

## ПРИЗНАКИ НОВЕЙШИХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ НА ЛАПТЕВОМОРСКОЙ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОКРАИНЕ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

канд. геол.-минерал. наук П.В.РЕКАНТ<sup>1,2</sup>, канд. геол.-минерал. наук Е.А.ГУСЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> – ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, e-mail: gus-evgeny@yandex.ru

<sup>2</sup> – Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

*В статье приводятся новые данные о признаках новейших тектонических движений на Лаптевоморской континентальной окраине, полученные в результате интерпретации сейсмоакустических данных. Установлены как прямые данные о наличии неотектонических движений на Лаптевоморской континентальной окраине в виде современных дизъюнктивов, так и косвенные данные в виде зон разгрузок газовых флюидов, подтверждающие их наличие. Несмотря на широкое распространение разломов в нижней части осадочного чехла, лишь некоторые из них проникают в толщу четвертичных отложений, что фиксируется на сейсмоакустических профилях.*

*Ключевые слова:* море Лаптевых, неотектоника, сейсмоакустические данные, зоны разгрузки, газовые флюиды.

### ВВЕДЕНИЕ

Шельф моря Лаптевых находится в районе центриклинального замыкания Евразийского суббассейна Северного Ледовитого океана, где наблюдается окончание срединно-океанического хребта Гаккеля. Эта часть Евроазиатской континентальной окраины характеризуется повышенной сейсмичностью [1, 2], эпицентры современных землетрясений фиксируются не только в глубоководных океанических котловинах, но и на шельфе моря Лаптевых.

Обычно геоморфологические особенности современного рельефа и распределение современных морских осадков определяются режимом новейших вертикальных и горизонтальных движений земной коры. Знак вертикальных неотектонических движений (НТД) связан как с морфологией образующихся новейших структур поднятия/опускания, так и с кинематикой образующихся новейших разломов.

Строение Лаптевоморской континентальной окраины определяется сопряжением рифтогенных прогибов шельфа с тектоническими структурами флексурно-разломной зоны континентального склона и гребневой зоны хребта Гаккеля. Складчатый фундамент и осадочный чехол шельфовых прогибов нарушены многочисленными разломами [3, 7, 8, 9]. Наиболее распространены на Лаптевоморском шельфе структуры растяжения со сбросами, направленными от горста к прогибу, вместе с тем встречаются и инверсионные структуры, в строении которых сбросовые нарушения направлены от прогиба к горсту [4]. Так или иначе, большинство разломов по сейсмическим данным не проникает в верхнюю часть осадочного чехла, что позволяет сделать предположение о том, что эти разрывные нарушения в настоящее время не активны, что подтверждается и значительной выровненностью современного рельефа шельфа моря Лаптевых. Редкие случаи проявления новейших разломов на Лаптевоморском шельфе рассматриваются в данной статье.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Современные методики высокоразрешающего сейсмоакустического профилирования позволяют получать разрезы с вертикальным разрешением до 20–30 см. Однако Лаптевоморский шельф имеет крайне неблагоприятные для сейсмоакустиче-

