

УДК 551.35:551.46

КОНТУРИТЫ И ГРАВИТИТЫ НА ВОЗВЫШЕННОСТИ РИУ-ГРАНДИ, ЮГО-ЗАПАДНАЯ АТЛАНТИКА (СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ)

© 2020 г. О. В. Левченко^{a, *}, Д. Г. Борисов^a, Н. В. Либина^a

^aИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Нахимовский просп., 36, Москва, 117997 Россия

*e-mail: olevses@mail.ru

Поступила в редакцию 01.10.2019 г.

После доработки 20.10.2019 г.

Принята к публикации 30.10.2019 г.

Морфология возвышенности Риу-Гранди и акустическая структура разных типов отложений в самой верхней части ее осадочного чехла охарактеризованы по данным высокоразрешающего сейсмоакустического профилирования 32-го (2010) и 52-го (2016) рейсов НИС “Академик Иоффе”. Склоны возвышенности сложены преимущественно оползневыми отложениями и гравититами, но на южном склоне возможно развитие процессов контуритовой седиментации. Контуритовые осадочные волны и, возможно, небольшие дрифты выявлены в троге Крузейру-ду-Сул на вершине возвышенности Риу-Гранди. В основании ее северного и южного склонов, возможно, существуют смешанные гравитито-контуритовые осадочные системы, в формирование которых основной вклад внесли плотностные потоки вниз по склону, а также контурные течения вод антарктического происхождения вдоль него.

Ключевые слова: склон, геострофические течения, контуриты, дрейфт, гравититы.

DOI: 10.31857/S0024497X20030039

Возвышенность Риу-Гранди является одной из основных морфоструктур океанского дна юго-западной Атлантики (рис. 1). Она находится между 28–34° ю.ш. и 28–40° з.д. и разделяет Аргентинскую и Бразильскую котловины, возвышаясь над их дном почти на 4 км и простираясь на ~400 и ~650 км (по изобате 3500 м) в широтном и меридиональном направлениях соответственно [Barker et al., 1983b; Johnson, 1983a]. Возвышенность разделена на два сегмента глубоководной впадиной. Восточный сегмент имеет подковообразную форму, а форма западного сегмента близка к овалу [Gamboa, Rabinowitz, 1984]. С северо-запада на юго-восток возвышенность пересекается трогом Крузейру-ду-Сул (Южный крест), который является грабеном, образованным в результате тектонических процессов в среднем эоцене [Barker et al., 1983b].

На выровненной вершине возвышенности Риу-Гранди этот трог с относительными глубинами до 1400–1600 м обрамляется двумя цепочками гайотов с плоскими вершинами на глубине 560–900 м ниже урвония океана. Северный склон возвышенности Риу-Гранди крутой и сильно расчленен эрозионными каньонами, тогда как южный и западный склоны более пологие. На западе возвышенность Риу-Гранди отделена субмеридио-

нальным глубоким каналом Вима от крупного поднятия – выступа подножия континентального склона. С севера возвышенность ограничена широтной зоной трансформных разломов Риу-Гранди (другое название – разломная зона Флорианополис), которая протягивается примерно вдоль 28.5° ю.ш. Южная граница возвышенности, по видимому, проходит по разлому вдоль 33.5° ю.ш. [Barker et al., 1983b], относящемуся к трансформной разломной зоне Чуи.

Юго-западная Атлантика характеризуется очень динамичным гидрологическим режимом, который создается в результате взаимодействия потоков текущих на север придонных и промежуточных антарктических вод с движущимися навстречу в южном направлении потоками Североатлантических глубинных вод (САГВ) [Reid et al., 1977; Johnson, 1983b; Florindo et al., 2015; Thran et al., 2018]. Хорошо известно, что эти геострофические контурные течения, следующие вдоль изобат и находящиеся в длительном взаимодействии с дном (в масштабах тысяч и миллионов лет), способны эродировать дно, переносить и переотлагать взвешенный осадочный материал [Rebesco et al., 2014; Hernandez-Molina et al., 2015]. При этом создаются как эрозионные (промоины, рвы, каналы, террасы), так и аккумулятивные (ри-

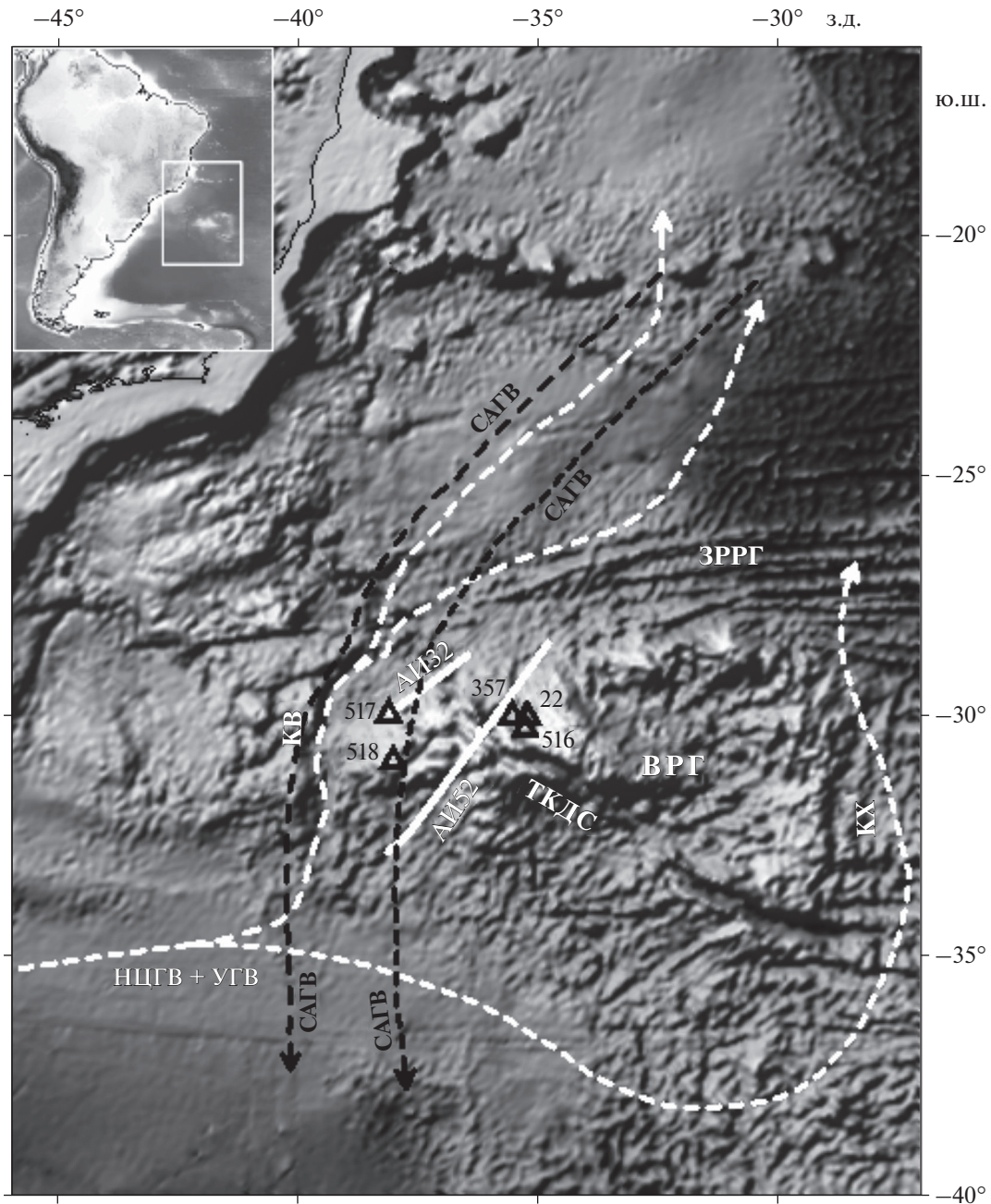


Рис. 1. Карта рельефа дна юго-западной части Атлантического океана в районе возвышенности Риу-Гранди (основа GMRT version 3.6). Положение района исследований показано на врезке.

Структуры дна: ВРГ – возвышенность Риу-Гранди, ЗРРГ – зона разлома Риу-Гранди, ТКДС – трог Крузейро-ду-Сул, КВ – канал Вима, КХ – канал Хантер. Течения: САГВ – Североатлантические глубинные воды, НЦПВ + УГВ – Нижние циркумполярные воды и Глубинные воды моря Уэдделла. Фрагменты профилей “SES-2000 deep” рейсов НИС “Академик Иоффе”: 32-го – АИ32 и 52-го – АИ52.

