

КОНТУРИТОВЫЕ СИСТЕМЫ НА КОНТИНЕНТАЛЬНОМ ПОДНОЖИИ БРАЗИЛИИ (ЮЖНАЯ АТЛАНТИКА)

Борисов Д.Г.¹, Мурдмаа И.О.¹, Иванова Е.В.¹, Левченко О.В.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия (117997, г. Москва, Нахимовский проспект, 36), e-mail: dborisov@ocean.ru

Придонные (контурные) течения, движущиеся преимущественно вдоль континентального склона, играют значительную роль в осадконакоплении на континентальных окраинах. Под действием придонных течений формируются как аккумулятивные тела (контуритовые дрефты), так и различные эрозионные формы (каналы, террасы). Анализ сейсмоакустических профилей сверхвысокого разрешения и колонок донных осадков, полученных в 33, 35 и 37-м рейсе НИС «Академик Иоффе» на континентальном подножии Бразилии, позволил установить, что поле волнообразных аккумулятивных тел (осадочных волн), покрывающих поверхность двух крупных контуритовых дрефтов, имеет явные признаки захоронения в своей северной части. Контуритовые дрефты и осадочные волны в районе исследования сформировались под действием придонного течения антарктических вод. Однако смена режима придонной циркуляции привела к значительным изменениям условий осадконакопления и постепенному захоронению системы аккумулятивных тел контуритов.

Ключевые слова: контурит, дрефт, глубоководный канал, придонное течение, сейсмопрофилирование сверхвысокого разрешения, континентальное подножие, Аргентинская котловина.

CONTOURITE SYSTEMS OF THE BRAZIL CONTINENTAL RISE (SOUTH ATLANTIC)

Borisov D.G.¹, Murdmaa I.O.¹, Ivanova E.V.¹, Levchenko O.V.¹

¹P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia (117997, Moscow, Nakhimovsky prospect, 36), e-mail: dborisov@ocean.ru

Along-slope bottom (contour) currents play an important role in sedimentation at oceanic margins. A wide range of sediment bodies (contourite drifts) and erosional features (channels, moats, terraces) are formed under the influence of bottom currents. Analysis of the very high resolution seismic profiles and sediment cores obtained on the Brazil continental rise during the 33rd, 35th and 37th cruises of the RV “Akademik Ioffe” revealed buried wave-like depositional bodies (sediment waves) in the northern part of the waves field that covers two huge contourite drifts. The drifts and sediment waves are considered to be formed by the bottom current of the Antarctic waters. Significant changes in the bottom circulation and corresponding sedimentation mechanisms resulted in gradual burial of the revealed contourite depositional system.

Keywords: contourite, drift, deep-sea channel, bottom current, very high resolution seismic profiling, continental rise, Argentine Basin.

Введение

Согласно современному определению, контуритами называют осадки, отложенные или переотложенные под действием придонных (в том числе контурных) течений [9]. Придонные течения, играющие важную роль в осадконакоплении на континентальных окраинах [6], имеют квазистационарный характер. Они демонстрируют значительную изменчивость скорости и направления движения в масштабах времени от часов до месяцев (сезонов) и сохраняют относительное постоянство в масштабах десятилетий и тысяч лет [9]. Возможность течений донных вод образовывать аккумулятивные и эрозионные формы подтверждена в ходе многочисленных исследований [например, 6; 9; 10]. Осадочные тела контуритов, получившие название «дрифты», имеют различную геометрию и размеры. Они могут достигать сотен километров по протяженности, десятков километров в ширину и сотен

метров в высоту [9]. Поверхность крупных дрейфов может быть покрыта сериями волнообразных осадочных тел аккумулятивного генезиса – осадочными волнами, площади распространения которых называются полями осадочных волн [3]. Обширные поля осадочных волн обнаружены в центральной и южной части Аргентинской котловины, где они приурочены к гигантским контуритовым дрейфам [5]. Формирование крупных дрейфов под действием придонных течений происходит в течение сотен тысяч и миллионов лет [6]. При этом происходящие палеоокеанологические и палеоклиматические изменения отражаются в осадочной структуре дрейфов, что дает основание считать данные тела природными архивами информации об изменениях климата и вариациях придонной циркуляции [9]. Контуритовые дрейфы являются также объектом интереса нефтегазовых компаний как перспективные структуры для поиска месторождений углеводородов [10].

