

УДК 551.462.8

ПОКМАРКИ ВОСТОЧНОГО СКЛОНА ОСТРОВА САХАЛИН

© 2011 Б.В. Баранов¹, К.А. Дозорова¹, А.С. Саломатин²

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997; e-mail: bbaranov@ocean.ru;

²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Владивосток, 690041

В статье представлены оригинальные данные, полученные при батиметрических и сейсмоакустических исследованиях восточного склона о. Сахалин в рамках российско-германского проекта КОМЭКС (Курило-Охотский Морской Эксперимент). Впервые в этом районе многолучевым эхолотом были закартированы покмарки – конусовидные депрессии, которые, как предполагается, возникают на морском дне за счет выброса газа из осадочной толщи. На восточном склоне о. Сахалин покмарки присутствуют повсеместно, за исключением его сегмента, граничащего с Курильской котловиной. Они встречаются в интервале глубин 500-1400 м, их размеры и плотность распределения варьируют как в пределах одного сегмента склона, так и от сегмента к сегменту. Имеющиеся данные дают основание предполагать, что покмарки южного сегмента склона являются слабо активными, газовые плюмы наблюдаются главным образом над покмарками в центральном и северном сегментах склона, что может быть обусловлено более высокой сейсмической активностью этих участков.

Ключевые слова: восточный склон, Сахалин, покмарки, морфология, размеры, распространение, активность.

ВВЕДЕНИЕ

Покмарки (от англ. rockmark), представляющие собой конусовидные депрессии на поверхности морского дна, были впервые обнаружены на шельфе провинции Новая Шотландия (Канада) при проведении съемки гидролокатором бокового обзора (King, MacLean, 1970). К настоящему времени установлено, что эти структуры широко распространены в морях и озерах в интервалах глубин от 30 до более 3000 м (Judd, Hovland, 2007). Предполагается, что покмарки возникают в результате эпизодического выброса газа, главным образом метана, из осадков на поверхность морского дна (Hovland, Judd, 1988). Изучение покмарков имеет важное фундаментальное и прикладное значение, поскольку предполагается, что выброс метана может происходить за счет разложения газовых гидратов (Kennet et al., 2003), которые рассматриваются в качестве будущего углеводородного сырья (Kvenvolden, 1988). Кроме того эти образования представляют собой потенциальный источник газов, вызывающих парниковый эффект (Dickens et al., 1997), а разложение газогидратов с выделением боль-

ших объемов газов является одной из причин, способствующих обрушению континентального склона (Henriet and Mienert, 1998).

Восточный склон острова Сахалин с 80-х годов прошлого столетия известен как район, где происходит активная разгрузка метана (Обжиров, 2006). Однако покмарки были обнаружены здесь только после картирования морского дна многолучевыми эхолотами в рейсах НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (КОМЕХ..., 2003) и «Зонне» (Cruise..., 2004). В настоящей работе по материалам батиметрической и сейсмоакустической съемок, выполненных в 1998 - 2004 гг., впервые дано описание морфологии покмарков, рассмотрен характер их распределения вдоль восточного склона о. Сахалин и приведены данные об их активности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В статье были использованы материалы, полученные в морских экспедициях при изучении восточного склона о. Сахалин в рамках российско-германского проекта КОМЭКС (Курило-Охотский Морской Эксперимент).

В 2002 г. батиметрическая съемка была выполнена в двух рейсах на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV29-1 и LV29-2) и в 2004 г. на НИС «Зонне» (SO178). При съемке использовались эхолоты трех типов: стационарный однолучевой эхолот (ELAC LAZ-72 E-V) на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» с частотой 12 кГц (Salomatin, 2003); буксируемый многолучевой эхолот «LOLA» на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» с диапазоном измерений от 10 до 3000 метров и частотой 12 кГц, 121 луч (Hein, 2003); стационарный многолучевой эхолот «СИМРАД EM 120» на НИС «Зонне» с диапазоном измерений от 10 до 10000 м и частотой 12 кГц, 191 луч (Baranov et al., 2004). Данные многолучевых эхолотов обрабатывались с помощью программы NEPTUNE, входящей в программное обеспечение многолучевого эхолота «СИМРАД EM 120» и разработанной компанией Kongsberg Maritime (Норвегия). Расчет сетки размерами 50 и 100 м и построение карт выполнялись с помощью программы Surfer 8. Разрешающая способность использованных эхолотов дает возможность на глубинах порядка 1000 м регистрировать структуры размерами в первые десятки метров и глубиной более 5 м, поэтому меньшие по размерам формы рельефа могли быть нами пропущены. Съемка однолучевым эхолотом проводилась в рейсах на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» по всему маршруту, многолучевыми эхолотами – на отдельных полигонах.

Гидроакустическая съемка была выполнена на НИС «Академик Лаврентьев» с целью регистрации газовых плюмов. Для этого использовался гидроакустический комплекс, созданный на базе модифицированных судовых эхолотов Sargan-EM и Sargan-GM, эхолота ELAC LAZ-72 E-V и многоканальной системы регистрации (Salomatin, 2003). Этот комплекс дает возможность проводить одновременную регистрацию сигналов на четырех независимых каналах с частотами 12 и 20 кГц. Гидроакустическая съемка проводилась одновременно со съемкой однолучевым эхолотом по всему маршруту судна.

Для описания строения осадков были использованы данные, полученные параметрическим эхолотом «SES-2000DS» и системой многоканального сейсмического профилирования. Параметрический эхолот «SES-2000DS» использовался в 29-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (2002 г.). Съемка проводилась в интервале глубин 200–3000 м, проникновение в осадочный чехол составляло до 50 м с вертикальным разрешением около 6 см. Первичная частота передатчика была 100 кГц, а вторичные частоты – 4, 5, 6, 8, 10 и 12 кГц (Wunderlich, 2003).

Многоканальные сейсмические исследования МОВ ОГТ проводились в трех геофизических

рейсах на НИС «Гагаринский» (1998–2001 гг.). Использовалась система, состоящая из 8-канальной косы производства компании GECO Prakla (Германия) и двух пневмоисточников: пушки с преобладающей частотой 70–90 Гц и общим объемом 6.88 л и мини-пушки с преобладающей частотой 80–170 Гц и объемом 1.04 л. Проникновение в осадочный чехол составляло до 2 с удвоенного времени распространения сигнала (Wong et al., 2003).

РЕЛЬЕФ ВОСТОЧНОГО СКЛОНА САХАЛИНА

Для генерального описания рельефа восточного склона о. Сахалин нами была использована батиметрическая карта, составленная А.С. Свиричевским (Baranov et al., 1997) для Охотского моря по данным съемок однолучевыми эхолотами в морских экспедициях Института океанологии РАН, Института морской геологии и геофизики ДВО РАН и Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН

Восточный склон о. Сахалин граничит с различными структурными элементами дна Охотского моря, а именно: Курильской глубоководной котловиной, возвышенностями Академии Наук и Института океанологии, котловиной Дерюгина и трогом Старицкого (рис. 1). Рельеф склона, за исключением отрезка, примыкающего к Курильской котловине, является достаточно простым и однородным. Тем не менее, с юга на север наблюдаются изменения высоты склона, его ширины, формы и, соответственно, углов наклона. Это дало нам основание подразделить склон на несколько сегментов, имеющих отчетливые границы. Первая из них приурочена к поднятию Полевого, вторая – к прогибу, расположенному на 51°30' с.ш., а третья определяется по отчетливому изменению морфологии склона вблизи 54° с.ш. (рис. 1).

Сегмент склона, обращенный к Курильской котловине, является самым высоким (более 3000 м), имеет сложный рельеф и крутые углы наклона. Каньоны, оползни и глубоководные террасы широко распространены на этом сегменте склона (Gnibidenko et al., 1995).

Южный сегмент граничит с возвышенностью Академии Наук, отделяясь от нее желобом Шмидта. Склон в пределах этого сегмента является наиболее широким. Его высота составляет около 1000 м, а углы наклона не превышают 1°. Поверхность склона здесь очень ровная и небольшие осложнения рельефа, представленные V-образными депрессиями, появляются только на глубинах свыше 500 м.

