в хрон (эпоху) Гилберт (**Gi**);
- субхрон обратной полярности – Элунино (Elun) – 0,71 млн лет;
- субхроны прямой полярности – Харамильо (Jar) – 0,90–1,06 млн лет; Кобб Маунтин (CobbM) – 1,21–1,24 млн лет; Гилза (Gil), Олдувей (Old) – 1,78–2,00 млн лет, Реюньон (R) – 2,08–2,14 млн лет;
- субхрон обратной полярности – Каена (**K**) – 3,05–3,12 млн лет; Маммот (Mam) – 3,22–3,33 млн лет.

В пяти колонках, отобранных на самом поднятии Менделеева и в расположенной восточнее впадине Менделеева (колонки АФ-00-01, АФ-00-03, АФ-00-04, АФ-00-07 и АФ-00-08), граница Брюнес–Матуяма находится на глубине от 86 до 102 см. В двух колонках из впадины Подводников (АФ-00-23 и АФ-00-28) граница находится на глубине 188 и 208 см. Таким образом, скорость осадконакопления в рассмотренных колонках не превышает 1–1,3 мм/тыс лет и увеличивается до 2,67 мм/тыс лет с приближением к шельфу Восточно-Сибирского моря, то есть к источнику выноса осадков в Северный Ледовитый океан.

На установленных границах инверсии геомагнитного поля отмечается резкое увеличение величин намагниченности и магнитной восприимчивости. Магнитная восприимчивость как мера наличия ферромагнитных частиц в отложениях может служить дополнительным параметром, характеризующим изменения условий седиментации, что также обнаруживается и при литологическом анализе.

Изменениям направления и характера намагниченности во многих случаях соответствуют литологические границы. Особенно четкая картина получается при рассмотрении палеомагнитной привязки границы, на которой в разрезе происходит переход от пачки крапчатых пелитов к пестроцветным пелитам. В колонках АФ-00-28 и АФ-00-23 эта граница приурочена к эпизоду Олдувей, в колонках АФ-00-08, АФ-00-07 и АФ-00-03 она располагается несколько ниже горизонта, относимого к эпизоду Олдувей, и только в колонке АФ-00-01 она располагается уже в горизонте, относимом к эпохе Гаусс.

Результаты изучения колонки КД12-03-10с, отобранной в экспедиции 2012 г., представлены на рис. 3. Кривая изменения наклоения вектора естественной остаточной намагниченности J_n с глубиной отображает чередования интервалов прямой и обратной полярностей земного магнитного поля. Начиная с верха колонки, положительные наклоения преобладают вплоть до 123,5 см, где происходит резкий переход в сторону отрицательных наклоений. Преимущественно отрицательные значения наклоения наблюдаются до глубины 394 см, перемежаясь выбросами положительных наклоений. По кривой величины вектора J_n видно, что намагниченность для интервалов с положительными наклоениями в среднем больше, чем для интервалов с отрицательными наклоениями. Разница в средних значениях величин намагниченности для выделяемых интервалов прямой и обратной полярностей обусловлена присутствием вязкой составляющей намагниченности, что было отмечено и в колонках 2000 г.

