

СТРАТИГРАФИЯ

УДК 551.35+551.77

СЕЙСМОСТРАТИГРАФИЯ ВЕРХНЕЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ  
СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО СКЛОНА ПОДНЯТИЯ СЕАРА

(Центральная Атлантика)

Д.Г. Борисов, И.О. Мурдмаа

Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, 117997, Москва, Нахимовский просп., 36, Россия

Статья посвящена интерпретации сейсмоакустических данных сверхвысокого разрешения, полученных в 35-м рейсе НИС «Академик Иоффе» (2011 г.) на поднятии Сеара в Центральной Атлантике с помощью узколучевого параметрического эхолота-профилографа «SES 2000 deep». Результаты сейсмопрофилирования на северо-восточном склоне поднятия были сопоставлены с данными глубоководного бурения (скв. 929А–Е), на основании чего установлена геологическая природа большей части выявленных отражающих границ, проведено детальное сейсмостратиграфическое расчленение верхнечетвертичного осадочного разреза и сделаны выводы о роли гравитационных потоков и придонных течений в осадконакоплении на исследуемом склоне поднятия в ходе последних 1.2 млн лет.

*Сейсмопрофилирование, контуристы, турбидиты, придонные течения, отражающие границы, глубоководное бурение.*

SEISMIC STRATIGRAPHY OF THE UPPER QUATERNARY DEPOSITS  
ON THE NORTHEASTERN SLOPE OF THE CEARÁ RISE (Central Atlantic)

D.G. Borisov and I.O. Murdmaa

This study is focused on interpretation of ultrahigh-resolution seismoacoustic data from the northeastern slope of the Ceará Rise (Central Atlantic) acquired using the *SES 2000 deep* parametric narrow-beam subbottom profiler during cruise 35 of RV *Akademik Ioffe* in 2011. The geologic nature of most of the detected reflectors is constrained by correlation of the results of seismoacoustic profiling with core data of the Ocean Drilling Program (ODP site 929A–E). Detailed seismostratigraphic study of the Upper Quaternary deposits in the study area has implications for better understanding of the role of gravity flows and bottom currents in sedimentation on the NE slope of the rise for the past 1.2 Myr.

*Reflection seismic profiling, contourites, turbidites, bottom currents, reflectors, Ocean Drilling Program*

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач шести научных рейсов НИС «Академик Вавилов» и «Академик Иоффе» (2009—2012 гг.) было выполнение непрерывного высокоразрешающего сейсмопрофилирования для детального сейсмостратиграфического исследования неоген-четвертичного осадочного чехла в глубоководных районах Атлантического океана. Для этих целей маршруты судов проходили через точки скважин Международного проекта глубоководного бурения [Мурдмаа и др., 2012; Левченко, Мурдмаа, 2012, 2013; Левченко, 2014; Левченко и др., 2014]. В 35-м рейсе НИС «Академик Иоффе» (2011 г.) маршрут экспедиции пролегал через точки скважин 929 и 925 на склоне и вершине поднятия Сеара в Центральной Атлантике [Левченко и др., 2014]. Они были пробурены в 1994 г. в рамках 154-го рейса судна «JOIDES Resolution» для изучения истории океанской седиментации региона в кайнозое, в частности циркуляции глубинных и поверхностных вод, обстановок осадконакопления, химического состава воды в Западной Атлантике [Curry et al., 1995]. Бурение предвзяли детальные сейсмические исследования с борта НИС «Maurice Ewing» (рейс Ew9209), выполненные в 1992 г. и включавшие в себя одноканальное сейсмопрофилирование с использованием пневматических пушек (частота сигнала 30 Гц) и сейсмоакустическую съемку с помощью эхолот-профилографа Atlas Hydrosweep (3.5 кГц) [Mountain, Curry, 1995]. Эти работы стали продолжением исследований, начатых в 70-х годах прошлого века в 14-м и 39-м рейсах бурового научного судна «Glomar Challenger» [Hayes et al., 1972; Perch-Nilsen et al., 1977].

© Д.Г. Борисов✉, И.О. Мурдмаа, 2018

✉e-mail: dborisov@ocean.ru

DOI: 10.15372/GiG20180305

На основании результатов сейсмопрофилирования, предшествующего бурению, акустическая структура осадочной толщи поднятия Сеара была разделена на три части [Mountain, Curry, 1995]. Верхняя часть временного сейсмического разреза мощностью до 260 мс (194 м) характеризуется четкой акустической стратификацией с протяженными параллельными отражающими границами. Внутри интервала выделяется 5—8 отражающих границ. Особое внимание среди них уделяется рефлектору с условным названием «красный», который был прослежен почти на всех сейсмических профилях на глубине 100—120 мс (70—85 м ниже поверхности дна). В месте бурения куста скважин 929 ближайшая к поверхности дна отражающая граница находится на глубине около 45 м. Средняя часть сейсмического разреза отделяется от верхней «синим» рефлектором. Волновая картина здесь осложнена бугристым характером отражающих границ, отличающихся прерывистостью и небольшой латеральной протяженностью. Среднюю и нижние части разреза разделяет рефлектор с условным названием «фиолетовый», прослеженный на глубине около 700 мс. Ниже этого рефлектора наблюдаются четкие протяженные параллельные отражающие границы, обликающие неровности базальтового фундамента. Рефлектор «оранжевый», выявленный на глубине 900 м, на отдельных участках профилей проходит очень близко к акустической границе базальтового фундамента, а также маркирует верхнюю границу отложений, заполняющих локальные впадины между выступами фундамента. Предполагается, что «фиолетовый» рефлектор отражает длительный перерыв в осадконакоплении в среднем—позднем эоцене, «синий» рефлектор соответствует перерыву в позднем миоцене, а «красный» рефлектор имеет плейстоценовый возраст [Mountain, Curry, 1995].

Из-за низкого вертикального разрешения полученные данные одноканального сейсмопрофилирования не подходят для детального сейсмостратиграфического расчленения разреза позднечетвертичных отложений поднятия Сеара, а сейсмозаписи профилографа Atlas Hydrosweeper практически не обрабатывались и не публиковались [Mountain, Curry, 1995].

