

## АТЛАС ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ НА ШЕЛЬФЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

<sup>1</sup>Росляков А.Г., <sup>1</sup>Терёхина Я.Е., <sup>1</sup>Токарев М.Ю., <sup>2</sup>Рыбин Н.А.

<sup>1</sup>МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО «Газпром недра», Москва, Россия

В результате обобщения материалов инженерных изысканий и результатов специальной обработки и интерпретации данных стандартной 3D сейсморазведки на акваториях Баренцева и Карского морей был составлен Атлас опасных геологических процессов и явлений. Труднодоступность региона и недостаточное количество фактических материалов диктуют необходимость иметь набор данных, характеризующих элементы геологического разреза, являющихся потенциально неблагоприятными для строительства скважин и других морских инженерных сооружений на Арктическом шельфе. Представленные в Атласе фрагменты волновых картин, полученных с использованием различных методических вариантов сейсморазведки и гидролокации, дают общую характеристику спектра геологических опасностей, имеющих распространение на Арктическом шельфе. Атлас является обобщением имеющегося опыта по выявлению опасных геологических процессов и явлений в этом регионе.

Ключевые слова: *геологические опасные процессы и явления, арктический шельф, атлас, сейсмические методы исследования, инженерные изыскания*

Минимизация рисков является одной из главных задач при обустройстве морских месторождений и проходке скважин на осваиваемых участках дна акваторий. Особенно это относится к труднодоступным районам Арктического шельфа, характеризующимся не только суровыми климатическими условиями, но и специфическим набором опасных геологических процессов и явлений. Труднодоступность региона и недостаточное количество фактических материалов диктуют необходимость иметь набор данных, характеризующих элементы геологического разреза, являющихся потенциально неблагоприятными для строительства скважин и других морских инженерных сооружений на Арктическом шельфе.

В результате обобщения материалов инженерных изысканий и результатов специальной обработки и интерпретации данных стандартной 3D сейсморазведки на акваториях Баренцева и Карского морей был составлен Атлас опасных геологических процессов и явлений. В содержание вошли:

- перечень, описание и схемы выявленных геологических опасностей;
- типы основных геологических опасных явлений: многолетнемерзлые породы, газонасыщенные осадки, разрывные нарушения, газовые карманы, потенциальные зоны аномально высокого пластового давления, палеоврезы, оползни, борозды выпахивания, и т.д.;
- образы опасных геологических явлений, полученных дистанционными методами: батиметрической съемкой, гидролокацией бокового обзора, стандартной 2D/3D сейсморазведкой, сейсморазведкой высокого и сверхвысокого разрешения, морской магнитометрией, морской электроразведкой, фото и видеосъемкой.

Примеры сопровождаются краткой геологической интерпретацией, обсуждением генезиса, распространенности и степени опасности этих элементов для сооружений разного типа.

В структуре Атласа использована схема разделения геологических опасностей, вне зависимости от их природы, в основу которой положен интервал исследования разреза, определяемый типом планируемого сооружения, и глубина моря [Токарев, 2020].

По глубине моря предлагается выделить следующие зоны:

1. Зона крайнего мелководья с глубинами менее 10 м
2. Мелководная зона с глубинами 10 – 100 м

### 3. Глубоководная зона с глубинами более 100м

Предложенное деление основано на специфике применения аппаратных комплексов и технологии проведения сейсмических работ на соответствующих глубинах. Кроме того, оно в первом приближении соответствует границам литолого-геоморфологических зон подводных материковых окраин. Так, зона крайнего мелководья примерно совпадает с областью подводного берегового склона, характеризующейся максимальным воздействием волн на дно, распространением наиболее грубозернистых отложений (песчано-гравийных, галечных) и значительными уклонами поверхности дна. Мелководная зона (10 – 100м) соответствует большей части шельфа с выровненной поверхностью дна и преобладанием алевритово-глинистых осадков (илов). Глубоководная зона (более 100м) в геоморфологическом отношении включает область внешнего шельфа, континентальный склон, подножие склона и днища глубоководных котловин. Эта зона отличается наибольшим разнообразием форм рельефа, широким диапазоном углов наклона дна и распространением наиболее тонких донных осадков (за исключением областей накопления обвальнo-оползневых отложений). Верхняя часть этой зоны соответствует наиболее крутой части континентального склона с максимальными уклонами дна, местами достигающими десятков градусов, широким развитием каньонов, общим преобладанием эрозионных процессов.