Цель исследования

Основная цель данной работы состоит в изучении механизмов формирования систем аккумулятивных и эрозионных форм на континентальной окраине Бразилии и Уругвая (Южная Атлантика).

Район исследования

Район исследования расположен на континентальном подножии в северо-западной части Аргентинской котловины и охватывает несколько крупных форм рельефа: эллипсоидное плато Санта Катарина, отделенное от континентального склона глубоководным проходом, котловину Сантус глубиной до 4000 м и южный уступ плато Сан-Паулу относительной высотой до 1500 м [2]. Необходимо отметить, что плато Санта Катарина и котловина Сантус расположены на огромном Нижнем плато Сантус, приподнятом на 600 м относительно абиссальной части Аргентинской котловины. Южнее расположен гигантский контуритовый дрейф из системы дрейфов Юинга [6]. Придонная циркуляция в районе исследования контролируется течением направленных на север нижних циркумполярных вод (НЦПВ) антарктического происхождения [8]. Основным источником осадочного материала в данном районе является залив Ла-Плата [2] (рис. 1А).

Материалы и методы исследования

Материалами для данной работы послужили результаты 33, 35 и 37-го рейсов НИС «Академик Иоффе», в ходе которых ударной грунтовой трубкой отобраны две колонки донных осадков, а с помощью сейсмоакустического профилографа сверхвысокого разрешения «SES 2000 deer» (4-6 кГц) получены три протяженных сейсмопрофиля (рис. 1А). Скорость распространения звука в воде и осадках при интерпретации принята равной 1500 м/с. Литологическое описание колонок осуществлялось на борту судна путем визуальных наблюдений и изучения осадка в сфер-слайдах под поляризационным микроскопом. В сфер-

слайдах приблизительно оценивалось соотношение основных осадкообразующих компонентов: терригенных обломочных и глинистых минералов, фораминифер, диатомовых, кокколитов и др. биогенных остатков. В пилотных пробах, отобранных из всех встреченных в колонке литологических типов осадков и промытых через сито с ячейей 0.1 мм, под бинокулярным микроскопом МБИ-6 определялся видовой состав фауны планктонных фораминифер, индикаторные виды бентосных фораминифер, а также присутствие и относительное обилие других групп микрофоссилий.

Результаты исследования и обсуждение

Сейсмопрофили пересекали серию симметричных волнообразных осадочных тел, частично покрывающих плато Санта Катарина и прослеженных на север до уступа плато Сан-Паулу через всю котловину Сантус. Высота осадочных тел составляет 10–60 м, расстояние между гребнями – от 1.5 до 4 км (рис. 1В). В северо-западном направлении наблюдается уменьшение этих параметров. В северной части котловины Сантус в направлении к плато Сан-Паулу выявлено постепенное заполнение осадочным материалом пространства между волнами, вплоть до полного их захоронения. Отложения, перекрывающие волны, характеризуются более высокой амплитудой отражений (рис. 1Г).

У подножия южных склонов плато Санта Катарина и Нижнего плато Сантус зарегистрированы сейсмофации, характеризующиеся мелкохолмистым рельефом поверхности дна и хаотической внутренней акустической структурой. У подножия Нижнего плато Сантус наблюдается резкий переход от сейсмофации с хаотической структурой к отложениям с четкой акустической стратификацией.

С вершины одной из волн на плато Санта Катарина отобрана колонка АИ-2443 (30°36.2' ю.ш., 44°16.97' з.д., глубина 3410 м) длиной 3.42 м. Колонка вскрыла разрез гемипелагического глинистого неравномерно уплотненного ила, содержащего многочисленные плотные комковатые прослои (хардграунды). Окисленный поверхностный слой хорошо развит и имеет мощность 38 см. В нижней части колонки (213–342 см) осадок диффузно слоистый, биотурбированный. Выделений гидротроилита не обнаружено. Содержание планктонных фораминифер в осадках низкое, их сохранность варьирует по разрезу. В нескольких образцах отмечено сильное растворение их карбонатных раковин (например, 230, 280 и 310 см). Однако хорошая сохранность и большое видовое разнообразие субтропической фауны планктонных фораминифер во многих образцах указывает на незначительное растворение, но сильное разбавление биогенного материала терригенным.