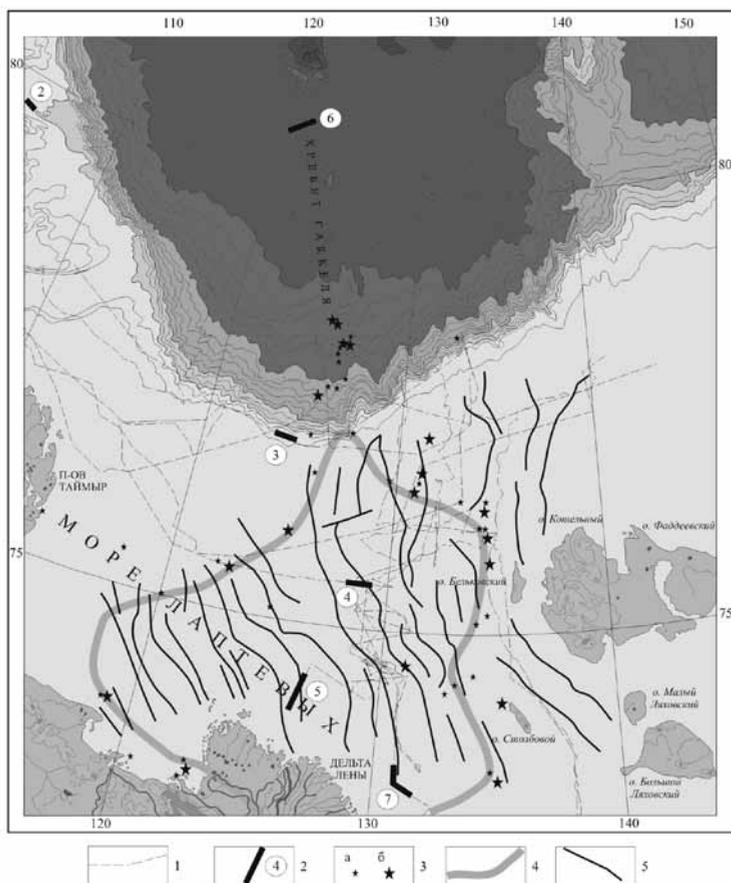


Рис. 1. Схема расположения сейсмоакустических профилей в районе исследований. Звездочками обозначены эпицентры землетрясений. 1 – положение сейсмоакустических профилей; 2 – положение фрагментов профилей, приведенных в тексте; 3 – эпицентры землетрясений (приведено по [1]): а – с магнитудой менее 5; б – с магнитудой более 5; 4 – граница Лаптевской микроплиты (приведено по [1]); 5 – разломы в осадочном чехле и фундаменте, выделенные по сейсмическим данным, по [7]

ского профилирования геологические условия, резко ухудшающие качество сейсмической записи. Наличие расположенного близко к поверхности дна слоя акустически звонких, предположительно мерзлых осадков [12] практически полностью блокирует проникновение высокочастотного сигнала глубже 20–40 м. К моменту написания данной статьи на Лаптевоморском шельфе получено более 7000 км сейсмоакустических профилей, покрывающих региональную сеткой большую часть акватории (рис. 1). В основном это данные высокочастотного профилирования полученного в 1993, 1995, 1998 гг. в рамках международных экспедиций на борту ледокола «Полярштерн» [18, 19, 20], а также в 2004 г. на борту г/с «Яков Смирницкий» [12]. Эти данные и были положены в основу данной статьи.

В 1993, 1995 и 1998 гг. непрерывное сейсмоакустическое профилирование проводилось сейсмоакустической аппаратурой «Парасаунд», вмонтированной в днище ледокола «Полярштерн». Излучатель данного акустического комплекса возбуждает две волны с частотами между 18 и 23,5 кГц и с узким лучом диаметром 4°. В результате интерференции между ними в водной толще, за счет параметрического

эффекта создается вторичная частота, которая составляет 4 кГц. Это обеспечивает проникновение акустического сигнала в толщу донных осадков до 100 м при разрешающей способности до 30 см. В ходе трех экспедиций в море Лаптевых было получено более 5000 км профилей высокоразрешающей сейсмоакустики, охватывающих в основном внешнюю и центральную часть шельфа (рис. 1) [18, 19, 20].

В 2004 г. в ходе российско-германской экспедиции «Трансдрифт-Х» работы проводились в южной части моря Лаптевых в районе, расположенном к востоку и северу от дельты р. Лены, затем работы были сконцентрированы на детализационном полигоне к западу от Васильевской банки, где были пройдены еще 19 параллельных профилей длиной по 8–11 км каждый. Профили были ориентированы с северо-запада на юго-восток и располагались на расстоянии около 400 м друг от друга [12]. Работы проводились при помощи сейсмоакустического комплекса «Соник-М141», сконструированного и собранного во ВНИИОкеангеология. Этот аппаратный комплекс состоит из высокочастотного профилографа и сонара бокового обзора, смонтированных в едином буксируемом аппарате. Рабочая частота профилографа может изменяться в широких пределах от 1,4 до 14 кГц, что в совокупности с мощным (до 10 кВт) выходным сигналом достаточно для просвечивания разреза мощностью до 30–40 м при вертикальном разрешении не хуже 20–30 см.

