

УДК 550.8

А.А. Шматкова<sup>1</sup>, А.А. Шматков<sup>2</sup>, В.Г. Гайнанов<sup>3</sup>, С. Бенц<sup>4</sup>

## ПРИМЕР ВЫДЕЛЕНИЯ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ МОРСКИХ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИХ ТРЕХМЕРНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В НОРВЕЖСКОМ МОРЕ

Рассмотрены возможности выделения опасных геологических объектов в шельфовой зоне арктических морей на основе трехмерных высокоразрешающих сейсмических наблюдений с системой P-Cable 3D. интерпретация трехмерных данных позволяет получить детальное изображение целевых объектов в пространстве и дает широкие возможности при их картировании. В результате применения трехмерных структурных построений и динамического анализа волновых полей удалось выделить и оконтурить ряд опасных геологических объектов и построить схему распространения зон с разной степенью риска.

*Ключевые слова:* сейсморазведка, геологические опасности, высокоразрешающая трехмерная интерпретация, фьорд.

The article considers the possibility of mapping geohazards in the shelf zone of Arctic seas based on P-Cable 3D high-resolution seismic data. Interpretation of 3D high-resolution seismic data provides a detailed image of g in all dimensions and gives ample opportunities in their mapping. The result of three-dimensional structural imaging and dynamic analysis of wave fields has been the identification and outlining a series of geohazards and obtaining the map of different risk zones.

*Key words:* seismic, geohazards, high-resolution, 3D, interpretation, fjord.

**Введение.** В настоящее время активно ведется освоение шельфа арктических морей. Проведение инженерно-геологических изысканий на разных этапах строительства и эксплуатации инженерных сооружения необходимо не только для комплексного изучения строения верхней части разреза, но и для поиска и идентификации опасных геологических явлений разного рода — разломов, скоплений приповерхностного газа, изменчивости свойств грунтов и т.д. Один из стандартных методов [OGP..., 2011], применяемых при изысканиях, — многоканальная высокоразрешающая 2D-сейсморазведка (ВРС 2Д), позволяющая получить сейсмическое изображение среды до глубины ~1000 м ниже поверхности дна. Однако относительно редкая сеть наблюдений (межпрофильное расстояние ~200 м) не позволяет получить достоверную и полную информацию о строении геологической среды и наличии различных опасностей. Очевидно, что применение трехмерных сейсмических наблюдений дает более широкие возможности при оценке геологических рисков.

Применение стандартных трехмерных сейсмических данных ограничено в связи с необходимостью высокочастотной переобработки [OGP..., 2011] и более низкой горизонтальной разрешающей способностью по сравнению с наблюдениями ВРС 2Д.

В то же время использование высокоразрешающей 3D-сейсморазведки (ВРС 3Д) ограничено различными причинами экономического и методического характера. Вследствие этого применение ВРС 3Д в настоящее время ограничивается в основном научными исследованиями.

В работе использованы данные ВРС 3Д, полученные во фьорде Люнген в Норвежском море. Основная цель проведения опытно-методических работ — оценка возможностей данной технологии для выявления и картирования потенциально опасных геологических объектов. Исследования проводились в мае 2012 г. с борта научно-исследовательского судна (НИС) «Хелмер Хансен», принадлежащего Университету Тромсё (Норвегия), с использованием системы P-Cable 3D, специально разработанной для таких целей [Planke et al., 2009; Eriksen et al., 2011; Ebuna et al., 2013].

**Сейсмогеологическое описание района исследований.** Район проведения исследований расположен во фьорде в северной части Норвежского моря (рис. 1). Фьорд Люнген представляет собой узкий, извилистый и глубоко врезающийся в сушу морской залив со скалистыми берегами, который расположен на северо-востоке от г. Тромсё. Две моренные гряды ограничивают фьорд: внешняя — Скарпнес (12,2 тыс. лет до н.э.), залегающая на фундаменте, и внутрен-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, аспирант; *e-mail:* laudina@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, аспирант; *e-mail:* shmatkovalex@gmail.com

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, профессор; *e-mail:* vgain@hotmail.ru