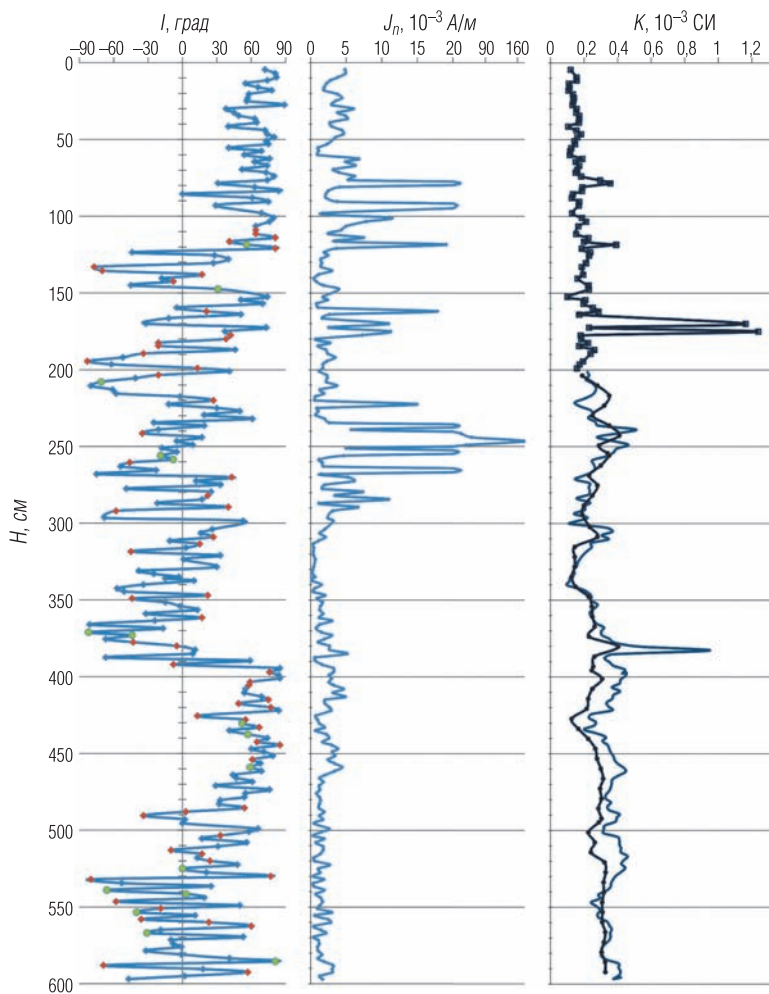


Рис. 3. Наклонение I , естественная остаточная намагниченность J_n и магнитная восприимчивость донных осадков K колонки KD12-03-10с, экспедиция Арктика-2012. На кривой наклонений также обозначены образцы, отобранные для магнитной чистки (температура – красные ромбы, переменное магнитное поле – зеленые кружки). Кривая магнитной восприимчивости, полученная при помощи MFK1-FA, обозначена полыми квадратами, КТ-5 – залитыми кружками, MS2E – без маркеров

Роль вязкой намагниченности в образцах как с выраженной обратной полярностью, так и с сомнительным направлением естественной остаточной намагниченности изучена в ходе размагничивания нагреванием и в переменном магнитном поле. Пошаговое размагничивание температурой для образца на глубине 133 см демонстрирует типичную форму кривой размагничивания для случая обратной полярности (рис. 4). Максимум на этой кривой на температуре 130 °С отображает уничтожение вязкой составляющей прямой полярности. Эта составляющая уменьшает изначальный вектор, а ее уничтожению сопутствует рост намагниченности. На следующем шаге и далее намагниченность начинает уменьшаться, что отражает постепенное ее разрушение. Образец, соответствующий глубине 397 см, в свою очередь показывает характерное поведение для вектора намагниченности с изначально положительным наклоном, возросшего за счет суммы с вязкой составляющей.

Интервалы прямых и обратных полярностей по длине всей колонки KD12-03-10с проявляются более четко на результирующей кривой наклонений характеристической компоненты остаточной намагниченности (ChRM) (рис. 5). Максимальное угловое отклонение (MAD), являющееся критерием точности рассчитанной ChRM, может быть использовано для оценки надежности полученных наклонений.

Расположенный на уровне 123,5 см переход из положительных наклонений в преобладающие отрицательные рассматривается как граница между хронами Брюнес и Матуяма, что делает вероятным предположение о низкой скорости седиментации в районе поднятия Менделеева. Принимая во внимание переход от отрицательных наклонений к положительным на глубине 394 см, можно определить следующую границу инверсии геомагнитного поля (переход между хронами Матуяма и Гаусс). В этом случае короткие интервалы положительных наклонений в хроне Матуяма могут быть приурочены к субхронам прямой полярности внутри него. Примерные ожидаемые позиции субхронов можно рассчитать исходя из средней скорости осадконакопления для хрона Матуяма (табл.).

Установленные границы переходов между хронами Брюнес–Матуяма и Матуяма–Гаусс сопровождаются пиками магнитной восприимчивости и намагниченности (рис. 3), что было отмечено и для колонок 2000 г. и интерпретировалось как возможный индикатор перемены в условиях осадконакопления [4].