Центральный сегмент граничит с возвышенностью Института океанологии и котловиной

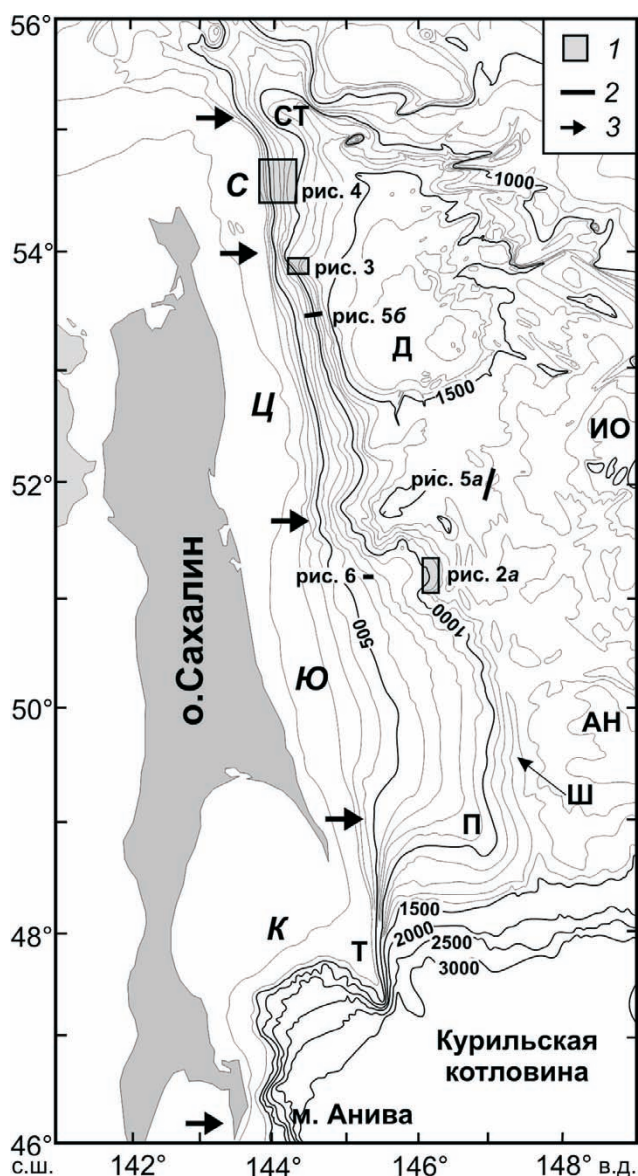


Рис. 1. Батиметрическая карта восточного склона о. Сахалин, положение полигонов и сейсмоакустических профилей: 1 – полигоны, закартированные многолучевым эхолотом; 2 – сейсмоакустические профили; 3 – границы сегментов: курильского (К), южного (Ю), центрального (Ц) и северного (С). Изобаты проведены через 100 м; для склона Курильской котловины – через 500 м. Сокращения: Т – хребт Терпения; П – поднятие Полевого; Ш – желоб Шмидта; Д – котловина Дерюгина; СТ – трог Старицкого; возвышенности: АН – Академии наук, ИО – Института океанологии.

Дерюгина. По сравнению с южным сегментом ширина склона здесь уменьшается, а его высота увеличивается до 1300 м. Отчетливый перегиб шельфа отсутствует, и склон на глубинах ниже 200 м имеет выпуклый профиль со средними углами наклона около 1.5°. В пределах этого сегмента находится два участка с волнистой поверхностью рельефа. Один из них располагается в верхней части склона на глубинах 200-700 м, а второй приурочен к его подножью с глубиной

1100-1500 м. По данным сейсмических исследований установлено, что волнистое строение поверхности обусловлено осадочными волнами (Wong et al., 2003).

Примечательной особенностью границы между центральным и северным сегментами является наличие в рельефе двух уступов, которые простираются в северо-западном и северо-восточном направлениях и имеют высоту до 100 м. В результате исследований, проведенных в рамках проекта КОМЭКС и корейско-российско-японских проектов CHAOS (Hydro-Carbon Hydrate Accumulations in the Okhotsk Sea) и SSGH (Sakhalin Slope Gas Hydrates), было установлено, что уступы соответствуют сопряженным разломам, объединяемым в зону разломов Лаврентьева (Baranov et al., 2008).

К северу от этой границы происходит еще одно изменение в строении склона: северный сегмент в отличие от центрального сегмента имеет вогнутый профиль со средними углами наклона около 2.5° и переход от склона к шельфу маркируется отчетливой бровкой, расположенной на глубине около 200 м. Предполагается, что вогнутый профиль склона северного сегмента образовался за счет подводных оползней, приводящих к сносу осадочного материала; центральный сегмент до настоящего времени остается стабильным (Wong et al., 2003).

Выше отмечалось, что в пределах южного сегмента на глубинах свыше 500 м появляются небольшие осложнения рельефа. Они представлены многочисленными V-образными депрессиями, глубина которых достигает 50-60 м, а размеры превышают 1 км. Батиметрическая съемка, выполненная многолучевым эхолотом «СИМРАД ЕМ 120» на НИС «Зонне», а также имеющиеся в нашем распоряжении гидроакустические, сейсмические профили и профили, полученные параметрическим эхолотом, дают основание предполагать, что эти депрессии являются покмаркам.

МОРФОЛОГИЯ И РАЗМЕРЫ ПОКМАРКОВ

Согласно общепринятому определению покмарки представляют собой округлые или продолговатые депрессии, обычно образующиеся в рыхлых тонкозернистых осадках за счет выброса газа в водную толщу. Вследствие этого они имеют эрозионную природу, что проявляется в срезании осадочных горизонтов на стенках покмарков (Hovland, Judd, 1988). Размеры покмарков колеблются от нескольких метров до нескольких десятков метров при глубине 5-10 м. Образования размерами более 350 м и глубиной свыше 35 м были названы гигантскими покмарками (Kelley et al., 1994). Встречаются также покмарки, размеры

которых превышают 1 км при глубине в несколько десятков метров (Long et al., 1998).

Данные о морфологии и размерах покмарков восточного склона о. Сахалин были получены на трех полигонах, расположенных в пределах южного и северного сегментов, а также на границе между центральным и северным сегментом (рис. 1).

Первый полигон был закартирован многолучевым эхолотом в рейсе НИС «Зонне» на южном сегменте в интервале глубин 1060-1350 м (рис. 1). По особенностям рельефа этот полигон можно разделить на две части: юго-западную и северо-восточную (рис. 2а). В юго-западной части располагаются два каньона северо-западного – юго-восточного простирания. Верховье одного из каньонов находится на глубине 1150 м и его русло постепенно опускается до глубин более 1350 м. В отличие от этого русло второго каньона состоит из нескольких изолированных депрессий. Депрессии имеют округлые или вытянутые в северо-западном направлении очертания, их размеры составляют от 250 до 750 м при глубине от 30 до 70 м.

Северо-восточная часть полигона представляет собой достаточно пологий склон, на котором располагается несколько десятков депрессий.

Выше изобаты 1300 м, на более крутом участке склона, депрессии, как правило, вытянуты в северо-западном направлении, а ниже этой отметки они являются округлыми (рис. 2б). Депрессии имеют размеры от 100 до 800 м, а их глубины колеблются от 5 до 100 м. Размер вытянутых депрессий по сравнению с округлыми больше, и соотношение длина/ширина для них варьирует от 2.17 до 3.5. Как для округлых, так и для вытянутых депрессий характерным является то, что они располагаются не хаотически, а в виде цепочек, ориентированных в северо-западном направлении.

Следующий полигон был закартирован в рейсе НИС «Зонне» в зоне разломов Лаврентьева, которая соответствует границе между центральным и северным сегментами (рис. 1). Главными морфологическими особенностями полигона является наличие двух разломных уступов, простирающихся в северо-восточном и северо-западном направлении, а также поля осадочных волн, верхняя и нижняя границы которых расположены на глубине около 900 и 1300 м, соответственно.

