

Оползни, потоки масс и современные процессы на дне синеклизы Rockall, на акватории Ирландии, выявленные с помощью глубинного гидролокатора бокового обзора

Slope failure, mass flow and bottom current processes in the Rockall Trough, offshore Ireland, revealed by deep-tow sidescan sonar

B.M. O'Reilly¹, P.W. Readman¹ и P.M. Shannon

Введение

Окраины синеклизы Rockall, которые сейчас представляют интерес для нефтегазовых исследований, являются важной с экологической точки зрения и слабо изученной частью шельфа. Для пополнения информации о регионе была проведена высокоразрешающая съемка гидролокатором бокового обзора (ГЛБО) в Ирландском секторе синеклизы Rockall в Июне/Июле 1998. Это позволило получить данные об устойчивости оползней, перемещении осадков, апвеллинге питательных веществ, современных процессах на дне и биологической активности на шельфе / склоне / подножии.

Детальная информация о природе многих из этих процессов может быть получена по данным малоглубинной геофизики. Проект TRIM (TOBI Rockall Irish Margins) (Shannon et al., 2001), поддерживаемый Программой Ирландской Нефтяной Инфраструктуры (Irish Petroleum Infrastructure Programme) (Rockall Studies Group), включает в себя 3100 погонных км съемки ГЛБО TOBI и 3700 км съемки 3.5 кГц профилографом вдоль границ синеклизы Rockall (Рис. 1). Этот проект последовал за более ранней разведкой AIRS (Atlantic Irish Regional Survey), проведенной через весь южный регион синеклизы Rockall с использованием системы ГЛБО GLORIA, обладающей меньшей разрешающей способностью (Unnithan et al., 2001).

Система ГЛБО TOBI, разработанная Центре Океанографии Саутгемптона (Flewellen et al., 1993), буксируется на уровне 300-400 м над дном моря. Он испускает сигналы с частотой 32 кГц и регистрирует акустический отклик от дна и придонных осадков от см до м по глубине. Этот акустический отклик отражает не только свойства обратного рассеивания от дна, но также детальную приповерхностную структуру осадков, сформированных современными процессами седиментации.

Цели и задачи

Общей целью проекта TRIM было предоставить геологическую и экологическую информацию, которую можно будет использовать в базовом экологическом изучении региона. Результаты проекта также уместны к широкому ряду сопряженных промышленных и научных дисциплин. Результаты включают информацию о прошлых и современных процессах седиментогенеза и океанографических процессах, оползнях и геотектонических процессах, устойчивости дна для процессов добычи нефти и газа, и палеоклиматологии. Специальными научными задачами проекта были:

- Области крутых склонов. На них находятся большие массы

и зоны неустойчивости. Внезапное движение таких больших объектов может вызвать неблагоприятные экологические и экономические последствия. Они могут служить источником цунами и также воздействовать на осадочный и экологический баланс бассейна. Оценка рисков для окружающей среды и установок на дне требует знаний о частоте и амплитуде оползней в различных частях склона. Это можно определить по градиентам наклона, геотехническим свойствам придонных осадков и пород, и по возможным инициирующим процессам, таким как флуктуации давления из-за штормов, поднятий земли вследствие тектонических землетрясений или нестабильности газогидратов.

- Современные карбонатные купола на восточной окраине Rockall.

Это имеет очень важное экологическое приложение. Их природа и рост могут быть вызваны разгрузкой термогенного газа по разломам вдоль окраин бассейна, высвобождением гидроксида метана в условиях, вызванных глобальным изменением температуры, или современным апвеллингом питательных веществ на шельфе.

- Характеристики большого каньона на восточном фланге синеклизы Rockall

Это может отражать основные пути подводного конуса выноса и, как современный аналог песчаного коллектора, дает нам представление о системе распределения песка в глубоководных бассейнах. Каньон четко выражен в топографическом рельефе и, возможно, содержит множество экологических ниш.