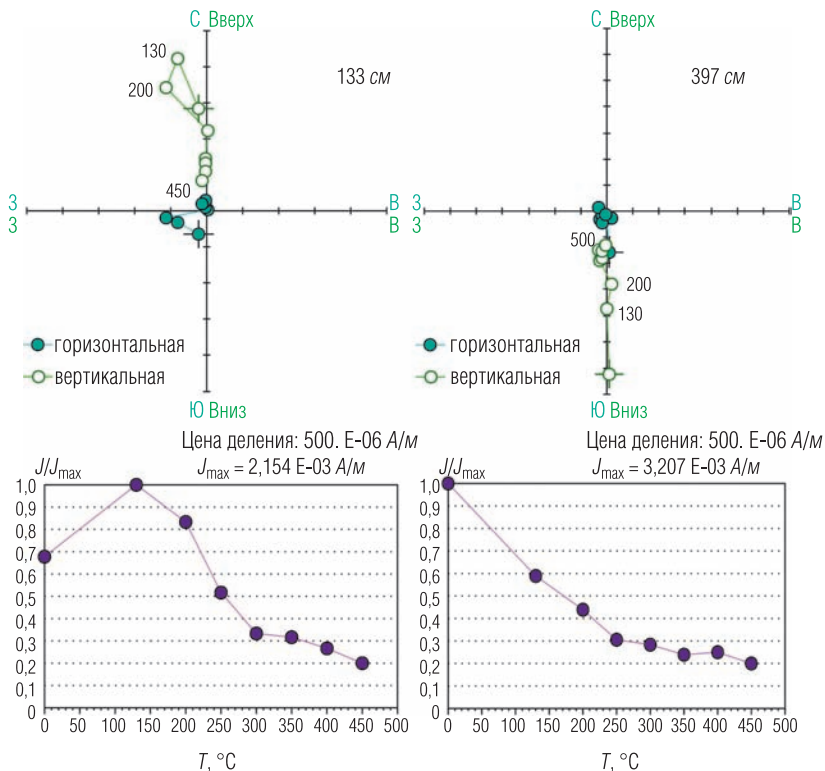


Рис. 4. Примеры ступенчатого терморазмагничивания типичных образцов колонки KD12-03-10с, отобранных на глубине 133 и 397 см. Для каждого образца приведены ортогональная диаграмма (вверху: залитые и полые кружки – проекции на горизонтальную и вертикальную плоскость соответственно. Звездочкой обозначены измерение J_n и кривая изменения величины J_n в ходе температурной чистки (внизу))

Начиная с глубины 394 см положительные наклонения ChRM держатся вплоть до 513 см, где претерпевают короткий сдвиг в отрицательную область, после чего восстанавливаются обратно в положительную (рис. 5). На глубине 531 см вновь происходит переход в область отрицательных наклонений, которые преобладают уже до конца исследованной колонки.