В зависимости от типа планируемого сооружения в каждой из указанных зон (по глубине моря) могут исследоваться разные интервалы разреза по грунту. При этом, каждый такой интервал должен изучаться с применением определенного комплекса методов и, таким образом, привязывается не только к типу сооружений, но и к методике работ.

Ниже приводится предлагаемое принятое в Атласе разделение опасных геологических элементов разреза по интервалам разреза (по грунту) с указанием типов сооружений, на безопасность которых могут повлиять эти элементы:

- Приповерхностные геологические опасности на морском дне и в интервале 0 – 10м ниже дна (Seabed Geohazards, Sub-bottom Geohazards)

Сооружения: Риски для строительства и эксплуатации легких инженерных сооружений, эстакад, опор СПБУ, подводных трубопроводов, прокладки кабелей, установки якорей буровых платформ, и т.д.

- Малоглубинные геологические опасности в интервале до 100 м ниже дна (Near-surface Geohazards)

Сооружения: Риски для строительства и эксплуатации легких инженерных сооружений, добычных эксплуатационных комплексов, оснований стационарных буровых платформ, терминалов и т.д.

- Геологические опасности для бурения до 1 км ниже дна (Drilling Hazards)

Сооружения: Риски для проходки глубоких скважин (поисково-оценочных, поисково-разведочных, эксплуатационных).

В начале каждой из трех глав Атласа приводятся таблицы применимости различных модификаций геофизических методов для выявления геологических опасностей в соответствующих интервалах разреза. Эти таблицы могут способствовать правильному выбору оптимальных методических вариантов геофизических работ в зависимости от конкретных задач и расположения изучаемого района.

Представленные в Атласе фрагменты волновых картин, полученных с использованием различных методических вариантов сейсморазведки и гидролокации, дают общую характеристику спектра геологических опасностей, имеющих распространение на Арктическом шельфе. Важно, что при этом рассмотрены участки, расположенные как в пределах гляциальной области шельфа, так и перигляциальной. Эти части шельфа существенно различаются по типу преобладающих геологических опасностей, что обусловлено разными условиями, существовавшими на них в период максимума последнего оледенения. Прежде всего, наблюдающиеся различия проявляются

в распространении многолетнемерзлых грунтов, гораздо более широко представленных на Восточно-Арктическом шельфе, где не было ледникового покрова и породы которого испытали наиболее глубокое промерзание в субэаральных условиях (Рис. 1). Деградация мерзлых толщ во время позднеплейстоцен-голоценовой трансгрессии привела к формированию и других сопутствующих осложнений геологического строения разреза – посткриогенным деформациям грунтового массива и широкому распространению посткриогенного газа, которые также являются факторами, неблагоприятными для строительства скважин и других инженерных сооружений.