В пределах этого полигона находится несколько округлых депрессий (рис. 3). Три из них, расположенные вблизи уступа северо-восточного

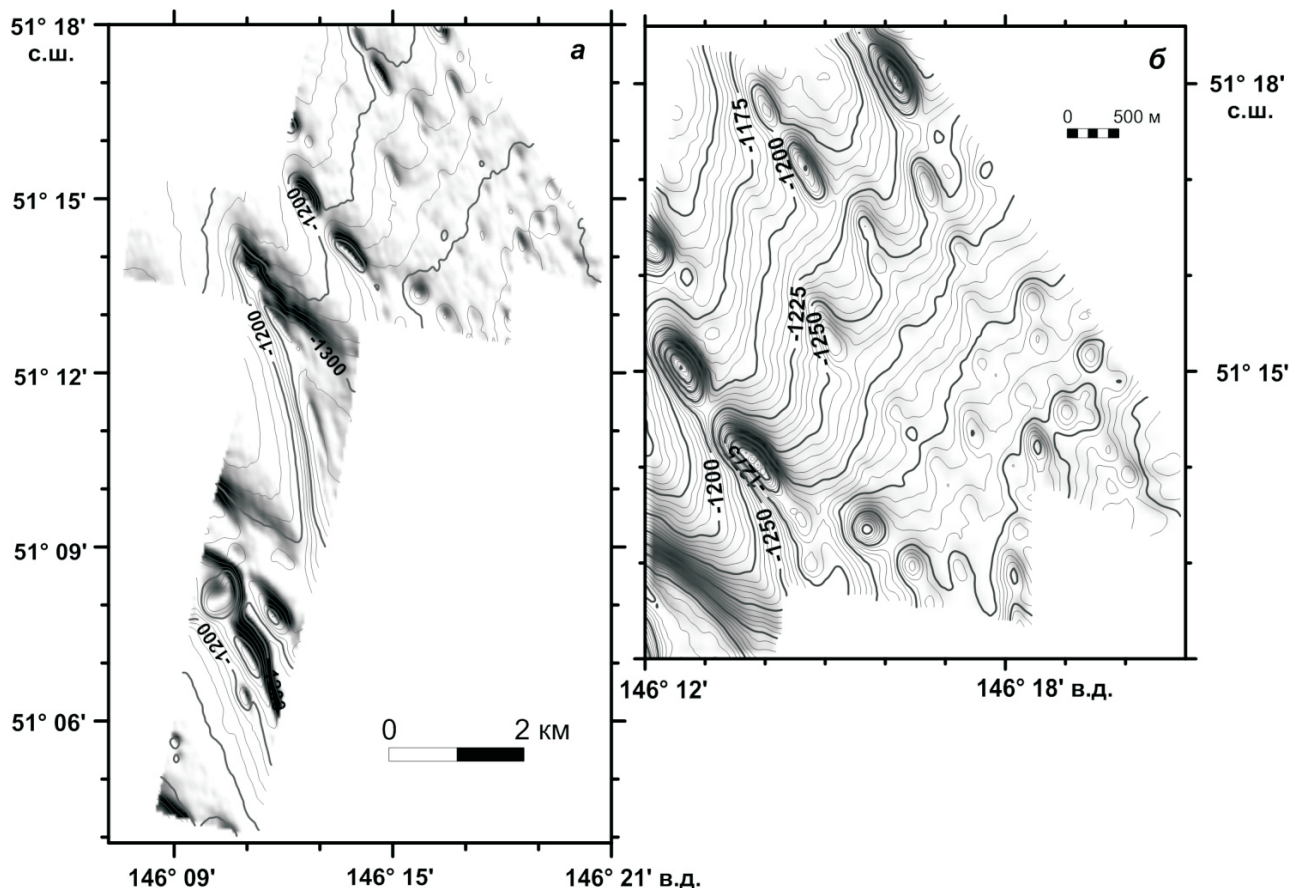


Рис. 2. Батиметрическая карта полигона в пределах южного сегмента, на которой видны округлые или удлиненные депрессии различных размеров (а) и ее северо-восточный фрагмент, показанный в более крупном масштабе (б). Изобаты проведены через 25 м (а) и 5 м (б). Положение см. на рис. 1.

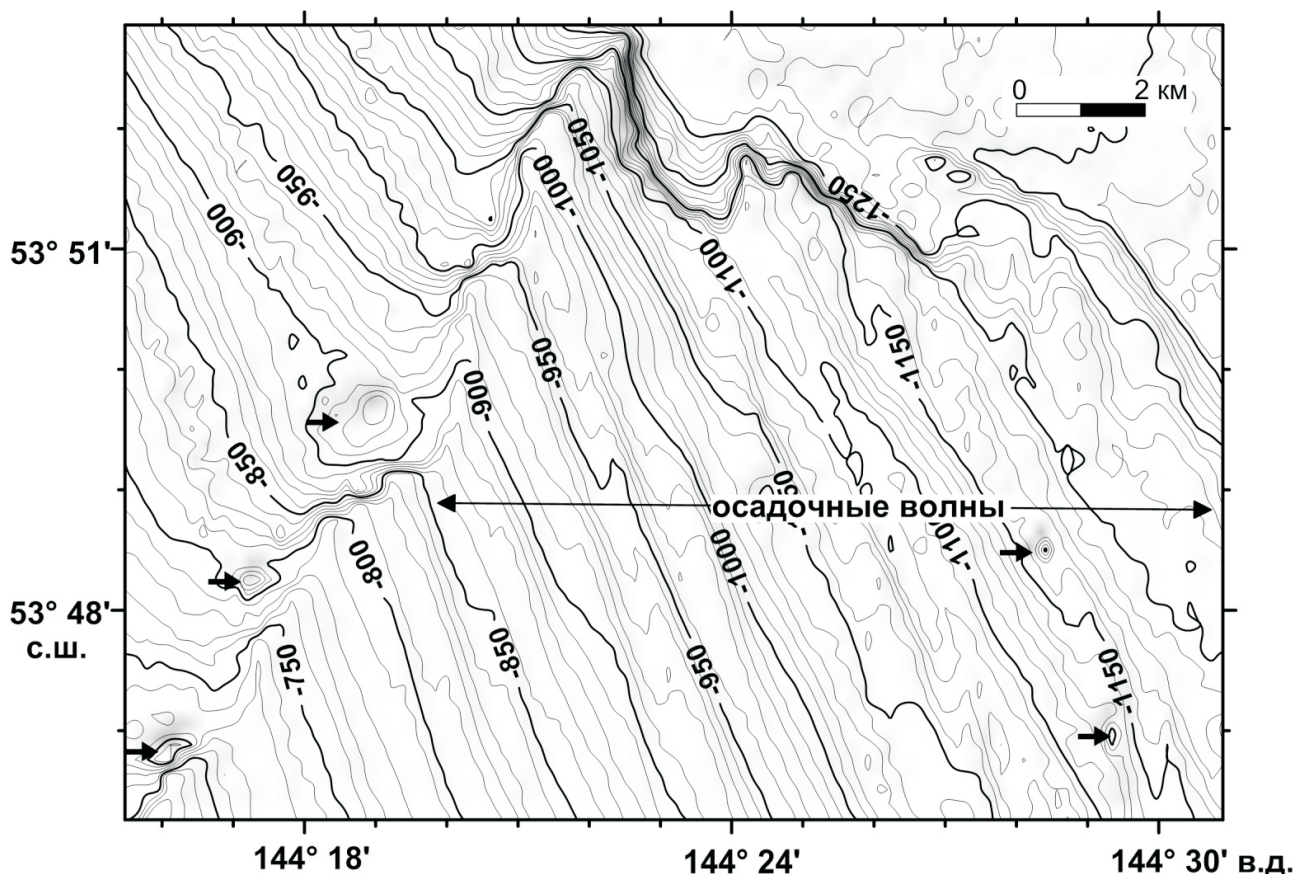


Рис. 3. Батиметрическая карта зоны разломов Лаврентьева. Наиболее крупные депрессии помечены стрелками. Сечение изобат 10 м. Положение района см. на рис. 1.