<sup>4</sup> Университет Тромсе, доцент; *e-mail:* Stefan.buenz@uit.no

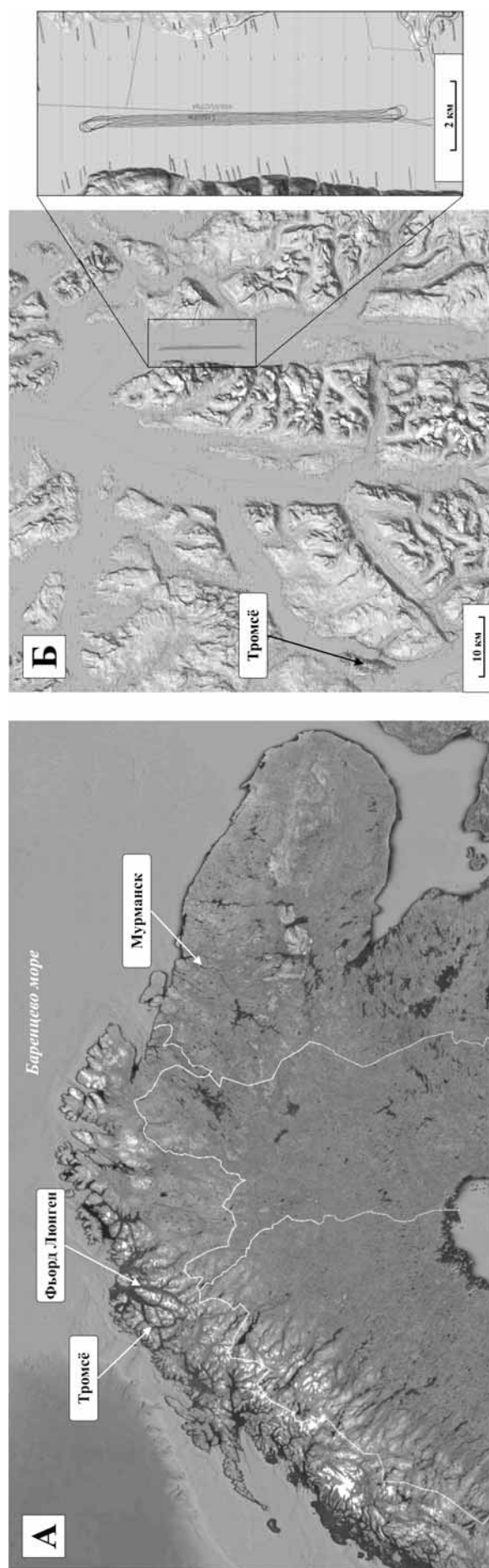


Рис. 1. Схема района исследований в мелком масштабе (А) и укрупненном масштабе (Б)

няя — Тромсё-Люнген, образованная в раннем дриасе (10,5 тыс. лет до н.э.). Максимальная мощность морены превышает 50 м. Между этими моренными грядами наблюдается наибольшая толщина осадочных отложений (150 м), образованных в период 12–10 тыс. лет до н.э.

Согласно априорной информации [Plassen, Vogren, 2003] в районе исследований можно выделить 5 основных комплексов (рис. 2):

акустический фундамент, сложенный мореной Скарпнес (балтийское оледенение) и частично кристаллическим фундаментом;

отложения комплекса А заполняют понижения в акустическом фундаменте и относятся к самой ранней стадии послеледниковой эпохи. Кровля этого комплекса в общих чертах повторяет характер кровли фундамента;

комплекс В образовался во время отступления ледника (аллерод и поздний дриас) и представлен ледниково-морскими отложениями, верхняя часть которых выполнена пачкой илестых глин с прослоями осадков, образованных за счет гравитационных потоков (выделяются по хаотичной волновой картине на временном разрезе);

отложения комплекса С были образованы во время позднего дриаса — пребореала. Они имеют глинисто-илестый состав с обломками, принесенными ледником, а также песчаными турбидитами;

самый поздний комплекс D представлен песчанистыми отложениями, образованными за счет придонных течений (9,5 тыс. лет до н.э. — настоящее время). Большое количество покмарок<sup>5</sup>, обнаруженных на поверхности дна, свидетельствуют о миграции флюида.

По результатам предварительной интерпретации в районе исследований выделены следующие сейсмостратиграфические комплексы (рис. 3): комплекс 1 — акустический фундамент, комплекс 2 — с нарушенной структурой (оползневое тело), комплекс 3 — морские отложения.

По морфологии кровли сейсмокомплекса 1 видно, что отложения, которые ему соответствуют, имеют блоковый характер. Волновая картина у блоков разная, что приводит к разрыву осей синфазности. По литературным данным [Plassen, Vogren, 2003], можно сделать вывод, что этот комплекс представлен гранитогнейсовыми (фундамент Балтийского щита) и моренными отложениями. Комплекс 2 представлен послеледниковыми отложениями, которые накопились на бортах фьорда и постепенно переместились на его дно до наступления морского периода, а комплекс 3 — морскими осадками.

**Аппаратура и методика исследований.** Для съемки ВРС 3D использована система P-Cable 3D, предназначенная для получения высокоразрешающих сейсми-

<sup>5</sup> Покмарка (англ. *rockmark*) — воронкообразное образование на морском дне, вызванное выходом флюида или газа.