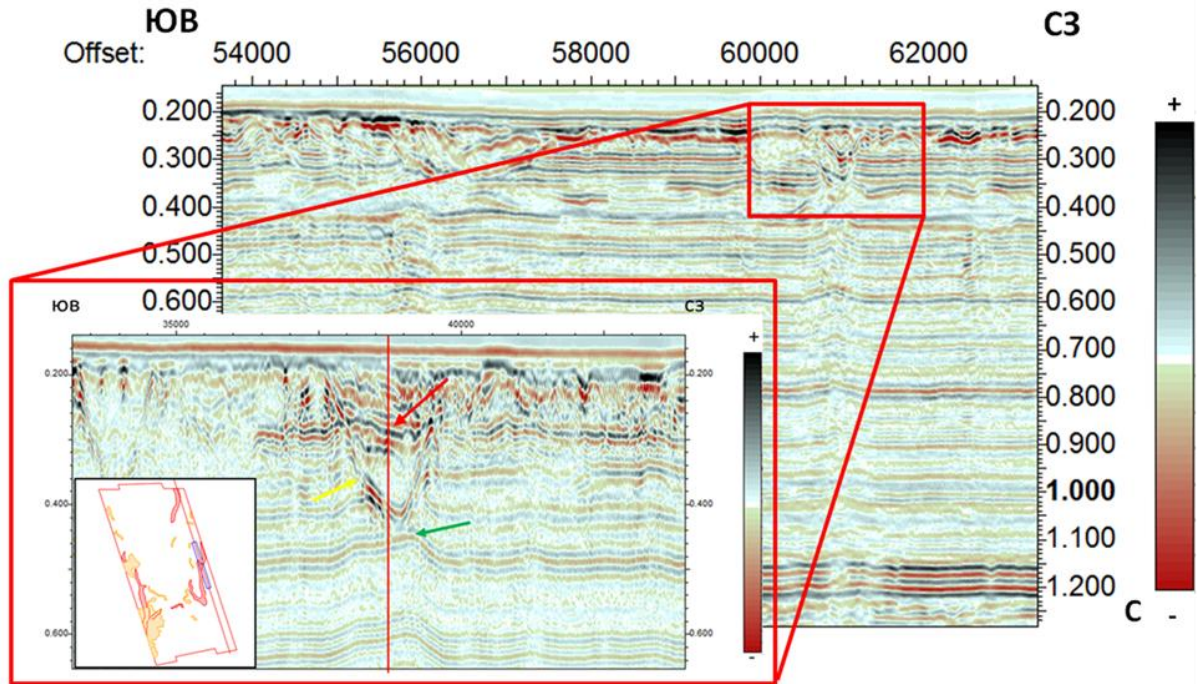


Рис. 1 Фрагмент сейсмического разреза, иллюстрирующий выделение предположительно мерзлых грунтов. Желтой стрелкой показана подошва палеовреза; красной – предполагаемая линза мерзлых грунтов; зеленой - ложный изгиб вверх ниже лежащих осей синфазности вследствие повышенных значений скорости в линзе. Положение профиля показано на врезке в левом нижнем углу. Карское море.

Необходимо отметить, что на большинстве изученных площадок сейсмогеологические условия являются неблагоприятными, а геологическое строение верхней части разреза – очень сложным, имеющим на многих участках линзовидно-слоистую структуру с частым чередованием и соседством твердомерзлых, пластичномерзлых и охлажденных грунтов, обладающих существенно различающимися физическими характеристиками. Это чередование связано с нахождением верхней части разреза при температуре, близкой к температуре фазовых переходов и контролируется литологическим составом отложений и степенью минерализации порового флюида. Дополнительное осложнение связано с высоким содержанием газа в разрезе, как посткриогенного, так и мигрирующего из глубоких (в том числе - продуктивных) горизонтов разреза. Все это затрудняет получение качественных сейсмических образов геологических опасностей и диктует необходимость применения специально оптимизированного для существующих условий комплекса геофизических исследований. При этом такой комплекс должен не просто давать возможность обнаруживать участки распространения многолетнемерзлых грунтов и аномально газонасыщенных интервалов, но и обеспечивать изучение, на их фоне, геологической структуры разреза от приповерхностной части до глубины 1- 1,5 км. Примером успешного применения такого подхода могут служить приведенные в Атласе иллюстрации результатов 2D/3D сейсмических площадных работ на тестовом полигоне Белоостровского ЛУ в Карском море [Пирогова, 2021]. Использование при интерпретации тех параметров сейсмического



волнового поля, которые могут быть вычислены (скорость, полярность отражений, псевдопоглощение) показало высокую эффективность (Рис. 2). Дальнейшее развитие методики сейсмических исследований в Арктике, направленное на количественное определение подобных важнейших характеристик волнового поля является актуальной задачей [Токарев, 2021]. Особенно это касается таких сложных вопросов, как выявление газовых гидратов в условиях субмаринной криолитозоны и надежная идентификация гидратоносных пород на фоне очень близких по упругим модулям льдистых отложений, изучения возможности промерзания охлажденных пород при струйной дегазации метана из-под мерзлой толщи и выявления таких участков.