Интерпретация сейсмоакустических данных проводилась в среде программного пакета *The Kingdom Suite* (ver. 7.6). Основные горизонты и сейсмofации были закартированы и затем экспортированы в среду программы *Surfer* (ver. 8.0) для объемного моделирования и реконструкции.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Первая информация о повышенной сейсмичности Лаптевоморской континентальной окраины появилась с началом периода инструментальных измерений в начале XX в. С тех пор данной тематике посвящен ряд работ как отечественных, так и зарубежных исследователей. Наиболее полно информация о распространении эпицентров землетрясений в Лаптевоморском регионе представлена в работах Г.П.Аветисова [1, 2]. По его данным, локализация эпицентров землетрясений в регионе не случайна. Анализ информации по сейсмическим событиям с магнитудой более 4 позволил этому автору высказать предположение о существовании в центральной части шельфа Лаптевской микроплиты (ЛМП), обособленной от прилегающих областей сейсмоактивными зонами с преобладанием нормально сбросовых движения в них. Наиболее уверенно прослеживаются ее северная, восточная и южная границы, менее надежно — западная. Очевидно, что в целом ЛМП, окруженная со всех сторон достаточно активными сейсмическими зонами, должна испытывать значительные тектонические нагрузки, которые могут разряжаться в ослабленных зонах внутри микроплиты [2]. Именно к восточной, южной и северной границам ЛМП приурочено подавляющее большинство эпицентров землетрясений.

Логично было бы предположить, что наличие значительного числа современных тектонических событий должно было бы найти свое отражение в приповерхностной части геологического разреза и особенно на сейсмоакустических профилях.

Непосредственными признаками новейших тектонических движений в сейсмоакустической волновой картине являются резкие смещения как отдельных сейсмических рефлекторов, так и целых сеймопачек в составе современных сеймокомплексов осадков. Единственным типом разрывных нарушений, которые можно непосредственно идентифицировать по сейсмоакустическим данным, являются нормальные сбросы с вертикальной амплитудой, превышающей разрешающую способность сейсмоакустических методов. Сбросы обычно выражены в виде уступов в современном рельефе морского дна (рис. 2).

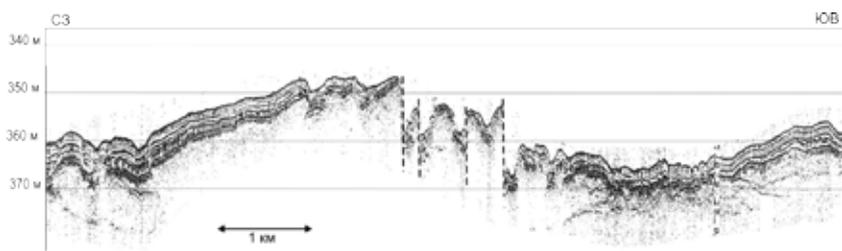


Рис. 2. Разрывные нарушения, смещающие слоистые четвертичные отложения, залегающие на акустически прозрачных позднекайнозойских породах на шельфе моря Лаптевых, к востоку от архипелага Северная Земля

Местоположение показано на рис. 1

По разломам, которые являются ослабленными зонами, активно развиваются эрозионные процессы. Яркой иллюстрацией этого являются верховья подводных каньонов, врезанных в прибрежной части Лаптевоморского континентального склона (рис. 3) в центральной части шельфа.

Попытки оценить и закартировать сеть неотектонических нарушений предпринималась и ранее. Так, С.С. Драчевым [16] было высказано предположение о широком развитии неотектонических дислокаций (НТД) в центральной части Лаптевоморского шельфа. По его мнению, последние нашли свое выражение в сериях асимметричных уступов, выраженных в современном рельефе морского дна с амплитудами вертикальных смещений в первые метры. Однако более пристальный анализ этих же сейсмоакустических данных в среде интерпретационного пакета *The Kingdom Suite* показал, что указанные объекты являются выступами более плотных отложений, предположительно мерзлых, разделенных ложбинами с крутыми склонами, и не связаны с дизъюнктивными нарушениями в верхней части осадочного чехла (рис. 4).