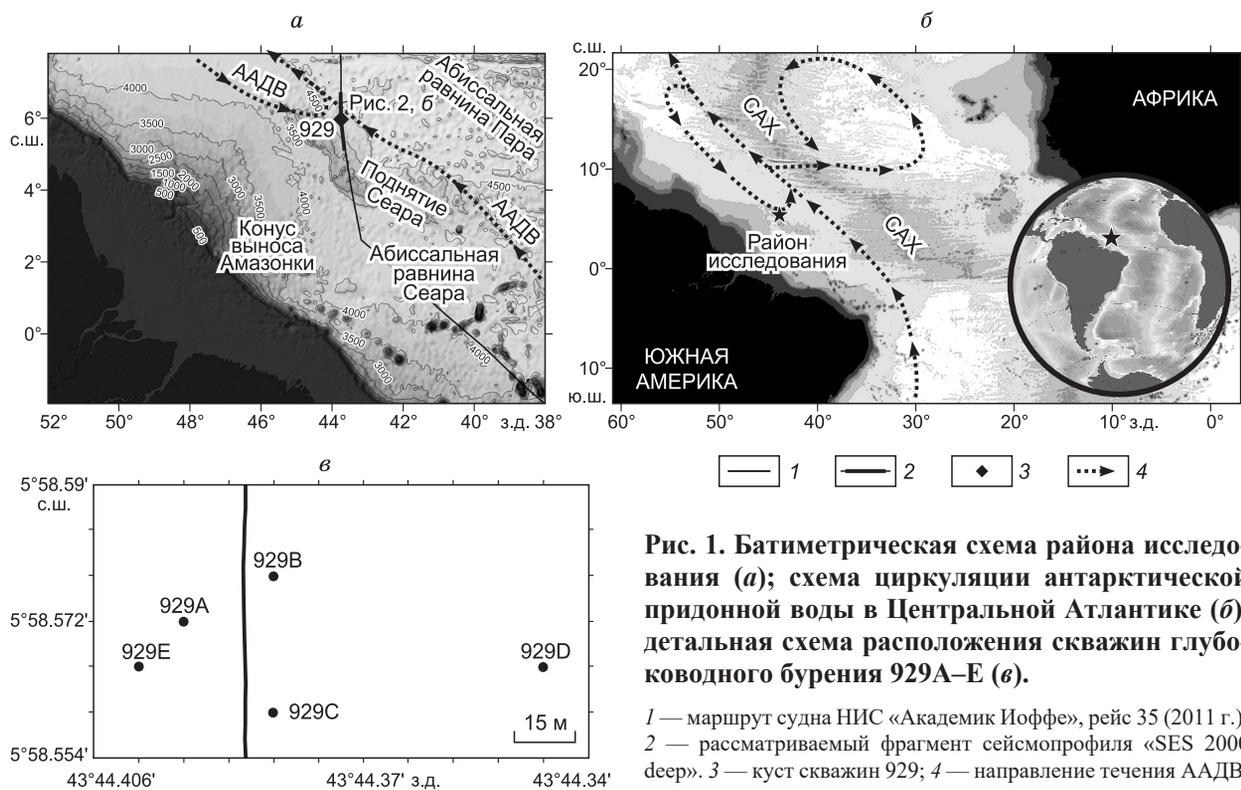
Основная задача данной статьи состояла в сопоставлении сейсмозаписей сверхвысокого разрешения с кернами глубоководного бурения скважин 929А–Е для выявления геологической природы отдельных отражающих границ и выполнения детального сейсмостратиграфического расчленения верхней части разреза четвертичных отложений поднятия Сеара.

#### **ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОДНЯТИЯ СЕАРА, ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ЕГО ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА И ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРИДОННЫХ ВОД**

Поднятие Сеара представляет собой асейсмичный хребет в Центральной Атлантике, образовавшийся около 80 млн лет назад в районе Срединно-Атлантического хребта. Оно простирается более чем на 500 км с северо-запада на юго-восток и превышает 100 км по ширине. В поперечном разрезе поднятие Сеара имеет асимметричный профиль с более крутым юго-западным и пологим северо-восточным склонами, уклоны которых достигают  $5.7^\circ$  и  $1.4^\circ$  соответственно [Perch-Nilsen et al., 1977]. Минимальная глубина воды на поднятии составляет 2600 м, в то время как в прилегающих областях глубина варьирует от 4000 м на абиссальной равнине Сеара до 4600 м на абиссальной равнине Пара (рис. 1, а). На западе к поднятию примыкает конус выноса р. Амазонка, устье которой находится на удалении 800 км от района исследования. Река является главным источником осадочного материала в данном регионе.

Мощность осадков, покрывающих базальтовый фундамент хр. Сеара, превышает 1000 м [Curry et al., 1995]. Пробуренные в районе исследования скважины вскрыли отложения, представленные чередованием глинистых и биогенных карбонатных илов, аргиллитов, известняков и мергелей, возрастом от голоцена до маастрихта [Perch-Nilsen et al., 1977]. Мощность четвертичных отложений составляет примерно 85—100 м [Bickert et al., 1997].

В данной статье рассматривается северо-восточный склон поднятия Сеара в интервале глубин 4100—4600 м. Здесь в точке 929 были пробурены пять скважин (с индексами А–Е) на глубинах 4355.6—4357.6 м, что ниже современного уровня кальцитового лизоклина, который находится на глубине около 4200 м [Curry, Cullen, 1997]. Четвертичные отложения, вскрытые скважинами, имеют мощность около 87 м и представлены биотурбированными глинами с раковинами фораминифер и кокколитами, содержание которых сильно варьирует по разрезу. Это отражается в изменении содержания карбоната кальция в осадках от 0 до 60% [Curry, Cullen, 1997]. В верхних 45 м вскрытого разреза встречаются обогащенные силтом прослой мощностью 1—3 см [Curry et al., 1995]. По результатам первичного изучения осадков в смер-слайдах (мазках) на борту бурового судна были сделаны предварительные выводы о наличии нормальной гранулометрической градации в данных прослоях и выдвинуты предположения о их турбидитной природе [Curry et al., 1995]. Для верхней части четвертичного разреза характерно также наличие обогащенных оксидами железа желтовато-коричневых прослоев мощностью менее сантиметра. Эти прослой приурочены к зонам постепенного изменения цвета осадка [Curry et al., 1995].