Результаты

Результаты съемки дают возможность взглянуть на недавние геологические процессы (Неоген - Голоцен) по обеим окраинам синеклизы Rockall, включая влияние потоков, параллельных склону на образование морфологии окраин. Эти данные особенно полезны при интерпретации малоглубинной сейсмостратиграфии вдоль окраин синеклизы Rockall, так как многие из отображенных на ГЛБО TRIM объекты могут иметь и более глубокий сейсмический отклик и форму колебаний.

Мозаики ГЛБО вместе с более глубинных данных 3.5 кГц профилографа (50 -100 м) были объединены с данными гравиразведки для получения истинной информации о природе дна и

¹Dublin Institute for Advanced Studies, 5 Merrion Square, Dublin 2, Ireland

²UCD School of Geological Sciences, University College Dublin, Belfield, Dublin 4, Ireland

придонные осадочные образования. Полученные изображения бокового обзора представляет собой снимок современного физического и экологического состояния дна, что служит основой для мониторинга природных и антропогенных изменений окружающей среды. Изображения и данные профилирования показывают примеры (а) сползание откоса и (б) современные черты дна. Это будет кратко описано далее.

Признаки оползней

На западных и восточных окраинах синеклизы Rockall были выявлены критические признаки оползневых процессов. Их начальное описание было предоставлено Shannon и др. (2001). Эти признаки проявляются как в одиночных так и в серии оползневых блоков, где полусцементированные участки склона отделяются и сползают вниз как несцементированные потоки обломочного материала. Наибольшие градиенты возникают на стенках V-образных каналов вдоль самой восточной окраины Rockall, где угол наклона превышает 12° (Unnithan и др., 2001). Наклонный градиент вдоль восточной окраины возможно отражает уменьшение влияния гляцио-морских процессов в южном направлении (Readman et al., 2000). Это уменьшение влияния выражается в форме оползневых тел и увеличении отложений осадков, так как окраина становится, истощена осадками в южном направлении. Эти изменения приведены ниже, последовательно от севера к югу.

На севере (56° N, вдоль гляцио-морского конуса выноса Donegal), где батиметрические градиенты наклона минимальны, отсутствуют система каньонов и крутых откосов. Мозаика ГЛБО определяет сложные «скользящие потоки» (Рис. 2).

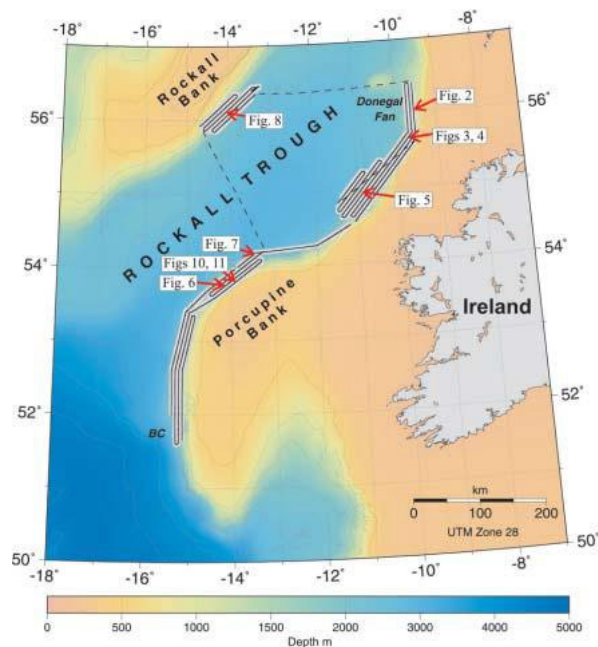


Рис. 1 Маршрутная карта для ГЛБО и 3.5 kHz съемок (пунктирные линии – только 3.5 kHz съемка) по Ирландскому сектору синеклизы Rockall. BC – каньон Вропа. Контуры батиметрии (GEBCO97) с 500 м интервалом.

Обычно, это соответствует результату ограничивающегося потока обломочного материала или сфокусированного переноса по дну отложений со склонов через подножье бассейна.

