

Опыт использования комплексных мобильных технологий при поисках и геофизическом картировании глубинных скоплений углеводородов в структурах Западной Антарктики

© В.Д. Соловьев¹, С.П. Левашов^{2, 3}, Н.А. Якимчук^{2, 3}, И.Н. Корчагин¹,
Д.Н. Божежа³, 2017

¹Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

²Институт прикладных проблем экологии, геофизики и геохимии, Киев, Украина

³Центр менеджмента и маркетинга в области наук о Земле Института геологических наук НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 4 октября 2016 г.

Отримані дані підтверджують висловлене раніше припущення про можливе існування в Західній Антарктиці великих скупчень нафти і газогідратів. У структурах пасивної континентальної окраїни Антарктичного півострова ці скупчення вуглеводнів формувалися в результаті неодноразового піднімання глибинних геофлюїдів у різнорівневі горизонти земної кори за регіональної реактивації палеоразломів і ослаблених зон. За матеріалами геофізичних досліджень у регіоні існують складні системи локальних структур, які вважають типовими для пасивних континентальних окраїн. Спільними для цих структур континентальної окраїни Антарктики, як і для інших подібних структур Світового океану, є досить тісний просторовий, а можливо, і генетичний зв'язок грязьових вулканів з виявленими ділянками BSR-відображень і місцями формування скупчень газогідратів. Отримані дані свідчать про значну роль глибинних флюїдів в утворенні скупчень вуглеводнів у різних горизонтах земної кори пасивних окраїн Західної Антарктики.

Ключові слова: Західна Антарктика, континентальні окраїни, грязьові вулкани, нафта, газогідрати, мобільні технології, геоелектричні методи пошуків.

Введение. Изучение минеральных ресурсов Антарктики и оценка перспектив их возможной (в отдаленном будущем) разработки является важным стимулом геолого-геофизических исследований континентальных окраин Антарктического полуострова. В соответствии с имеющимися международными договоренностями на территории Антарктиды в настоящее время действует долгосрочный (до 2049 г.) мораторий на любые практические геологоразведочные работы, связанные с минеральными ресурсами (рис. 1). В то же время здесь разрешено проведение научных исследований, которые не противоречат основным положениям Протокола об охране окружающей среды Договора об Антарктике 1991 г. и направлены на изучение геологического строения, истории форми-

рования структур земной коры, а также прогноз минерально-сырьевых ресурсов региона [Иванов, 1985; Mineral ..., 1990; Rebesko et al., 1998; Грикуров и др., 2000; Milkov, 2000; Tinivella et al., 2002; Jin et al., 2003; Haacke et al., 2007; Корзун, 2009; Madrussani et al., 2010; Solovyov et al., 2009, 2011; Соловьев и др., 2011; Geletti, Busetti, 2011; Loreto et al., 2011; Janik et al., 2014].

К предпосылкам формирования значительных скоплений углеводородов в структурах дна Западной Антарктики принято относить: крупные осадочные бассейны с мощностью разновозрастных (в том числе юрско-меловых) осадков свыше 2—3 (до 10) км; выделение широкого спектра структур и нарушений в осадочных толщах, благоприятных для формирования потенциальных ловушек углеводородов в песча-

нистых коллекторах с подтвержденным наличием органического углерода [Иванов, 1985; Грикуров и др., 2000; Корзун, 2009].

К наиболее перспективным нефтегазоносным бассейнам данного региона относят структуры моря Уэдделла и Росса (рис. 1), где общий объем осадочных пород оценивается на уровне 12—15 млн км³, а прогнозные запасы нефти в структурах этих морей оцениваются в 50 млрд баррелей, что равно потенциалу месторождений Аляски [Корзун, 2009]. Потенциал 10 осадочных бассейнов шельфа и материковой окраины Антарктиды превышает 200 млрд баррелей нефти [Иванов, 1985; Корзун, 2009]. Очевидно, приведенные прогнозные оценки основаны, в первую очередь, на традиционных представлениях о районах и структурах возможного нефтегазонакопления. Поэтому получение новых данных, свидетельствующих о формировании скоплений глубинных углеводородов, представляет дополнительный интерес с точки зрения оценки перспективности данного региона.