**Рис. 1.** Батиметрическая схема района исследования (а); схема циркуляции антарктической придонной воды в Центральной Атлантике (б), детальная схема расположения скважин глубоководного бурения 929А–Е (в).

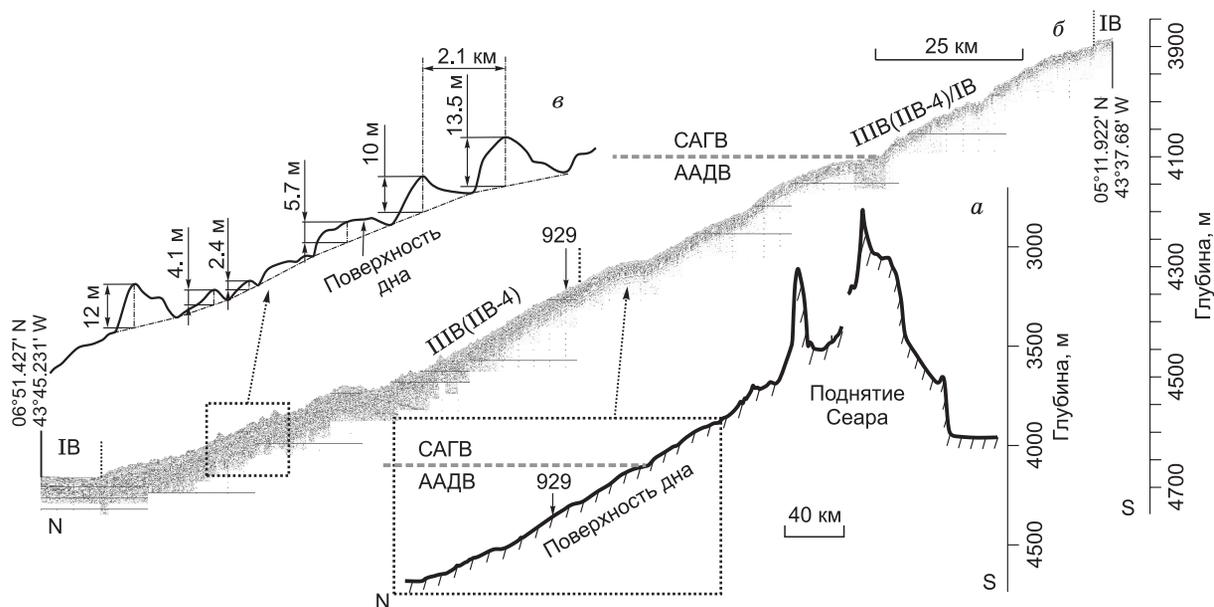
1 — маршрут судна НИС «Академик Иоффе», рейс 35 (2011 г.); 2 — рассматриваемый фрагмент сейсмопрофиля «SES 2000 deep». 3 — куст скважин 929; 4 — направление течения ААДВ.

Придонная циркуляция в рассматриваемом районе Центральной Атлантики контролируется главным образом антарктической придонной и североатлантической глубинной водами (ААДВ и САГВ соответственно), для выделения которых использовалась классификация, приведенная в работе [Rhein et al., 1995]. Согласно этой классификации, граница между САГВ и более холодной и тяжелой ААДВ соответствует изоповерхностям потенциальной плотности  $\sigma_t = 45.90 \text{ кг/м}^3$  и потенциальной температуры  $\theta = 1.8 \text{ }^\circ\text{C}$ . В районе поднятия Сеара эта граница находится на глубине около 4100 м. Выше этой границы поднятие омывается течением САГВ, движущимся в генеральном направлении на юг [Mauritzen et al., 2002]. Придонное течение ААДВ движется вдоль восточного склона поднятия на северо-запад, формируя систему циклонических круговоротов. Один круговорот, вытянутый вдоль Срединно-Атлантического хребта, охватывает северную часть поднятия (см. рис. 1, б).

Современная скорость течения ААДВ характеризуется низкими значениями и не превышает  $10 \text{ см/с}$  [Whitehead, Worthington, 1982; Hall et al., 1997]. Однако в ходе предыдущих исследований на сейсмозаписях и в колонках донных осадков, полученных на северо-восточном склоне поднятия и абиссальной равнины Пары, были обнаружены литологические и сейсмические признаки эрозионно-аккумулятивной деятельности придонных течений, указывающие на более высокую интенсивность потоков придонных вод в геологическом прошлом. Например, на северо-восточном склоне поднятия Сеара в интервале глубин 4480—4590 м на сейсмозаписях запечатлены многочисленные пересекающиеся дифракционные гиперболы, которые предположительно соответствуют промоинам, выработанным придонными течениями [Kumar, Embley, 1977; Mountain, Curry, 1995]. По предварительным оценкам, они вытянуты в направлении с севера на юг, т.е. под небольшим углом к направлению течения ААДВ. Сходные формы были выявлены и на глубинах 3250—3500 м, находящихся под контролем САГВ [Mountain, Curry, 1995]. Масштаб промоин на данный момент нельзя оценить точно [Kumar, Embley, 1977; Mountain, Curry, 1995]. Обычно для подобных форм рельефа характерны протяженность до нескольких километров, ширина в несколько десятков метров и глубина не более метра [Rebesco et al., 2014].

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу исследования легли сейсмоакустические данные, полученные в 35-м рейсе НИС «Академик Иоффе» (2011 г.) с помощью узколучевого параметрического эхолота-профилографа «SES 2000 deep» (вторичная частота 5 кГц). Профилирование осуществлялось при скорости судна 9 узлов. Глубина проникновения акустического сигнала под поверхность дна достигала 50 м, при этом разрешающая способность составила 0.4—0.5 м.



**Рис. 2. Батиметрический профиль вдоль маршрута судна НИС «Академик Иоффе» (2011) через поднятие Сеара (а); фрагмент сейсмопрофиля «SES 2000 deer» на северо-восточном склоне поднятия Сеара (б); схема измерения размеров осадочных волн (в).**

а: указана условная граница между ААДВ и САГВ; б: пунктирными вертикальными линиями обозначены приблизительные границы между сейсмофазиями; вертикальной стрелкой показана точка 929 глубоководного бурения.