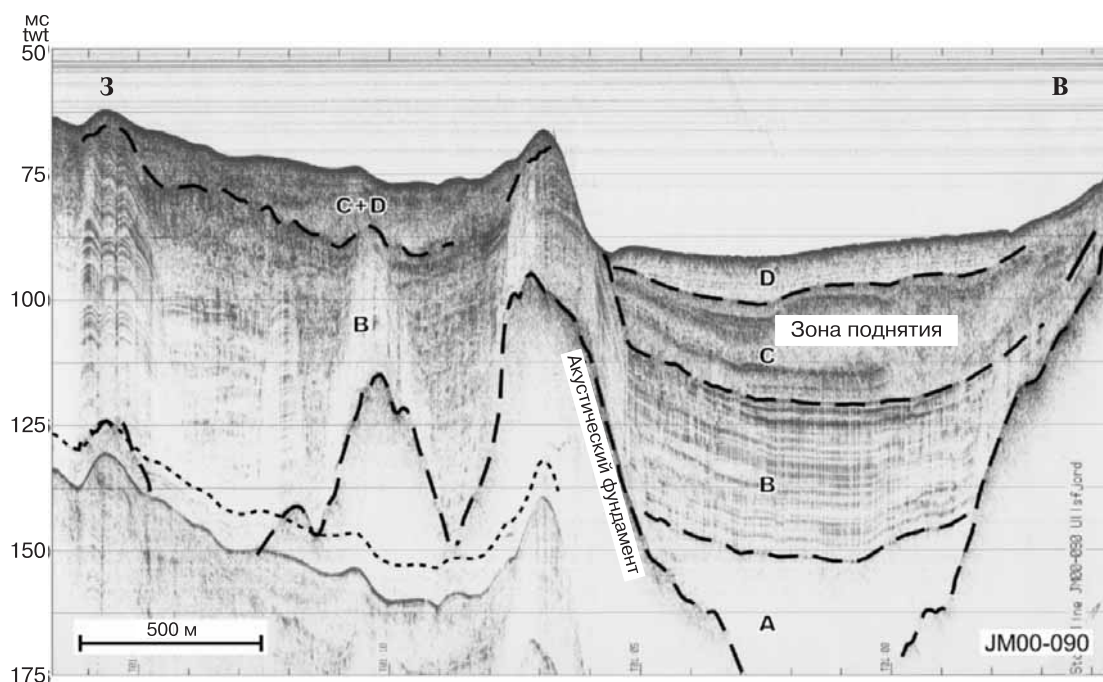


Рис. 2. Профиль, выполненный 3,5-килогерцевым профилографом поперек внутренней части бассейна Улсфьорда. Буквами обозначены выделенные сейсмостратиграфические комплексы, по [Plassen et al., 2003]



Рис. 3. Сейсмический разрез вдоль продольного профиля с выделенными сейсмостратиграфическими комплексами

ческих данных по плотной сети наблюдений [Planke et al., 2009; Eriksen et al., 2011; Ebuna et al., 2013].

Приемная часть системы P-Cable 3D состоит из 14 восьмиканальных цифровых твердотельных кос, буксирюемых на кабеле, растянутом двумя параванами<sup>6</sup> в направлении перпендикулярном движению судна (рис. 4). Расстояние между каналами в косах 3,125 м, общая длина активной секции 25 м. В начале каждой сейсмической косы находится виброизоляция секция, предназначенная для уменьшения шумов буксировки, а также многоканальный модуль оцифровки сейсмического сигнала на базе 24-разрядного аналогово-цифрового преобразователя, позволяющий регистрировать данные с интервалом дискретизации

от 1/16 до 2 мс. Коммуникация с заборным оборудованием осуществляется по протоколу Ethernet.

В качестве источника упругих колебаний использовалась пневматическая пушка «Mini G.I.» объемом 40 дм<sup>3</sup> (~650 см<sup>3</sup>), что позволяет получать центральную частоту сигнала ~250 Гц. Преимущества этого источника заключаются в уменьшении пульсации воздушного пузыря и улучшенной амплитудно-частотной характеристике излучаемого сигнала. Пневматическую пушку буксировали на глубине 1,5 м в 100 м от кормы судна (рис. 4).

Для точного проведения судна и приемно-излучающей системы по запланированным профилям использовались 4 DGPS-приемника (один приемник

<sup>6</sup> Параван (англ. *paravane*) — устройство для отведения сейсмических кос вбок от судна.