простираются, имеют размеры от 500 до 1000 м при глубине до 30 м. Несколько структур с размерами ~ 100 м и глубиной до 10 м находятся в поле осадочных волн, причем две наиболее примечательные с диаметром ~ 350 и глубиной до 30 м приурочены к вершине одной и той же осадочной волны.

В пределах северного сегмента съемка многолучевыми эхолотами была выполнена в рейсах НИС «Академик М.А. Лаврентьев» и «Зонне» на полигоне в интервале глубин моря 200-1090 м (рис. 4). Рельеф этого полигона является достаточно простым: изобаты ориентированы в субмеридиональном направлении, а склон полого погружается на восток к котловине Дерюгина. Округлые или слегка вытянутые депрессии начинают появляться на склоне ниже изобаты 800 м. Они наиболее распространены в центральной части полигона. Единственным исключением является структура, расположенная в верхней части склона на глубине 350 м. Глубина депрессий составляет 10-40 м, а размеры колеблются от 350 до 1200 м. Для вытянутых депрессий отношение длина/ширина варьирует от 2 до 3.33.

Таким образом, батиметрическая съемка, выполненная многолучевыми эхолотами, показала, что на восточном склоне о. Сахалин располагается множество депрессий с размерами

от нескольких десятков до нескольких сотен метров и глубиной до нескольких десятков метров. Их морфология дает нам основание высказать предположение о том, что они являются покмарками.

Выше отмечалось, что покмарки имеют эрозионную природу, что проявляется в срезании осадочных горизонтов на их стенках (Hovland, Judd, 1988). Поэтому склоны покмарков являются очень крутыми, что отчетливо видно на рис. 2. Вывод о том, что закартированные депрессии представляют собой покмарки, подтверждается сейсмоакустическими разрезами (рис. 5, 6), которые, хотя и не захватывают полигоны, но расположены в достаточной близости от них и в пределах тех же структурных сегментов.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ПЛОТНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКМАРКОВ

Картирование рельефа дна многолучевым эхолотом было выполнено только на трех полигонах. Поэтому на основании имеющегося материала детально оконтурить каждую область с покмарками не представляется возможным. Тем не менее, имеющиеся батиметрические и сейсмоакустические профили дают нам основание предполагать, что эти структуры встречаются

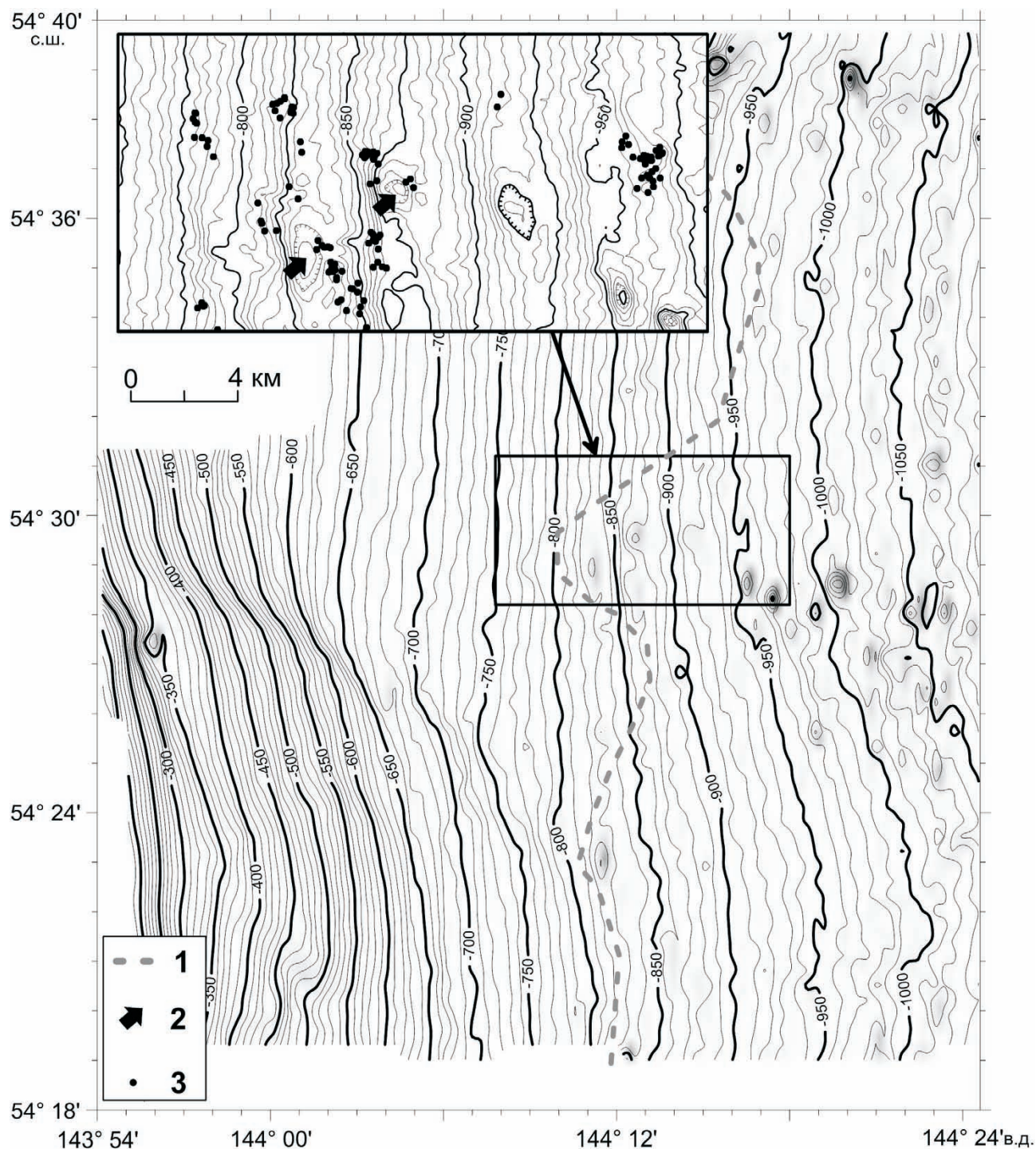


Рис. 4. Батиметрическая карта участка северного сегмента склона на котором видны округлые или удлиненные депрессии: 1 – верхняя граница области распространения депрессий; 2 – активные покмарки; 3 – газовые плумы. Изобаты проведены через 10 м и 5 м (врезка). Положение участка см. на рис. 1.

на всех сегментах восточного склона о. Сахалин, за исключением участка курильского сегмента между м. Анива и поднятием Полевого.

Верхние границы области распространения покмарков колеблются от 500 м для южного сегмента, до 700 м для центрального и 800 м для северного сегмента. Нижняя граница для южного сегмента проходит по желобу Шмидта и депрессии, которая отделяет склон о. Сахалин

от возвышенности Института океанологии. Для центрального и северного сегментов нижняя граница области распространения покмарков, вероятно, находится в районе перехода склона в котловину Дерюгина. Структуры, которые можно было бы интерпретировать в качестве покмарков, в самой котловине не обнаружены.