Анализ сейсмических данных сводился к выделению основных типов сейсмофаций, изучению их характеристик и определению областей их распространения. Понятие «сейсмофация» увязывает между собой особенности волновой картины на сейсмических разрезах с литологическими и физическими параметрами изучаемых осадочных толщ. Разные типы сейсмофаций (т.е. акустических образов донных отложений) отличаются конфигурацией отражающих границ, их частотными и амплитудными характеристиками.

Выделение основных типов сейсмофаций на полученных сейсмозаписях проводилось на основе классификации сейсмофаций, представленной для юго-западной и Экваториальной Атлантики в работах [Damuth, 1975; Damuth, Hayes, 1977] и адаптированной для сейсмограмм, полученных на профилографе «SES 2000 deer». Адаптация этой классификации базируется на сравнении данных «SES 2000 deer», полученных в пяти рейсах НИС «Академик Иоффе» (2010–2013 гг.) в Западной Атлантике с картой распределения сейсмофаций в работах [Damuth, 1975; Damuth, Hayes, 1977; Левченко, Мурдмаа, 2012, 2013; Левченко, 2014; Левченко и др., 2014].

Оценка высоты и длины волнообразных осадочных тел на склоне поднятия Сеара по сейсмическим данным проводилась методом, проиллюстрированным на рис. 2, в.

Обработка сейсмических данных проводилась с помощью программного обеспечения Interactive Sediment Layer Editor (ISE).

Сейсмопрофиль пересекает поднятие с севера на юг и прошел через точки бурения скважин 929А–Е. На детальном плане, представленном на рис. 1, в, показано положение скважин и маршрут судна. Поскольку для профилографа «SES 2000 deer» диаметр акустического пятна на поверхности дна составляет около 5% от глубины океана в точке расположения судна (т.е. около 200 м для района исследования), а расстояние от скважин до линии маршрута судна не превышает 100 м, то можно утверждать, что сигнал профилографа охватил все пять скважин одновременно.

Геологическая интерпретация сейсмических данных строилась на сопоставлении значений амплитуды отраженного сигнала профилографа «SES 2000 deer» со сводным геологическим разрезом скважин 929А–Е и данными о плотности осадка. Значения амплитуды отраженного сигнала «SES 2000 deer» по глубине сейсмического разреза были получены в точке с координатами, примерно соответствующими скв. 929А. Для более точного сопоставления с литологическими данными глубина выделенных акустических границ была скорректирована на основании результатов измерения скорости звука в осадках скв. 929А. Разница глубины устья скважины и показаний профилографа в этой точке (4357.6 и 4342 м соответственно) объясняется погрешностью измерения, которая для «SES 2000 deer» составляет менее 0.5 % от глубины океана над точкой, т.е. около 20 м.

Для данной работы из отчета проекта глубоководного бурения скважин 929А–Е были взяты данные о плотности донных осадков и осадочных пород, их вещественном составе, содержании карбоната кальция и скорости распространения звука [Curry et al., 1995; Curry, Cullen, 1997]. Данные о плотности осадка и осадочных пород были получены измерением затухания проходящего через осадок гамма-излучения с помощью прибора GRAPE (gamma-ray attenuation porosity evaluator), установленного на научном буровом судне «JOIDES Resolution», сразу после поднятия керна на борт.

В отчете глубоководного бурения приведен сводный геологический разрез, составленный на основании результатов бурения скважин 929А–Е [Curry et al., 1995]. Для представления данных о составе, возрасте, физических и химических свойствах осадка и осадочных пород, вскрытых каждой из пяти скважин куста, в отчете бурения и в данной статье используется шкала глубины по сводному геологическому разрезу (composite depth scale). Применение такой шкалы необходимо для точной корреляции между скважинами одного куста. Данный подход позволяет учесть растяжение керна относительно интервала опробования за счет расширения газов в осадке при отсутствии гидростатического давления, потерю части керна на стыках между секциями (даже при стопроцентном выходе керна), ошибки измерения глубины отбора керна *in situ* из-за вертикального смещения судна при волнении и приливах [Ruddiman et al., 1987; Hagelberg et al., 1992]. Для каждой скважины в отчете глубоководного бурения даны поправки к глубине по проходке, необходимые для расчета глубины по сводному разрезу [Curry et al., 1995].

Возрастная модель для сводного геологического разреза скважин 929А–Е взята из статьи [Bickert et al., 1997]. Возрастные границы изотопно-кислородных стадий (ИКС) получены из работы [Lisiecki, Raymo, 2005].

В качестве батиметрической основы для исследования была выбрана глобальная модель рельефа поверхности Земли ETOPO1 с разрешением 1 мин [Amante, Eakins, 2009].

## РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМОПРОФИЛИРОВАНИЯ

Волновая картина на северо-восточном склоне поднятия Сеара меняется с глубиной (см. рис. 2). К основанию склона прилегают сейсмофации абиссальной равнины Пара с ровными параллельными протяженными отражающими границами. Этот тип сейсмофаций соответствует типу IV по классификации [Damuth, 1975; Damuth, Hayes, 1977]. При приближении к склону поднятия Сеара глубина проникновения акустического сигнала ниже поверхности дна постепенно увеличивается по профилю от 30 до 50 м. Выше глубины 4680 м акустические границы приобретают волнообразный характер. Высота волн не превышает 15 м, и для большинства из них составляет 5 м. Расстояние между их вершинами вдоль профиля изменяется от 500 до 2100 м. Отмечается миграция вершин большей части волн вверх по склону. В акустическом разрезе обнаруживается чередование высокоамплитудных протяженных рефлекторов и менее интенсивных, прерывистых отражающих границ. Эти сейсмофации относятся к типу ПВ-4 (по [Damuth, 1975]) или ШВ (по [Damuth, Hayes, 1977]) и прослеживаются до глубины 4330 м. Выше по склону, вплоть до отметки 3900 м, выявлено чередование двух типов сейсмофаций с постепенным уменьшением глубины проникновения акустического сигнала в донные отложения с 50 до 25 м.