фели, осадочные волны, контуритовые дрифты) формы рельефа дна, а также формируется особый тип донных отложений – контуриты. В результате многолетних исследований влияния циркуляции придонных вод на процессы глубоководной седиментации, зарубежными авторами разработана классификация контуритов и система пред-

ставлений о механизмах их образования в рамках контуритовой парадигмы [Rebesco, 2005; Contourites, 2008; Rebesco et al., 2014]. В Мировом океане контуритовые отложения развиты преимущественно на континентальных окраинах. Они также выявлены в некоторых абиссальных котловинах с благоприятным режимом циркуляции при-

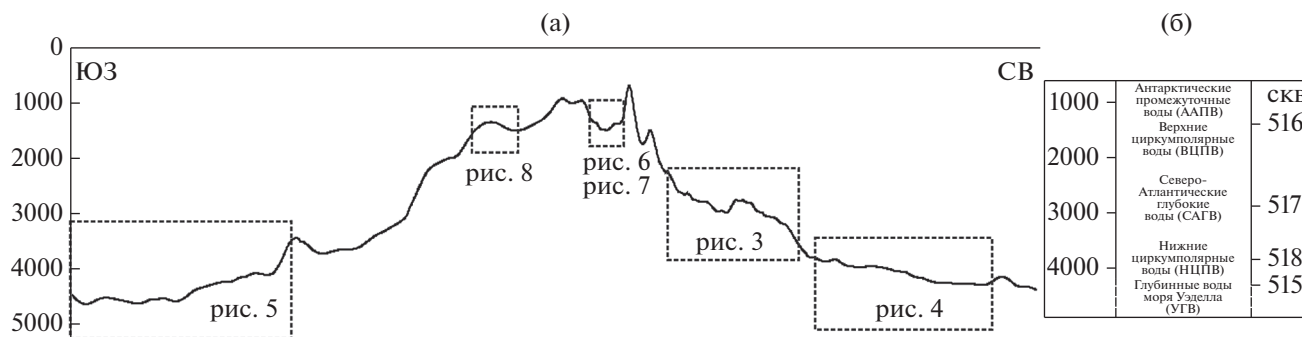


Рис. 2. Батиметрический профиль через возвышенность Риу-Гранди и вертикальная структура водной толщи. а – батиметрический профиль (основа GMRT version 3.6) вдоль профиля АИ52 (см. рис. 1), пунктирные прямоугольники – фрагменты сейсмоакустического разреза, приведенные в статье на рис. 3–8; б – положение скважин 72-го рейса DSDP относительно основных водных масс юго-западной Атлантики (по [Johnson, 1983b] с изменениями).

донных вод, и юго-западная Атлантика относится к таким регионам [Johnson, 1983b; Florindo et al., 2015; Thran et al., 2018].

Возвышенность Риу-Гранди является препятствием на пути распространения основных водных масс и в значительной степени влияет на водообмен между Аргентинской и Бразильской котловинами [Johnson, 1983a; Florindo et al., 2015]. В разных интервалах глубин склоны возвышенности подвергаются интенсивному воздействию одновременно нескольких геострофических течений (рис. 2б). Антарктические промежуточные воды (ААПВ) охватывают интервал 400–1000 м; под ними, в интервале 1000–1800 м, движутся Верхние циркумполярные воды (ВЦПВ); глубже, в интервале 1800–3700 м – Североатлантические глубинные воды (САГВ), а на глубинах более 3700 м – Нижние циркумполярные воды (НЦПВ) и Глубинные воды моря Уэдделла (УГВ). В свою очередь, циркуляция придонных вод влияет на процессы рельефообразования и осадконакопления на возвышенности, а ее осадочный покров является своеобразным архивом, документирующим историю изменений придонной циркуляции в ответ на глобальные климатические и тектонические изменения [Barker et al., 1983b; Johnson, 1983b]. Неровный рельеф дна на склонах возвышенности и признаки перерывов в осадконакоплении, выявленные на основании сейсмических и литологических данных в интервале глубин 2000–3600 м, предположительно связаны также и с эрозионной деятельностью контурного течения САГВ [Barker et al., 1983b]. В настоящее время Южная Атлантика рассматривается как один из важнейших регионов для изучения роли придонной циркуляции в процессах глубоководного осадконакопления, в частности для понимания роли локальных вихрей и бентических штормов в возбуждении активных придонных течений, способных формировать контуриты [Thran et al., 2018].

Осадки, покрывающие возвышенность Риу-Гранди, изучены достаточно хорошо. В трех рейсах по программе глубоководного бурения DSDP в западной части возвышенности было пробурено 5 скважин: DSDP-22 (рейс 3), DSDP-357 (рейс 39) и DSDP-516-518 (рейс 72) (см. рис. 1) [Barker et al., 1983a]. Скважины на ее своде и западном склоне вскрыли разрез пелагических биогенных известковых илов раннемиоценового-четвертичного (скв. 516, 1313 м) и среднеплиоценового-четвертичного (скв. 517, 2963 м) возраста. Результаты бурения свидетельствуют о том, что на возвышенности Риу-Гранди с позднего эоцена произошло непрерывное пелагическое осадконакопление, а современный режим циркуляции океанских вод установился в позднем плиоцене, примерно 3 млн лет назад. Однако в изученных образцах осадков не отмечены какие-либо признаки деятельности придонных течений или турбидных потоков. Только в основании западного склона, в пелагических известковых илах раннемиоценового-четвертичного возраста (скв. 518, 3944 м) выявлены песчаные прослои, которые рассматриваются как возможные турбидиты.

Несмотря на большой объем сейсмопрофилирования на возвышенности Риу-Гранди, выполненный при выборе места скважин глубоководного бурения, контуритовые структуры при анализе полученных данных в итоговых публикациях не упоминаются [Barker et al., 1983a]. Именно сейсмопрофилирование является основным и первоначальным методом выявления контуритовых структур, на которых впоследствии выполняется пробоотбор для литолого-стратиграфического изучения слагающих осадков и реконструкции палеоскоростей и доминирующих направлений придонных течений [Contourites, 2008; Rebesco et al., 2014].

Возможные контуритовые структуры на возвышенности Риу-Гранди рассмотрены пока в единственной публикации по данным съемки с

многолучевым эхолотом [Lisniewski et al., 2017]. На своде возвышенности в районе трога Крузей-ру-ду-Сул в рельефе дна на глубинах от 600 до 1600 м выявлены участки распространения небольших серий аккумулятивных валов высотой 1–3 м с пологими склонами 0.3° и расстоянием между гребнями/вершинами от 250 до 550 м. Валу ориентированы приблизительно параллельно направлению простирания трога. Они предварительно классифицированы как осадочные волны, протяженность некоторых из которых превышает 30 км. Однако сами авторы указывают на необходимость их изучения сейсмическим профилированием для подтверждения контуритовой природы.

Два сейсмоакустических профиля высокого разрешения были выполнены через возвышенность Риу-Гранди в 32-м (2010) [Левченко, Мурдмаа, 2013] и 52-м (2016) [Иванова и др., 2018] рейсах НИС “Академик Иоффе” (см. рис. 1). Эти данные частично закрывают пробел в изученности одной из главных региональных морфоструктур рассматриваемого района Южной Атлантики, позволяя детализировать акустическую структуру самой верхней части осадочного чехла плиоцен-четвертичного возраста. В данной статье рассмотрены выявленные нами осадочные структуры, которые могли быть образованы на возвышенности Риу-Гранди придонными (контурными) течениями. Актуальность этих результатов обусловлена перспективами промышленной разработки на возвышенности Риу-Гранди железомарганцевых корок. Именно для оценки экологических рисков, которые могут быть связаны с добычей этих полезных ископаемых, Геологическая Служба Бразилии выполняла геолого-геофизические исследования [Lisniewski et al., 2017].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) проводит исследования строения дна Атлантического океана в регулярных трансатлантических рейсах НИС “Академик Иоффе”. Они включают высокоразрешающее сейсмоакустическое профилирование с узколучевым параметрическим эхолотом-профилографом “SES-2000 deep” и отбор колонок донных осадков гравитационной (ударной) трубкой. Для корреляции сейсмоакустических записей также используются данные близко расположенных скважин глубоководного бурения. Эти исследования позволяют рассмотреть актуальный вопрос о роли трех главных механизмов осадконакопления: гравитационных потоков осадочного материала разной плотности, размыва и переотложения осадков придонными течениями и фоновой вертикальной седиментации. Стратегия и методика изучения процессов седиментогенеза в Атлантическом океане в позднем кайнозое в трансатлантических рейсах ранее

опубликованы в работах [Мурдмаа и др., 2012; Левченко, Мурдмаа, 2013; Борисов и др., 2013; Левченко и др., 2014; Симагин и др., 2017; Иванова и др., 2018].