Далее к югу (55° N) обнаруживаются затейливые серии подводных каньонов и типичны параллельные откосы, образованные оползнями (Рис. 3). Комплексы каньонов состоят из стеблевидных U-образных глубоких оврагов, объединенных в единую систему V-образных каналов в верхней части откоса (Рис. 4), что является первоначальным материалом для сложных серий отложений на склоне. Все это покрывают отдельные акустически прозрачные тела, проинтерпретированные как верхнеплейстоценовые / голоценовые отложения потоков обломочного материала (Рис. 5). Корреляция между малоглубинным ГЛБО и более глубинным эхо-сигналом профилографа 3.5 кГц является точной для этого района. Это предполагает, что процессы осадочных потоков, сформировавших эти отложения, были более динамично устойчивы, чем на севере. В районах, где недавняя переработка осадочного материала изменила верхнюю часть отложений (до 1 м), связь между изображением обратного рассеивания (от 1 см до метра) и эхолотом будет различаться.

На юге (с 54° N) система каньонов менее сложна и состоит из глубоко изрезанных V-образных каналов, которые сближаются со всего бассейна на нижнем склоне. Это выражено в V-образном рисунке на картах обратного рассеивания. Эти сильно изрезанные каналы становятся глубоко погребенными, так как их оси меняют свой наклон и ориентируются параллельно в сторону верхнего склона (Рис. 6). Изменение ориентации осей, возможно, находится под контролем более древних разломов по окраинам бассейна. Осадки во впадины поступают по каналам вдоль восточной окраины бассейна и связаны с областями высоких значений обратного рассеивания звука, простирающимися с середины до нижней части склона, где выходят обнажения горных пород

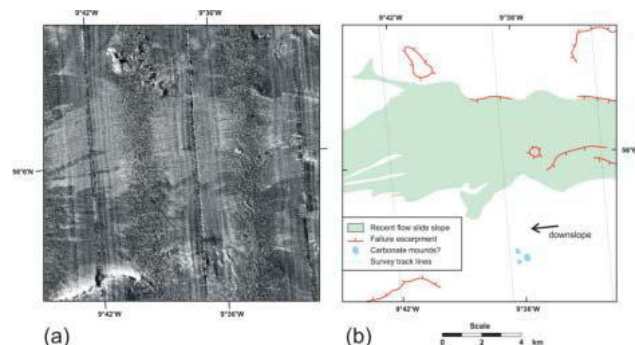


Рис. 2 (а) сонограмма ГЛБО верхней и средней части склона. Языки высоких значений обратного рассеивания (светлые) определяют границы недавних потоков через южное окончание ледникового конуса выноса Donegal. (б) Интерпретация сонограмм ГЛБО. Изменения в значениях обратного рассеивания звука показывают слабую корреляцию с 3.5 kHz данными. Это говорит о том, что акустическая структура очень приповерхностная и, возможно, осадочная система была очень неустойчива и пути перемещения осадков сильно менялись.

(возможно, верхнемеловые отложения мела, по данным отбора керна), появившихся на поверхности после оползней. Эти области оползней покрывают листовидные турбидитные отложения (Рис. 7).

Аналогичные области с высокой интенсивностью обратного рассеивания иногда образуют подходящую основу для образования и роста карбонатных куполов (O'Reilly et al., 2004). Значит, можно предположить, что оползни, «обнажившие» стратиграфические слои древнее, чем время образования куполов. Восточная окраина