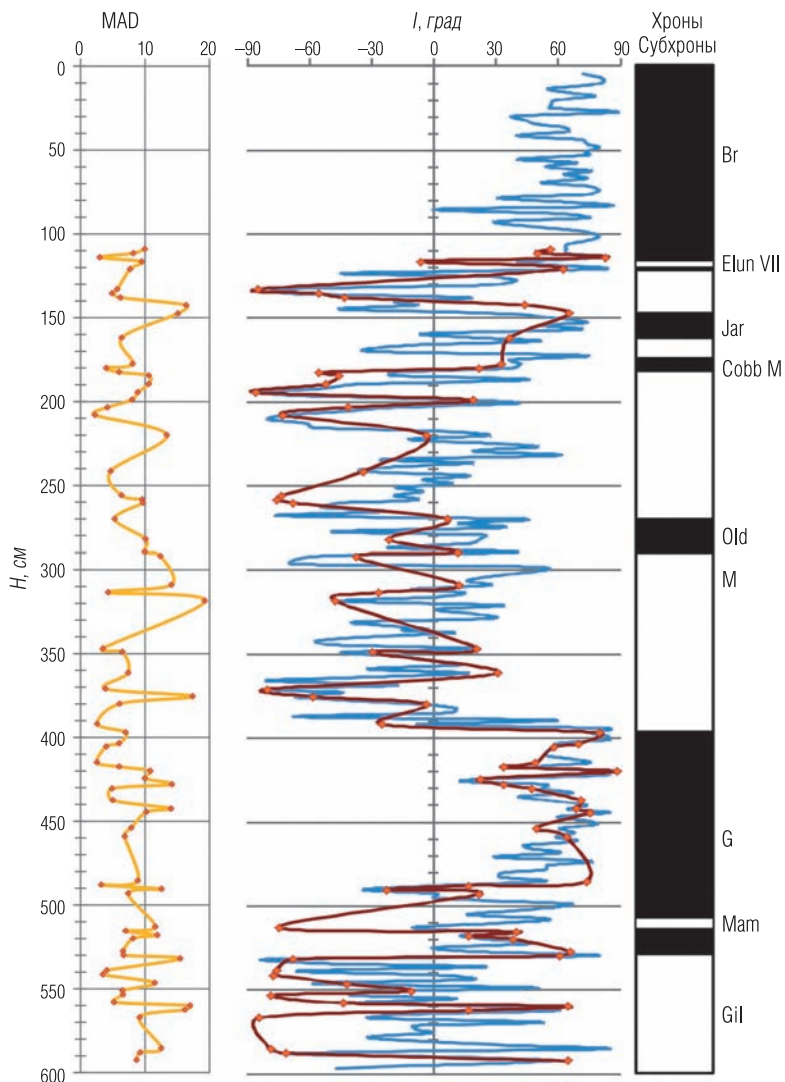


Рис. 5. Палеомагнитная корреляция донных осадков в колонке KD12-03-10с. Оранжевым цветом и маркерами обозначаются наклонения характеристической компоненты остаточной намагненности ChRM, синим – наклонения естественной остаточной намагненности J_n

Таблица

Положение границ хронов различной полярности
в колонках донных осадков поднятия Менделеева

№ колонки	Граница (глубина), см			Скорость осадкона- копления, мм/тыс лет		
	Брюнес– Матуяма (0,78 млн лет)	Матуяма– Гаусс (2,58 млн лет)	Гаусс– Гилберт (3,58 млн лет)	Брюнес	Мату- яма	Гаусс
АФ-00-01	86	213		1,10	0,70	
АФ-00-03	102	271		1,31	0,99	
АФ-00-04	94			1,21	1,06 ¹	
АФ-00-07	102			1,31	0,84 ¹	
АФ-00-08	101			1,29	1,01 ¹	
АФ-00-23	188			2,41	1,15 ¹	
АФ-00-28	208			2,67	0,95 ¹	
KD12-03-10с	123,5	394,5	531	1,58	1,5	1,36

Примечание. ¹ Скорость в коллекции образцов 2000 г. определена по субхронам.

Уровень 531 см может рассматриваться как граница перехода между хронами Гаусс и Гилберт. Следует отметить, что кривая намагниченности показывает большие величины J_n для интервала 394–531 см, чем для нижней части кривой, при практически неменяющейся кривой магнитной восприимчивости (рис. 3). Это является дополнительным доказательством перехода границы полярности.

Средняя скорость осадконакопления, рассчитанная для колонки KD12-03-10с, составляет 1,44 мм/тыс лет за 3,58 млн лет. Эти данные хорошо согласуются со скоростями, полученными для колонок 2000 г. (табл.), и показывают, что низкие скорости осадконакопления в районе поднятия Менделеева характерны не только для периодов Брюнес и Матуяма, но и для более ранних хронов Гаусса и части хрона Гилберта, начиная с осадков, возраст которых составляет около 4,3 млн лет. Таким образом, история осадконакопления на поднятии Менделеева прослежена почти с самого начала эпохи плиоцена.

Известно, что скорость осадконакопления не остается постоянной и варьирует с течением времени, даже если условия седиментации не изменяются кардинально [14]. В то же время литификация и уплотнение осадков со временем приводят к уменьшению измеренной скорости осадконакопления в нижележащих толщах. Этот эффект подтверждают приведенные выше данные.

Результаты радиохимического анализа материала колонок поднятия Менделеева приведены в работе Гусева и др. [1]. По этим данным средняя скорость осадконакопления составляет от 1,1 до 1,5 мм/тыс лет, что близко совпадает с палеомагнитными данными. Лишь в расположенной южнее, ближе к континентальному склону колонке вычисленная скорость осадконакопления за период порядка 200 тыс лет составляет 4,4 мм/тыс лет.