Сейсмоакустический профиль 52-го рейса НИС “Академик Иоффе” (АИ52) пересек возвышенность Риу-Гранди с СВ на ЮЗ (см. рис. 1). Он прошел к западу от района работ бразильских исследователей [Lisniewski et al., 2017] и от точки скв. 516, где также выполнялась съемка разными методами сейсмопрофилирования [Barker et al., 1983a]. Профиль 32-го рейса (АИ32) пересек северо-западную оконечность возвышенности. В этих рейсах сейсмоакустическая съемка выполнялась с профилографом “SES-2000 deep” на скорости 9 узлов. Высокая частота 4–5 кГц и мощность акустического сигнала 80 кВт обеспечивают сверхвысокое разрешение сейсмических разрезов до нескольких десятков сантиметров на глубину до 100 м и более под дном в зависимости от состава и физических свойств осадков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Профиль АИ52 пересек западный сегмент возвышенности Риу-Гранди от подножия северного склона в Бразильской котловине через ее вершину до подножия южного склона в Аргентинской котловине (см. рис. 1). Батиметрический профиль вдоль него с записями профилографа приведен на рис. 2а. На нем показано положение сейсмоакустических фрагментов, позволяющих детально проиллюстрировать строение верхней толщи осадочного покрова возвышенности Риу-Гранди на отдельных участках с разным типом осадконакопления, включая возможное контуритовое.

Северный склон возвышенности Риу-Гранди. Северный склон до глубины ~3800 м характеризуется очень расчлененным шероховатым рельефом дна и хаотической “комковатой” видимой акустической структурой донных отложений, местами с сильными короткими криволинейными рефлекторами, часто характерной гиперболической формы (рис. 3а). Видимая мощность этих хаотических, вероятно, оползневых отложений незначительная ~20 м, исключая отдельные образованные ими холмы на дне высотой до 50 м, в которых она достигает 60 м. Под ними наблюдается акустически “немая” однородная толща без каких-либо внутренних отражений. По-видимому, это связано с ограниченным проникновением высокочастотного (4 кГц) акустического сигнала в относительно плотные осадки, обнажающиеся на поверхности дна. Подобные участки на крутых склонах возвышенности рассматривали как признаки эрозии или неотложения связанных с активностью придонных течений разной природы [Barker et al., 1983b]. Среди этих хаотических от-

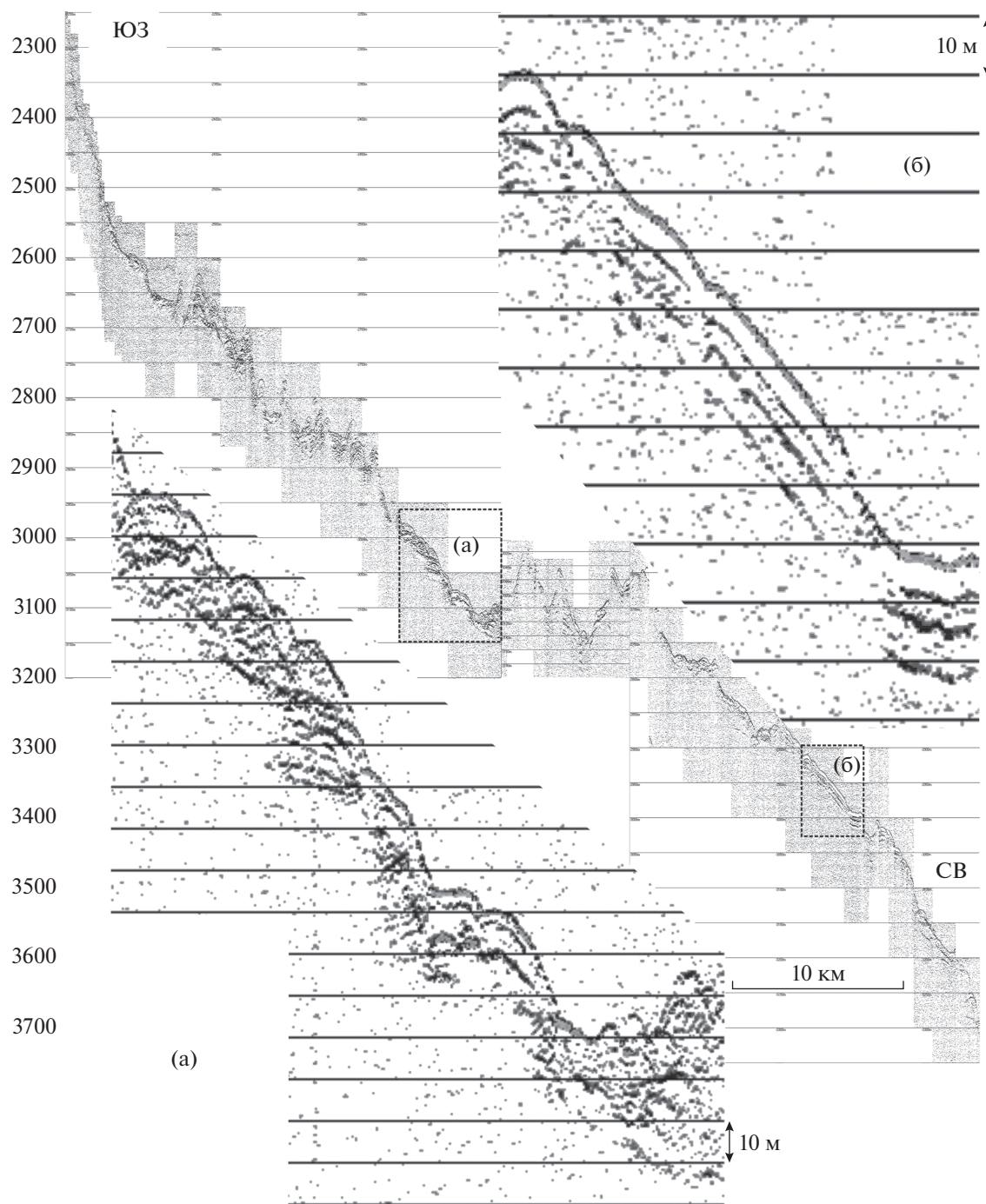


Рис. 3. Фрагмент профиля АИ52 в верхней и средней частях северного склона возвышенности Риу-Гранди, положение показано на рис. 2.
 а – оползневые отложения; б – гравититы (отложения плотностных потоков, движущихся вниз по склону).

ложений резко выделяется своей регулярной волновой картиной короткий участок на глубине 3300–3400 м, где прослеживаются конформные параллельные гладкие рефлекторы (см. рис. 3б), которые мы относим к гравититам (отложениям плотностных потоков, движущихся вниз по склону).

Начиная с глубин 3800–3900 м, морфология склона становится более сглаженной и дно более ровным, а на глубине ~4100 м склон резко выполаживается и дно становится почти горизонтальным (рис. 4а). Также меняется строение и сейсмоакустический имидж осадочных отложений, видимая мощность которых составляет 20–30 м.