Часто новейшие разломы являются унаследованными от более древних дизъюнктивных структур и имеют глубинные корни. Такие разломы хорошо читаются как на глубинных сейсмических профилях МОВ ОГТ, так и на сейсмоакустических профилях. Иллюстрацией одного из таких разломов является сброс, зафиксированный на сейсмических и сейсмоакустических профилях в южной части Лап-



Рис. 3. Верховья подводных каньонов Лаптевоморского континентального склона, заложенные по новейшим разломам

Местоположение показано на рис. 1

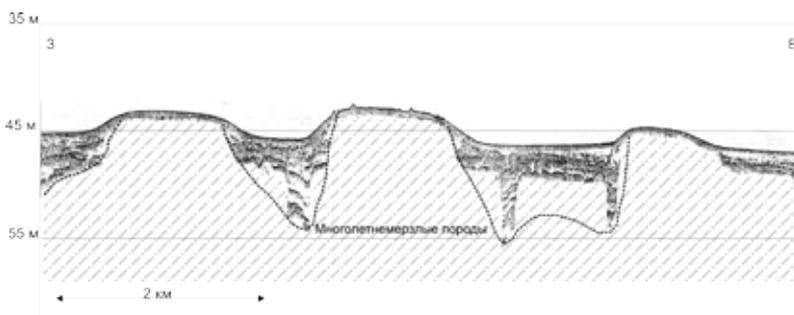


Рис. 4. Фрагмент сейсмоакустического профиля, иллюстрирующий характерный облик кровли ММП в районе Столбовой банки

Выступы деградирующей криолитозоны чередуются с глубокими термокарстовыми озерными воронками. Местоположение показано на рис. 1

тевского шельфа и выраженный в современном рельефе в виде невысокого уступа (рис. 5). Интересно, что вертикальная амплитуда смещения по сбросу на глубине около 2 км по одному из рефлекторов на профиле МАГЭ 86715 составляет около 900 м (рис. 5 в), в то время как по сейсмоакустическим данным (рис. 5 а, б) амплитуда составляет первые метры. Простираение большинства новейших разломов на шельфе из-за недостаточного количества сейсмоакустических профилей определить пока невозможно. Но унаследованность некоторых из них дает основание предполагать их северо-западное и северо-северо-западное простираение, как и для глубинных разломов шельфа моря Лаптевых [7, 8].

Наиболее распространены новейшие разломы у подножия континентального склона в месте окончания срединно-океанического хребта Гаккеля. Здесь, в бортовой части рифтовой долины (рис. 6) фиксируется ступенчато-боковое строение океанского дна, границами блоков являются многочисленные сбросовые нарушения. Кроме того, по новейшим разрывам в гребневой зоне хребта Гаккеля развиты интрузии, представляющие собой штокообразные тела, прорывающие слоистую толщу осадков и выходящие на поверхность дна. Простираение разрывных нарушений в рифтовой долине и гребневой зоне хребта, скорее всего, соответствует ориентировке неровностей рельефа.

Еще одним косвенным признаком развития НТД на Лаптевоморском шельфе могут служить некоторые из более чем ста закартированных структур разгрузки газовых флюидов в плейстоцен-голоценовых осадках. Было установлено, что на шельфе моря Лаптевых кроме структур газовой разгрузки, образованных за счет высвобождения аутигенного газа в процессе деградации криолитозоны, выделяются и картируются узконаправленные зоны газового просачивания (т.н. сиппинга), связываемые нами с участками нарушения сплошности толщи кайнозойских осадков (рис. 7). В отличие от первых двух, достаточно обширных (от 100 м до нескольких км шириной) акустически мутных зон нарушения корреляции, развитых под речными палеодолинами и термокарстовыми котловинами, последний тип представляет достаточно узкие зоны направленной разгрузки газовых флюидов. Мы предполагаем, что источником газовых проявлений в таких зонах могут служить более глубокие горизонты геологического разреза, а путями миграции – зоны разрывных нарушений. К сожалению, преобладание зон разгрузок первых двух типов значительно усложняет задачу идентификации зон газового сиппинга, связываемого с НТД.

