

УДК 614.8:622.69(571.642)

С.Г. Миронюк

## Геологические опасности осваиваемых месторождений восточного шельфа о. Сахалин: идентификация и принципы картографирования

На современном этапе с точки зрения сохранения устойчивости функционирования топливно-энергетической отрасли страны возрастает значение инфраструктуры шельфовых нефтегазовых месторождений о. Сахалин, в том числе подводных добычных комплексов (ПДК). При этом необходимыми условиями безаварийной эксплуатации объектов инфраструктуры являются локализация, распознавание, параметрическое описание и прогноз развития геологических опасностей, осложняющих строительство морских сооружений.

Учитывая неоднозначность толкований термина «геологическая опасность», далее в статье под геологической опасностью будем понимать «компоненты геологической среды, которые могут неблагоприятно воздействовать на экосистемы и инженерные сооружения или вызвать их разрушение» [1]. Оценку геоопасностей проводят на всех стадиях проектирования в следующей последовательности [2]:

1) обоснование целей, задач, методов оценки и критериев приемлемых вероятностей отказов морских сооружений;

2) идентификация опасностей, которая предусматривает:

- на этапе *предпроектных проработок* выявление и описание всех геоопасностей на основе данных оценочных изысканий и обобщения научных публикаций и фондовых материалов, их первичную оценку, установление приоритета геоопасностей с помощью экспертных оценок, описание триггерных эффектов, построение предварительных прогнозных индивидуальных сценариев развития опасных геологических процессов;

- на этапе *разработки проектной документации* характеристику отдельных геоопасностей на основе детальных изысканий и исследований, включая лабораторные и вычислительные эксперименты.

Анализ материалов изысканий реализованных проектов обустройства шельфовых месторождений в восточной части Сахалина (Чайво, Лунское, Киринское и др.), а также опубликованных данных [3–9] позволил на этапе предпроектных проработок составить следующий реестр геоопасностей, выявленных в указанном регионе: землетрясения, разжижение грунтов и неравномерные осадки, цунами, газопроявления в форме внезапных выбросов газа, литодинамические процессы, ледовая экзарация в береговой зоне и др. (таблица).

Основная задача этапа предпроектных проработок – установление приоритета геоопасностей. Для предварительного выявления, описания и ранжирования геоопасностей за рубежом (ExxonMobil, Shell), а в последнее время и в России (проекты строительства газопровода «Голубой поток», освоения Киринского газоконденсатного месторождения (ГКМ) и др.), применяют разнообразные качественные и полуколичественные методы: HAZID (идентификация опасностей), АДС (анализ «дереьев событий»), аналогий и др. Использование экспертных оценок при реализации проекта обустройства Киринского ГКМ позволило выделить следующие геоопасности как приоритетные для детальных исследований: *землетрясения и газопроявления* (газовые карманы с аномально высоким пластовым давлением (АВПД)) [10].

С целью дальнейшей идентификации и картографирования геологических опасностей на этапе разработки проектной документации в пределах Киринской площади

**Ключевые слова:**

геологические опасности, морские сооружения, о. Сахалин, идентификация опасностей, разжижение грунтов, цунами, картографирование геологических опасностей.

**Keywords:**

geologic risks, offshore structure, Sakhalin, hazards identification, soil liquefaction, tsunami, mapping of geologic hazards.

**Геологические опасности на площадях месторождений углеводородов  
восточного шельфа о. Сахалин**

Месторождение	Глубина моря, м	Технология добычи	Геологические опасности
Одопту-море	18	Наклонно-направленные скважины	Землетрясения, активные разломы, абразия, эскаррация, песчаные волны, палеодолины, газонасыщенные грунты, газовые карманы
Пильтун-Астохское	27–35	Морские эксплуатационные платформы на основании гравитационного типа	Землетрясения, разрывные нарушения, валуны и поля валунов, эрозия, выходы коренных пород, неоднородность грунтового основания, песчаные волны, палеодолины, газонасыщенные грунты, газовые карманы
Аркутун-Даги	15–40	Морская эксплуатационная платформа на основании гравитационного типа	Землетрясения, разрывные нарушения, валуны, эскаррация, песчаные волны, палеодолины, газонасыщенные грунты, газовые трубы, газовые карманы
Чайво	10–26	Морская эксплуатационная платформа на основании гравитационного типа	Землетрясения, разрывные нарушения, валуны, эскаррация, песчаные волны, палеодолины, газонасыщенные грунты
Лунское	42–47	Морская эксплуатационная и буровая платформа на основании гравитационного типа	Землетрясения, разрывные нарушения, выходы коренных пород, валуны и поля валунов, палеодолины, газонасыщенные грунты, газовая труба, газовые факелы, покмарки
Кириновское	75–90	Подводная	Землетрясения, разрывные нарушения, рифели, палеодолины, газонасыщенные грунты, газовая труба, газовые карманы