На шельфе Антарктического полуострова также проведены масштабные геофизические исследования с целью поисков и картирования скоплений газогидратов — относительно нового источника углеводородов [Milkov, 2000; Tinivella et al., 2002; Jin et al., 2003; Madrussani et al., 2009; Solovyov et al., 2009, 2011; Geletti, Busetti, 2011; Loreto et al., 2011]. Прогнозные оценки возможных запасов этого сырья на материковой окра-

ине вблизи Южных Шетландских островов показали, что Антарктика может считаться районом формирования крупных скоплений газогидратов, а прогнозные запасы углеводородов в Антарктике сопоставимы с потенциальными запасами шельфовых зон континентальных окраин Африки, Австралии и арктических морей [Mineral ..., 1990; Макогон, 2010; Loreto et al., 2011].

Краткие сведения об использованных технологиях получения геофизической информации. Геолого-геофизические исследования континентальной окраины Антарктического полуострова на протяжении последних 20 лет периодически выполнялись во время проведения сезонных работ украинских антарктических экспедиций. В 2004, 2006 и 2012 гг. был выполнен значительный объем исследований в Западной Антарктике, в том числе геоэлектрическими методами становления короткоимпульсного поля (СКИП) и вертикального электрорезонансного зондирования (ВЭРЗ) [Левашов и др., 2010, 2011, 2012 а, б, 2016; Шуман, 2012; Solovyov et al., 2011]. Эти технологии базируются на частотно-резонансных принципах электромагнитных зондирований [Левашов и др., 2012 а]. Их основной задачей является исследование распределения квазистационарного электрического поля Земли и его спектральных характеристик (метод ВЭРЗ) над залежами различных видов полезных ископаемых, в том числе над скоплениями углеводородов (УВ). Для проведения исследований этими методами была создана измерительная аппаратура и разработана методика оперативного проведения полевых измерений и интерпретации полученных результатов для решения широкого круга геолого-геофизических и прикладных задач [Левашов и др., 2012 а, б, 2016].

Методом СКИП регистрируется процесс становления поля короткого электрического импульса в малогабаритных дипольных ферритовых антеннах. Над зонами пониженной и повышенной электропроводности пород временные интервалы становления сигналов разной полярности различаются. Поэтому выделение областей, различающихся по времени становления поля для сигналов разной полярности, дает возможность определять зоны повышенной и пониженной проводимости пород, которые несут соответствующую информацию о геоэлектрических свойствах среды. Съёмка этим методом позволяет картировать положительные геоэлектрические аномалии типа "залежь" (АТЗ), характерные для месторождений УВ. Имеющийся на сегодняшний день опыт проведения съёмки показал, что во всех случаях над извест-



Рис. 1. Схематическая карта Антарктики с указанием положения участков исследований (АП — Антарктический полуостров).

ными месторождениями УВ фиксировалась аномалия типа "залежь".

В основе метода ВЭРЗ — эффект поляризации геоэлектрической неоднородности разреза в естественном квазиустановившемся электрическом поле Земли E_z . На границах стратиграфических неоднородностей разреза, которые характеризуются аномальными значениями геоэлектрических параметров среды, в электрическом поле Земли формируются зоны поляризации, образующие систему электрических диполей с аналогичной зоной поляризации на границе земля—воздух. На земной поверхности наблюдается суммарное электромагнитное поле, вызванное изменениями естественного электрического потенциала. Это поле можно представить в виде волнового пакета электромагнитных колебаний, в котором половина длины каждой волны пакета отвечает глубине залегания отдельной поляризуемой поверхности. Идентификация (выделение из пакета) и изучение отдельных электромагнитных колебаний дает возможность оценить интервалы глубин залегания аномальных геоэлектрических объектов. На земной поверхности идентификация и регистрация отдельных волн пакета и определение их характеристик осуществляется с помощью подбора резонансной частоты генератора электромагнитных колебаний. Методом ВЭРЗ в точках зондирования выделяются аномально поляризованные пласты (АПП) типа "нефтяной пласт", "газовый пласт", "залежь газогидратов" и др. [Левашов и др., 2012 а, б]. Совместное использование методов СКИП и ВЭРЗ позволяет выявлять аномалии типа "залежь", а также оценивать мощность и глубины залегания АПП непосредственно в процессе выполнения измерений.

Для повышения оперативности, расширения возможностей и достоверности решения конкретных поисковых задач была разработана методика комплексирования методов СКИП и ВЭРЗ с нетрадиционным для классической геофизики методом частотно-резонансной обработки и интерпретации (дешифрирования) данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [Левашов и др., 2010, 2011, 2012 а, б, 2016 и др.]. Методы позволяют обнаруживать и картировать аномальные зоны типа "залежь нефти", "залежь газа", "залежь газогидратов" с предварительной оценкой пластовых давлений в нефтегазовых коллекторах [Левашов и др., 2011]. Проведенные опытные работы показали, что выявленные и закартированные методом частотно-резонансной обработки спутниковых данных ано-

мальные зоны типа "залежь УВ" достаточно уверенно коррелируются с геоэлектрическими аномальными зонами, закартированными съемкой методом СКИП.