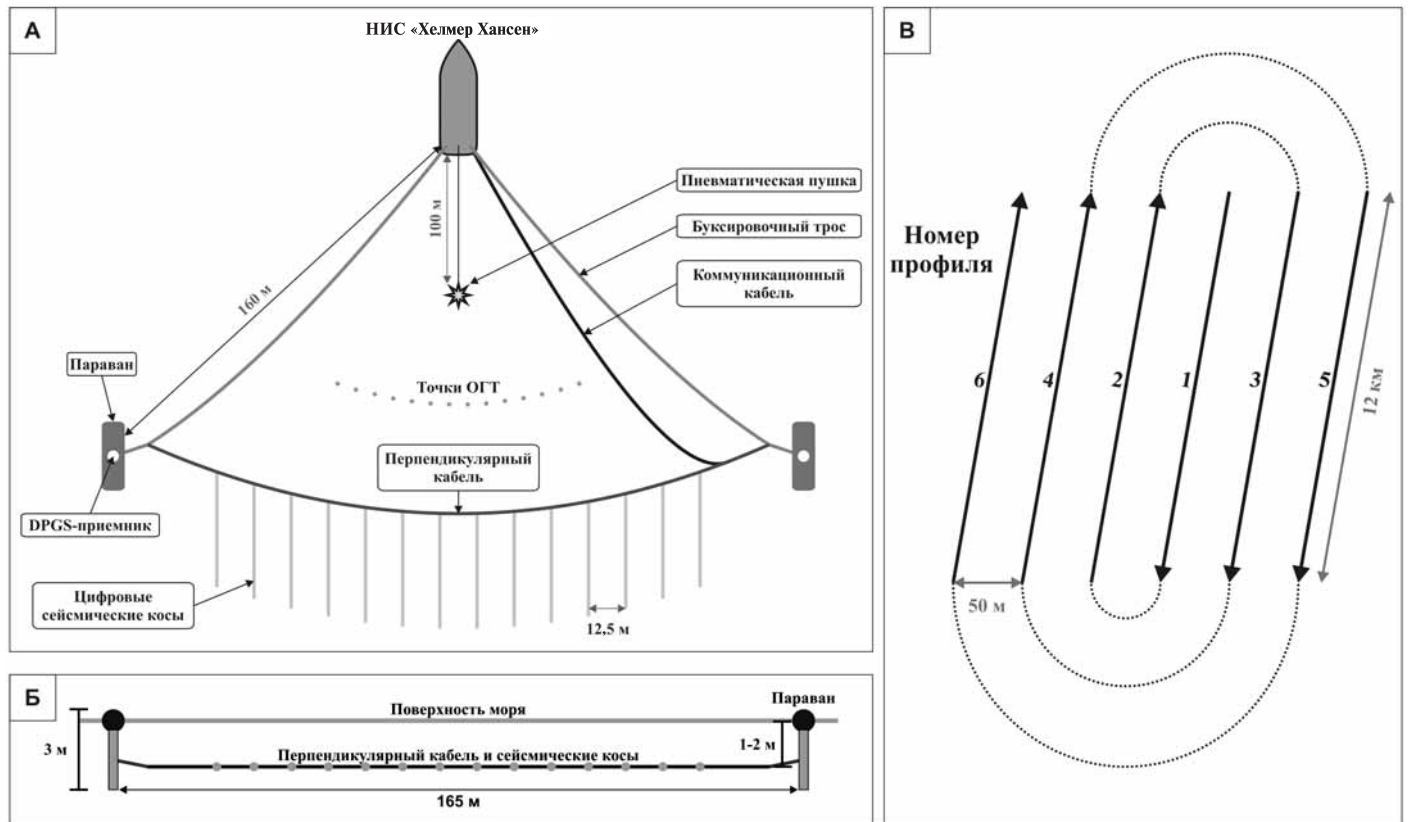


Рис. 4. Схема основных элементов системы P-Cable 3D: А — вид сверху, Б — вид сбоку, В — схема движения судна по площади исследований

был установлен на корме судна, два — на параванах и один — на пневматической пушке).

Всего было получено 12 профилей длиной 12 км, ориентированных параллельно оси фьорда (рис. 4, В). Плановая ширина покрытия общими глубинными точками для каждого профиля — 80 м. Чтобы съемки соседних линий перекрывались, расстояние между ними составляло 50 м. В результате съемки получены данные ВРС 3D на площади 8 км<sup>2</sup>.

**Обработка данных.** Обработка сейсмических данных проводилась в программных комплексах RadExPro Professional и Prime 3D, и включала все основные процедуры обработки 3D-сейсмических данных с учетом особенностей графа обработки

данных ВРС 3D. Методика наблюдений и влияние волнения моря потребовали ввести статические поправки и корректировать геометрию наблюдений. Кроме того, было проведено подавление повторного удара пневматической пушки и кратных волн.

Для сохранения истинных соотношений амплитуд для последующего динамического анализа выполнена регуляризация сейсмических данных. Восстановление «истинных амплитуд» после трехмерной глубинной миграции Кирхгофа до суммирования выполнено с применением метода эталонных сейсмограмм.

На этапе интерпретации, кроме того, рассчитывались кубы сейсмических атрибутов — среднеквадра-