выполнены комплексные инженерные изыскания, включая сейсморазведку высокого разрешения (СВР), непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП), гидролокацию бокового обзора (ГЛБО), эхолотирование, подводную видеосъемку при помощи телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА), литодинамические исследования, буровые работы и пробоботбор, лабораторные исследования грунтов и др. Опыт изучения морских геологических опасностей показал, что при выявлении донных мезо- и микроформ (палеодолин, эскаррационных борозд, покмарков и т.д.) наилучшие результаты были получены в ходе совместного анализа батиметрических, сейсмоакустических данных и данных гидролокатора бокового обзора. При этом очевидны преимущества многолучевого эхолотирования по сравнению с однолучевой моделью. Для получения данных о латеральной изменчивости пород и строении геологического разреза, в том числе для обнаружения газонасыщенных грунтов, наилучший результат дает применение многоканального НСАП в комплексе с бурением [11].

Изучение ведущих геопасностей (землетрясений и газопроявлений) с помощью указанных методов позволило заключить следующее [12]. Для периода повторяемости

$T = 1000$  лет, которому отвечает нормативная карта ОСР-97-В, получены следующие оценки исходной сейсмичности для различных участков района обустройства Кириновского ГКМ: максимальная амплитуда колебаний грунта  $A_{\max} = 0,21-0,25$  g, сейсмическая интенсивность по шкале MSK  $I_{MSK} \approx 8,0-8,3$  балла для грунта II категории, при этом верхние значения  $I_{MSK}$  относятся к береговой зоне, а нижние – к восточному глубоководному морскому участку. Результаты выполненных расчетов показывают, что исходная сейсмичность района обустройства Кириновского ГКМ для периода повторяемости  $T = 1000$  лет ниже, чем указывается на карте ОСР-97-В, где данный район характеризуется исходной сейсмичностью 9 баллов. Расчетная сейсмическая интенсивность на участках с неблагоприятными грунтовыми условиями достигает 8,7 балла.

К числу наиболее опасных вторичных эффектов землетрясений относятся *разжижение грунтов* и *цунами*. Исследование склонности грунтов к разжижению (по данным статического зондирования, путем динамического трехосного сжатия модельных образцов, а также с использованием метода, основанного на расчетах сейсмического потенциала разжижения) позволило заключить, что песчаные грунты в местах строительства объектов ПДК под-

вержены разжижению. Разжижение грунтов возможно при сейсмических воздействиях с  $T = 500\text{--}1000$  лет и магнитудой  $M = 5,5\text{--}6,0$ . Разжижаются в основном пески мелкие рыхлые, пески средней плотности, песок пылеватый средней плотности и среднетонкий песок средней плотности. Мощность разжижаемых грунтов достигает 3–4 м. Наблюдается тенденция уменьшения мощности разжижаемого слоя по направлению к берегу [13].

Анализ исторических данных (хроник) о цунами на восточном побережье Сахалина, дополненный численным гидродинамическим моделированием распространения цунами, показал:

- цунамиопасность для участков побережья, прилегающих к району Кириинского ГКМ, можно квалифицировать как умеренную. Статистические оценки говорят о возможности появления цунами с высотами, превышающими 1,2 м, раз в 50 лет, высотами  $> 1,6$  м раз в 100 лет и высотами  $> 2,7$  м раз в 500 лет;

- в случае реализации среднего (наиболее вероятного, ожидаемого) сценария развития цунами максимальная высота волн цунами на восточном побережье Сахалина может достигать 3 м. Учет приливных колебаний уровня, амплитуда которых в фазе сизигии может достигать 1 м, увеличивает это значение до 4 м;

- при консервативном подходе (рассматривается самый пессимистический сценарий генерации цунами землетрясениями с  $M = 9,0$ ) амплитуда волн цунами на побережье северного Сахалина может достигать 10 м.