В настоящее время существенно усовершенствована методика оценки пластовых давлений флюидов в коллекторах частотно-резонансным методом обработки и декодирования данных ДЗЗ, что позволяет оценивать пластовые давления флюидов в коллекторах в различных (в том числе и в глубинных) горизонтах разреза [Левашов и др., 2011, 2016].

Мобильные методы были апробированы на многих известных месторождениях УВ, в том числе и на одном из крупнейших в Украине — Шебелинском газоконденсатном месторождении, и применяются для поисков нефти и газа в различных регионах мира, включая морские акватории полярных регионов Земли [Левашов и др., 2010, 2012 б, 2016].

Применение мобильных технологий для поисков АТЗ ("скопление нефти") вблизи УАС "Академик Вернадский". Предложенные технологии были использованы для обнаружения и картирования скоплений УВ и газогидратов вблизи Антарктического полуострова, где первые исследования методом СКИП—ВЭРЗ были выполнены во время проведения сезонных работ 2004 и 2006 гг. По результатам проведенных исследований (2004) была построена серия глубинных разрезов, характеризующих строение верхней части земной коры впадины Палмер вблизи УАС "Академик Вернадский" [Иванов, 1985; Левашов и др., 2010, 2011, 2012 а, б].

Впадина Палмер расположена на континентальном (Тихоокеанском) шельфе Антарктического полуострова юго-западнее о-ва Анверс, представляя собой типичное внутришельфовое образование, сформированное в центре схождения ледовых палеопотоков, пересекающих весь континентальный шельф (рис. 2, а) на расстоянии более 200 км от побережья Антарктического полуострова [Rebesco et al., 1998]. Эта часть континентального шельфа служила своеобразной платформой для развития и продвижения ледников во время последнего ледникового периода. В результате крупных перемещений масс ледников через внутренний шельф формировались многочисленные глубинные эрозионные трог и впадины, ставшие областями накопления постледниковых морских осадков. Котловина Палмер является одним из таких эрозионных трогов, образованным в результате суммарного воздействия трех отдельных аккумуляру-

ющих центров формирования ледников: о-в Анверс, плато Брус и побережье Земли Грейама. Осадки котловины расслоены на пять горизонтов, сложенных диатомовыми илами, турбидитами, подводными брекчиями, ледниковыми отложениями общей мощностью больше 200 м. По данным сейсмического профилирования наиболее глубокорасположенная отражающая граница датируется поздним плейстоценом. В региональном плане породы фундамента представлены мезозойскими и ранне-кайнозойскими вулканогенными породами [Rebesco et al., 1998]. Система северо-восточных разломов, ограничивающая с юга котловину впадины Палмер и влияющая на формирование заполняющей осадочной толщи, лежит на широтном продолжении Южной разломной зоны Анверс. Поэтому значительная часть подвижек, зафиксированных в пределах внутреннего шельфа, может быть генетически связана с геодинамическими процессами в этой крупной разломной зоне. Часть профилей съемки 2004 г. (8—8а, 9—9а) пере-

секли шельф Антарктического полуострова (см. рис. 2, а), что позволило охарактеризовать структуру земной коры впадины Палмер по данным ВЭРЗ. Подробное описание полученных результатов приведено в работе [Solovyov et al., 2009], поэтому здесь приведем лишь разрезы вдоль указанных профилей, на которых глубинный разрез обогащен зонами даек и зонами дробления, в районе впадины Палмер и ее структурного продолжения (рис. 3). Выявленные закономерности глубинного строения участков континентального шельфа были подтверждены более поздними (2006) материалами ВЭРЗ. Этими работами были выявлены глубинные неоднородности разреза не только в верхней части земной коры (на глубинах до 6,0 км), но и на глубинах 10,0—12,0 и 16,0—18,0 км, обусловленные многочисленными комплексами эффузивных и кристаллических пород, а также пород переходного слоя "кора—мантия" переменной мощности.