Колонка АИ-2442 (32°41.30' ю.ш., 46°05.60' з.д., глубина 3890 м, длина 4.61 м), полученная у подножия Нижнего плато Сантус, вскрыла отложения с четкой акустической

стратификацией на сейсмопрофиле. Колонка представлена гомогенным глинистым илом практически без примеси обломочных минералов и микрофоссилий. Окисленный слой отсутствует. Осадок содержит черные выделения гидротроилита, неравномерно распределенные по разрезу, свидетельствующие о резко восстановительной среде раннего диагенеза. Осадки в колонке палеонтологически почти «немые», содержат лишь единичные экземпляры раковин планктонных и бентосных фораминифер, радиолярий и остракод (в отдельных пробах). Во многих пробах отмечены обломки раковин фораминифер, указывающие на растворение.

Осадочные волны в данном районе были обнаружены ранее в рейсе M29/2 на НИС «Meteor». В ходе многолучевого эхолотирования установлено, что гребни волн примерно параллельны изобатам [4]. На сейсмоакустическом профиле, полученном в рейсе RC1605 НИС «Robert Conrad» (база данных GeoMapApp, www.geomapapp.org), видно, что осадочные волны покрывают поверхности двух крупных аккумулятивных тел, расположенных на плато Санта-Катарина и у подножия его северного склона. На сейсмопрофиле в структуре осадочного тела на плато Санта-Катарина видны более древние захороненные волны, происхождение которых очевидно не связано с неровностями фундамента (рис. 1Б). Общая геометрия аккумулятивных тел, наличие линзовидных внутренних несогласий и осадочных волн дает основание интерпретировать данные тела как грядоподобные контуритовые дрифты [6]. Происхождение дрифтов, вероятно, связано с деятельностью течения НЦПВ. Скорости придонных течений в открытой части Аргентинской котловины не превышают обычно 10 см/с, однако для формирования подобных аккумулятивных тел скорости течений должны быть в пределах 10–30 см/с [9]. Локальное увеличение скоростей течений происходит за счет огибания такого массивного препятствия, как плато Санта Катарина, и увеличения уклона поверхности, вдоль которой движется поток. В результате возникают локальные максимумы скоростей течения у склонов плато и в структуре потока появляются неоднородности в виде отдельных струй. Плато разбивает течение на несколько ветвей, огибающих его с востока и запада, а также, вероятно, переваливающих через плато. На его относительно пологой вершине скорости потока заметно меньше, чем на более крутых склонах (рис. 1Д). Такая разница приводит к возникновению локальных вихрей над дрейфом и наращиванию аккумулятивного тела в его осевой части за счет осаждения переносимого течением взвешенного осадочного материала. При этом на склонах дрейфта может наблюдаться неотложение осадочного материала и эрозия (рис. 1Е). Следует отметить, что бóльшая ось дрейфта Санта Катарина ориентирована перпендикулярно к континентальному склону, что нетипично для большинства контуритовых дрифтов и связано, скорее всего, с резким изменением направления простирания склона на данном его отрезке [6].

Дрифт в котловине Сантус, вероятно, генетически связан с трансформным разломом Риу-Гранди, субширотно простирающимся вдоль уступа плато Санта Катарина. Сила Кориолиса (F_K) в Южном полушарии отклоняет поток движущихся на север НЦПВ влево по ходу движения, прижимая его к континентальному склону. В результате увеличения скорости потока за счет возрастания уклона поверхности, вдоль которой он движется, и смещения ядра потока в сторону склона возникает разность скоростей у левого и правого бортов канала. За счет экмановского транспорта взвешенный материал, переносимый течением, перемещается в латеральном направлении направо по ходу потока (рис. 1Е). Легко переваливая через борт канала из-за небольшой разницы по плотности с окружающей водой, взвесь осаждается по мере удаления от оси потока и уменьшения его скорости. В результате на левом борту канала доминируют процессы эрозии, а на правом – аккумуляции осадочного материала (т.е. формирования контуритового дрифта). Данная схема хорошо согласуется со схемой, представленной в работе [9]. Геометрия, размеры и положение в плане обнаруженных волнообразных тел свидетельствуют об их контуритовом происхождении [5].