К ведущим геопасностям следует относить также естественные газопроявления в форме метановых сипов и неконтролируемые газопроявления при проходке скважин в виде выброса флюидов при вскрытии газовых карманов с АВПД [14]. Аварии и инциденты, вызванные прорывами газа к поверхности дна, за последние 50 лет произошли в различных регионах Мирового океана, в том числе на российском шельфе Азовского, Каспийского, Восточно-Сибирского, Печорского и Черного морей. Аварии сопровождались загрязнением морской воды, атмосферы, формированием крупных антропогенных котлованов на дне моря (до 500 м в диаметре и глубиной до 100 м), гибелью людей и морских организмов.

Существует несколько вариантов сценария аварийных ситуаций на поверхности моря, связанных с выбросами флюидов при вскрытии газовых карманов [15]:

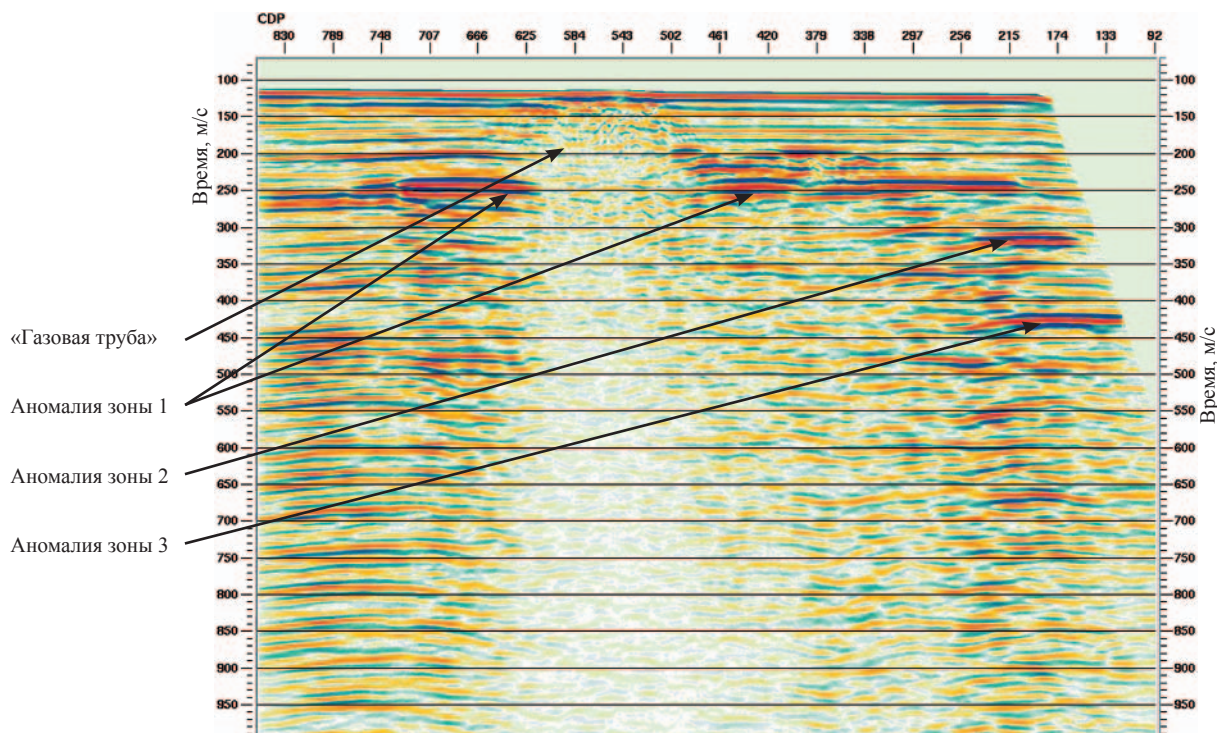
- 1) авария с наиболее тяжелыми последствиями для буровых гравитационных платформ: выброс газа под или вблизи платформы, образование котлована и его рост в процессе развития аварийной ситуации, нарушение устойчивости сооружения, опрокидывание платформы;