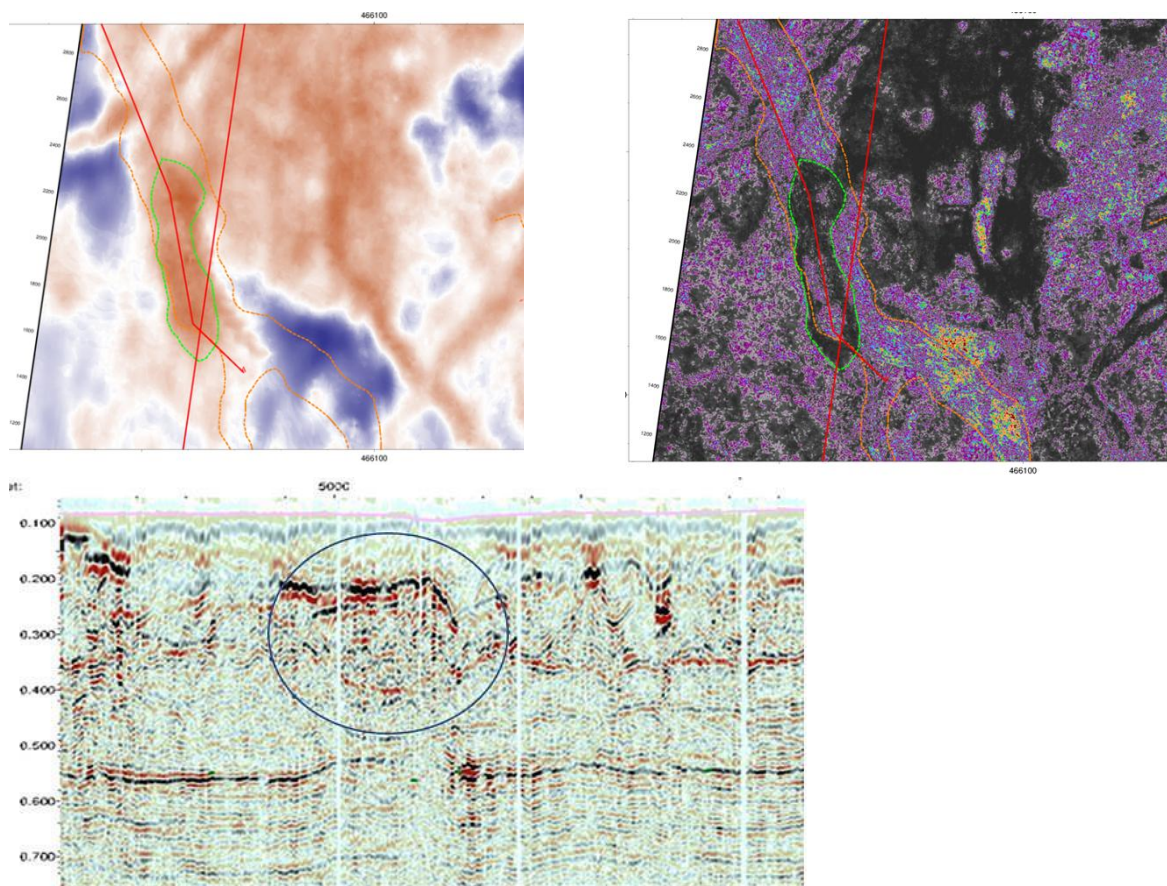


Рис. 2 Линза мерзлых грунтов на сейсмическом разрезе (внизу, овал), на карте средних скоростей (вверху слева, зеленый пунктир) и слайсе по кубу атрибута «псевдопоглощение» (вверху справа, зеленый пунктир). Проявляется повышенными значениями скорости и пониженными значениями псевдопоглощения. Оранжевый пунктир на слайсах - палеоврез. Карское море.