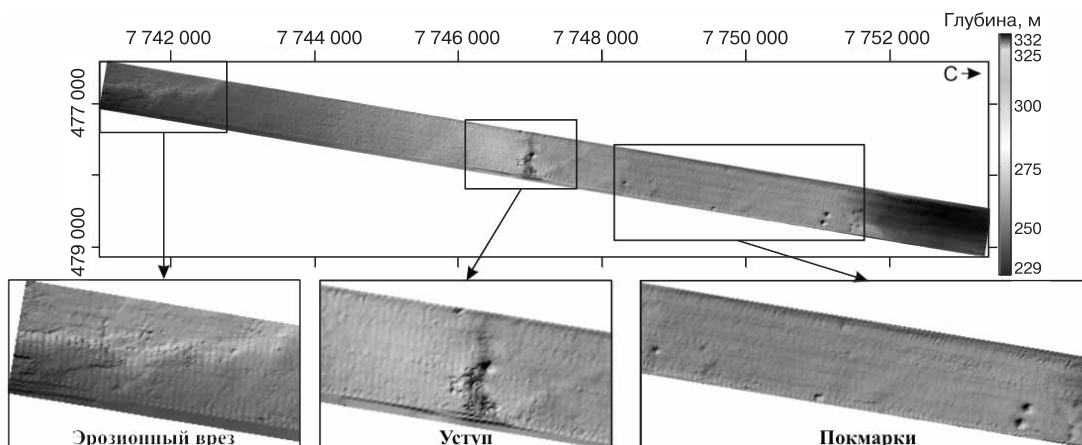
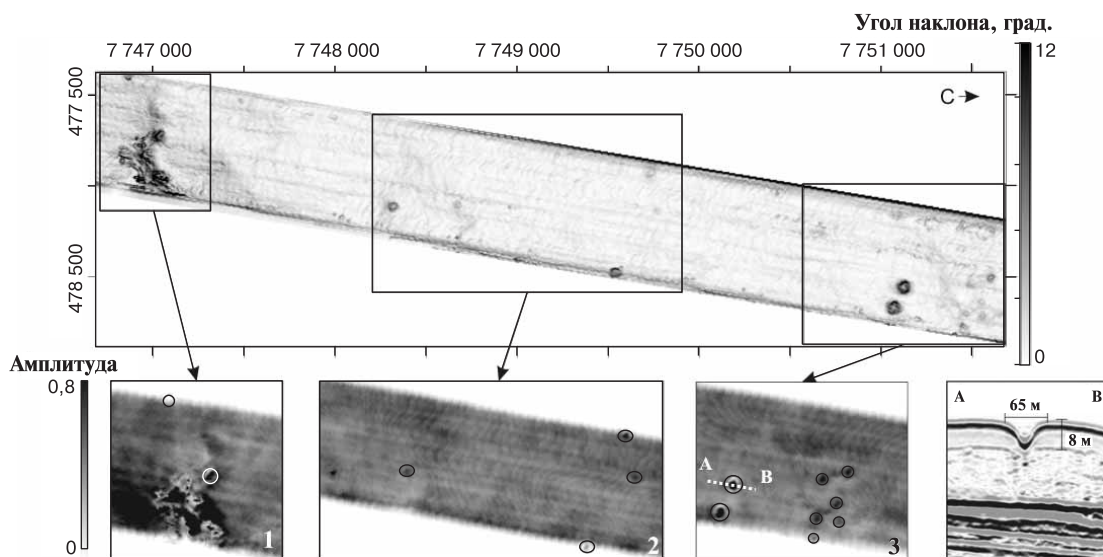


Рис. 5. Карта рельефа дна, построенная по данным системы P-Cable 3D, с выделенными областями распространения опасных объектов

Рис. 6. Карта углов наклона поверхности дна с выделенными на ней областями покмарок. В нижней части — карты среднеквадратичных амплитуд для тех же областей (круги — покмарки), внизу справа — пример сейсмического разреза вдоль одной из покмарок



тических амплитуд, когерентности, карты наклонов поверхности для разных горизонтов.

**Выделение опасных объектов на морском дне.** На карте рельефа дна (рис. 5) отмечается плавное увеличение глубины воды от 230 м (в южной части) до 330 м (в северной), что связано с переходом в более глубинную область (открытое море). Угол наклона морского дна составляет  $\sim 0,5^\circ$ .

Данные ВРС 3D позволяют выделять геологические объекты размером от 7 м по простиранию и от 2 м по вертикали. На карте рельефа морского дна выделяются следующие опасные геологические объекты: 14 донных воронок (покмарок) в северной части полигона; уступ, образовавшийся из-за оползания придонных осадков в центральной части полигона, и эрозионный врез, выделенный в южной части (рис. 5).

Эти объекты представляют средний уровень опасности для инженерных сооружений. Наличие покмарок и эрозионных врезов необходимо учитывать при установке якорей буровых судов и платформ, так как покмарки могут маркировать наличие газа в более глубоких частях разреза и содержать жесткие карбонатные корки. Неоднородность донных грунтов может повлиять на равномерность закрепления якорей, при проведении работ с полупогружными платформами.

На карте углов наклона поверхности морского дна и карте среднеквадратичных амплитуд (рис. 6) покмарки выделяются по большим значениям углов наклона по краям воронки (до  $12^\circ$ ) и по небольшим значениям в ее центральной части. На карте среднеквадратичной амплитуды они связаны с зонами повышенных значений амплитуд. По характеру распространения покмарок можно выделить три области (рис. 6):

1) в первой области покмарки приурочены к структуре уступа. Две вытянутые в субширотном направлении покмарки имеют ширину 30, 56 м и

длину 36, 65 м соответственно, глубина 4 и 9 м соответственно;

2) во второй области насчитывается 5 изометричных покмарок диаметром от 40 до 55 м, их глубина колеблется от 2 до 4 м;

3) в третьей области выделяются 2 крупные и глубокие покмарки диаметром 65 м и глубиной 8 м, а также группа из 6 небольших покмарок диаметром 15–25 м и глубиной 2–4 м.

Эрозионный врез на южной окраине района исследований мог образоваться в результате деятельности каменных или грязевых потоков. Его максимальная глубина составляет 8 м, протяженность 1,5 км, а ширина 400 м. Подчеркнем, что точно под этим объектом расположен эрозионный палеоврез, что может привести к негативным последствиям в случае выбора этого места для осуществления хозяйственной деятельности.