Очевидно, что количество покмарков значительно варьирует, как в пределах сегмента, так и

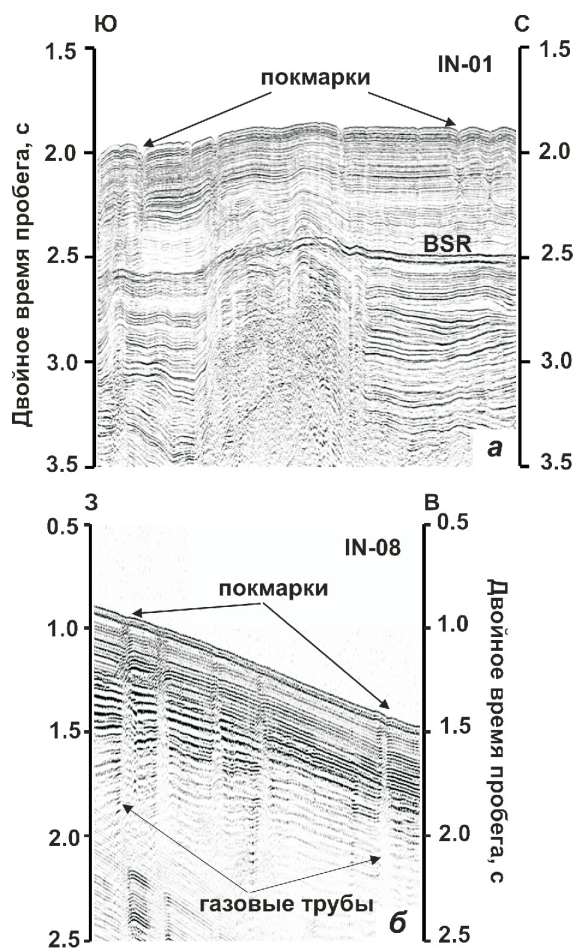


Рис. 5. Фрагменты сейсмических профилей IN-01 (а) и IN-08 (б) с покмарками. На профиле IN-01 газовые трубы (вертикальные зоны акустической прозрачности/мутности) под покмарками отсутствуют. Наличие газовых труб на профиле IN-08 дает основание говорить об активности покмарков. Положение профилей см. на рис. 1.

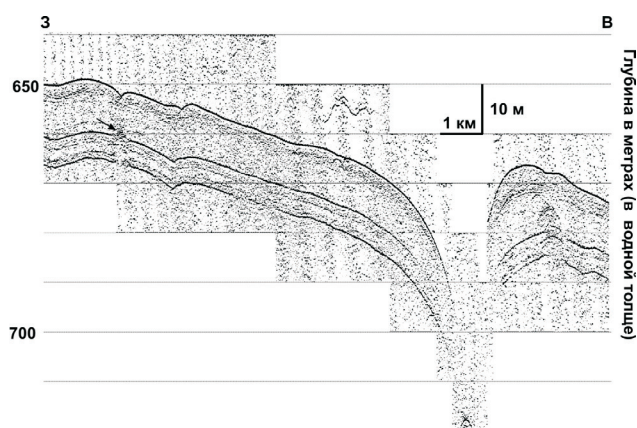


Рис. 6. Фрагмент профиля SES-003 на котором в его восточной части виден крупный покмарк размерами более 2 км и глубиной 50 м. На склонах покмарка отражающие горизонты срезаются. Исчезновение отражающих горизонтов и зона акустической мутности (стрелка) под покмарком в западной части профиля дает основание предположить наличие газа. Положение профиля см. на рис. 1.

от сегмента к сегменту, и мы предполагаем, что они наиболее широко распространены в пределах южного сегмента. Их плотность достигает здесь 1 покмарк/км² (северо-восточная часть первого полигона), что является максимальным значением для всех полигонов, закартированных многолучевым эхолотом. В пределах южного сегмента на батиметрических и сейсмоакустических профилях была также зафиксирована максимальная частота встречаемости покмарков составляющая 1 покмарк/3 км длины профиля.

АКТИВНОСТЬ ПОКМАРКОВ

Свидетельством активности покмарков является наличие в водной толще над покмарками газовых плюмов и вертикальных зон акустической мутности/прозрачности (газовых труб) на сейсмических профилях под покмарками.

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что распределение газовых плюмов на восточном склоне о. Сахалин является неравномерным (рис. 7а). В пределах его курильского сегмента было зарегистрировано 10 плюмов, расположенных, главным образом, на шельфе и его перегибе. Покмарки здесь обнаружены не были и газовые плюмы наблюдались над ровными участками дна и над небольшими холмами высотой в несколько метров. На южном сегменте к настоящему времени на глубине 567 м был обнаружен только один газовый плюм высотой около 300 м. Он приурочен к покмарку диаметром 850 м и глубиной 23 м (рис. 7б). Центральный сегмент характеризуется неравномерным распределением газовых плюмов. В его южной части они единичны, в то время как в северной части сегмента, начиная с 53° с.ш., их количество резко увеличивается. Множество газовых плюмов было также зарегистрировано в пределах северного сегмента.

В этой связи возникает вопрос, отражает ли наблюдаемая картина реальное распределение газовых плюмов, или она является артефактом, связанным с плотностью гидроакустической съемки. Действительно на северном сегменте и северной части центрального сегмента, которые являлись основными объектами наших исследований, плотность гидроакустической съемки является наибольшей по сравнению с более южными районами. С другой стороны для южной половины центрального и всего южного сегмента плотность съемки является примерно одинаковой. Несмотря на это на юге центрального сегмента было зарегистрировано 15 газовых плюмов, а в пределах южного сегмента только один. В связи с этим можно полагать, что наблюдаемая картина не является артефактом, а отражает реальное распределение газовых плюмов. Акустических признаков газовых про-