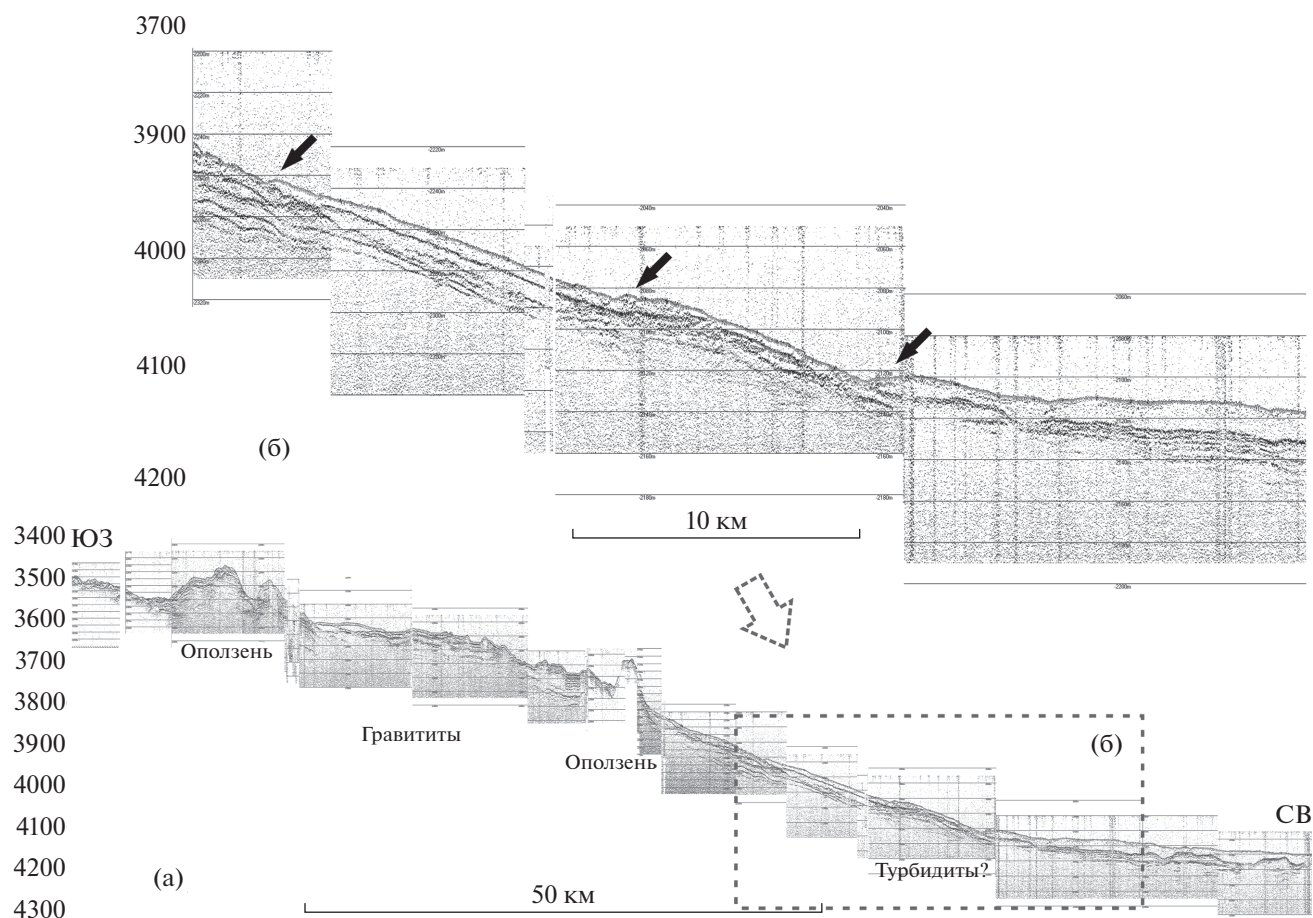


Рис. 4. Морфология склона и акустическая структура донных отложений.

а – фрагмент профиля АИ52 в нижней части северного склона возвышенности Риу-Гранди, положение показано на рис. 2; б – плоские аккумулятивные осадочные тела, возможно, образованные контурным течением (показаны темными стрелками).

В этом интервале глубин ниже дна развиты акустически прозрачные осадки с несколькими сильными протяженными и неровными внутренними рефракторами. Здесь наблюдаются три четких небольших плоских аккумулятивных осадочных тела, выступающих в рельефе дна примерно на 5 м (см. рис. 4б), а между двумя верхними – небольшой участок стратифицированных осадков с гладкими параллельными рефракторами.

Похожее строение нижней части северного склона наблюдается в самой западной части возвышенности Риу-Гранди на профиле 32-го рейса НИС “Академик Иоффе” (см. рис. 1). На всем этом участке развиты акустически прозрачные отложения мощностью до 40–60 м, внутри которых непрерывно протягивается несколько конформных отражающих границ. Здесь наблюдаются небольшие плоские аккумулятивные осадочные тела, выступающие в рельефе дна. На обоих профилях АИ32 и АИ52 на широте примерно 28°30' ю.ш. начинаются структуры зоны транс-

формного разлома Риу-Гранди, который ограничивает одноименную возвышенность с севера.

Южный склон возвышенности Риу-Гранди. Ранее отмечалось, что, в отличие от северного склона возвышенности Риу-Гранди, ее южный и западный склоны относительно пологие и покрыты мощными пелагическими стратифицированными осадками с параллельными поверхностями дна внутренними отражающими границами и без каких-либо явных признаков переотложения гравитационными процессами вниз по склону [Johnson, 1983a]. В действительности морфология южного и северного склонов похожа (см. рис. 2а). Многочисленные грядовые выступы высотой 10–30 м и шириной 0.5–2 км создают расчлененный рельеф дна в верхней и средней частях южного склона (рис. 5). Осадочные шапки мощностью до 10 м на этих грядах имеют места хаотическую акустическую структуру, а на крутых уступах между ними ниже дна отражения вообще отсутствуют. На поверхность дна здесь выходит подстилающая акустически “немая” толща. Лишь в

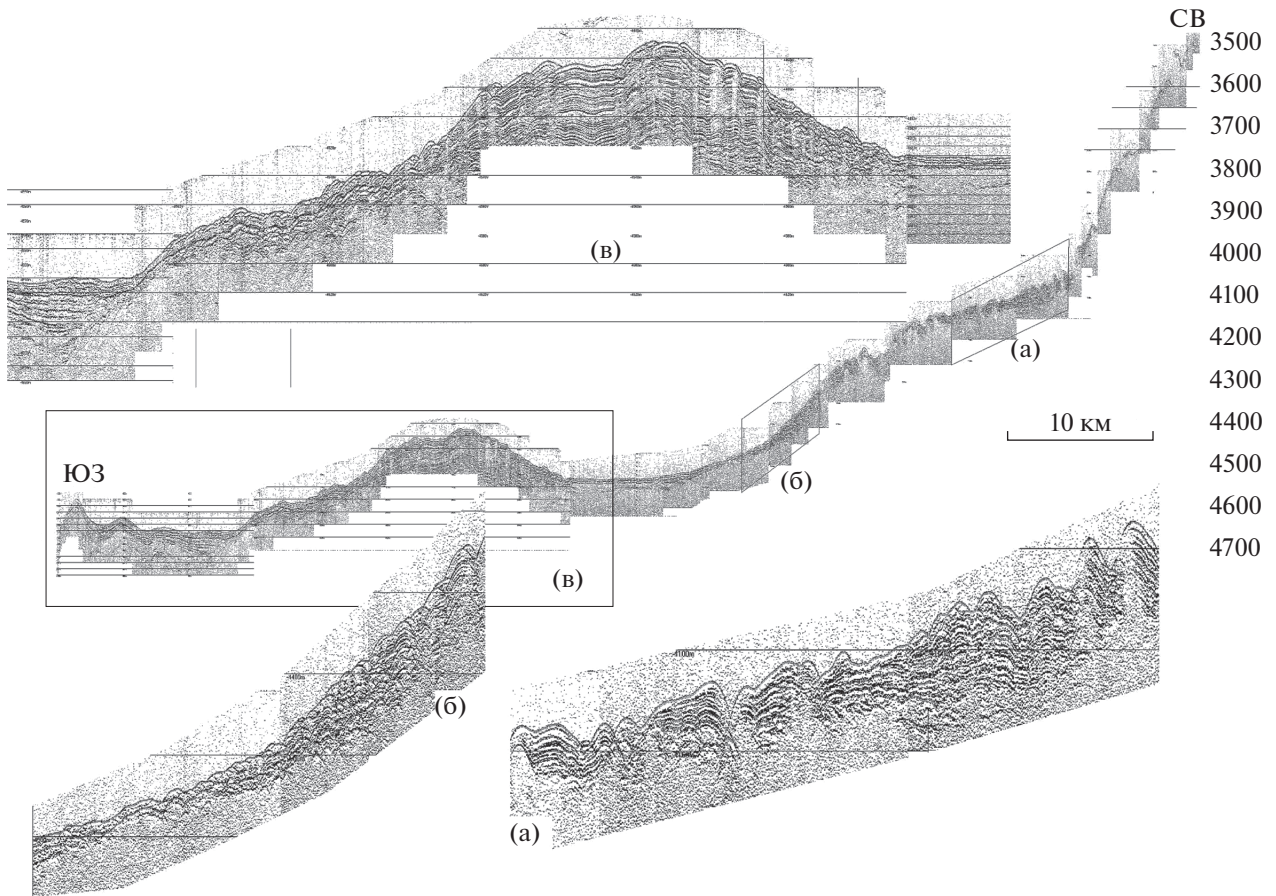


Рис. 5. Фрагмент профиля АИ52 в нижней части южного склона возвышенности Риу-Гранди, положение показано на рис. 2.