На карте рельефа дна (рис. 6) и сейсмических разрезах выделяется уступ, который может быть связан с перемещением придонных осадков в сторону открытого моря в результате гравитационных процессов или действия придонных течений. На карте когерентности (рис. 7) отчетливо выделяется бровка уступа (приподнятая часть), а также область понижения рельефа за ним. Амплитуда уступа колеблется от 12 м в восточной части района исследования до 1 м в западной части. На карте когерентности отчетливо выделяются и другие следы придонных течений.

**Выделение потенциально опасного палеооползня.** Выделенный оползень имеет сложное строение — внутри тела наблюдается две поверхности скольжения, что указывает на неоднократное оползание осадков со склона фьорда (рис. 8). Оползень расположен в северной части исследуемой территории, его протяженность составляет 7 км, максимальная мощность 130 м. В южной части оползшие осадки заполняют лишь небольшие понижения в фундаменте, мощность исследуемого объекта не превосходит 60 м.

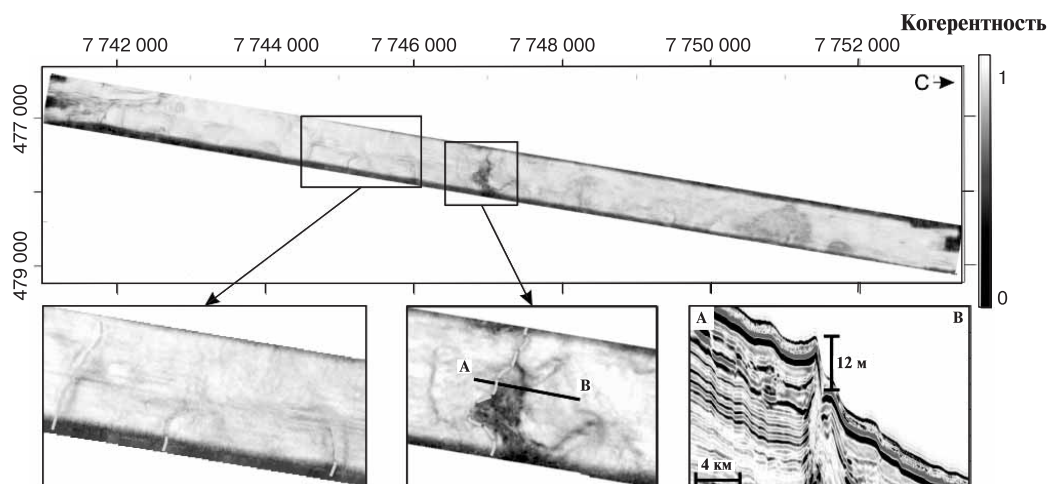


Рис. 7. Карта когерентности с выделенным на ней уступом. Внизу справа — сейсмический разрез вдоль профиля АВ

**Геологические опасности, выделенные в комплексе акустического фундамента.** Кровля фундамента представлена блоками, разделенными разломами. Известно, что область исследований была активна как в дочетвертичное время, так и в четвертичное. В настоящее время территория испытывает общее поднятие. Разломы в фундаменте могут представлять опасность для инженерных сооружений, так как их развитие может привести в движение перекрывающие фундамент осадочные толщи, что помимо прямого ущерба может вызвать активизацию оползневых процессов.

При построении тектонической модели изучаемой площади по трехмерным сейсмическим данным обычно используется следующий алгоритм: на первом этапе при традиционном подходе трассируют разломы, уверенно выделяемые на временных разрезах, затем намечают точки, где ряд косвенных признаков (падение уровня энергии) может указывать на наличие разлома. Для уточнения положения разломов может применяться сейсмический атрибут когерентность. На рис. 9 представлен сейсмический разрез по

продольному профилю и разрез куба когерентности по тому же профилю.

По карте рельефа кровли фундамента (рис. 10) можно выделить крупные блоки — опущенный в северной части и приподнятый в южной. При этом глубина до кровли фундамента колеблется от 320 (южная часть полигона) до 580 м (северная часть полигона). По карте углов наклона поверхности кровли фундамента (рис. 11) можно определить основные направления тектонических нарушений в плане.

В результате проведенной интерпретации составлена структурная схема кровли фундамента (рис. 12), на которой выделяются 4 относительно приподнятых и 5 относительно опущенных блоков шириной до 2,7 км, расположенных в субширотном направлении. Амплитуды разломов не превышают 40 м. На схеме видно, что наиболее крупные разломные зоны связаны с разломами на бортах фьорда, по которым текут современные реки.