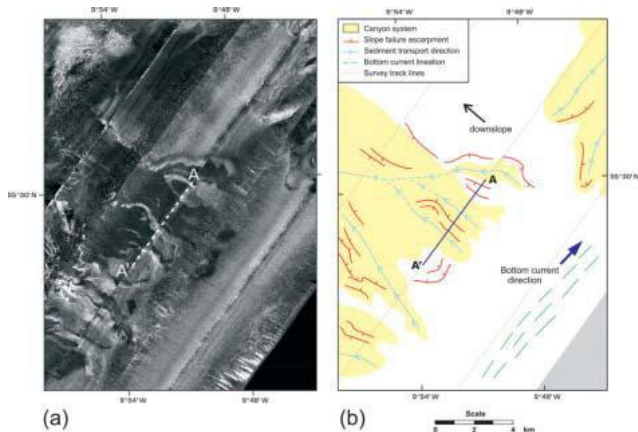


Рис. 3 (а) мозаика ГЛБО системы каньонов, состоящей из U-образных глубоких оврагов, питающих V-образный канал, глубоко проникающий по склону. Профиль 3.5 kHz обозначен A-A' и показан на Рис. 4. (b) интерпретация мозаик ГЛБО. Стеблевидные объекты в области главной стены каньона образованы гравитационным оползнем ледниковых отложений с крутых областей бровки шельфа на верхние части склона. Это сползание образует отложения потоков (турбидитные и грязевые потоки), которые рассекают V-образные каналы на верхней и средней части склона.

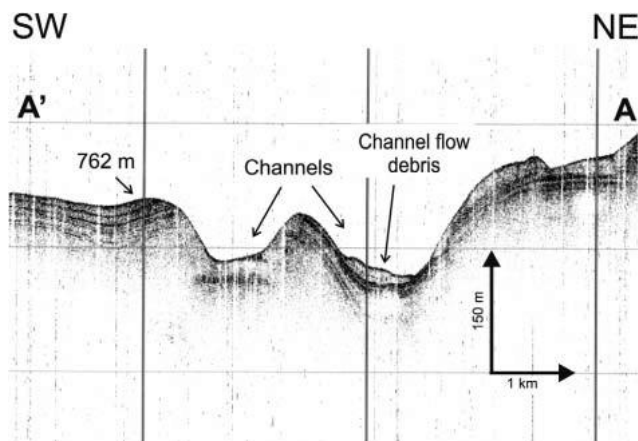


Рис. 4 Профиль 3.5 kHz, изображающий U-образные овраги, прорезанные в поддонной структуре. Границы отдельных оврагов определяются по резким зубчатым уступам. Обратите внимание на прорезание поддонной структуры и на уступ от оползня на северном окончании профиля. На Рис. 3 указаны положения профиля и соответствующие мозаики ГЛБО.

синеклизы Rockall больше всего страдает от осадков на юге, так как уменьшается поступление гляциологических осадков в бассейн в район большой системы каньонов (далее по тексту название Brona Canyon обозначается BC на Рис. 1).

Каньоны, основные образования вдоль восточной окраины, отсутствуют на западной окраине (по крайней мере, в зонах, обхваченных исследованиями см. Рис. 1). Оползни были образованы фрагментарным отслаиванием мелкодисперсных осадков от боковых стенок зон отслаивания вдоль склона (Рис. 8). Поступательное движение осадков вниз по склону, в отличие от вращательного сползания, было основной причиной сползания. Такой тип сползания, с похожими значениями интенсивности обратного рассеивания,

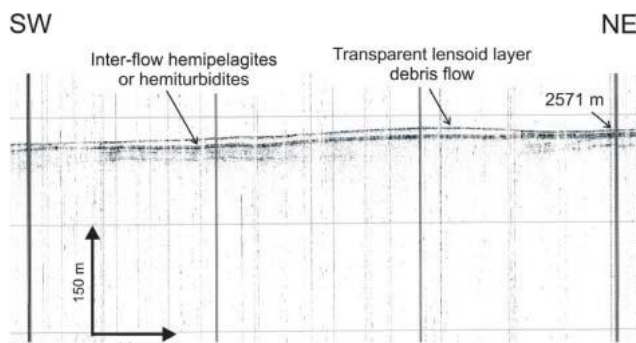


Рис. 5 3.5 kHz профиль через линзовидный фрагмент мутяевого потока. Фрагмент осадков акустически прозрачен, без признаков внутренней структуры. Это говорит о том, что здесь был один поток. Отложения покрывают очень тонкий, но ощутимый слой (турбидиты), который разделяет отложения от мутяевых потоков.