Усложнение разреза сопровождается увеличением мощности земной коры до 30—31 км вбли-

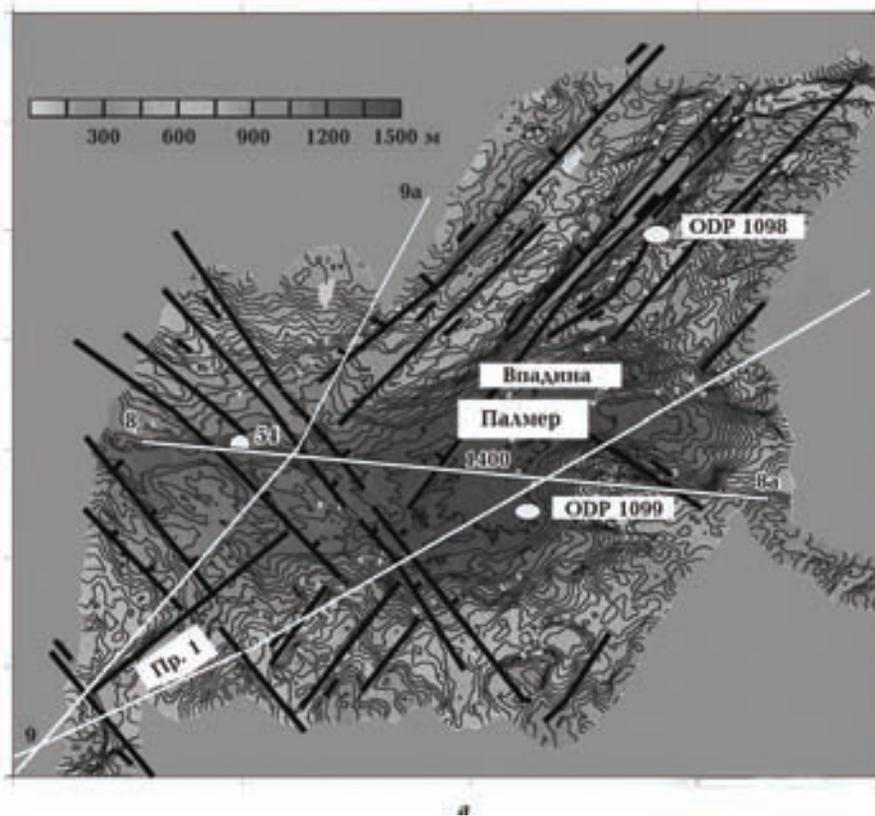


Рис. 2. Схема разломной тектоники (а) впадины Палмер, по [Rebesco et al., 1998], положение района исследований вблизи Антарктического полуострова (б) и результаты глубоководного бурения (в) скважины ODP1098 [Mineral ..., 1990]. Показано положение скважин глубоководного бурения (ODP1098 и ODP1099), пункта зондирования ВЭРЗ (54), профилей (8—8а, 9—9а) съемки 2004 г., а также Пр. 1 (2012 г.).