- 2) авария с наиболее тяжелыми последствиями для плавучих буровых установок и судов: выброс газа, образование газовойдынного шлейфа, образование газовойдынного облака, пожар (взрыв), снижение/потеря плавучести плавсредств, попавших в зону выхода газовойдынного шлейфа на поверхность воды, гибель плавсредств;

- 3) общий сценарий с наиболее тяжелыми последствиями для буровых платформ и судов: выброс газа, образование над поверхностью моря взрывоопасного газовойдынного облака, возможные его возгорание или взрыв в замкнутой зоне морских сооружений. К числу сценариев с тяжелыми гуманитарными последствиями следует отнести таковой, приводящий к выбросам токсичного газа (например, сероводорода  $H_2S$ ) на палубу бурового судна;

- 4) наиболее вероятный сценарий: выброс и падение в рабочей зоне оборудования, спущенного в скважину, бурового раствора и шлама в связи с газопроявлениями, изменение динамических характеристик гребных винтов и рулевых устройств судов, частичная потеря их плавучести.

В пределах Кириинского блока геофизическими методами – НСАП и СВР (работы выполнялись ЗАО «Тихоокеанская инжиниринговая компания», г. Южно-Сахалинск) – обнаружены два основных вида поверхностных газопроявлений: локальные (сосредоточенные) выходы (газовые факелы) и площадное поступление метана из так называемых газовых труб над газоносными структурами. В районе исследований отчетливо выделяются две «газовые трубы», которые образовались в результате миграции флюидов вверх по разрезу из глубоководных горизонтов. Одна из них находится на Кириинской площади и прослеживается до самого дна (рисунок). Над газовой трубой сформировался бугор высотой до 1,5–2,0 м.



**Сейсмопрофиль «газовой трубы» (вертикальная зона осветления записи) и газовых карманов (аномальные зоны) в центральной части Киринского ГКМ: CDP (англ. common-depth point) – общая глубинная точка, м**

К наиболее опасному для ПДК виду газопроявлений относятся так называемые газовые карманы в верхней части осадочного чехла, приуроченные к плейстоценовым и неогеновым пескам, алевролитам и слаболитифицированным песчаникам. Выделены три-четыре зоны локализации газовых карманов на глубинах преимущественно 100–325 м от поверхности морского дна.

Бурению скважин, особенно эксплуатационных, внутри контура нефтегазоносной залежи должны предшествовать детальные геофизические исследования с целью обнаружения зон АВПД. Предварительная оценка степени их опасности возможна на основе анализа аномальных эффектов отраженных волн. С целью идентификации и оценки степени опасности зон газонасыщения (газовых карманов) для сооружений ПДК рассматривался следующий комплекс аномальных эффектов отраженных волн:

- резкое возрастание амплитуд и уменьшение их частоты;
- изменение полярности волн (с положительной на отрицательную);
- прогибание под «яркими пятнами» границ ниже залегающих отражающих горизонтов (за счет уменьшения скорости прохождения

волн в газосодержащих грунтах). Учитывалась также глубина залегания газовых карманов с АВПД.

Как показывает практика, наиболее эффективным методом обнаружения зон газонасыщения является объемная сейсморазведка. Ее применение позволяет избежать неоднозначности при идентификации аномалий волнового поля (нередко аномалии возникают из-за литологической неоднородности разреза, а не в связи с газонасыщенностью осадков) и, в случае обнаружения, более точно определить пространственное положение газовых карманов.

Работы по оценке геопасностей завершаются составлением картографических моделей: инвентаризационных карт опасностей газопроявлений и/или всех обнаруженных на донной поверхности или в грунтовой толще геопасностей в масштабах 1:5000 – 1:10000. Назначение таких карт – отображение общих закономерностей пространственного распространения геопасностей.

По заданию заказчика дополнительно может быть составлена крупномасштабная карта районирования донной поверхности по степени геологической опасности. При ее составлении применяется метод экспертного ранжи-



рования геологических опасностей. В качестве геоопасностей рассматриваются геологические процессы, специфические грунты, неровности морского дна (поднятия и впадины) и т.д., которые могут повлиять на устойчивость морских сооружений. Критериями ранжирования являются последствия (разной тяжести – аварии,

инциденты, дефекты) их воздействий на сооружения. Выделяются категории высокой, средней и низкой геоопасности. Указанным категориям соответствуют следующие таксоны зонирования морского дна по геоопасности: опасная зона, зона относительной опасности и относительно безопасная зона.