Значительным ограничением в повышении достоверности интерпретации геофизических данных и более надежном выявлении геологических опасностей в сложных условиях Арктического шельфа является крайне малое количество данных бурения. В Атласе на примере тестового полигона Белоостровского ЛУ показано, что даже одна инженерно-геологическая скважина, пробуренная на участке, где имеются информативные сейсмические данные по верхней части разреза, может обеспечить существенное продвижение в интерпретации волновой картины и экстраполяции верифицированных данных на обширные области площадных работ.

Авторы выражают благодарность ПАО «Газпром» за предоставленную возможность работы с уникальными материалами и выражают надежду на продолжение подобных исследований на Арктическом шельфе.

## ЛИТЕРАТУРА

Токарев М.Ю., Пирогова А.С., Локтев А.С., Рыбалко А.Е., Росляков А.Г., Терехина Я.Е., Гайнанов В.Г., Шалаева Н.В., Ампилов Ю.П., Бобачев А.А., Потемка А.К., Бирюков Е.А., Пронин И.С., Замотина З.С., Кузнецов К.М., Хачатрян А.М., Понимаскин А.И., Щуплов П.А., Яковенко А.Д., Сучкова А.В., Куликова Д.С., Семенова А.А., Терентьева Е.Б., Мартын А.А., Хоштария В.Н., Рыбин Н.А., Иванов Н.А., Кожухов Д.В., Трифонов А.Н., Слепченко В.А., Верещинская Л.С. Отчет о создании технологий выявления и оценки геологических рисков при бурении и возведении объектов нефтегазового комплекса на шельфе, МГУ имени М.В. Ломоносова, 2020. 581 с.

Токарев М.Ю., Локтев А.С., Росляков А.Г., Пирогова А.С., Рыбин Н.А., Хоштария В.Н., Данилевская Н.С. Инновационные технологии выявления и оценки геологических рисков при бурении и возведении объектов нефтегазового комплекса на Арктическом шельфе // Наука и техника в газовой промышленности. 2021. № 2. С. 20-33.

Пирогова А.С., Токарев М.Ю., Сучкова А.В., Щуплов П.А., Рыбин Н.А., Хоштария В.Н. Инверсия данных сейсморазведки высокого и сверхвысокого разрешения для оценки акустических свойств придонных грунтов в условиях мелководного шельфа Карского моря // Геофизика. 2021. № 5. С. 13-23.

## ARCTIC SHELF GEOHAZARDS ATLAS

<sup>1</sup>Roslyakov A.G., <sup>1</sup>Terekhina Y.E., <sup>1</sup>Tokarev M.Yu., <sup>2</sup>Rybin N.A.

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>LTD Gazprom Nedra, Moscow, Russia

As a result of the generalization of engineering survey materials and the results of special processing and interpretation of conventional 3D seismic data in the Barents and Kara Seas, an Atlas of hazardous geological processes and phenomena was compiled. The inaccessibility of the region and the insufficient amount of actual materials dictate the need to have a set of data characterizing elements of the geological section, which are potentially dangerous for the construction of wells and other offshore engineering structures on the Arctic shelf. The fragments of wave patterns presented in the Atlas, obtained examples of various seismic and sonar data, give a general description of the spectrum of geological hazards that are widespread on the Arctic shelf. The Atlas is a generalization of the existing experience in identifying dangerous geological processes and phenomena in this region.

Keywords: geological hazardous processes and phenomena, Arctic shelf, atlas, seismic research methods, engineering surveys