Обращает на себя внимание тот факт, что расположение части зон разгрузки газовых флюидов хорошо коррелирует с северной и восточной границами выделенной

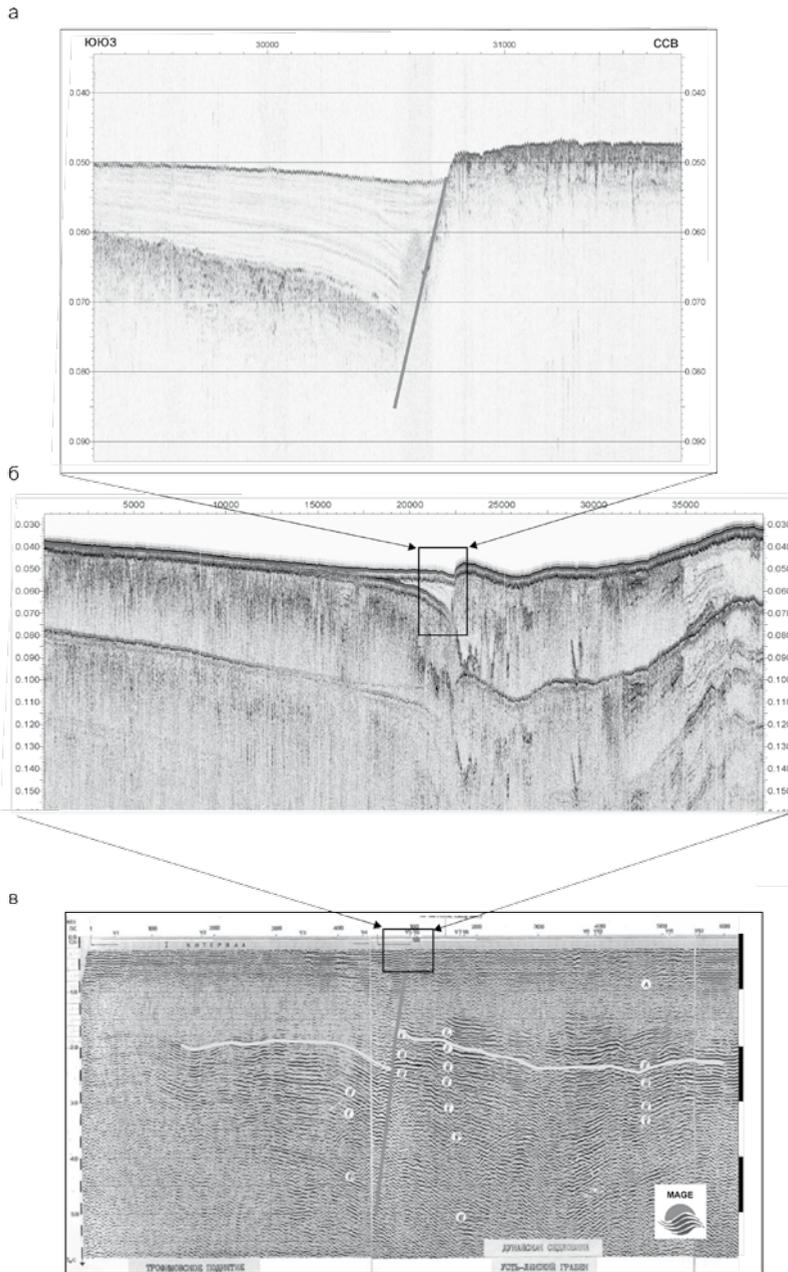


Рис. 5. Новейший разлом в южной части Лаптевоморского шельфа, зафиксированный: *a* – профилографом (3,5 кГц), *б* – высокочастотной сейсмоакустической системой (частота источника 400 Гц), *в* – многоканальной низкочастотной сейсмической системой МОВ ОГТ (профиль МАГЭ 86715)

На рис. 5 *a* отчетливо наблюдается зона концентрированной разгрузки флюидов в непосредственной близости от разлома. Местоположение показано на рис. 1. Вертикальный масштаб приведен в секундах двойного времени пробега волны (ТWT), горизонтальный масштаб в метрах