Детально показаны участки: в – аккумулятивная насыпь, смешанная гравитито-контуритовая осадочная система, б – отложения плотных потоков неконсолидированных осадков, а – регулярные гряды параллельно-слоистых осадков с конформными внутренними рефлекторами, сложенные в том числе контуритами.

редких небольших впадинах видимая мощность акустически прозрачных, местами стратифицированных в нижней части осадков составляет от нескольких метров до 15 м. Скорее всего, гряды представляют собой оползневые тела, а участки отсутствия видимых осадков – эрозионные поверхности. Заполняющие впадины осадки являются отложениями плотных потоков, движущихся вниз по склону (т.е. гравититами).

Только начиная с глубины 4000–4100 м, где дно резко выполаживается, и его морфология становится более спокойной, появляется сплошной осадочный покров (см. рис. 5а). Здесь гряды сложены параллельно-слоистыми осадками с конформными внутренними рефлекторами. Мы допускаем, что придонные течения также участвовали в их формировании. Наблюдаются участки с серией гиперболических отражений с единым наклонным рефлексором в основании (см. рис. 5б). Подобная структура характерна для потоков неконсолидированных осадков, оползающих вниз по склону (в зарубежной литературе

“mass movement deposits” или “mass transport deposits”).

Очень интересная структура, высотой более 150 м и протяженностью около 20 км, находится в самой нижней части южного склона (см. рис. 5в). Это, скорее всего, аккумулятивное осадочное тело. В его средней части, с волнистым рельефом дна, наблюдаются протяженные участки конформных параллельно-слоистых осадков видимой мощностью до 80 м, которые могли быть сформированы процессами, связанными с деятельностью придонных течений. На флангах этой насыпи развиты стратифицированные осадки мощностью до 40–50 м, с хаотической структурой и многочисленными гиперболическими отражающими границами, что типично для отложений плотных потоков неконсолидированных осадков. Наблюдаемая южнее регулярная волнистая морфология дна и внутренняя структура слоистых ундуляций, размерами несколько километров и высотой до 40 м, предполагают активное влияние придонных течений на

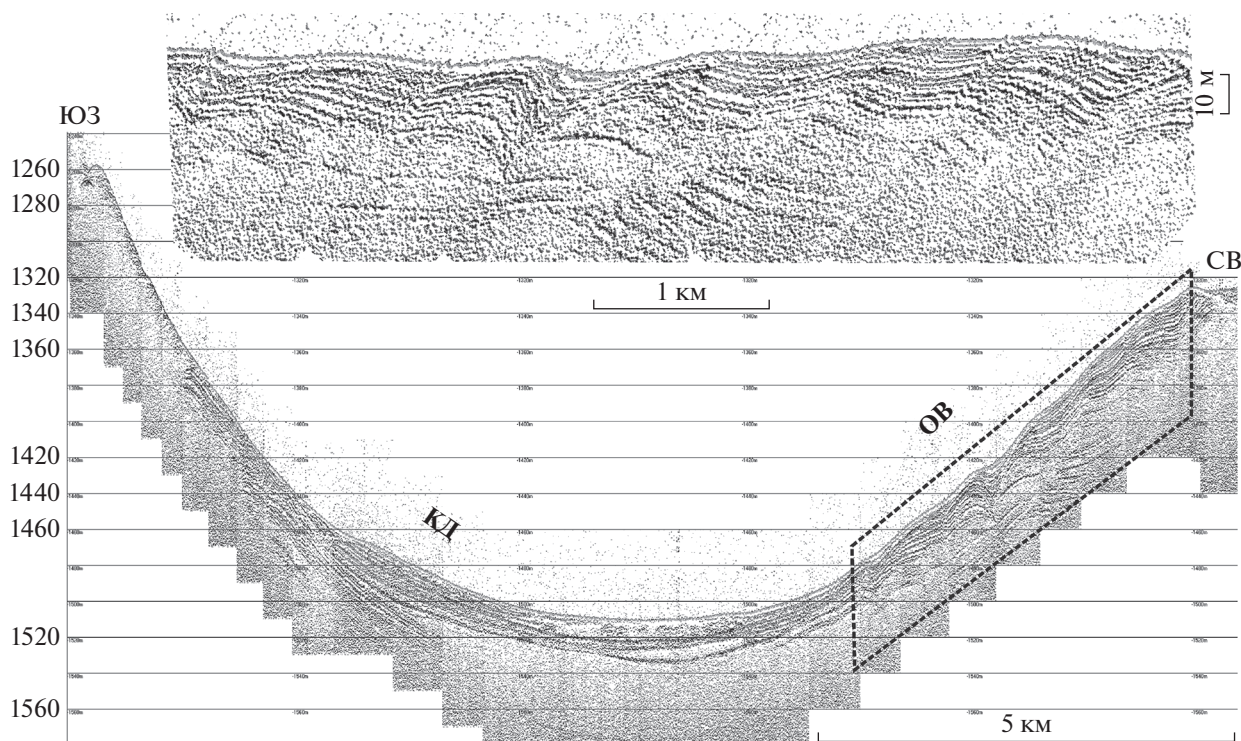


Рис. 6. Фрагмент профиля АИ52 в трого Крузейру-ду-Сул на вершине возвышенности Риу-Гранди, положение показано на рис. 2.

Детально показаны осадочные волны на восточном борту трого.

процессы осадконакопления и рельефообразования.

Вершина возвышенности Риу-Гранди. Структуры, которые достаточно уверенно можно отнести к контуритовым, наблюдаются на профиле АИ52 в трого Крузейру-ду-Сул. Самые верхние слои осадочной толщи его восточного борта, видимой мощностью 10–15 м, залегают в виде серии четких асимметричных ундуляций пачки субпараллельных рефлекторов, которые конформно отображаются в волнистой морфологии дна. Вершины волнообразных структур мигрируют в сторону склона вверх по разрезу (рис. 6). Высота этих ундуляций до 5–6 м, длина волны (расстояние между гребнями) 1–1.5 км. Мы интерпретируем их как контуритовые осадочные волны. Наличие несогласных субгоризонтальных отражающих границ под ними свидетельствует о том, что это не складчатые деформации, подтверждая их скорее седиментационную, чем тектоническую природу.

Волнистая структура дна резко обрывается в основании восточного борта трого. В осевой части трого и на его западном борту поверхность дна гладкая, а отражающие границы внутри стратифицированной приповерхностной толщи осадков мощностью до 40–50 м непрерывные. В центральной части трого дно подстилается акустиче-

ски прозрачными осадками мощностью до 30 м, которые сильными рефлекторами разделяются на несколько линз. Аналогичные линзы, но стратифицированных осадков, развиты в основании западного борта. Самая верхняя линза образует здесь уплощенное поднятие высотой в несколько метров (рис. 7а). Возможно, эти линзовидные образования являются небольшими контуритовыми пластерными дрифтами.

Контуриты, возможно, также развиты и в южной выровненной части вершины возвышенности Риу-Гранди. Юго-западнее основного гайота находится впадина, видимая мощность осадков в которой на профиле АИ52 достигает 30–40 м (рис. 8а). У подножия гайота находится ров глубиной около 25 м с выровненным дном и прирусловым валом, состоящим из волнистых стратифицированных отложений. Возможно, это канал, по которому распространяется локальный поток придонного течения. Ров ограничивает выступающее в рельефе дна плоское осадочное тело, ограниченное с другой стороны уступом высотой около 10 м с небольшим аккумулятивным холмом. Рефлекторы в верхних отложениях мощностью 10–15 м на своде этого поднятия конформны поверхности дна. Глубже, под акустически прозрачными отложениями, фрагментарно, на глубине до 40–45 м ниже поверхности дна, про-