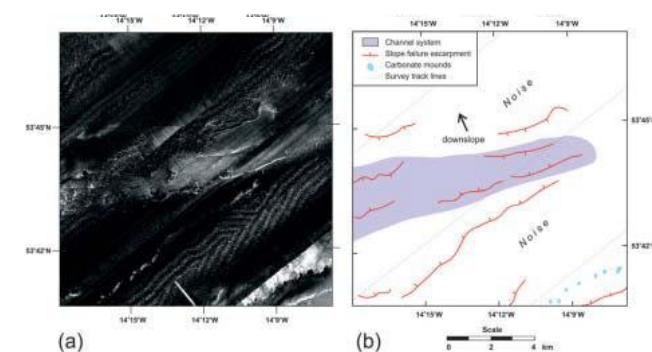


Рис. 6 (а) Мозаика обратного рассеивания ГЛБО

частично погребенного каньона на верхней части склона берега Roscirine. Ось каньона параллельна батиметрическим контурам, но становится параллельна слону ближе к нижней части склона (не показано на данном рисунке). Это изменение может быть вызвано нормальной системой разломов, параллельной окраине бассейна. (Зигзаги обусловлены электронным шумом). (b) Интерпретация погребенного канала. Из-за частично погребенных уступов канала, рельеф определяется по линейному продолжению выдержанных областей высоких значений обратного рассеивания.

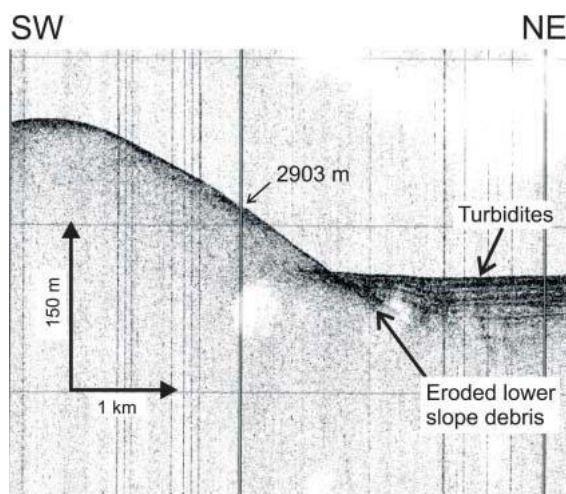


Рис. 7 3.5 kHz профиль, изображающий покрывающую толщ из тонкослоистых турбидитных фаций над бугристой кровлей нижней части склона. Турбидиты покрывают эрозионные отложения мутьевых потоков на нижней части склона.

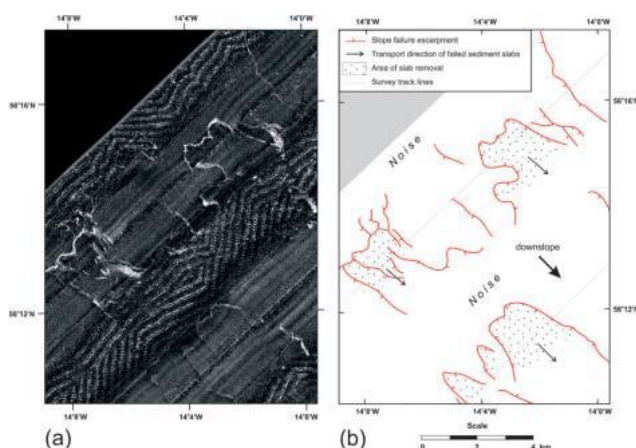


Рис. 8 (a) мозаика ГЛБО, показывающая пластовый оползень на восточной стороне берега Rockall Bank. Шов, выделяющийся светлой областью обратного рассеивания, определяет торцовую стенку оврага. Регулярные зигзагообразные параллельные линии на северо-востоке и в центре рисунка являются результатом шума от корабля (изменено по Shannon et al., 2001). (Обратите внимание, что зигзаги также соответствуют электронному шуму.) (b) Интерпретация изображений ГЛБО. Область торцовой стенки склона скорее всего была сформирована фрагментарным пластовым оползнем мутьевых отложений по склоны.