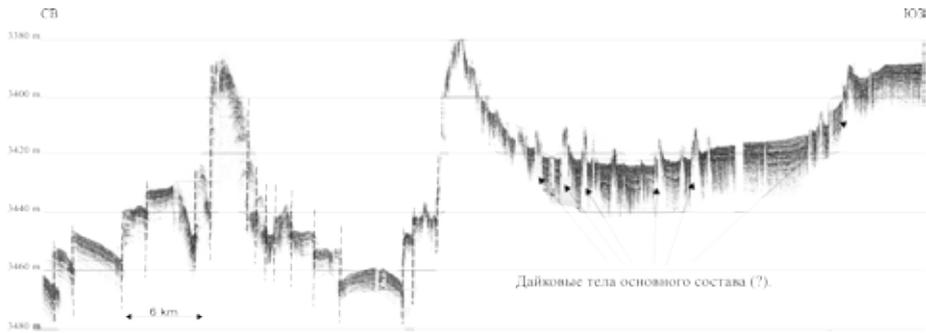


Рис. 6. Фрагмент сейсмоакустического профиля, иллюстрирующего выходы на поверхность дна в районе рифтовой долины хребта Гаккеля пород дайкового комплекса, прорывающих осадочный чехол

Борта рифтовой долины нарушены многочисленными сбросами. Местоположение показано на рис. 1

Г.П.Аветисовым ЛМП. Частичная же нестыковка этих результатов может быть легко объяснена отсутствием надежных сейсмоакустических данных в западной части ЛМП.

Некоторое количество косвенной информации о наличии НТД в регионе было получено в ходе изучения субаквальной криолитозоны Лаптевоморского шельфа по сейсмоакустическим данным.

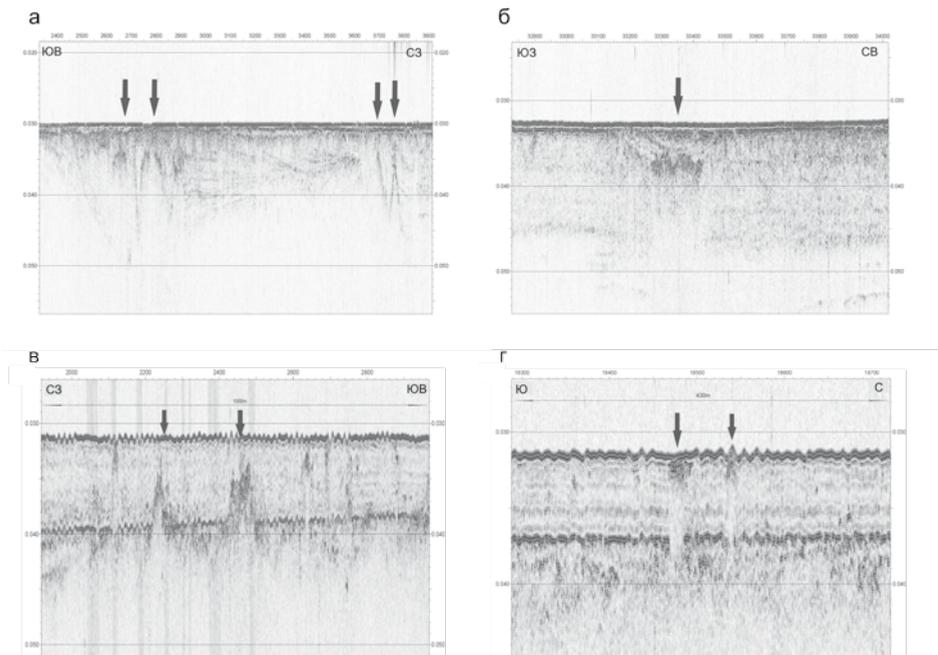


Рис. 7. Фрагменты сейсмоакустических профилей, иллюстрирующие участки концентрированной разгрузки газовых флюидов (стрелки) в южной части моря Лаптевых