В заключение следует отметить, что палеомагнитные исследования колонок донных осадков поднятия Менделеева позволили уверенно определить границу Брюнес–Матуяма. В трех колонках определена граница Матуяма–Гаусс, а в самой длинной колонке KD12-03-10с на глубине 531 см с применением процедур размагничивания уверенно зафиксирована граница Гаусс–Гилберт. Тем самым история осадконакопления на поднятии Менделеева прослежена со времени, близкого к началу плиоценовой эпохи. Для всего изученного интервала времени характерна низкая скорость осадконакопления, в основном в пределах 1–1,5 мм/тыс лет.

Наконец, в ряде колонок к границам хронов приурочены пиковые значения магнитной восприимчивости, а иногда и величины естественной остаточной намагниченности, что является дополнительным параметром возрастной корреляции колонок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев Е. А., Максимов Ф. Е., Кузнецов В. Ю. и др. Стратиграфия донных осадков поднятия Менделеева (Северный Ледовитый океан) // Доклады Академии наук. 2013. Т. 450. № 5. С. 573–587.
2. Кочегура В. В. Применение палеомагнитных методов при геологической съемке шельфа. СПб.: ВСЕГЕИ, 1992. 143 с.
3. Морозов А. Ф., Петров О. В., Шокальский С. П. и др. Новые геологические данные, обосновывающие континентальную природу области Центрально-Арктических поднятий // Региональная геология и металлогения. 2013. Т. 53. С. 34–55.

4. Пискарев А. Л., Андреева И. А., Гуськова Е. Г. Палеомагнитные данные о скорости осадконакопления в районе поднятия Менделеева (Северный Ледовитый океан) // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 5. С. 694–704.
5. Поспелова Г. А. Геомагнитные экскурсы // *Краткая история и современное состояние геомагнитных исследований в Институте физики Земли Российской Академии наук*. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2004. С. 44–55.
6. Backman J., Fornaciari E., Rio D. Biochronology and Paleoceanography of Late Pleistocene and Holocene Calceous Nannofossil Abundances across the Arctic Basin // *Marine Micropaleontology*. 2009. № 72. P. 86–98.
7. Backman J., Jakobsson M., Lovlie R. *et al.* Is the Central Arctic Ocean a Sediment Starved Basin? // *Quaternary Science Reviews*. 2004. V. 23. P. 1435–1454.
8. Clark D. L. Magnetic Reversals and Sedimentation Rates in the Arctic Ocean // *Geological Society of America Bulletin*. 1970. V. 81. № 10. P. 3129–3124.
9. Gee J. S., Kent D. V. Source of Oceanic Magnetic Anomalies and the Geomagnetic Polarity Timescale // Amsterdam: Elsevier. 2007. In M. Kono (Ed.), *Geomagnetism, Treatise on Geophysics*. V. 5. P. 455–507.
10. Jakobsson M., Lovlie R., Al-Hanbali H. *et al.* Manganese and Color Cycles in Arctic Ocean Sediments Constrain Pleistocene Chronology // *Geology*. 2000. V. 28. P. 23–26.
11. Kirschvink J. L. The Least-squares Line and Plane and the Analysis of Palaeomagnetic Data // *Geophysical Journal International*. 1980. V. 62. P. 699–718.
12. Moran K., Backman J., Brinkhuis H. *et al.* The Cenozoic Palaeoenvironment of the Arctic Ocean // *Nature*. 2006. V. 441. P. 601–606.
13. Polyak L., Bischof J., Ortiz J. D. *et al.* Late Quaternary Stratigraphy and Sedimentation Patterns in the Western Arctic Ocean // *Global and Planetary Change*. 2009. V. 68. P. 5–17.
14. Tauxe L. *Essentials of Paleomagnetism*. University of California, 2010. 489 p.
15. Witte W. K., Kent D. V. Revised Magnetostratigraphies Confirm Low Sedimentation Rates in Arctic Ocean Cores // *Quaternary Research*. 1988. V. 29. P. 43–53.

Рецензент доктор геол.-мин. наук, проф. Ю. И. Кузнецов