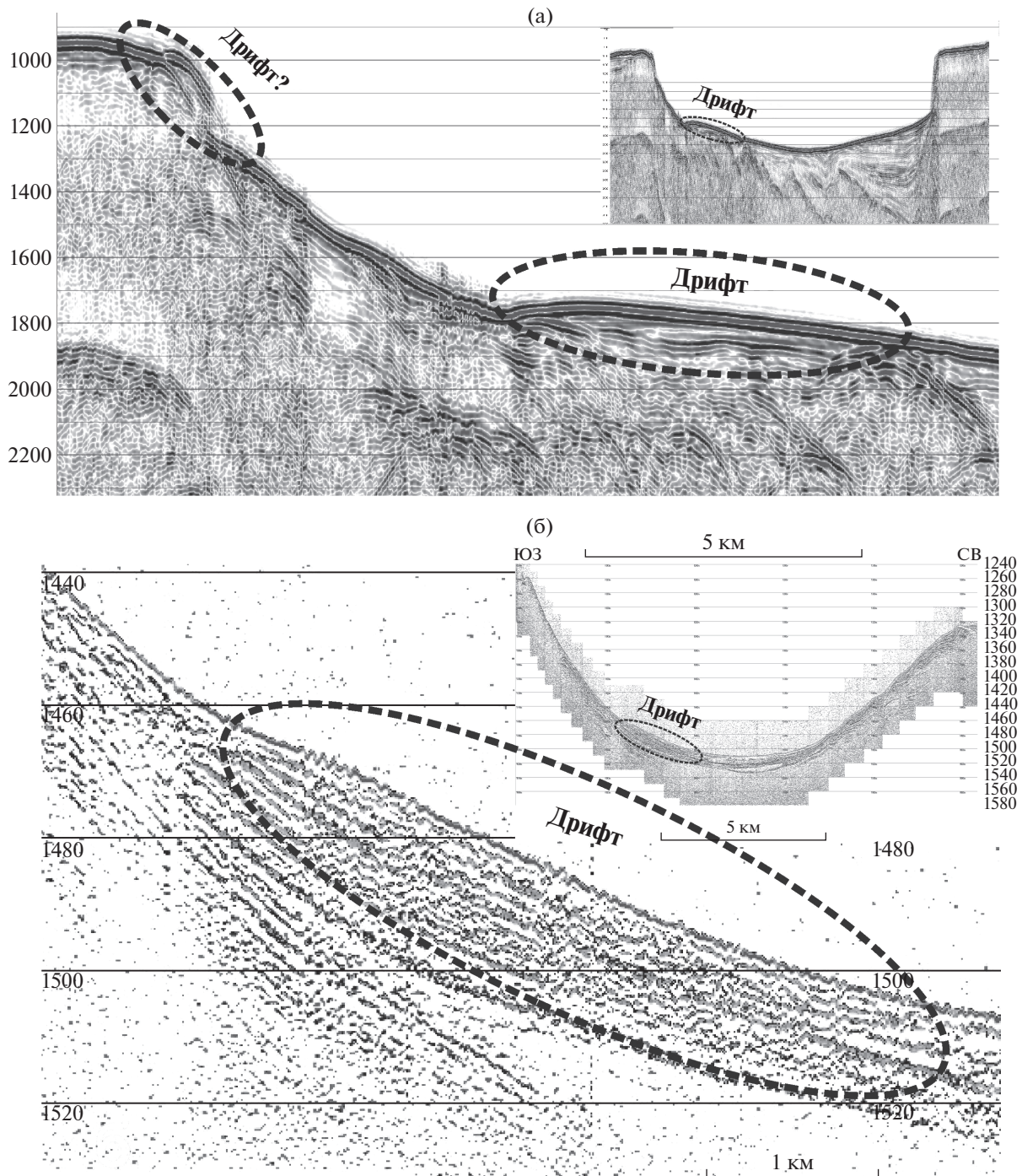


Рис. 7. Пластерный контуритовый дрифт в трое Крузейру-ду-Сул на профиле НИС “Фред Мур” [база данных MGDS] (а) и на профиле АИ52 (б); положение показано на рис. 2.

слеживается несогласная шероховатая отражающая граница. Гипотетическое предположение о том, что плоское осадочное тело представляет собой небольшой контуритовый дрифт с характерным пограничным рвом, также, как и гипотезы о других предполагаемых контуритовых структурах, нуждается в проверке детальной сейсмоаку-

стической съемкой в сочетании с отбором колонок.

Похожее строение имеет находящаяся южнее площадка с субгоризонтальной выровненной поверхностью и ограничивающим рвом глубиной около 20 м на краю вершины возвышенности Риу-Гранди (см. рис. 8б). Она обрывается в сто-

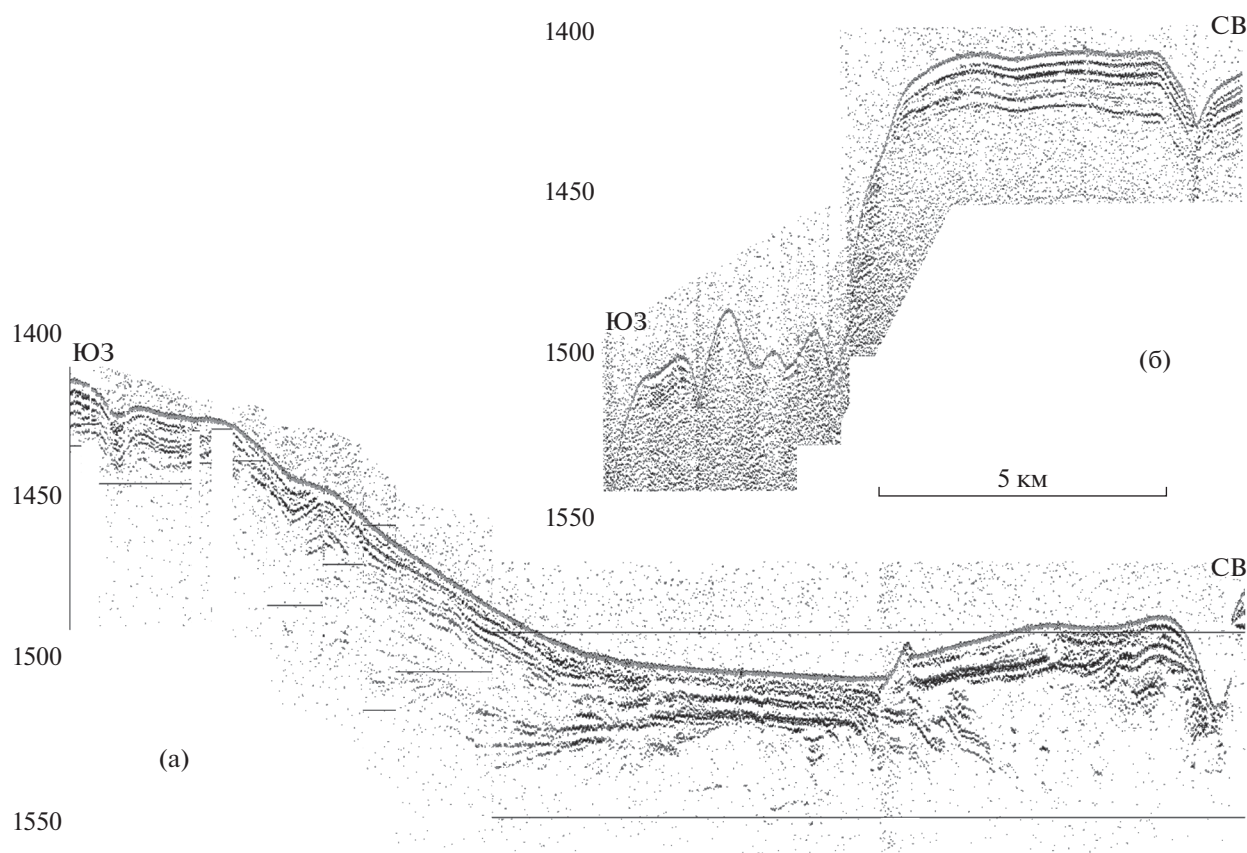


Рис. 8. Структуры в южной выровненной части вершины возвышенности Риу-Гранди, похожие на контуритовые. а – аналог контуритового дрефта; б – аналог контуритовой террасы.

рону котловины крутым уступом высотой более 100 м, являющимся, по-видимому, одним из бенчей, которые отмечены на склонах возвышенности Риу-Гранди [Barker et al., 1983b]. Именно деятельностью придонных течений эти авторы объясняют такую морфологию. В целом эта структура подобна контуритовым террасам, широко развитым на континентальной окраине Южной Америки (например, [Preu et al., 2013]).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как отмечалось выше, на возвышенности Риу-Гранди выполнен большой объем исследований, включая сейсмопрофилирование, однако до сих пор достоверные свидетельства существования здесь контуритов отсутствуют, несмотря на то, что в данном районе предполагается активное воздействие придонных течений на процессы осадконакопления [Barker et al., 1983a]. Единственный пример возможной контуритовой структуры на возвышенности Риу-Гранди был описан по результатам батиметрической съемки [Lisniewski et al., 2017]). Авторы этой работы отмечали, что одних только батиметрических данных недостаточно для убедительных однозначных вы-

водов. Позднее они даже усомнились в своей интерпретации, предположив "...что это скорее эрозионные формы, а не осадочные волны..." [Lisniewski, 2018, персональное сообщение]. На наш взгляд, представленные примеры [Lisniewski et al., 2017, fig. 4] все же больше похожи на аккумулятивные формы типа осадочных волн. Интересны два альтернативных механизма образования осадочных волн, которые предположили эти авторы. Согласно первому, разрушение внутренних волн создает активную турбулентность вблизи дна, которая приводит к переотложению осадков в виде осадочных волн. Другой механизм они связывают с региональной антициклонической циркуляцией Антарктических Промежуточных Вод (АПВ). В какой-то степени это согласуется с вихревой моделью образования контуритов [Thran et al., 2018].