Модели, полностью объясняющей формирование осадочных волн под действием придонных течений, на настоящий момент не существует. Однако в работе [5] предлагается модель, в которой образование осадочных волн связывается с внутренними волнами потока. Подобные волны возникают в результате движения стратифицированного потока над неровностями дна. В районе исследования присутствуют два фактора, необходимые для формирования столь больших осадочных волн: поступление огромного количества терригенного осадочного материала из залива Ла-Плата и наличие системы мощных течений, способных транспортировать и отлагать взвешенный осадочный материал. Первичные неровности дна, послужившие морфологической основой для формирования осадочных волн, вероятно, возникли вследствие локальной эрозии под действием придонного течения НЦПВ, огибающего плато Сан-Паулу. Эрозия в данном случае обусловлена внутренней неоднородностью потока и выделением в нем отдельных струй. Уменьшение высоты осадочных волн в направлении к континентальному склону на плато Санта Катарина предположительно объясняется разностью скоростей течения НЦПВ на востоке и западе плато. Это связано, вероятно, с тем, что под действием силы Кориолиса поток НЦПВ, огибающий плато с востока, прижимается к склону плато, а западный поток к континентальному склону. В результате на востоке плато скорости течения становятся выше. Формирование осадочных волн в котловине Сантус может быть связано, в том числе, и с вихрями, возникающими в латеральных частях восточной и западной ветвей течения НЦПВ [9] (рис. 1Е).

Симметричная форма волн и отсутствие явной миграции их вершин свидетельствует об относительно низких скоростях придонных течений в настоящее время и доминировании процессов аккумуляции осадочного материала («облекание» осадочных волн). Формирование волн подобного размера возможно только при значительных скоростях придонных течений (5-20 см/с). При этом на одном склоне волны преобладает эрозия, а на противоположном – накопление осадочного материала, что приводит к постепенному смещению вершины волны (миграции) [5]. Наличие уплотненных прослоев в колонке АИ-2443 свидетельствует о кратковременных перерывах в осадконакоплении, связанных, вероятнее всего, с интенсификацией придонных течений. Захоронение поля осадочных волн в северной части котловины Сантус предположительно вызвано значительным изменением режима придонной циркуляции в районе исследования и снижением скоростей придонных течений, способных лишь отлагать транспортируемый материал. Однако нельзя исключать и влияния гравитационных потоков с плато Сан-Паулу на процесс захоронения волн. Вероятно, высокие скорости осадконакопления в районе исследований обусловили нестабильность склонов и активность гравитационных процессов (оползневые процессы, пастообразные потоки осадочного материала), результаты которой обнаружены у подножия плато Санта Катарина и Нижнем плато Сантус.

Определение возраста данной системы затруднительно. По видовому составу редких целых раковин планктонных фораминифер в колонках АИ-2442 и АИ-2443 можно заключить, что фауна соответствует фораминиферовым стратиграфическим зонам N23 (*Globigerina calida calida*) и N22 (*Globorotalia truncatulinoides*), т.е. отложения сформировались в среднем-позднем плейстоцене, скорее всего, их возраст не превышает 1 млн лет. Верхние 250 см колонки АИ-2442 и верхние 310 см колонки АИ-2443 моложе 450 тыс. лет, судя по присутствию вида *Globorotalia hirsuta* [7]. Наличие розовых раковин *Globigrinoides ruber* в интервале 0-230 см колонки АИ-2443 указывает на возраст не более 280 тыс. лет [1]. Вариации сохранности фауны и состава комплексов, а также отсутствие вида *Globorotalia menardii* и низкое содержание *Globigerinoides sacculifer* в отдельных образцах отражают ледниково-межледниковые и тысячелетние вариации климатических условий.