Куст скважин 929 приходится на область распространения сейсмофаций типа ПВ-4 (ШВ). В акустическом разрезе здесь выделяются 27 отражающих границ (не считая рефлектора соответствующего поверхности дна), находящихся в интервале глубин от 2 до 40 м ниже. Наиболее близкие к поверхности рефлекторы 1—4 достоверно прослежены по профилю на расстояние около 70 км. Более глубокие отражающие границы прослеживаются на 30—50 км. Продлению выделенных акустических границ вверх по склону препятствует значительное снижение глубины проникновения акустического сигнала и изменение характера рефлекторов (прерывистость, низкая амплитуда отражения). Вниз по склону возможность их достоверного прослеживания ограничивается сильными ундуляциями рефлекторов, создающими сложную волновую картину с пересекающимися дифракционными гиперболами.

Некоторые рефлекторы были объединены в группы (6а-в и 8а-в), поскольку на отдельных участках профиля сливаются в единую границу и становятся неразличимыми.

## ОБСУЖДЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ СЕЙСМОПРОФИЛИРОВАНИЯ С ЛИТОЛОГИЧЕСКИМИ И ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИМИ ДАННЫМИ

На северо-восточном склоне поднятия сейсмопрофиль «SES 2000 deer», вероятнее всего, пересекает эрозионно-аккумулятивные формы рельефа, образованные под действием придонных течений и упомянутые в работе [Mountain, Curry, 1995]. Эти формы относятся к области распространения сейсмофаций ШВ, которые в большинстве случаев соответствуют осадкам, отложенным под действием придонных течений [Damuth, Hayes, 1977]. Волнообразные осадочные тела, характерные для этого типа сейсмофаций, наиболее выражены в интервале глубин 4450—4680 м, где значения скорости течения, по-видимому, были наиболее высокими. Этот интервал глубины, очевидно, соответствовал положению ядра потока ААДВ.

Уменьшение глубины проникновения акустического сигнала в осадки вверх по склону связано с постепенным удалением от отметки компенсационной глубины карбоната накопления и повышением содержания карбоната кальция в донных осадках.

Сопоставление высокоразрешающих сейсмоакустических данных со сводным геологическим разрезом скважин, а также данными о плотности и карбонатности донных осадков позволило установить геологическую природу большей части выделенных акустических границ и примерно оценить возраст, которому эти границы соответствуют. Выделенные рефлекторы можно разделить на четыре группы. К первой группе относятся отражающие границы, соответствующие условным турбидитам (прослоям, обогащенным сiltом и песком, мощностью 1—3 см с предполагаемой нормальной гранулометрической градацией). На сейсмозаписи они представляют собой четкие, протяженные, параллельные рефлекторы с относительно высокой амплитудой отражения, которые соответствуют острым пикам на графиках плотности влажного осадка (рефлекторы 1, 2, 5, 7, 8а, 9, 11, 13—16, 18, 21 на рис. 3, 4). В большинстве случаев эти прослои приходятся на интервалы глинистых осадков с низким содержанием карбоната кальция, которые соответствуют периодам оледенений (изотопно-кислородные стадии 2—4, 6, 8, 10 и далее четные стадии) или интервалам перехода от межледниковий к оледенениям.

Ко второй группе относятся акустические границы, соответствующие уплотненным желтовато-коричневым прослоям, которые обогащены оксидами железа и почти не отличаются по гранулометрии от вмещающих тонкозернистых осадков (см. на рис. 3, 4, рефлекторы 4, 6б, 8в, 12). В частности, к ним относятся и так называемые железистые хардграунды. Они соответствуют захороненным границам между поверхностным окисленным и восстановленным слоями осадков и являются результатом окислительно-восстановительных процессов диагенеза осадков и маркируют замедление скорости осадконакопления [Волков, 1979]. Большинство этих прослоев относится к интервалам, возраст которых соответствует межледниковьям или периодам перехода к оледенениям. В третью группу входят рефлекторы 2, 3, 6в, 10, 19, 20, 22, которые одновременно обусловлены наличием уплотненного железистого прослоя и резким изменением содержания карбоната кальция в осадках. В этих случаях интервалы пиковых значений содержания карбоната кальция и хардграунды удалены друг от друга менее чем на 0.5 м по разрезу, и разрешающей способности профилографа «SES 2000 deer» недостаточно, чтобы их различить. Карбонатность в значительной степени влияет на акустические свойства осадка и является важным фактором, который необходимо учитывать при интерпретации сейсмических данных [Curry et al., 1995]

К четвертой группе отнесены рефлекторы, обусловленные резкими изменениями содержания карбоната кальция в осадках (см. 6а, 8б, 17 на рис. 3, 4).