В результате комплексной интерпретации трехмерных высокоразрешающих сейсмических данных и картирования потенциально опасных геологических

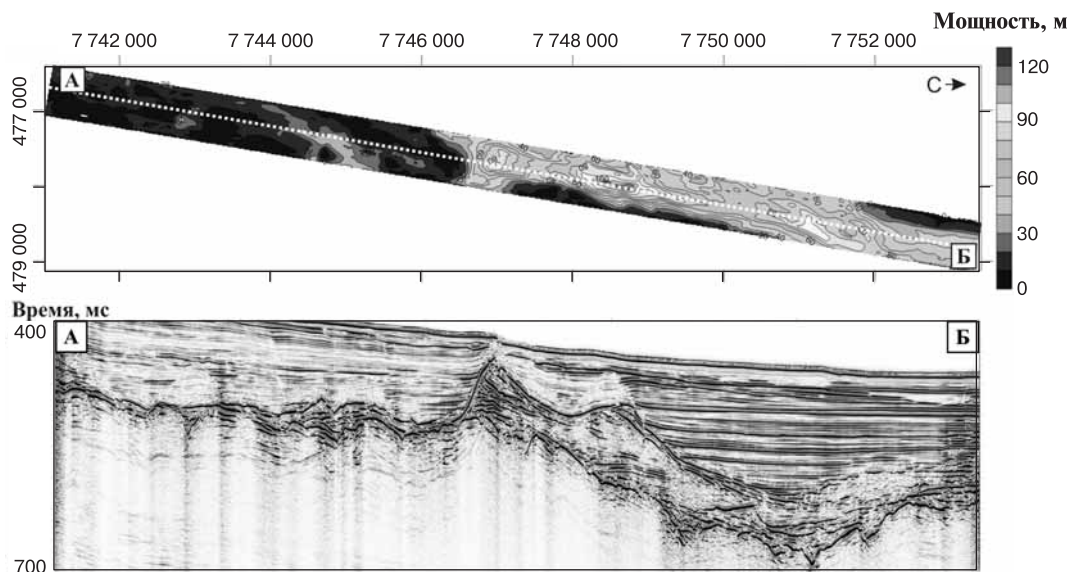


Рис. 8. Карта мощности палеооползня (вверху) и сейсмический разрез вдоль профиля АВ (снизу)



Рис. 9. Разрез по продольному профилю куба когерентности (вверху), сейсмический разрез по тому же профилю (внизу) с выделенными на нем разломами (вертикальные линии)

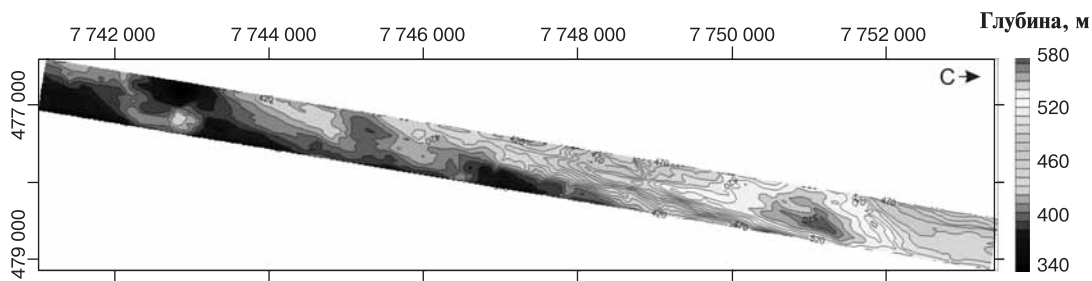
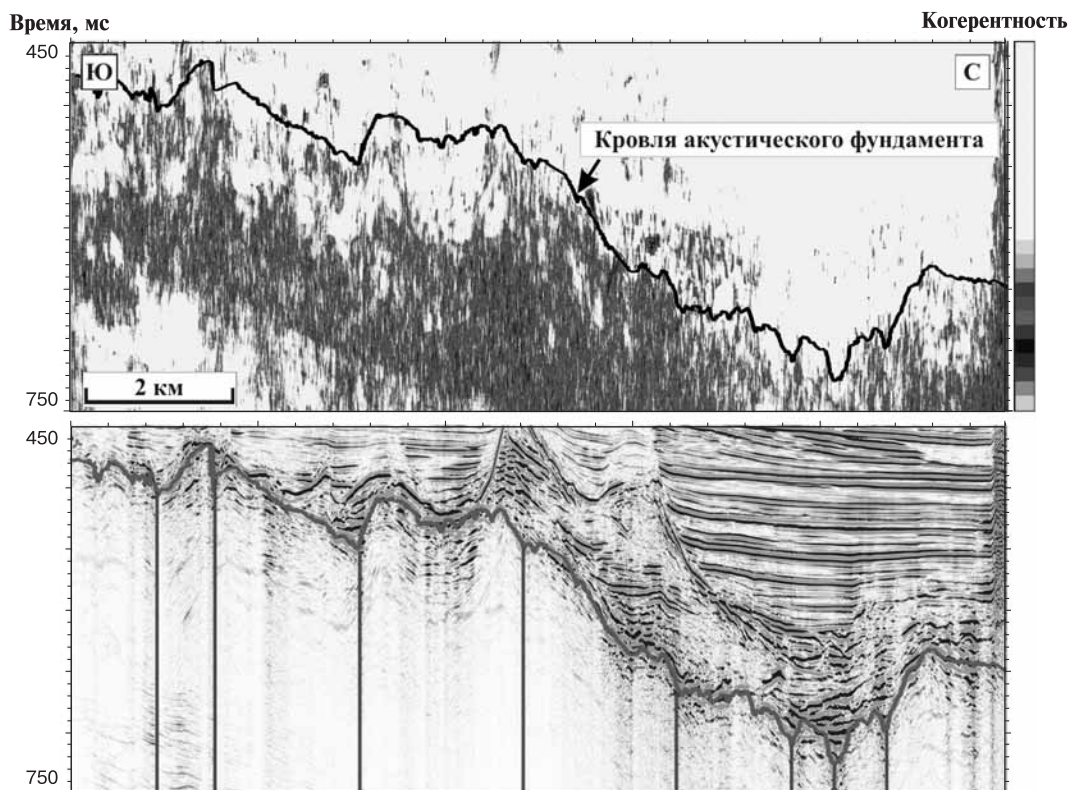