Заключение

Формирование контуритовых дрифтов и поля осадочных волн в северо-западной части Аргентинской котловины предположительно связано с деятельностью придонного течения нижних циркумполярных вод. Важную роль в образовании данных осадочных тел имеет плато Санта Катарина, как фактор, обуславливающий увеличение скоростей придонных течений. В настоящее время обнаруженная контуритовая система неактивна, здесь

доминируют процессы аккумуляции осадочного материала из залива Ла-Плата, транспортируемого и отлагаемого под действием течения антарктических вод. В результате происходит постепенное захоронение системы.

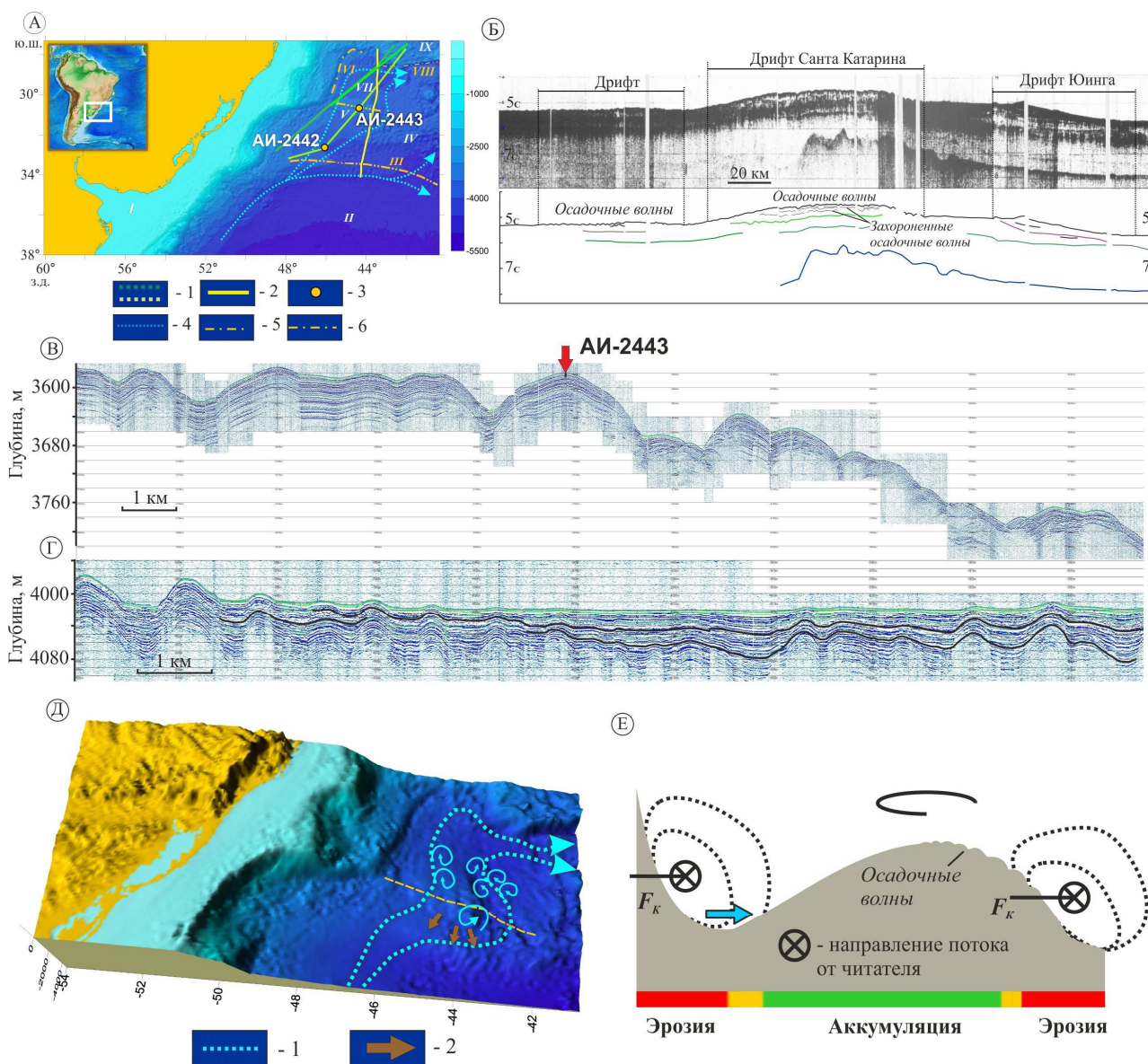


Рис. 1. А – схема рельефа дна района исследования с указанием положения сейсмопрофилей и геологических станций, а также направлений придонных течений антарктических вод: I – залив Ла-Плата, II – Аргентинская котловина, III – система дрейфов Юинга, IV – Нижнее плато Сантус, V – плато Santa Катарина, VI – канал Сан-Паулу, VII – котловина Сантус, VIII – трансформный разлом Риу-Гранди, IX – плато Сан-Паулу; 1 – сейсмопрофили «SES 2000 deer», 2 – сейсмопрофиль, полученный в рейсе RC-1605 НИС «Robert Conrad», 3 – геологическая станция, 4 – направление придонных течений, 5 – оси глубоководных каналов и разломов, 6 – оси контуритовых дрейфов. Б – фрагмент сейсмопрофиля, полученного в рейсе RC-1605 НИС «Robert Conrad», с элементами интерпретации. В – фрагмент сейсмопрофиля «SES 2000 deer», полученный на северном склоне плато Santa Катарина, с

указанием положения геологической станции. Г – фрагмент сейсмопрофиля «SES 2000 deep» с элементами интерпретации. Д – трехмерная схема, демонстрирующая механизм формирования контуритовой системы в районе исследования: 1 – направления придонных течений, 2 – направления гравитационных процессов. Е – схема, отражающая эрозионно-аккумулятивную деятельность придонных течений. Положение батиметрического профиля показано на рис. 1Д. Синяя стрелка указывает направление экмановского транспорта.

Список литературы