также выделяются вдоль восточной окраины синеклизы, особенно вдоль берега Porcupine. Свидетельства вращательного скольжения и сползания по склону очень редки. Запечатанные фрагменты обнажений на мозаиках ГЛБО (особенно на восточной окраине синеклизы, где распространены осадки и мелкодисперсные отложения) возможно образованы многочисленными

оползнями. Относительная заостренность этих структур, несмотря на наличие эрозии, позволяет сделать предположение о том, что многие из них исторически молодые. Недавно зарегистрированные (1999 и 2000) землетрясения с магнитудой более 2 в синеклизе Rockall (см. Рис. 9), записанные Ирландской сейсмической сетью (Jacob, 1993), могут иметь отношение к оползням. Тем не менее, как частотное, так и магнитудное распределение землетрясений за долгий период времени, периодичность землетрясений с различными магнитудами в изучаемом регионе в настоящее время неизвестны. Это затрудняет понимание относительной важности климатических и тектонических процессов в образовании оползней.

Современные донные образования

Свидетельства современной сильной, ранее замеченной (Kenyon, 1986), циркуляции в направлении, обратном движению часовой стрелки, существуют и особенно заметны на нижних и верхних склонах восточной и западной окраин синеклизы. На восточной окраине, прилежащей к берегу Rockall, продольная форма ложа определяет юго-западное направление течений, но при этом на восточной окраине синеклизы скопления карбонатных построек (Рис. 10) препятствуют сильному северному течению. Форма дна и современная ориентировка определяют одинаковый режим течения вдоль верхней и средней частей склона (Рис. 3). Также имеются признаки сильного течения через верхнюю часть склона до глубины 1000 м и в основании склона.

Кажется, что биологически-продуктивные части континентального

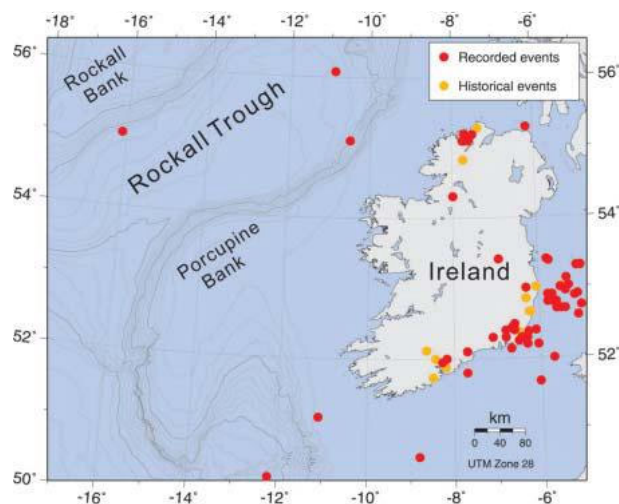


Рис. 9 Карта, показывающая землетрясений (красные круги) в районе Ирландии, записанные сейсмической сетью DIAS seismic network с 1980. Магнитуды (по шкале Рихтера) поднимались до 3.2 M_L . Исторические землетрясения (оранжевые круги) также показаны. Недавние события в синеклизе Rockall в точках 55.1°N, 10.5°W и 55.04°N, 16.1°W имеют магнитуды 2.7 и 3.2 M_L , похожие на остальные землетрясения в этой области.



склона связаны с сильными придонными течениями. Например, форма дна вокруг отдельного скопления большой численности на восточной окраине синеклизы (Рис. 10) позволяет сделать вывод о том, что интенсивное северо-восточное течение со скоростью (Рис. 11) с 0.5 до 1.0 мс⁻¹ перемещает высокопористые отложения песка (см. O'Reilly и др., 2003). В недавнем времени была сформулирована модель развития этого скопления, состоящего из 140 отдельных построек, которая показывает, что с Плейстоцена по Голоцен изменение климата и связанные с этим океанографические процессы, как то изменение уровня моря и основные подводные оползни, имели сильное воздействие на рост и уплотнение колоний всей популяции (O'Reilly и др., 2004).