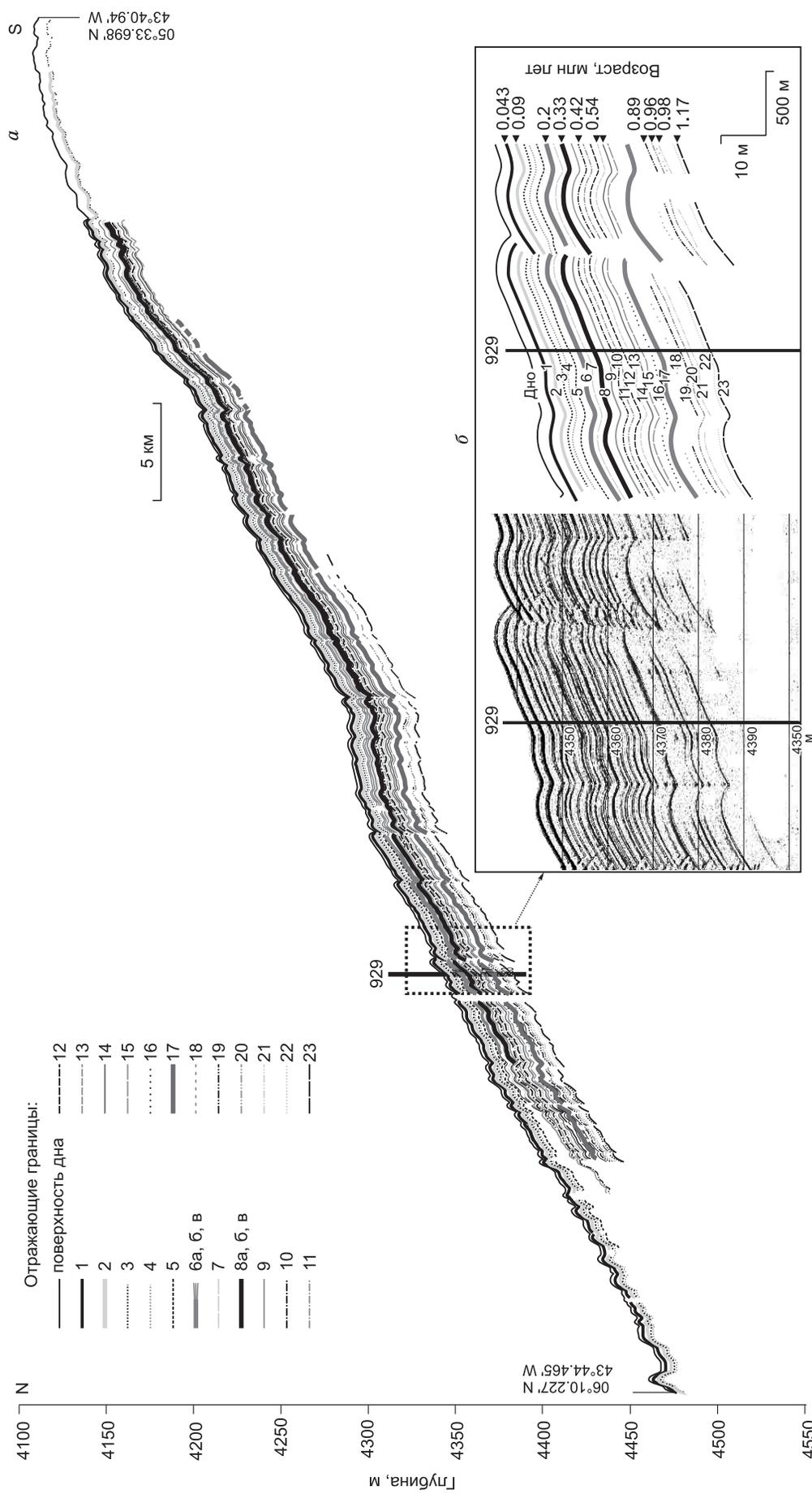
Таким образом, сейсмоакустический разрез охватил отложения возрастом от 0 до 1.2 млн лет.

Изменения скорости осадконакопления, обусловившее формирование уплотненных прослоев, обогащенных оксидами железа, вероятнее всего, связано преимущественно с вариациями интенсивности поступления осадочного материала из Амазонки. За счет более активной эрозии в пределах водосборного бассейна реки и понижения уровня океана во время оледенений количество осадочного материала, поступающего из Амазонки в район поднятия Сеара, значительно возрастало. Во время межледниковий наблюдалась обратная картина и скорость осадконакопления падала [Curry, Cullen, 1997].

Высокая скорость накопления осадков во время оледенений провоцировала неустойчивость склона и интенсификацию деятельности гравитационных потоков. Выводы о природе более грубозернистых прослоев, обнаруженных в кернах бурения, сделаны на основе визуального описания осадков и изучения их под микроскопом в смер-слайдах (мазках) на борту бурового судна «JOIDES Resolution» [Curry et al., 1995]. Детальных гранулометрических исследований с использованием анализаторов размерности частиц не проводилось и поэтому о наличии нормальной гранулометрической градации во всех этих прослоях однозначно сказать нельзя. Градационная слоистость также может являться признаком контуритовых циклитов (осадков придонных течений), которые также могут иметь резкий нижний и постепенный верхний контакты [Rebesco et al., 2014].

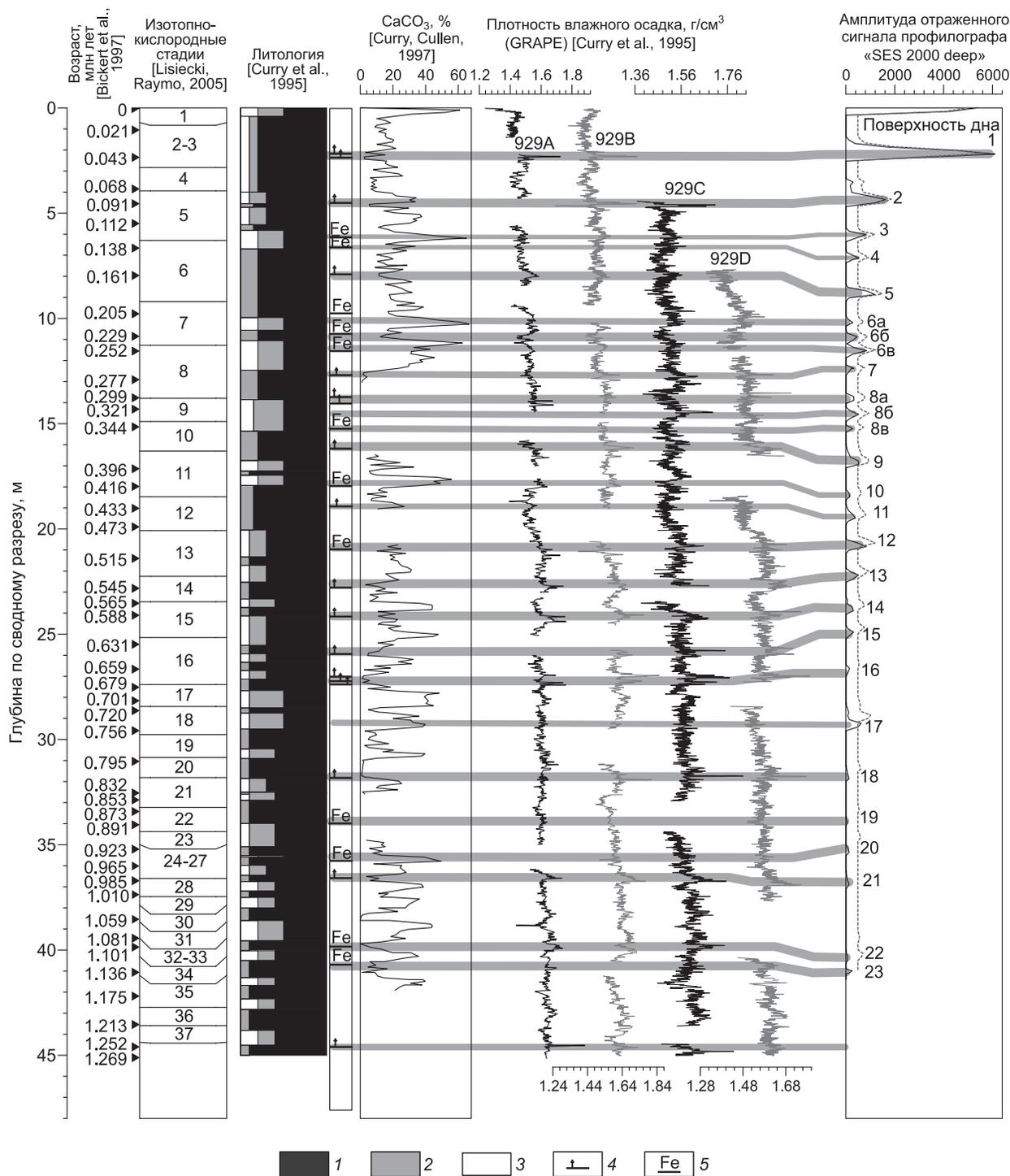
Турбидные потоки с континентального склона едва ли могут быть ответственными за формирование рассматриваемых прослоев, поскольку поднятие Сеара является для них непреодолимым препятствием на пути от бровки шельфа до скв. 929. Гравитационный поток должен обогнуть поднятие с запада и достичь точки скважины, поднимаясь вверх по склону, что представляется маловероятным. Турбидные потоки могли сходить по северо-восточному склону хр. Сеара. В пользу такого предположения могут свидетельствовать отражающие границы, соответствующие более грубозернистым прослоям. Эти рефлекторы прослеживаются вверх по склону на десятки километров в интервале глубин 4500—4100 м.