### Список литературы

1. Миرونюк С.Г. Опыт комплексной оценки и крупномасштабного районирования северо-восточного шельфа Черного моря по геологической опасности для строительства линейных объектов / С.Г. Миرونюк, В.В. Маркарьян, С.К. Шельтинг // Инженерные изыскания. – 2013. – № 13. – С. 46–57.
2. Миرونюк С.Г. Морские инженерные изыскания и оценка опасности субаквальных геологических процессов / С.Г. Миرونюк // Инженерные изыскания. – 2014. – № 4. – С. 60–64.
3. Астафьев В.Н. Торосы и стамухи Охотского моря / В.Н. Астафьев, Г.А. Сурков, П.А. Трусков. – СПб.: Прогресс-Погода, 1997. – 197 с.
4. Белошапков А.В. Аккумулятивные формы прибрежной зоны и шельфа северо-восточного Сахалина / А.В. Белошапков, А.И. Гордин, В.В. Ильин, В.Ф. Путов // Человечество и береговая зона Мирового океана в XXI веке. – М.: ГЕОС, 2001. – С. 126–140.
5. Кофф Г.Л. Оценка риска цунами и сейсмического риска береговых зон Сахалинской области / Г.Л. Кофф, Б.В. Левин, Е.Н. Морозов, О.В. Барсукова. – М.; Южно-Сахалинск, 2005. – 61 с.
6. Поломошнов А.М. Исследование стамух на шельфе северного Сахалина / А.М. Поломошнов, В.Н. Астафьев, С.В. Землюк // Материалы 2-го Европейского симпозиума по шельфовой механике ISOPE EUROMS-99: Трубопроводы. – М., 1999. – С. 85–88.
7. Рогожин Е.А. Очерки региональной сейсмотектоники / Е.А. Рогожин. – М.: ИФЗ РАН, 2012. – 340 с.
8. Тараканов Р.З. Сейсмичность, глубинное строение и сейсмическая опасность Курило-Охотского региона / Р.З. Тараканов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук в форме науч. докл. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. – 76 с.
9. Шакиров Р.Б. Морфотектонический контроль потоков метана в Охотском море / Р.Б. Шакиров, А.И. Обжиров // Подводные исследования и робототехника. – 2009. – № 1 (7). – С. 31–39.
10. Миرونюк С.Г. Подводные добычные комплексы – перспективное направление добычи газоконденсата на шельфе. Технология и риски / С.Г. Миرونюк, О.А. Пименов, О.А. Порядина, Н.О. Хозяинова // Газовая промышленность. – 2014. – Декабрь (№ 715). – С. 28–33.
11. Миرونюк С.Г. Опыт применения геофизических методов с целью идентификации морских геологических опасностей / С.Г. Миرونюк, С.М. Клещин // ГеоИнжиниринг, 2010. – № 1. – С. 48–54.
12. Миرونюк С.Г. Опыт сейсмического микрорайонирования участков строительства морских трубопроводных и добычных сооружений на шельфе / С.Г. Миرونюк // Газовая промышленность. – 2014. – Спецвыпуск: Промышленная безопасность и противопожарная защита объектов газовой промышленности (№ 712). – С. 113–119.
13. Миرونюк С.Г. Оценка разжижаемости грунтов на площадках строительства подводных трубопроводов и добычного комплекса в районах северо-западного и северо-восточного шельфа о. Сахалин / С.Г. Миرونюк, С.В. Манжосов, В.Ю. Ионов // Инженерные изыскания. – 2011. – № 6. – С. 6–14.
14. Миرونюк С.Г. Газонасыщенные морские грунты и естественные газовыделения углеводородов: закономерности распространения и опасность для инженерных сооружений / С.Г. Миرونюк, В.П. Отто // Геориск. – 2014. – № 2. – С. 8–18.
15. Миرونюк С.Г. Локализация приповерхностных зон скопления газа (газовых карманов и труб) геофизическими методами и оценка их опасности для морских сооружений / С.Г. Миرونюк // ТЭК. Безопасность. – 2013. – № 2. – С. 74–79.