Обсуждение и заключение

Весь набор данных TRIM представляет собой отличный пример того, как строение малоглубинных осадочных фаций и морфология склона развивается и взаимодействует в глубоководном бассейне, который является обширной переходной зоной между окраинами, подвергшимся и неподвергшимся оледенению. На севере, влияние оледенения было подавляющим на плейстоценовый конус выноса Donegal (см. Рис. 1), где

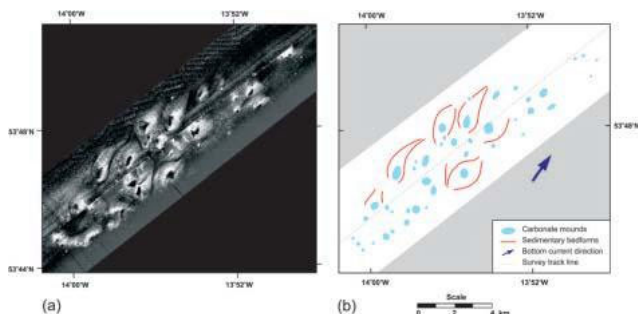
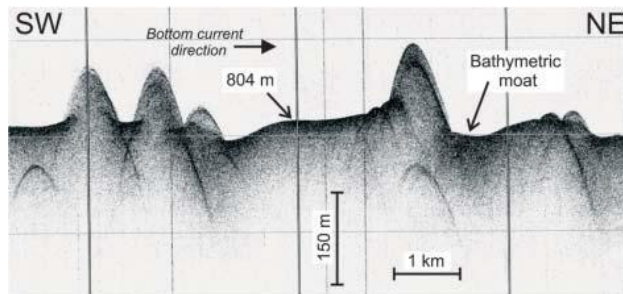


Рис. 10 (а) Мозаика ГЛБО, изображающая скопление карбонатных построек на глубинах от 700 до 900 м на восточной окраине Rockall. Заметьте, что хвосты осадков удлинены с одной стороны построек, что говорит о юз-св направлении течения. (б) Интерпретация скопления карбонатных построек по мозаике ГЛБО.



показанные на Рис. 10. Заметьте, что батиметрические углубления на северо-восточной окраине наибольшей постройки являются признаками северо-восточного направления сильного течения (стрелка указывает современное направление течения).

региональный уклон более крутой (Unnithan и др., 2001), система стеблевидных оврагов обычно образуется в результате гравитационного сжатия мелкодисперсных осадков, периодически покрывающихся наступающими и отступающими ледниками. Приток ледниковых осадков был, возможно, спровоцирован палеоклиматическими вариациями на севере в плейстоценовую эпоху.

Различная морфология системы каньонов далее к югу, где каналы глубоко врезаны в плотные осадки и горные породы, позволяет делать вывод о том, что они частично контролируются тектоническими процессами и разломами в кайнозой или раньше. Система каньонов, возможно, была активной в период поднятия окраин бассейна и позднее была затоплена быстрым опусканием бассейна в позднем палеогене, которое недавно было выявлено на восточной окраине бассейна Rockall (Haughton et al., 2005). Позднее, они могли выступать в роли пути перемещения для плейстоценовых ледниковых осадков и для осадков, перемещаемых сильным течением в голоцене, относящемся к образованию карбонатных построек (O'Reilly et al., 2003). Дальнейшие исследования, такие как проведение высокоразрешающей 2D сейсмической съемки и отбор образцов с выявленных структур, требуются для проверки этих суждений.