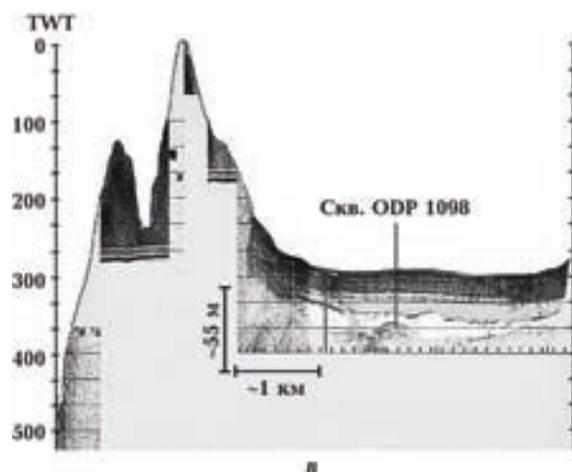
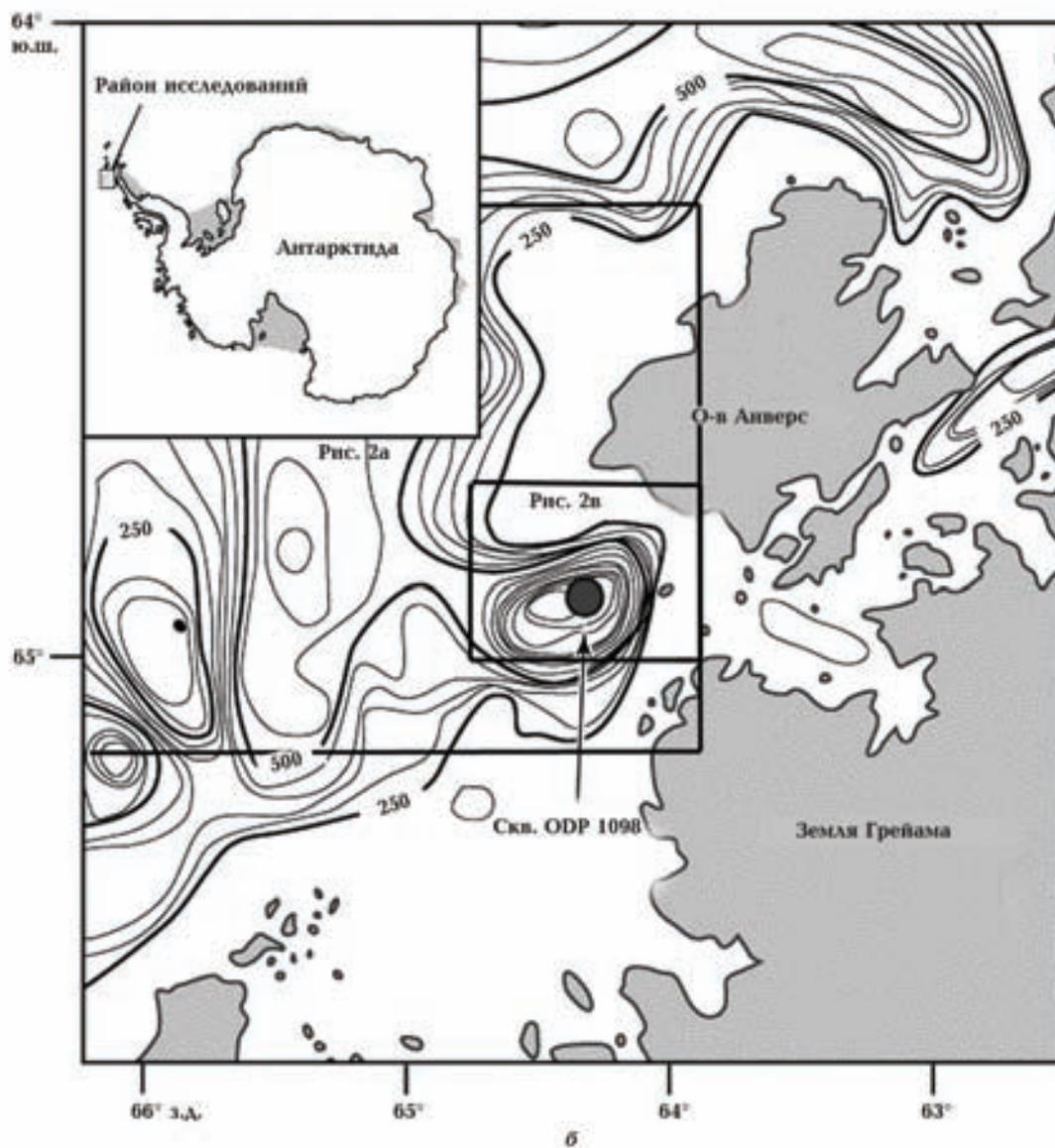


Рис. 2 (окончание).