Рис. 10. Карта рельефа кровли акустического фундамента



Рис. 11. Карта углов наклона кровли акустического фундамента

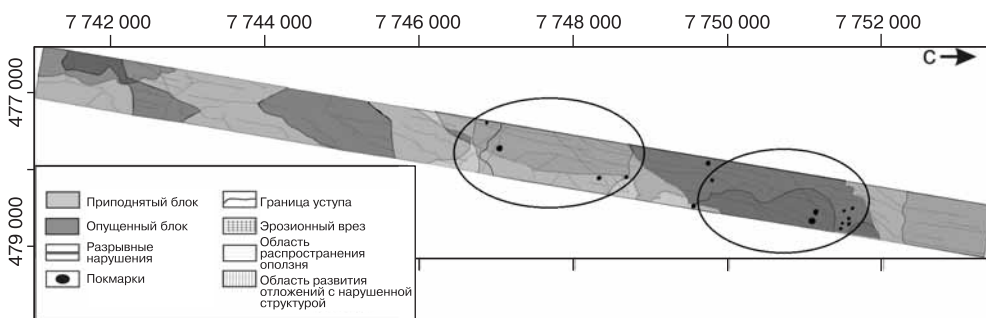


Рис. 12. Схема распространения потенциально опасных объектов

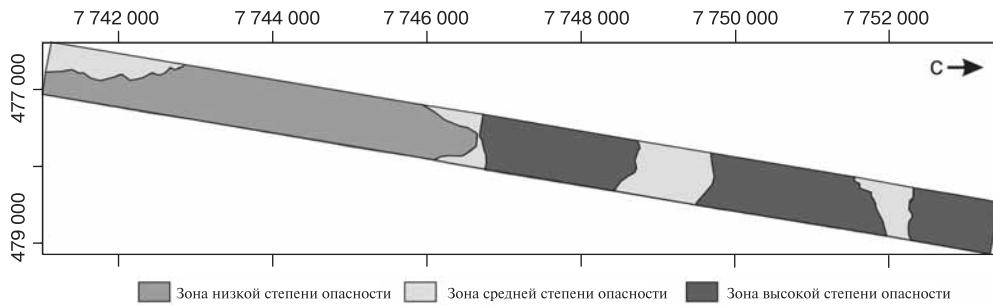


Рис. 13. Схема распространения зон разной степени опасности

объектов, представленных в каждом сейсмостратиграфическом комплексе, составлена сводная схема распространения опасных геологических объектов (рис. 12). Наибольший риск представляют такие зоны, где совпадают разные потенциально опасные геологические объекты. Таки образом, была составлена схема распространения зон разной степени опасности (рис. 13), по которой можно оценить геологические риски при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений.

**Заключение.** Интерпретация данных трехмерных высокоразрешающих сейсмических исследований позволила с достаточной точностью в пространстве выделить следующие опасные геологические объекты:

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ebuna D.R., Mitchell T.J., Hogan P.J.* et al. High-resolution offshore 3D seismic geophysical studies of infrastructure geohazards: SAGEEP Conference. USA, Denver, 2013.
- Eriksen O.K., Berndt C., Buenz S.* et al. Styles of shallow gas migration and accumulation on the Norwegian Continental Margin // 73th EAGE Conference & Exhibition, 2011.
- OGP Report N 373-18-1. Guidelines for the conduct of offshore drilling hazard site surveys. L.: OGP, 2011.

покмарки, эрозионный врез, уступ, области распространения отложений с нарушенной слоистостью, палеооползень, области тектонических нарушений в кровле фундамента. В результате построена схема распространения опасных зон.

Небольшая ширина полосы исследований, которая составила всего 0,6 км, не позволила точнее объяснить генезис каждого выделенного объекта. Проведение сейсмических наблюдений по рассматриваемой методике на достаточно большой площади позволило бы не только выделить опасные геологические объекты, но и восстановить историю развития этой территории в послеледниковый период.

- Planke S., Eriksen F.N., Berndt C.* et al. P-Cable high-resolution seismic // *Oceanography*. 2009. Vol. 22, Iss. 1. P. 85.
- Plassen L., Vorren T.O.* Sedimentary processes and the environment during deglaciation of a fjord basin in Ullsfjorden, North Norway // *Norw. J. Geology*. 2003. Vol. 83. P. 23–36.

Поступила в редакцию  
05.03.2014