1. Бараш М.С. Четвертичная палеоокеанология Атлантического океана. — М. : Наука, 1988. — 272 с.
2. Борисов Д.Г., Мурдмаа И.О., Иванова Е.В., Левченко О.В., Юцис В.В., Францева Т.Н. // Океанология. — 2013. — Т. 53, № 4. — С. 460-471.
3. Пуганс В.А. Осадочные волны: современное состояние знаний // Бюл. Моск. О-ва испытателей природы. Отд. геол. — 2012. — Т. 87, № 1. — С. 25-37.
4. Bleil U. et al. Report and Preliminary Results of METEOR Cruise 29/2, Montevideo - Rio de Janeiro, 15.07.1994 - 08.08.1994 — Berichte, Fachbereich Geowissenschaften. — Universität Bremen, 1994. — N. 59. — PP. 153.
5. Flood R.D., Shor A.N. Mud waves in the Argentine Basin and their relationship to regional bottom circulation patterns // Deep-Sea Research. — 1988. — V. 35, N. 6. — P. 943-971.
6. Hernández-Molina F.J., Llave E., Stow D.A.V. Continental Slope Contourites // Developments in Sedimentology. — 2008. — V. 60. — P. 379-408.
7. Nishi H. Norris R.D., Okada H. Paleooceanographic changes in the dynamics of Subtropical Atlantic surface conditions at hole 997A 1 // Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results. [Eds. Paull C.K. et al.], 2000. — V. 164. — P. 343-363.
8. Reid J.L., Nowlin W.D., Patzert W.C. On the characteristics and circulation of the southwestern Atlantic Ocean // J. Phys. Oceanography. — 1977. — V. 7, № 1. — P. 62-91.
9. Stow D.A.V., Hunter S., Wilkinson D., Hernandez-Molina F.J. // Developments in Sedimentology. — 2008. — V. 60. — P. 143-156.
10. Viana A. R., Almedia W. JR, Nunes M. C. V. et al. The economic importance of contourites. In: [Eds. Viana A. R. & Rebesco M.] Economic and Palaeoceanographic Significance of Contourite Deposits. Geological Society, London, Special Publications. — 2007. — V. 276. — P. 1-24.

Рецензенты:

Никифоров С.Л., д.г.н., зав. лабораторией сейсмостратиграфии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН», г.Москва.

Пересыпкин В.И., д.г.-м.н., зав. лабораторией химии океана, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН», г.Москва.