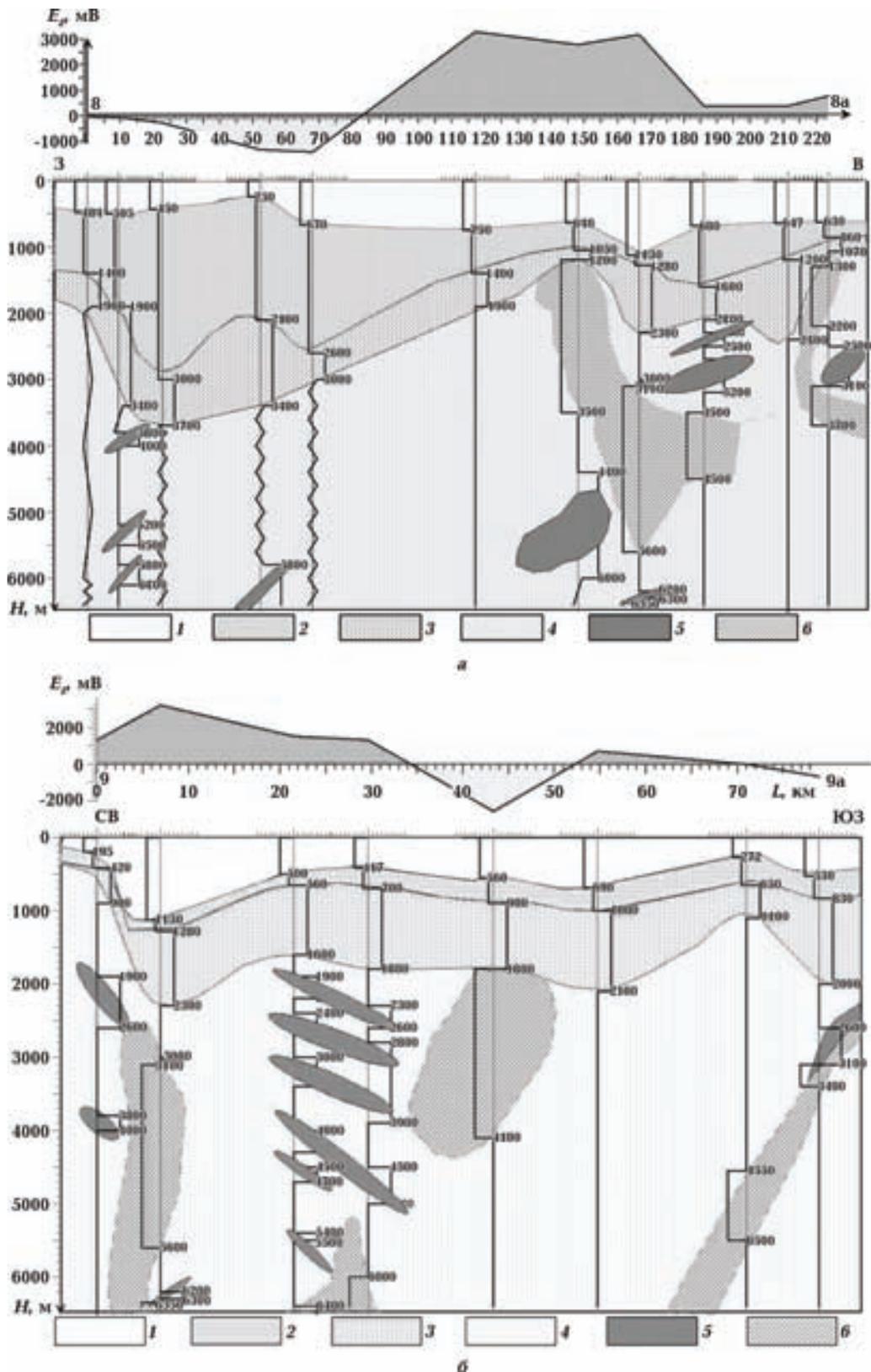


Рис. 3. Глубинный разрез вдоль профилей 8—8а (а) и 9—9а (б) по данным ВЭРЗ (2004): 1 — вода, 2 — первый осадочный слой, 3 — второй осадочный слой и нарушенные породы верхней части фундамента, 4 — породы фундамента, 5 — дайки, 6 — зоны дробления в фундаменте. Положение профилей показано на рис. 2, а.

зи о-ва Анверс. Имеющиеся для этого района данные глубинных сейсмических зондирований [Janik et al., 2014] не совпадают с приведенными значениями глубин раздела Мохо по данным ВЭРЗ. На сейсмическом разрезе отсутствует значительная дифференциация мощностей глубинных горизонтов, нет и областей обогащения разрезов отдельными протяженными горизонтами даек. Возможно, положение раздела Мохо, полученное для этого региона по данным ВЭРЗ, совпадает с усредненным положением кровли "нижнего горизонта земной коры", выделяемого по данным ГСЗ [Solovyov et al., 2009; Janik et al., 2014]. На глубинном (до 32 км) разрезе по результатам работ ВЭРЗ была выявлена крупная зона тектонических нарушений, объединенных в глубинный разлом, вытянутая вдоль побережья полуострова. Вполне вероятно, что разлом имеет древнее заложение и длительную историю формирования, на что указывают особенности глубинных разрезов по профилям ВЭРЗ, выявившие значительную неоднородность глубинного строения и степени насыщения земной коры шельфа Антарктического полуострова эффузивными и интрузивными образованиями. Такая обширная зона протяженных разломов северо-западного простирания была закартирована и по результатам детальных исследований рельефа дна впадины Палмер (см. рис. 2, а). Выделенные в разрезе земной коры зоны дробления (см. рис. 3) могли служить подводящими каналами для миграции глубинных геофлюидов и скоплений формирования углеводородов в смежных локальных структурах впадины Палмер (рис. 4).

В 2006 г. вблизи о-ва Анверс была обнаружена аномалия типа "залежь" длиной около 25 км (см. рис. 4), а по данным ВЭРЗ в интервале глубин до 3500 м выделены аномально поляризованные пласты (АПП) типа "залежь углеводородов".