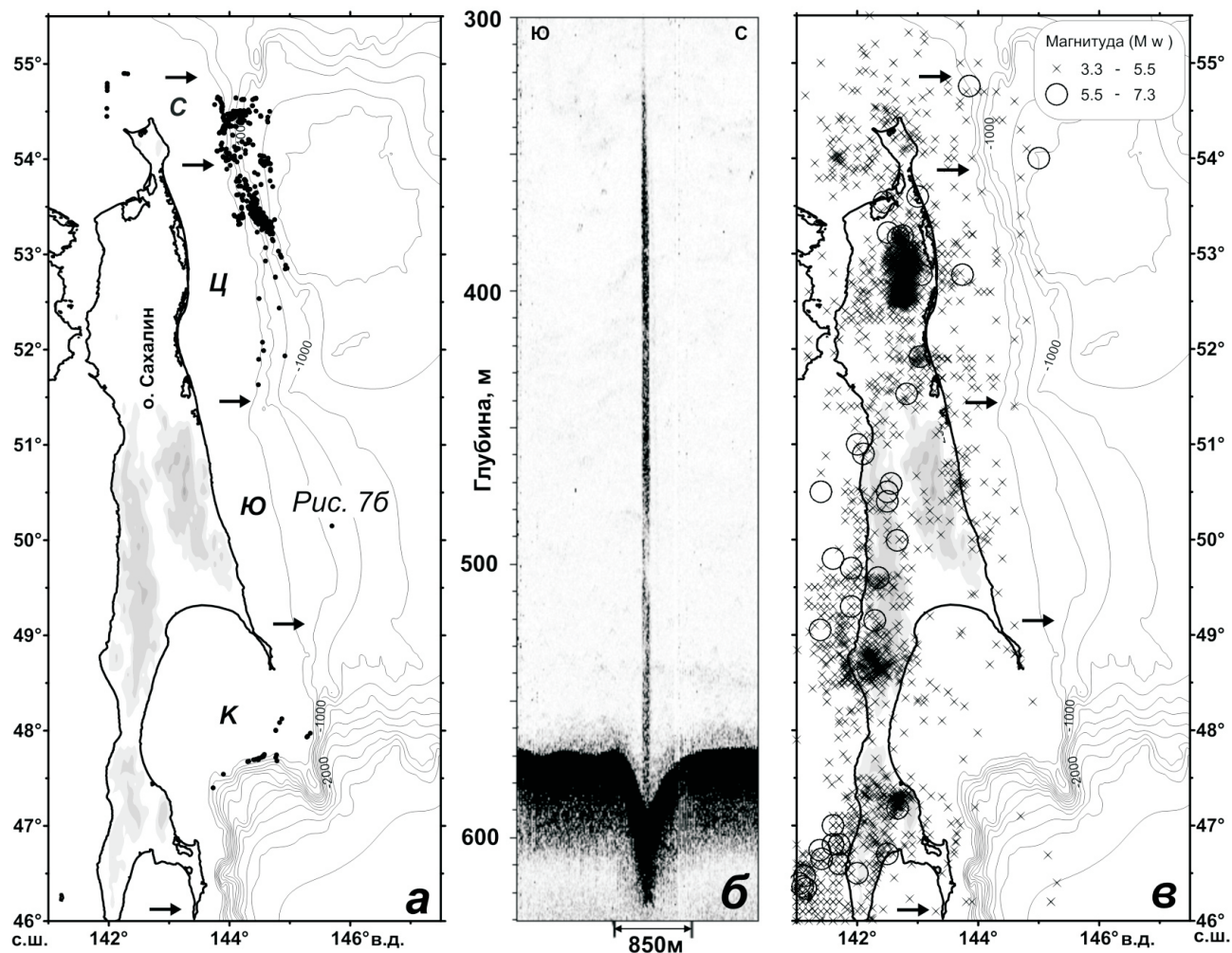


Рис. 7. Распределение газовых плюмов на восточном склоне о. Сахалин (Саломатин, Юсупов, 2011; Baranov et al., 2008) (а), эхограмма газового плюма, зарегистрированного над покмарком над южным сегменте, 56-ой рейс НИС «Академик М.А. Лаврентьев», август 2011 г. (б) и положение эпицентров мелкофокусных землетрясений с 1905 по 2008 гг. (Поплавская и др., 2006 с дополнениями из каталога National Earthquake Information Center – NEIC (<http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>)) (в) Изобаты проведены через 250 м, использована General Bathymetric Chart of the Ocean – GEBCO (<http://www.gebco.net/>). Условные обозначения и сокращения см. на рис. 1.

сачиваний (газовых труб) в пределах южного сегмента не наблюдается и на сейсмических профилях, пройденных в этом районе (рис. 5а). С другой стороны гидроакустические и сейсмические профили, полученные в пределах центрального и северного сегментов, показали, что газовые плюмы встречаются повсеместно, в том числе и в пределах покмарков (рис. 4, врезка), а под покмарками располагаются газовые трубы (рис. 5б).

Таким образом, на восточном склоне о. Сахалин можно выделить два района, первый из которых соответствует южному сегменту, где покмарки характеризуются слабой активностью. Второй район включает в себя центральный и северный сегменты, где активность покмарков является более высокой.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Модель образования покмарков была предложена и детально описана в работе (Novland, Judd, 1988). Согласно этой модели постепенное накопление газа и увеличение порового давления в верхней части осадочного чехла приводит к взрывному выделению газа. Это сопровождается выбросом тонкозернистых осадков в водную толщу с образованием на морском дне конусообразной депрессии – покмарка. Для того, чтобы на морском дне образовались покмарки осадочная толща должна содержать достаточное количество газа, а дно сложено тонкозернистым осадочным материалом (илами и/или глинами). Кроме того, должны отсутствовать сильные течения, которые очень быстро приводят к эрозии покмарков.

Многие авторы (Матвеева, Соловьев, 2003; Обжиров и др. 2002; Соловьев и др., 1994; Lammers et al., 1995; Mazurenko et al., 2009; Shoji et al., 2009; Jin et al., 2011), отмечали, что Охотское море, в целом, и восточный склон о. Сахалин, в частности, являются областью в которой осадки насыщены газами (в основном метаном). Вдоль восточного склона о. Сахалин метан образуется в пределах крупного прогиба фундамента, протягивающегося в субмеридиональном направлении и заполненного осадками мощностью от 2 до 9 км (Харахинов, 2010). Свидетельством наличия большого количества газа в осадочном чехле в северной части этого прогиба (котловина Дерюгина) является характер сейсмических записей, на которых наблюдаются беспорядочные прерывистые отражающие горизонты, и, вследствие этого, отсутствует внутренняя структура (Lüdmann, Wong, 2003; Worrall et al., 1996).

При наших исследованиях на восточном склоне о. Сахалин покмарки были зарегистрированы на глубинах, больших чем 500 м, поэтому можно предполагать, что ниже этой изобаты осадки являются достаточно тонкозернистыми для образования этих структур. Глубины верхней границы распространения покмарков на склоне закономерно увеличиваются от южного (500 м) к северному (800 м) сегменту. Это может быть связано с тем, что основное количество осадков накапливается здесь за счет выноса их р. Амур (Харахинов, 2010). Поэтому в проксимальных частях выноса будут осаждаться более грубозернистые частицы (по сравнению с дистальными участками), что приводит к постепенной миграции вверх по склону границы распространения покмарков с севера на юг.

Обнаружение большого количества покмарков на восточном склоне о. Сахалин является примечательным результатом. Вопрос их генезиса выходит за рамки данной работы, мы можем только сослаться на ряд исследователей (Kennet et al., 2002; Nisbet, 2002; Paull et al., 1996), которые полагают, что образование полей покмарков происходило в результате взрывного выделения больших объемов метана при разложении газовых гидратов. Разложение газовых гидратов было обусловлено понижением уровня моря в позднеледниковый период (14-25 тыс. лет назад) и, соответственно, изменениями РТ-условий, главным образом уменьшением гидростатического давления.

Покмарки могут достаточно долго сохраняться на морском дне даже в отсутствии выбросов газа или другого флюида. Трехмерное компьютерное моделирование динамики жидкости и акустические измерения в фиорде Иннер Осло показали, что при наличии придонных течений над покмарками возникает апвеллинг

(Hammer et al., 2009). Апвеллинг приводит к отклонению придонных течений и вследствие этого препятствует осаждению тонкозернистых осадочных частиц. Поэтому уменьшение скорости осадконакопления над покмарками по отношению к скоростям в пределах ровного дна может объяснить тот факт, что неактивные покмарки не засыпаются осадками и даже могут углубляться.

С другой стороны, если придонные течения являются достаточно сильными, то это может приводить к эрозии покмарков. Так в северо-восточной части полигона, расположенного в южном сегменте, покмарки вытянуты вниз по склону и начинают соединяться друг с другом, что может свидетельствовать об их эрозии (рис. 2б). Примером полного размыва покмарков, вероятно, является каньон, находящийся в центральной части полигона и ориентированный в северо-западном направлении. В русле каньона все признаки покмарков отсутствуют (рис 2а).

Известно (Judd, Hovland, 2007), что на морском дне покмарки распределяются, как правило, не хаотично, а располагаются в виде полей, в пределах которых происходило или происходит истечение газа. Установлено, что определенные структуры контролируют потоки флюида и путями его миграции с глубины могут являться соляные диапиры (Taylor et al., 2000), тектонические разломы и разломные антиклинали (Eichhubl et al. 2000), полигональные разломы (Berndt et al., 2003; Gay et al. 2004) и параллельно-стратифицированные отложения (Naudts et al., 2006).

Для восточного склона о. Сахалин, вероятно, наиболее важным фактором, контролирующим распределение различных газовых структур, и, в частности покмарков, является наличие разрывных нарушений, которые могут иметь тектоническую или оползневую природу. Поскольку вдоль о. Сахалин проходит современная граница, разделяющая Охотскую и Амурскую плиты (Cook et al., 1986; Savostin et al., 1983), тектоническая природа разломов проявляется особенно отчетливо. Граница плит соответствует здесь системе правосторонних сдвигов, ориентированных в субмеридиональном направлении (Fournier et al., 1994; Rozhdestvenskiy, 1986).

Глубинные субмеридиональные разломы, принадлежащие к этой границе плит, были также выявлены по магнитным и гравитационным аномалиям на шельфе и восточном склоне о. Сахалин (Тектоника ..., 2004; Харахинов, 2010; Rozhdestvenskiy, 1986). В дополнение к этому предполагается наличие системы оперяющих разломов северо-восточного и северо-западного простираний (Гнибиденко, Хведчук, 1982). Северо-восточные и северо-западные разло-

мы, как отмечалось ранее, хорошо выражены в рельефе, и служат границами между сегментами. Именно эти разрывные нарушения могут контролировать распределение покмарков, что отчетливо видно для зоны разломов Лаврентьева, где несколько покмарков располагаются непосредственно вблизи от разломного уступа (рис. 3). Существование системы северо-западных разломов можно предполагать для полигона, расположенного в пределах южного сегмента, где покмарки выстраиваются в виде цепочек северо-западного простирания (рис. 2а, 2б).