Значительную роль в позднечетвертичном осадконакоплении в районе исследования могли играть придонные течения, которые в периоды интенсификации активно взмучивают, транспортируют и перелопачивают принесенный гравитационными потоками материал. В области распространения сейсмофаций ШВ, которые, согласно [Damuth, Hayes, 1977], отражают результаты деятельности придонных течений,



**Рис. 3. Интерпретация фрагмента сейсмопрофиля «SES 2000 deep» на северо-восточном склоне поднятия Сеара (а), увеличенный фрагмент сейсмопрофиля в районе проведения буровых работ [Curry et al., 1995] (б).**

1—23 — номера отражающих границ, приведен возраст отложений, которым соответствуют акустические границы, по [Bickert et al., 1997].



**Рис. 4. Схема сопоставления сейсмоакустических данных «SES 2000 deer» со сводным разрезом скважин и данными о физических свойствах и карбонатности осадка.**

На графике изменений амплитуды сигнала SES пунктирной линией показаны значения без поправки на изменения скорости звука в донных отложениях, сплошной — с поправкой на эти изменения.

1 — глина, 2 — кокколиты, 3 — раковины и обломки фораминифер, 4 — относительно грубозернистый прослой (турбидит), 5 — железистый хардграунд.

волнообразный характер рефлекторов сохраняется на всю глубину сейсмического разреза. Наблюдается миграция вершин осадочных волн, отсутствуют признаки выполаживания акустических границ. Этот факт может указывать на значительное влияние придонных течений на осадконакопление в районе исследования в течение последних 1.2 млн лет.

Некоторые авторы полагают, что скорость придонных течений ААДВ в Атлантическом океане возрастала во время переходов от межледниковий к оледенениям [Ledbetter, 1986; Masse et al., 1994]. В таком случае силтовые прослои, соответствующие рефлекторам 8а, 9, 16, 18, 21, могут быть переотложены придонными течениями. Другая точка зрения о том, что максимальная скорость придонного течения ААДВ имела место во время межледниковий, отстаивается в статьях [Ledbetter, 1984; Pudsey, Howe, 1998]. Если следовать этому предположению, интенсификация придонных течений могла приводить к эрозии и неотложению осадка, снижению скорости осадконакопления и формированию железистых хардграундов. В настоящее время вопрос о влиянии флуктуаций скорости придонных течений на осадконакопления в пределах двадцати- и сорокатысячелетних климатических циклов остается предметом для дискуссий [Faugeres et al., 1999; Lima et al., 2009].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов проведено детальное сейсмостратиграфическое расчленение разреза верхнечетвертичных отложений северо-восточного склона поднятия Сеара в интервале глубин 4100—4500 м. Сейсмоакустический разрез охватил отложения возрастом от 0 до 1.2 млн лет.

Сопоставление сейсмоакустических данных сверхвысокого разрешения с результатами глубоководного бурения на поднятии Сеара позволило установить, что отражающие границы создают вариациями плотности осадка, обусловленными наличием прослоев силта (с примесью песка) и железистых хардграундов, а также вариациями содержания карбоната кальция в осадках. Придонные течения антарктической воды, предположительно, оказывали существенное влияние на позднечетвертичное осадконакопление в районе исследования и могли способствовать формированию грубозернистых прослоев и хардграундов.

Авторы выражают благодарность научному составу и экипажу 35-го рейса НИС «Академик Иоффе» за помощь в выполнении сейсмопрофилирования, а также рецензенту за ценные замечания и комментарии, которые помогли значительно улучшить статью.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-60111 мол\_а\_дк.

## ЛИТЕРАТУРА

**Волков И.И.** Окислительно-восстановительные процессы диагенеза осадков. Океанология. Химия океана. Т. 2. Геохимия донных осадков М., Наука, 1979, с. 363—413.

**Левченко О.В.** Непрерывное высокоразрешающее сейсмопрофилирование вдоль трансатлантического разреза Роттердам (Голландия)-Монтевидео (Уругвай) (40-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Иоффе») // Океанология, 2014, т. 54, № 2, с. 286—288.

**Левченко О.В., Мурдмаа И.О.** Стратегия системных исследований структуры донных осадков вдоль трансатлантических геотраверзов (32-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Иоффе», осень 2010 г., Калининград Ушуая) // Океанология, 2012, т. 53, № 1, с. 139—144.

**Левченко О.В., Мурдмаа И.О.** Комплексные исследования вдоль трансатлантического разреза Ушуая (Аргентина) — пролив Ла-Манш, 33-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Иоффе» // Океанология, 2013, т. 53, № 3, с. 425—427.