Ранее сейсмоакустическая съемка с профилографом "Парасаунд" была выполнена в трогее Крузейру-ду-Сул в 17 рейсе НИС "Академик Сергей Вавилов" (2003) исследователями из Геологического института РАН [Пейве и др., 2004]. Тогда волнистую структуру заполняющих его слоистых осадков мощностью до 85 м объясняли недавней тектонической активностью, а наблюдаемые в

них ундуляции интерпретировали как молодые складчатые деформации. На наш взгляд, это следствие низкого латерального разрешения полученных в рейсе записей “Парасаунда”. Подобный “тектонический” подход до недавнего времени был обычным при интерпретации сильно сжатых сейсмических разрезов, полученных в океанских рейсах на высокой скорости съемки (9 узлов и выше) при редкой частоте излучения сигналов на больших глубинах. Из-за нереалистичного соотношения вертикального и горизонтального масштабов, любые пологие формы в осадках в этом случае выглядят как складки. Поэтому до недавнего времени волнистое залегание морских отложений рассматривалась исключительно как свидетельство тектонического воздействия, без учета специфики седиментационных факторов.

Использование сейсмоакустических профилографов с частотой излучения сигналов на порядок выше (к ним относится и SES-2000 deep), обеспечивает высокую степень латерального разрешения записей, что позволило рассматривать альтернативные процессы осадконакопления, ответственные за волнистый рисунок отражающих границ, в том числе контуритовые. Полученные в 52-м рейсе НИС “Академик Иоффе” на возвышенности Риу-Гранди сейсмоакустические данные, рассмотренные выше (см. рис. 6), показывают, что тектоническая интерпретация не верна. Волнистая стратифицированная придонная толща на восточном борту трого Крузейру-ду-Сул, по-видимому, была сформирована ветвью придонного течения, движущегося вдоль трого, что отчасти подтверждают измерения бразильских исследователей с использованием доплеровского измерителя течений ADCP [Lisniewski et al., 2017].

Результаты сейсмоакустического профилирования в рейсе АИ52 также указывают на присутствие маломощного плоского покровного контуритового дрефта на дне трого, у основания его западного борта (см. рис. 7а). На выполненном ранее в рейсе НИС “Фред Мур” (1979) [Barker et al., 1983b] многоканальном сейсмическом профиле в основании западного склона трого Крузейру-ду-Сул, южнее скв. 516, четко выделяется похожее осадочное тело, мощностью около 150 м и длиной более 5 км (см. рис. 7б). Подобное осадочное тело наблюдается и на профиле НИС “Вима”, но авторы в обоих случаях их не распознали [Barker et al., 1983b, fig. 11]. По-видимому, образование этих осадочных тел (контуритовых дрефтов) контролировалось циркуляцией придонных вод в трого. Менее уверенно можно предполагать, что образование небольшого (менее 1 км) аккумулятивного осадочного тела линзовидной формы, мощностью более 100 м, на верхней бровке западного борта трого (см. рис. 7б) также частич-

но связано с подобной циркуляцией. Наблюдаемое латеральное распределение разных контуритовых форм рельефа в трого Крузейру-ду-Сул – осадочных волн на восточном борту и покровного плоского дрефта на западном борту, возможно, объясняется действиями силы Кориолиса и экмановского транспорта, контролирующими процессы накопления контуристов.

Многоканальный профиль НИС “Фред Мур” также четко показывает, что базальтовый фундамент в трого Крузейру-ду-Сул лежит глубже 85 м. Рефлекторы в осадочной толще согласно огибают его выступы или обрываются на их бортах без каких-либо признаков деформации. Предполагается, что тектонические и вулканические процессы, сформировавшие наклонные блоки фундамента в осевой части трого на этом профиле, были активны до среднего миоцена, после чего образование разломов прекратилось [Barker et al., 1983b]. Поэтому не подтверждается не только недавняя тектоническая активность, но и предполагавшийся А.А. Пейве с соавторами [Пейве и др., 2004] молодой вулканизм.

Сейсмоакустическое профилирование 52-го рейса НИС “Академик Иоффе” выявило некоторые различия морфологии и акустической структуры донных отложений северного и южного склонов возвышенности Риу-Гранди. Шероховатый облик крутого северного склона с расчлененным рельефом дна, вероятно, создается оползневыми отложениями и гравититами с непрозрачной и хаотической внутренней структурой. Существенно более спокойная морфология его нижней части и акустическая структура донных отложений с непрерывными протяженными внутренними рефлекторами предполагают иной характер процессов рельефообразования и осадконакопления. Небольшие пологие аккумулятивные осадочные чешуи, выступающие в рельефе дна, участки стратифицированных осадков с гладкими параллельными рефлекторами и непрерывные рефлекторы внутри акустически прозрачных осадков допускают влияние контурного придонного течения. Известно, что одна из ветвей идущего с юга придонного течения ААДВ после выхода из канала Вима западнее возвышенности Риу-Гранди огибает ее, поворачивая на восток, и дальше какое-то время идет вдоль широтного разлома Риу-Гранди [Johnson et al., 1983a]. Взаимодействие плотностных потоков, движущихся вниз по склону возвышенности с этим донным контурным течением могло формировать смешанную гравитито-контуритовую осадочную систему в основании возвышенности.

Хотя южный склон имеет более спокойную пологую морфологию, здесь все же наблюдаются признаки переотложения донных осадков, на отсутствие которых ранее указывал Д.А. Джонсон

[Johnson et al., 1983a]. Оползневые гряды хаотического заполнения и протяженные эрозионные поверхности в средней части южного склона (см. рис. 5), по-видимому, сформированы плотными потоками, движущимися вниз по склону. На южном склоне возвышенности Риу-Гранди развитие контуритов более вероятно, чем на северном. Они могут частично слагать регулярные гряды параллельнослоистых осадков с конформными внутренними рефлекторами (см. рис. 5а). Еще более вероятно значительная роль контуритовой седиментации в формировании крупного осадочного тела и последующих ундуляций слоев осадков, залегающих в основании южного склона. Идущее с юга течение НЦПВ, огибая возвышенность Риу-Гранди, по-видимому, воздействует на дно в данном районе. Это контурное течение, действующее на протяжении длительного времени, не формирует здесь классические контуриты и контуритовые формы рельефа дна, а воздействуя на склон, инициирует циклические нисходящие гравитационные потоки. Так можно объяснить сложную конформно-слоистую и, одновременно, хаотическую структуру верхней части осадочного чехла крупного холма у основания южного склона, где участки протяженных гладких рефлекторов чередуются с участками коротких гиперболических отражений (см. рис. 5в). Отмеченное выше сочетание отложений разного типа (контуритов, гравититов), позволяет предположить существование смешанной гравитито-контуритовой осадочной системы в основании южного склона возвышенности Риу-Гранди.

Если существование контуритовых структур в средней и нижней частях склонов возвышенности Риу-Гранди, скорее, предполагается, то на ее вершине в 52-м рейсе НИС “Академик Иоффе” были получены фактические данные, подтверждающие их присутствие там (см. рис. 6–8). Высокорастворяющее сейсмоакустическое профилирование впервые выявило контуритовые осадочные волны в троге Крузейру-ду-Сул (см. рис. 6). В троге также наблюдаются осадочные тела, похожие на локальные покровные контуритовые дрефты (см. рис. 7). Полученные данные позволяют по-новому взглянуть на выполненные здесь ранее профили стандартного НСП низкого разрешения. На профилях НИС “Фред Мур” [база данных MGDS] и НИС “Вима” [Barker et al., 1983b] наблюдаются аккумулятивные осадочные тела, похожие на контуритовые дрефты, которые ранее не идентифицировались. Свидетельством активной роли придонных течений в формировании морфологии вершины возвышенности Риу-Гранди могут также служить небольшой контуритовый дрефт с характерным пограничным рвом и поднятие с субгоризонтальной выровненной поверхностью, установленные на южном краю вершины возвышенности (см. рис. 8). Это поднятие

подобно контуритовым террасам, широко развитым на континентальной окраине Аргентины и Уругвая (например, [Preu et al., 2013]).