Для того чтобы происходила разгрузка газа, разломы должны быть активными («открытыми»), что наиболее ярко проявляется в сейсмичности. Остров Сахалин, как современная граница плит, является сейсмически активным (рис. 7в). Все землетрясения являются здесь мелкофокусными с глубиной очага не более 40 км. По данным о распределении сильных землетрясений с $M_w \geq 5.5$ основные смещения вдоль этой границы плит в настоящее время происходят вдоль западного побережья на юге острова и вдоль восточного побережья в его северной части. Слабые точки наблюдаются также на шельфе южной части о. Сахалин. Однако к северу от $51^{\circ}30'$ с.ш. сейсмичность начинает охватывать не только шельф о. Сахалин, но и его континентальный склон, причем кроме слабых событий здесь были также зарегистрированы землетрясения с $M_w > 5.5$.

Сопоставление карт распределения гидроакустических аномалий и эпицентров землетрясений показывает, что газовые плюмы были зарегистрированы только на сейсмически активной части склона (рис. 7а, 7в). Связь между газовыми плюмами и сейсмичностью была, вероятно, впервые обнаружена в Калифорнийском заливе, когда после сильного землетрясения ($M_s = 5.8$) количество плюмов увеличилось в несколько раз (Field, Jennings, 1987). Аналогичное увеличение количества газовых плюмов было зарегистрировано на северо-восточном склоне о. Сахалин после Нефтегорского землетрясения 1995 г. ($M_w = 7.0$), которое произошло вблизи этого склона (Обжиров, 2006). В пределах южного сегмента склона к настоящему времени был зарегистрирован единичный газовый плюм, что может быть связано с отсутствием сейсмической активности в этом районе. Поэтому разломы здесь неактивны (закрыты) и не могут служить в качестве подводящих каналов для разгрузки газа. В связи с этим мы предполагаем, что наблюдаемая картина распределения газовых плюмов и связанных с ними активных покмарков обусловлена различной тектонической активностью сегментов склона.

Контроль распределения покмарков за счет параллельно-стратифицированных отложений, вероятно, осуществляется в пределах области

осадочных волн к северу от разлома Лаврентьева. Каждую из осадочных волн можно рассматривать в качестве небольшого осадочного хребта, сложенного параллельно-стратифицированными отложениями, которые постепенно утоняются к вершине. Наличие покмарков на гребне одной из таких волн (рис. 3), свидетельствует о том, что газ мигрирует вверх по восстанию горизонтов и разгружается при их утонении на гребне осадочной волны.

В заключении необходимо отметить, что в данной работе представлены результаты первого и пока единственного исследования, посвященного покмаркам восточного склона о. Сахалин. Поэтому некоторые вопросы, которые могут возникнуть у читателя, могут остаться открытыми. Для ответа на них в этом районе необходимо провести дополнительные исследования, включающие в себя картирование дна многолучевыми эхолотами, сейсмоакустическую съемку, опробование водной толщи и осадков и непосредственное наблюдение морского дна с помощью глубоководных аппаратов.

ВЫВОДЫ

На восточном склоне о. Сахалин в интервале глубин 500-1400 м покмарки были обнаружены повсеместно, за исключением его курильского сегмента, расположенного между м. Анива и поднятием Полевого. Размеры покмарков колеблются от нескольких десятков до нескольких сотен метров, а глубина составляет от нескольких метров до нескольких десятков метров. Количество покмарков на единицу площади сильно варьирует как в пределах одного сегмента, так от сегмента к сегменту и максимальные ее значения равны 1 покмарку/км².

Покмарки наиболее широко распространены в пределах южного сегмента, но к настоящему времени газовый плюм был зарегистрирован только над одним из них. В пределах центрального и северного сегментов количество покмарков уменьшается, однако газовые плюмы встречаются здесь повсеместно, в том числе и над покмарками.

Вероятно, наиболее важным обстоятельством, контролирующим активность покмарков, является наличие активных разломов. Последнее проявляется в сейсмичности, которая регистрируется на склонах центрального и северного сегментов, но отсутствует на склоне южного сегмента.

Работы по проекту КОМЭКС финансировались Федеральным министерством образования и научных исследований Федеративной республики Германия и Министерством образования и науки Российской Федерации. Обработка

материала была выполнена при финансовой поддержке Программы № 21 Президиума РАН. Авторы благодарны участникам морских экспедиций в рамках этого проекта за кооперацию в получении данных, представленных в статье.

Список литературы

- Гнибиденко Г.С., Хведчук И.И.* Основные особенности тектоники Охотского моря // Геологическое строение Охотоморского региона. Владивосток: САХКНИИ, 1982. С. 3-25.
- Матвеева Т.В., Соловьев В.А.* Газовые гидраты Охотского моря: закономерности формирования и распространения // Российский химический журнал. 2003. Т. XLVII. № 3. С. 101-111.
- Обжиров А.И.* История исследования газогидратов в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 72-81.
- Обжиров А.И., Соснин В.А., Салюк А.Н.* Мониторинг метана в Охотском море. Владивосток: Дальнаука, 2002. 250 С.
- Поплавская Л.Н., Иващенко А.И., Оскорбин Л.С. и др.* Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905-2005. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 104 с.
- Тектоника и углеводородный потенциал Охотского моря. ДВО РАН / Отв. ред. К.Ф. Сергеев. Владивосток: ИМГиГ ДВО РАН, 2004. 159 С.
- Саломатин А.С., Юсупов В.И.* Акустические исследования газовых «факелов» Охотского моря // Океанология. 2011. Т. 51. № 5. С. 1-9.
- Соловьев В.А., Гинзбург Г.Д., Дуглас В.К. и др.* Газогидраты Охотского моря // Отечественная геология. 1994. № 2. С. 10-16.
- Харахинов В.В.* Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 275 с.
- Baranov B.V., Pristavakina E.I., Dozorova K.A. et al.* The structure of the Okhotsk Sea and the development of its sedimentary basins // Arctic and Russian Studies II, CASP. Cambridge. 1997. 114 p.
- Baranov B., Werner R., Chichaev A. et al.* Bathymetry and Parasound investigations // Cruise Report SO178-KOMEX. Mass exchange processes and balances in the Okhotsk Sea / Dullo, W.-Chr., Biebow, N. Georgeleit, K. (Eds.). GEOMAR Report. Kiel, 2004. P. 10-19.
- Baranov B.V., Jin Y.K., Shoji H. et al.* Gas Hydrate System of the Sakhalin Slope: Geophysical approach // Scientific Report of the Sakhalin Slope Gas Hydrate Project 2007. KOPRI, 2008. 116 p.
- Berndt C., Büinz S.* Polygonal fault systems on the mid-Norwegian margin: A long term source for fluid flow / Van Rensbergen, P., Hillis, et al. (Eds.). Subsurface Sediment Mobilization. Geological Society of London Sp. Publication 216, 2003. P. 283-290.
- Cook D.B., Fujita K., McMullen C.A.* Present-day plate interactions in northeastern Asia: North American, Eurasian and Okhotsk plates // J. Geodynamics. 1986. V. 6. P. 33-51.
- Cruise Report SO178-KOMEX. Mass exchange processes and balances in the Okhotsk Sea // GEOMAR Report / Dullo W.-Chr., Biebow, N. Georgeleit, K. (Eds.). Kiel. 2004. 125 p.
- Dickens G.R.M., Castillo M., Walker J.C.G.* A blast of gas in the latest Paleocene: Simulating first order effects of massive dissociation of oceanic methane hydrate // Geology. 1997. V. 25. P. 259-262.
- Eichhubl, P., Greene H.G., Naehr T. et al.* Structural control of fluid flow: offshore fluid seepage in the Santa Barbara Basin, California // J. Geochemical Exploration. 2000. V. 69-70. P. 545-549.
- Field M.E., Jennings A.E.* Seafloor gas seeps triggered by a northern California earthquake // Marine Geology. 1987. V. 77. P. 39-51.
- Fournier M., Jolivet L., Huchson P. et al.* Neogene strike-slip faulting in Sakhalin and Japan Sea // JGR. 1994. V. 99. P. 2701-2725.
- Gay A., Lopez M., Cochonat P. et al.* Polygonal faults-furrows system related to early stages of compaction - Upper Miocene to present sediments of the Lower Congo Basin // Basin Research. 2004. V. 16. P. 101-116.
- Gnibidenko H.S., Hilde T.W.C., Gretskeya E.V. et al.* Kurile (South Okhotsk) back-arc basin // Back-Arc Basins: Tectonics and Magmatism / Taylor B. (Eds.). New York: Plenum. 1995. P. 421-449.
- Hammer Ø., Webb K.E., Depreiter D.* Numerical simulation of upwelling currents in pockmarks, and data from the Inner Oslofjord, Norway // Geo-Marine Letters. 2009. V. 29. P. 269-275. doi 10.1007/s00367-009-0140-z.
- Hein H.* Swath bathymetry mapping // KOMEX Cruise Report RV «Akademik M.A. Lavrentiev». Cruise 29, Leg I and Leg II. GEOMAR Report 110 / Biebow N., Kulinich R., Baranov B. (Eds.). Kiel, 2003. P. 15-18.
- Henriet J.-P., Mienert J. (ed.).* Gas hydrates – Relevance to world margin stability and climatic change: Geological society [London] Special Publication 137. 1998. 338 p.
- Hovland M., Judd A.G.* Seabed Pockmarks and Seepages. London: Graham and Trotman, 1988. 293 p.
- Jin Y.K., Kim Y.G., Baranov B. et al.* Distribution and expression of gas seeps in a gas hydrate province of the northeastern Sakhalin continental slope, Sea of Okhotsk // Marine and Petroleum Geology. 2011. doi:10.1016/j.marpetgeo. 2011.03.007.
- Judd A., Hovland M.* Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. Cambridge University Press, 2007. 475 p.
- Kennett J., Cannariato K.G., Hendy I.L. et al.* Methane Hydrates in Quaternary Climate Change: the