Благодарности

При создании этой публикации использовались данные и результаты съемки, проведенной при совместном проекте Rockall Studies Group (RSG) of the Irish Petroleum Infrastructure Programme Group 2. Группа RSG состояла из: Agip (UK) Ltd, Anadarko Ireland Company, ARCO Ireland Offshore Inc, BG Exploration & Production Ltd, BP Exploration Operating Company Ltd, British-Borneo International Ltd, Elf Petroleum Ireland BV, Enterprise Energy Ireland Ltd, Mobil Oil North Sea Ltd, Murphy Ireland Offshore Ltd, Phillips Petroleum Exploration Ireland, Saga Petroleum Ireland Ltd, Shell EP Ireland B.V., Statoil Exploration (Ireland) Ltd, Total Oil Marine plc, Union Texas Petroleum Ltd and the Petroleum Affairs Division of the Department of the Marine and Natural Resources. Выражается большая благодарность опыту и здоровому чувству юмора команды ГЛБО из Southampton Oceanography Centre, и за участие менеджеров и работников R.V. *Pelagia*, за успешное проведение проекта. Благодарим Neil Kenyon за обсуждения и интерпретацию мозаик ГЛБО, как во время, так и после рейса. Мы благодарим анонимных редакторов за полезные предложения. Эта статья имеет порядковый номер GP176 в Геофизическом отделе Dublin Institute for Advanced Studies.

Ссылки

Flewelling, C.G., Millard, N.W., and Rouse, I.P. [1993] TOBI, a vehicle for deepocean survey, *Electronic and Communication Engineering Journal* 5, 85-93.

- Jacob, A.W.B. [1993] Seismic Hazard in Ireland. In Robin K. McGuire (ed) *The Practice of Earthquake and Hazard Assessment*. International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior and European Seismological Commission, 150-152.
- Haughton, P., Praeg, D., Shannon, P.M., Harrington, G., Higgs, K., Amy, L., Tyrrell, S., and Morrissey, T. [2005]. First results from shallow stratigraphic boreholes on the eastern flank of the Rockall Basin, offshore western Ireland. In: Dore, A.G. and Vining, B. (eds) *Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives - Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference*. Geological Society, London, 1077-1094.
- Kenyon, N.H. [1986] Evidence from bedforms for a strong poleward current along the upper continental slope of NW Europe. *Marine Geology* **72**, 187-198.
- O'Reilly, B.M., Readman, P.W., Shannon, P.M., and Jacob, A.W.B. [2003] A model for the development of a carbonate mound population in the Rockall Trough based on deep-towed sidescan sonar data, *Marine Geology* **198**, 55-66.
- O'Reilly, B.M., Readman, P.W., and Shannon, P.M. [2004] Cold-water coral mounds: Evidence for early Holocene climate change and slope failure, *Geophysical Research Letters* **31**, No.7, L07204 10.1029/2003GL018619.
- Readman, P.W., O'Reilly, B.M., Shannon, P.M., Jacob, A.W.B., Kenyon, N.H., and Blake, T.A. [2000] Changes in slope failure style along the eastern margin of the Rockall Trough revealed by TOBI sidescan data, American Geophysical Union 2000 Fall Meeting, San Francisco, December 2000. *Eos, Trans AGU* **81**, (48), F761.
- Shannon, P.M., O'Reilly, B.M., Readman, P.W., Jacob, A.W.B., and Kenyon, N. [2001] Slope failure features on the margin of the Rockall Trough. In: Shannon, P.M., Haughton, P.D.W. & Corcoran, D.V. (eds) *The Petroleum Exploration of Ireland's Offshore Basins*. Geological Society, London, Special Publication **188**, 445-464.
- Unnithan, V., Shannon, P.M., McGrane, K., Readman, P.W., Jacob, A.W.B., Keary, R., and Kenyon, N.H. [2001]. Slope instability and sediment re-distribution in the Rockall Trough: constraints from GLORIA. In: Shannon, P.M., Haughton, P.D.W. and Corcoran, D.V. (eds) *The Petroleum Exploration of Ireland's Offshore Basins*. Geological Society, London, Special Publication **188**, 439-454.