**Левченко О.В., Мурдмаа И.О., Иванова Е.В., Мутовкин А.Д., Блинова Е.В., Борисов Д.Г., Дремучев С.А., Исаченко С.М., Константинова Н.П., Лапидус Л.В., Маринова Ю.Г., Фирстова А.В., Францева Т.Н., Юсис В.В.** Новые результаты сейсмофацциального анализа четвертичных отложений Западной Атлантики // ДАН, 2014, т. 458, № 4, с. 480—485.

**Мурдмаа И.О., Левченко О.В., Маринова Ю.Г.** О четвертичных сейсмофациях континентально-го подножия Атлантического океана // Литология и полезные ископаемые, 2012, №5, с. 427—450.

**Amante C., Eakins W.W.** ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: procedures, data sources and analysis // NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA, 2009.

**Bickert T., Curry W.B., Wefer G.** Late Pliocene to Holocene (2.6-0 Ma) Western Equatorial Atlantic deep-water circulation: inferences from benthic stable isotopes / Eds. N.J. Shackleton, W.B. Curry, C. Richter, T.J. Bralower // Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 1997, v. 154, p. 239—254.

**Curry W.B., Cullen J.L.** Carbonate production and dissolution in the Western Equatorial Atlantic during the last 1 m.y. / Eds. N.J. Shackleton, W.B. Curry, C. Richter, T.J. Bralower // Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 1997, v. 154, p. 189—199.

**Curry W.B., Shackleton N.J., Richter C., Backman J.E., Bassinot F., Bickert T., Chaisson W.P., Cullen J.L., deMenocal P., McCullough Dobson D., Ewert L., Grutzner J., Hagelberg T.K., Hampt G., Harris S.E., Herbert T.D., Moran K., Murayama M., Murray D.W., Pearson P.N., Raffi I., Schneider D.A.,**

**Tiedemann R., Valet J.-P., Weedon G.P., Yasuda H., Zachos J.C.** Proceedings ODP, Initial Reports, 1995, v. 154, p. 1111.

**Damuth J.E.** Echo character of the western equatorial Atlantic floor and its relationship to the dispersal and distribution of terrigenous sediments // *Mar. Geol.*, 1975, v. 18, p. 17—45.

**Damuth J.E., Hayes D.E.** Echo character of the East Brazilian continental margin and its relationship to sedimentary processes // *Mar. Geol.*, 1977, v. 24, p. 73—95.

**Faugères J.C., Stow D.A.V., Imbert P., Viana A.R.** Seismic features diagnostic of contourite drifts // *Mar. Geol.*, 1999, v. 162, p. 1—38.

**Rudimann W.F., Cameron D., Clement B.M.** Sediment disturbance and correlation of offset holes drilled with the hydraulic piston corer: Leg 94 // Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 94, 1987, p. 615—634.

**Hall M.M., McCartney M., Whitehead J.A.** Antarctic bottom water flux in the equatorial Western Atlantic // *J. Phys. Oceanogr.*, 1997, v. 27, p. 1903—1926.

**Hayes D.E., Pimm A.C., Beckmann J.P., Benson W.E., Berger W.H., Roth P.H., Supko P.R., U. von Rad.** Site 142 // Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 14, 1972, p. 249—282.

**Kumar N., Embley R.W.** Evolution and origin of Ceara Rise: an aseismic rise in the western equatorial Atlantic // *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1977, v. 88, p. 683—694.

**Ledbetter M.T.** Bottom-current speed in the Vema Channel recorded by particle size of sediment fine-fraction // *Mar. Geol.*, 1984, v. 58, p. 137—149.

**Ledbetter M.T.** Bottom-current pathways in the Argentine Basin revealed by mean silt particle size // *Nature*, 1986, v. 321, № 6068, p. 423—425.

**Lima A.F., Faugeres J.-C., Mahiques M.** The Oligocene—Neogene deep-sea Columbia Channel system in the South Brazilian Basin: Seismic stratigraphy and environmental changes // *Mar. Geol.*, 2009, v. 266, p. 18—41.

**Lisiecki L.E., Raymo M.E.** A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records // *Paleoceanography*, 2005, v. 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.

**Masse L., Faugeres J.C., Bernat M., Pujos A., Mezerais M.L.** A 600,000-year record of Antarctic bottom water activity inferred from sediment textures and structures in a sediment core from the Southern Brazil Basin // *Paleoceanography*, 1994, v. 9, № 6, p. 1017—1026.

**Mauritzen C., Polzin K.L., McCartney M.S., Millard R. C., West-Mack D.E.** Evidence in hydrography and density fine structure for enhanced vertical mixing over the Mid-Atlantic Ridge in the western Atlantic // *J. Geophys. Res.*, 2002, v. 107, № C10, 3147.

**Mountain G.S., Curry W.B.** Cruise Ew9209: site survey for Leg 154 / Curry W.B., Shackleton N.J., Richter C. // *Proc. ODP, Initial Reports.*, 154: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1995, p. 39—52.

**Perch-Nielsen, K., Supko P.R., Boersma A., Bonatti E., Carlson R.L., McCoy F., Neprochnov Y.P., Zimmerman H.B.** Site 354: Ceara Rise // Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 39, 1977, p. 45—99.

**Hagelberg T., Shackleton N.J., Pisias N.** Shipboard Scientific Party. Development of composite depth section for sites 844 through 854 // *Proc. ODP, Initial Reports*, 1992, v. 138, part 1, p. 79—85.

**Pudsey C.J., Howe J.A.** Quaternary history of the Antarctic Circumpolar Current: evidence from the Scotia Sea // *Mar. Geol.*, 1998, v. 148, p. 83—112.

**Rebesco M., Hernandez-Molina F.J., Van Rooij D., Wåhlin A.** Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations // *Mar. Geol.*, 2014, v. 352, p. 111—154.

**Rhein M., Stramma L., Send U.** The Atlantic Deep Western Boundary Current: Water masses and transports near the equator // *J. Geophys. Res.*, 1995, v. 100, p. 2441—2457.

**Whitehead J.A., Worthington L.V.** The flux and mixing rates of Antarctic bottom water within the North Atlantic // *J. Geophys. Res.*, 1982, v. 87, № C10, p. 7903—7924.

*Рекомендована к печати 17 августа 2017 г.  
Н.Л. Добрецовым*

*Поступила в редакцию 21 декабря 2016 г.,  
после доработки — 27 июля 2017 г.*