- Clathrate Gun Hypothesis. Washington DC. American Geophysical Union, 2003. 202 p.
- Kelley J.T., Dickinson S.M., Belknap D.F. et al.* Giant seabed pockmarks: evidence for gas escape in Belfast Bay, Maine // *Geology*. 1994. V. 22. P. 59-62.
- King L.H., MacLean B.* Pockmarks on the Scotian Shelf // *Geological Society of America Bulletin*. 1970. V. 81. P. 3142-3148.
- KOMEX Cruise Report RV «Akademik M.A. Lavrentiev» Cruise 29, Leg I and Leg II // GEOMAR Report 110 / Biebow N., Kulinich R., Baranov B. (ed.). Kiel, 2003. 176 p.
- Kvenvolden K.* Methane hydrates – A major reserve of carbon in the shallow geosphere? // *Chemical Geology*. 1988. V. 71. P. 41-51.
- Lammers S., Suess E., Mansurov M.N. et al.* Variations of atmospheric methane supply from the Sea of Okhotsk induced by the seasonal ice cover // *Global Biogeochemical Cycle*. 1995. V. 9. № 3. P. 351-358.
- Long D., Lammers S., Linke P.* Possible hydrate mounds within large sea-floor craters in the Barents Sea // *Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change* / Henriot J.P., Mienert J. (ed.) Geological Society of London, Special Publication. 1998. V. 137. P. 223-237.
- Lüdmann T., Wong H.K.* Characteristics of gas hydrate occurrences associated with mud diapirism and gas escape structures in the northwestern Sea of Okhotsk // *Marine Geology*. 2003. V. 201. P. 269-286.
- Mazurenko L.L., Matveeva T.V., Prasolov E.M. et al.* Gas hydrate forming fluids on the NE Sakhalin slope, Sea of Okhotsk // *Sediment-Hosted Gas Hydrates: New Insights on Natural and Synthetic Systems* / Long, D., Lovell M.A. Rees, J.G., Rochelle C.A. (Eds.). Geological Society, London, Special Publications, 2009. V. 319. P. 51-72
- Naudts L., Greinert J., Artemov Yu. et al.* Geological and morphological setting of 2778 methane seeps in the Dnepr paleo-delta, northwestern Black Sea // *Marine Geology*. 2006. V. 227. P. 177-199.
- Nisbet E.G.* Have sudden large releases of methane from geological reservoirs occurred since the last glacial maximum and could such releases occur again? // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2002. A360. P. 581-607.
- Paull C.K., Buelow W.J., Ussler W. III et al.* Increased continental-margin slumping frequency during sea-level lowstands above gas hydrate -bearing sediments // *Geology*. 1996. V. 24. P.143-146.
- Rozhdestvenskiy V.S.* Evolution of the Sakhalin folds system // *Tectonophysics*. 1986. V. 127. P. 331-339.
- Salomatin A.* Technical support of the hydroacoustic observation // KOMEX Cruise Report RV «Akademik M.A. Lavrentiev» Cruise 29, Leg I and Leg II. GEOMAR Report 110 / Biebow N., Kulinich R., Baranov B. (Eds.). Kiel, 2003. P. 10-14.
- Savostin L.A., Zonenshain L.P., Baranov B.V.* Geology and plate tectonics of the Sea of Okhotsk // *Geodynamics of the Western Pacific-Indonesian Region* / Hilde T.W.C., Uyeda S. (Eds). Geodynamic series AGU, 1983. P. 189-222.
- Shoji H., Jin Y.K., Obzhirov A. et al.* Methane Hydrates and Plumes in the Sea of Okhotsk // *J. of Geography. Special Issue on Methane Hydrate*. 2009. V.118. № 1. P. 175-193.
- Taylor M.H., Dillon W.P., Pecher I.A.* Trapping and migration of methane associated with the gas hydrate stability zone at the Blake Ridge Diapir: new insights from seismic data // *Marine Geology*. 2000. V. 164. P. 79-89.
- Wong H.K., Lüdmann T., Baranov B.V. et al.* Bottom current-controlled sedimentation and mass wasting in the north-western Sea of Okhotsk // *Marine Geology*. 2003. V. 201. P. 287-305. doi:10.1016/S0025-3227[03]00221-4.
- Worrall D.M., Kruglyak V., Kunst F. et al.* Tertiary tectonics of the Sea of Okhotsk, Russia: Far-field effects of the India-Eurasia collision // *Tectonics*. 1996. V. 15. № 4. P. 813-826.
- Wunderlich J.* High resolution echosounder profiling on LV29 – technical aspect // KOMEX Cruise Report RV «Akademik M.A. Lavrentiev» Cruise 29, Leg I and Leg II GEOMAR Report 110 / Biebow N., Kulinich R., Baranov B. (ed.). Kiel. 2003. P. 98-103.

ПОКМАРКИ ВОСТОЧНОГО СКЛОНА ОСТРОВА САХАЛИН
POCKMARKS OF THE EASTERN SAKHALIN SLOPE

Baranov B.V.¹, Dozorova K.A.¹, Salomatin A.S.²

¹*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences;*

²*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute*

The paper provides original data on bathymetric and seismo-acoustic investigation of the Eastern Sakhalin Slope carried out in frames of the Russian-German KOMEX (Kurile-Okhotsk Marine EXperiment) Project. For the first time, pockmarks (conical depressions originating in sea bottom due to gas escape from sedimentary cover) were mapped in this region. Except one zone which adjoins the Kurile Basin, pockmarks are numerous at the eastern slope of Sakhalin Island. They were detected at depths from 500 to 1400 m. Their size and distribution vary within a single zone of the slope and from one zone to another. Existing data allow suggesting that pockmarks in the southern zone are inactive. Currently active gas emission is just observed at pockmarks of the central and northern zones and was probably caused by strong seismic activity within these zones.

Keywords: Eastern Sakhalin Slope; pockmarks; morphology, size, distribution and activity.