Местоположение показано на рис. 1. Вертикальный масштаб приведен в секундах двойного времени пролета волны (TWT), горизонтальный масштаб в метрах

Как известно, криолитозона на Лаптевоморском шельфе является реликтовой. Ее образование большинство исследователей [5, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17 и др.] относят к периоду позднеплейстоценовых регрессий, когда весь Лаптевоморский шельф вплоть до его бровки был осушен и подвергался активному промерзанию. В результате была сформирована мощная континентальная толща многолетнемерзлых пород (ММП), затопленная снова в ходе голоценовой трансгрессии. После чего начался процесс ее деградации. На большей части Лаптевоморского шельфа ММП перекрыты достаточно выразительным слоем современных осадков, состоящих в основном из голоценовых морских, аллювиальных, а также таберальных отложений. Последние образуются за счет разрушения и протаивания мерзлых осадков и на сейсмоакустической записи представляются бесструктурной неслоистой сейсмотолщей. Однако в центральной части шельфа, в западной части ЛМП установлено поднятие морского дна, где ММП предполагаются непосредственно у поверхности морского дна и не перекрыты слоем современных осадков. Кровля ММП здесь представляет холмистую поверхность, разделенную впадинами, заполненными акустически слоистыми осадками. Отсутствие следов разрушения кровли ММП *in-situ*, а именно таберальных осадков, может косвенно свидетельствовать о постепенном подъеме данной области шельфа, размыве и выносе продуктов разрушения ММП за пределы данного поднятия. В морфоструктурном плане описанное выше поднятие ограничено с востока и запада хорошо выраженными в современном рельефе палеорулами р. Лены. Как известно, речные долины часто приурочены к разломам, поскольку эрозионные процессы наиболее активно протекают в тектонически ослабленных зонах. С этой точки зрения ограниченность описанного выше поднятия речными палеодолинами также может косвенно указывать на подъем данного блока земной коры.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ввиду слабой сейсмоакустической изученности шельфа моря Лаптевых не представляется возможным дать полную картину распространения новейших разломов в регионе, однако даже то количество, которое зафиксировано на имеющихся профилях, дает представление об их проявлении.

Анализ сейсмоакустических профилей как наиболее информативных данных дает как прямые данные о наличии НТД на Лаптевоморской континентальной окраине в виде современных дизъюнктивов, так и косвенные данные, подтверждающие наличие НТД в виде зон разгрузок газовых флюидов. Кроме того, предполагаемый по сейсмоакустическим и геоморфологическим данным воздымающийся блок земной коры в центральной части шельфа хорошо коррелирует с ЛМП, выделяемой Г.П.Аветисовым по данным анализа сейсмических событий в регионе.

Несмотря на широкое распространение разломов в нижней части осадочного чехла, лишь некоторые из них проникают в четвертичные отложения, что фиксируется на сейсмоакустических профилях. Как было показано, новейшие разломы приурочены к узким зонам, совпадающим с районами проявления современных землетрясений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветисов Г.П.* Еще раз о землетрясениях моря Лаптевых // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2000. Вып. 3. С. 104–114.
2. *Аветисов Г.П.* О границах литосферных плит на шельфе моря Лаптевых // ДАН. 2002. Т. 385. № 6. С. 793–796.
3. *Виноградов В.А., Гусев Е.А., Лопатин Б.Г.* Возраст и структура осадочного чехла Восточно-Арктического шельфа России // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2004. Вып. 5. С. 202–212.