Участки антарктического шельфа вблизи антарктической станции "Академик Вернадский", включая и район обнаружения АТЗ, были изучены с помощью метода частотно-резонансной обработки и интерпретации данных ДЗЗ. В пределах обследованного участка шельфа были выявлены и оконтурены четыре относительно крупные аномальные зоны типа "залежь нефти" (см. рис. 4, б). При этом ранее закартированная по данным ВЭРЗ геоэлектрическая аномалия типа "залежь углеводородов" (см. рис. 4, а) полностью попала в одну из аномальных зон, выделенных по результатам обработки и интерпретации спутниковых данных. Значительные раз-

меры и высокие интенсивности полученных аномальных откликов указывали на возможное наличие в этом районе крупных скоплений углеводородов (см. рис. 4, б). Проведенные исследования подтвердили наличие общих благоприятных предпосылок формирования залежей углеводородов в данном секторе материковой окраины Антарктического полуострова, хотя ранее никаких данных о возможных залежах углеводородов в этом регионе в открытой литературе опубликовано не было.

Из рассмотрения результатов зондирования методом ВЭРЗ видно, что продуктивные пласты, залегающие ниже поверхности дна на 100—400 м (см. рис. 4, а), расположены в пределах первого осадочного слоя, а нижележащие продуктивные горизонты залегают в пределах второго осадочного слоя, а также в верхней части фундамента, где значительную роль играет сеть тектонических нарушений (см. рис. 2, а). Вдоль зон тектонических нарушений, тяготеющих в котловине Палмер к материковой окраине Антарктического полуострова, на разных этапах тектонической активизации в зонах нефтегазонакопления могло происходить усиление процессов, приводящих к миграции глубинных флюидов, содержащих эндогенные углеводороды, в различные горизонты земной коры (см. рис. 4, а).

В 2012 г. были выполнены зондирования методом ВЭРЗ (57 пунктов) вдоль двух профилей (Пр. 1, Пр. 2), пересекающих ранее выявленные аномалии (рис. 4, 5). Результаты проведенных исследований подтвердили наличие и перспективность всех четырех крупных аномальных зон типа "нефтяная залежь", закартированных методом частотно-резонансной обработки и интерпретации (дешифрирования) данных ДЗЗ для этой части антарктического шельфа (см. рис. 4, б). Глубина разноуровневого залегания продуктивных пластов типа "нефтяная залежь" (мощностью от 40 до 100 м) колеблется от 400 до 3300 м, при этом наиболее крупные и мощные пласты в пределах аномалии Oil-1 залегают на глубине 1600—1800 м, как это было показано ранее (см. рис. 4, а). Детальные работы методом ВЭРЗ показали, что Oil-2 и Oil-4 состоят из отдельных аномалий, каждая из которых характеризуется своим набором продуктивных пластов и их распределением в разрезе на глубине 600—3200 м (рис. 6). Как было указано, важную роль при оценке перспективности выявленных залежей нефти играет величина пластовых давлений в коллекторах, определенная по спутниковым данным [Левашов и др., 2011]. Рассмотрение графиков зна-