Выделение на сейсмоакустических профилях НИС “Академик Иоффе” на возвышенности Риу-Гранди контуритовых осадочных структур достаточно условно и во многом субъективно. Однако это сознательный выбор авторов, с целью инициировать новое направление исследований, в котором эти структуры могут быть первоочередными объектами. Для окончательного заключения о развитии на возвышенности Риу-Гранди контуритов, их формах и типах, на первых этапах необходимо выполнить детальную съемку с высокоразрешающим сейсмопрофилографом типа SES-2000 deep одновременно со съемкой многолучевым эхолотом. По результатам такой съемки необходимо отобрать и изучить колонки донных осадков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное в 52-м рейсе НИС “Академик Иоффе” (2016) сейсмоакустическое профилирование с SES-2000 deep впервые выявило осадочные волны и, возможно, небольшие дрефты в троге Крузейру-ду-Сул на вершине возвышенности Риу-Гранди, а также похожую на контуритовую террасу структуру на южном краю вершины. Несмотря на высказываемые ранее предположения о воздействии основных водных масс на дно возвышенности Риу-Гранди (например, [Johnson et al., 1983a]), фактические данные, подтверждающие существование там контуритовых структур отсутствовали, исключая валы в рельефе дна, похожие на осадочные волны [Lisniowski et al., 2017].

Контуритовые аккумулятивные формы рельефа в троге Крузейру-ду-Сул, по-видимому, связаны с распространяющимися через него течениями АПВ и ВЦПВ, что подтверждают измерения с использованием ADCP [Lisniowski et al., 2017]. Латеральное распределение разных контуритовых форм в троге Крузейру-ду-Сул на профиле SES-2000 deep 52-го рейса НИС “Академик Иоффе” – осадочных волн на восточном борту и покровных плоских дрефтов на западном борту – возможно, объясняется действиями силы Кориолиса и экмановского транспорта, контролирующими процессы накопления контуритов.

Результаты сейсмоакустического профилирования в 32-м и 52-м рейсах НИС “Академик Иоффе” позволяют предположить, что крутой и шероховатый северный склон возвышенности Риу-Гранди сложен преимущественно оползневыми отложениями и гравититами. На пологом и гладком южном склоне присутствие наряду с гравититами продуктов контуритовой седиментации более вероятно.

В основании северного склона возвышенности Риу-Ганди, возможно, существует смешанная гравитито-контуритовая осадочная система, в формировании которой основной вклад внесли плотностные потоки, движущиеся вниз по склону, а также контурное течение НЦПВ и УГВ вдоль трансформного разлома Риу-Гранди. В основании южного склона возвышенности Риу-Ганди, где наблюдаются типичные отложения потоков слабо консолидированных осадков, по видимому, также существует смешанная гравитито-контуритовая осадочная система. Она по своему строению и генезису отличается от системы в основании северного склона, здесь роль вдоль-склонового контурного течения НЦПВ и УГВ, которое сталкивается с возвышенностью, может быть существенно выше.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 18-17-00227, О.В. Левченко, Д.Г. Борисов). Обработка сейсмических профилей выполнялась в рамках государственного задания (тема № 0149-2019-0006, Н.В. Либина).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Борисов Д.Г., Мурдмаа И.О., Иванова Е.В. и др. Контуритовые системы в районе южного эскарпа плато Сан-Паулу, Южная Атлантика // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 4. С. 517–528.

Иванова Е.В., Мурдмаа И.О., Борисов Д.Г. и др. Геолого-геофизические исследования контуритовых систем Центральной и Южной Атлантики в 52-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Иоффе” // *Океанология*. 2018. Т. 58. № 2. С. 337–339.

Левченко О.В., Мурдмаа И.О. Стратегия системных исследований структуры донных осадков вдоль трансатлантических геотраверзов (32-й рейс научно-исследовательского судна “Академик Иоффе”, осень 2011 г., Калининград–Ушуая) // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 1. С. 139–144.

Левченко О.В., Мурдмаа И.О., Иванова Е.В. и др. Новые результаты сейсмофациального 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 континентального подножия Атлантического океана // *Литология и полез. ископаемые*. 2012. № 5. С. 427–450.

Пейве А.А., Турко Н.Н., Цуканов Н.В. и др. Особенности строения поднятия Риу-Гранди (Южная Атлантика) // *ДАН*. 2004. Т. 397. № 4. С. 511–516.

Симагин Н.В., Мурдмаа И.О., Сейткалиева Э.А. и др. Осадочное заполнение экваториального срединно-океанского каньона Атлантического океана // *Литология и полез. ископаемые*. 2017. № 6. С. 3–10.

Barker P.F., Carlson R.L., Johnson D.A. et al. *Init. Repts DSDP*. V. 72. Washington: U.S. Govt. Printing Office, 1983a. 1124 p.

Barker P.F., Buffler R.T., Gamboa L.A. A seismic reflection study of the Rio Grande Rise // *Init. Repts DSDP*. V. 72. Washington: U.S. Govt. Printing Office, 1983b. P. 499–517.

Contourites / Eds M. Rebesco, A. Camerlenghi. *Developments in Sedimentology*. 60. Amsterdam: Elsevier, 2008. 666 p.

Florindo F., Gennari R., Persico D. et al. New magnetobiostratigraphic chronology and paleoceanographic changes across the Oligocene-Miocene boundary at DSDP Site 516 (Rio Grande Rise, SW Atlantic) // *Paleoceanography*. 2015. V. 30. P. 659–681.

Gamboa L.A.P., Rabinowitz P.D. The evolution of the Rio Grande Rise in the southwest Atlantic Ocean // *Marine Geology*, 1984. V. 58(1–2). P. 35–58. Hernández-Molina F.J., Wählin A., Bruno M. et al. Oceanographic processes and products around the Iberian margin: a new multidisciplinary approach // *Boletín Geológico y Minero*. 2015. V. 126(2–3). P. 279–326.

Johnson D.A. Regional oceanographic setting of the Southwestern Atlantic // *Initial Reports DSDP*. V. 72. Washington: U.S. Govt. Printing Office, 1983a. P. 15–35.

Johnson D.A. Paleocirculation of the Southwestern Atlantic // *Initial Reports DSDP*. V. 72. Washington: U.S. Govt. Printing Office, 1983b. P. 977–994.

Lisniewski M.A., Harlamov V., Frazão E.P. et al. Sediment waves on the Rio Grande Rise // 2017 IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics). 2017. P. 1–5.

MGDS (Marine Geoscience Data System), http://www-udc.ig.utexas.edu/sdc/map_asp.htm.

Preu B., Hernández-Molina F.J., Violante R. et al. Morphosedimentary and hydrographic features of the northern Argentine margin: The interplay between erosive, depositional and gravitational processes and its conceptual implications // *Deep. Sea Res. Part I*. 2013. V. 75. P. 157–174.

Rebesco M. Contourites // *Encyclopedia of Geology* / Eds R.C. Selley, L.R.M. Cocks, I.R. Plimer. Oxford: Elsevier, 2005. P. 513–527.

Rebesco M., Hernández-Molina F.J., Van Rooij D. et al. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations // *Mar. Geol.* 2014. V. 352. № 2. P. 111–154.

Reid J.L., Nowlin W.D., Patzert W.C. On the characteristics and circulation of the southwestern Atlantic Ocean // *J. Phys. Oceanogr.* 1977. V. 7. № 1. P. 62–91.

Thran A.C., Dutkiewicz A., Spence P., Müller R.D. Controls on the global distribution of contourite drifts: Insights from an eddy-resolving ocean model // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2018. V. 489. P. 228–240.

Contourites and Gravitites on the Rio Grande Rise, Southwest Atlantic Ocean (Seismoacoustic Data)

O. V. Levchenko^{1, #}, D. G. Borisov¹, N. V. Libina¹

¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Nakhimovskii prosp., 36, Moscow, 117997 Russia

[#]e-mail: olevses@mail.ru

The morphology of the Rio Grande Rise and the acoustic structure of different types of deposits in its uppermost sedimentary cover were discussed on the base of high resolution seismoacoustic data collected during the 32nd (2010) and 52nd (2016) cruises of R/V “Akademik Ioffe”. The slopes of the Rise are characterized mainly by slumps and gravitites, but contouritic sedimentation appears to develop on its southern slope. Contourite sediment waves and possible small drifts are identified in the Cruzeiro-do-Sul Trog at the top of the Rio Grande Rise. Mixed gravity-contourite sedimentary systems seem to be located at the base of its northern and southern slopes. Gravity driven flows moving down-slope and contourite currents of waters of Antarctic origin are responsible for formation of these contourite features.

Keywords: slope, geostrophic current, contourites, drift, gravitites.