4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (новая серия). Лист Т-53-56 (о. Жохова). Объяснительная записка. СПб.: Изд-во картфабр. ВСЕГЕИ, 2005. 118 с.
5. Григорьев М.Н. Морфология и динамика преобразования подводной мерзлоты в прибрежно-шельфовой зоне морей Лаптевых и Восточно-Сибирского // Наука и образование. 2006. № 4. С. 105–109.
6. Гусев Е.А., Зайончек А.В., Мэннис М.В., Рекант П.В., Рудой А.С., Рыбаков К.С., Черных А.А. Прилаптевоморское окончание хребта Гаккеля // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. Вып. 4. С. 40–54.
7. Драчев С.С. Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых // Геотектоника. 2000. № 6. С. 43–58.
8. Драчев С.С. О тектонике фундамента шельфа моря Лаптевых // Геотектоника. 2002. № 6. С. 60–76.
9. Иванова Н.М., Секретов С.Б., Шкарубо С.И. Данные о геологическом строении шельфа моря Лаптевых по материалам сейсмических исследований // Океанология. 1989. Т. 29. Вып. 5. С. 789–795.
10. Куницкий В.В. Криолитозона низовья Лены. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН СССР, 1989. 162 с.
11. Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Тумской В.Е., Холодов А.Л. Криолитозона Восточно-Сибирского Арктического шельфа // Вестник Московского Ун-та. Сер. 4. Геология. 2003. № 4. С. 51–56.
12. Рекант П.В., Гусев Е.А., Тумской В.Е., Швенк Т., Шписс Ф., Черкашев Г.А., Кассенс Х. Распространение и особенности залегания субаквальной криолитозоны в районе банок Семеновская и Васильевская (море Лаптевых) по данным сейсмоакустического профилирования // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития / Отв. ред.: Х.Кассенс, А.П.Лисицын, Й.Тиде, Е.И.Полякова, Л.А.Тимохов. М., 2009 (в печати).
13. Соловьев В.А., Гинзбург Г.Д., Телепнев Е.В., Михальчук Ю.Н. Криотермия и газовые гидраты Северного Ледовитого океана. Л.: Севморгеология, 1987. 150 с.
14. Слагада Е.А. Петрографические особенности современных отложений береговой зоны моря Лаптевых // Исслед. мерзлых толщ и криогенных явлений. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН СССР? 1988. С 11–21.
15. Фартышев А.И. Особенности прибрежно-шельфовой криолитозоны моря Лаптевых. Новосибирск: Наука. 1993. 136 с.
16. Drachev S., Bauch H., Kassens H., Kaul N., Chizhov D., Roudoy A. The Laptev Sea: A Natural Laboratory for Addressing the Processes of Rupture of Continental Lithosphere and their Impact on Natural Environment. EUG XI Abstracts, Symposium RCM7: Tectonics and sedimentation associated with Arctic Margins. 8<sup>th</sup> April – 12<sup>th</sup> April 2001 Strasbourg (France). Cambridge Publication, 2001. P. 756.
17. Hubberten H.-W., Andreev A., Astakhov V.I., Demidov I., Dowdeswell J.A., Henriksen M., Hjort C., Houmark-Nielsen M., Jakobsson M., Larsen E., Lunkka J.P., Lys A., Mangerud J., Mller P., Saarnisto M., Schirmermeister L., Sher A.V., Siegert C., Siegert M.J., Svendsen J.I. The periglacial climate and environment in northern Eurasia during the last glaciation (LGM) // Quaternary Science Reviews. 2004. Vol. 23. P. 1333–1357.
18. Kassens H., Niessen F. Profile of sediment echo sounding during cruise ARK-XIV/1b with links to ParaSound data files, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, PANGAEA, 2004. doi:10.1594/PANGAEA.141225.
19. Niessen F. Profile of sediment echo sounding during cruise ARK-IX/4 with links to ParaSound data files, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, PANGAEA. 2004. doi:10.1594/PANGAEA.206530.
20. Niessen F., Profile of sediment echo sounding during cruise ARK-XI/1 with links to ParaSound data files, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, PANGAEA. 2004. doi:10.1594/PANGAEA.206531.

**THE SEISMIC-ACOUSTIC EVIDENCES OF THE RECENT TECTONICS ON  
THE LAPTEV SEA CONTINENTAL MARGIN**

*New evidence confirming recent tectonic movements at the Laptevs Sea continental margin was obtained by interpretation of high resolution seismic data. This evidence includes both direct and indirect manifestations. Direct ones are observed modern faults, indirect, fluid discharge zones thought to originate from these. Despite the wide occurrence of faults in the lower part of the sedimentary cover, only some of them penetrate the Quaternary sequence, as is seen at seismoacoustic profiles.*

*Key words:* Laptevs Sea, neotectonics, high resolution seismic, gas seepage.