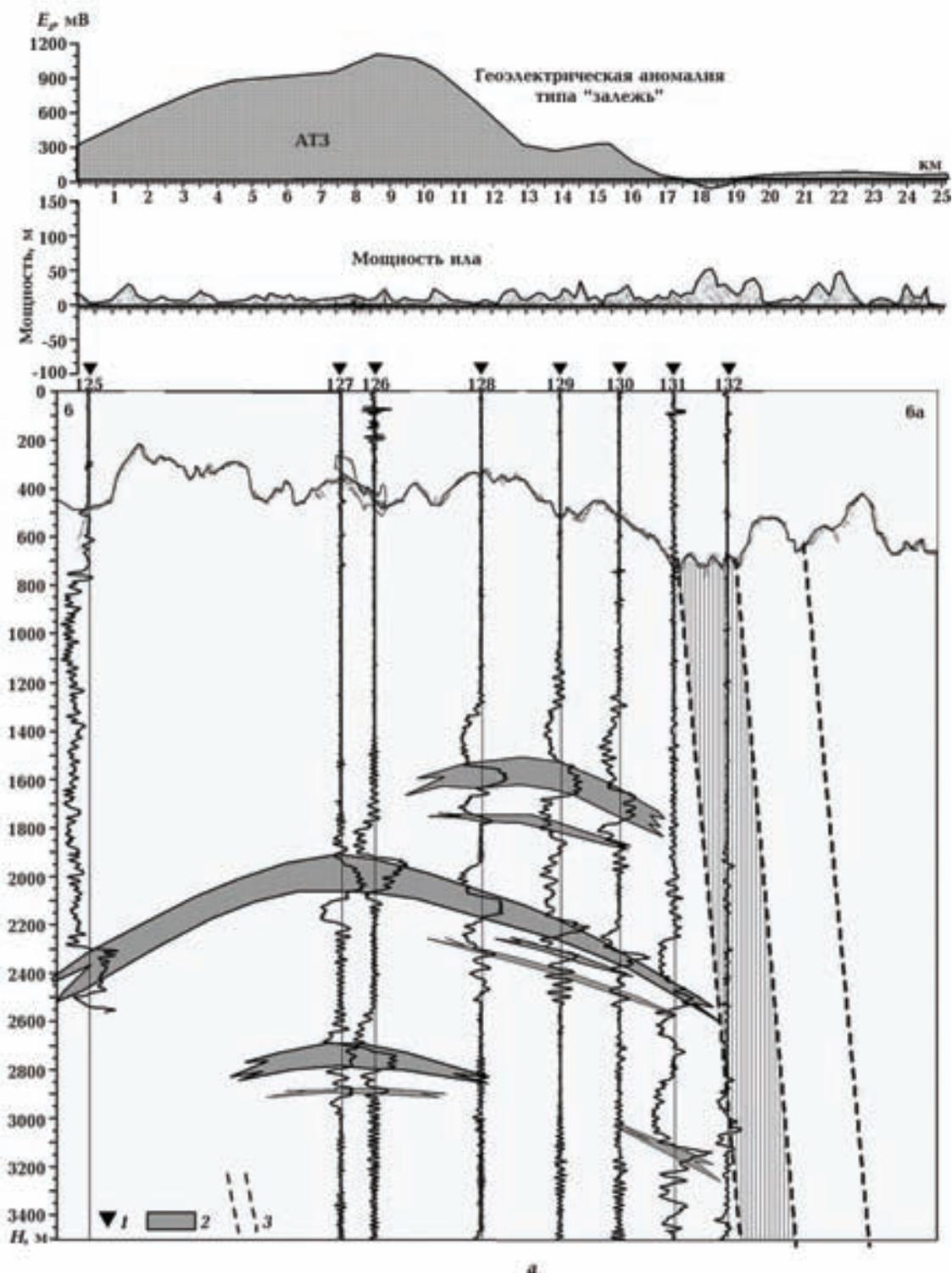


Рис. 4. Результаты интерпретации данных ВЭРЗ (2006) над аномальной зоной типа "залежь углеводородов" (а): 1 — пункты ВЭРЗ; 2 — участки АПП типа "залежь углеводородов"; 3 — зона нарушения) и результаты обработки данных ДЗЗ вблизи Антарктического полуострова (б): 1 — шкала интенсивности аномальных откликов АТЗ; 2 — реперные точки; 3 — зоны нарушений (А—В — положение профиля, приведенного на рис. 4, а).



Рис. 4 (окончание).

чений максимального пластового давления в выявленных коллекторах (см. рис. 5, 6) показало, что их средние величины в пределах крупных аномальных зон достаточно стабильны. Для зон (Oil-1, Oil-2 и Oil-2a) величина максимального пластового давления изменяется от 20 до 33 МПа, а для аномальных зон Oil-3, Oil-4 и Oil-4a она не превышает 16 МПа (см. рис. 5, 6). Проведенные исследования относятся к типу региональных, поэтому нуждаются в выполнении детальных работ для получения более достоверных результатов.

Предварительные оценки протяженности отдельных пластов, их количества, положения в разрезе, эффективных площадей аномальных зон типа "залежь нефти", а также величин пластового давления в пределах выявленных аномалий подтверждают высказанное ранее предположение о возможном существовании крупных скопления углеводородов в этой части Западной Антарктики.

Новые данные о скоплениях газогидратов в районе о-ва Анверс и результаты работ методом ВЭРЗ на континентальной окраине Южных Шетландских островов. В ряде стран мира (Канада, США, Германия, Норвегия, Япония, Индия, Китай и др.) на протяжении последних 25 лет реализуются целенаправлен-

ные и широкомасштабные программы по обнаружению, изучению и разработке газовых гидратов [Tinivella et al., 2002; Анфилатова, 2008; Макогон, 2010; Solovyov et al., 2011]. Общая сумма средств, выделенных промышленно развитыми странами на эти программы, превышает 1,5 млрд долларов, из них около 500 млн долларов выделила Япония, особенно заинтересованная в развитии своей энергетической базы. Проводимые в этой стране исследования, направленные на изучение нетрадиционных углеводородов (к которым относятся и газогидраты), получили в 2013 г. дополнительный импульс после успешной добычи (с глубины около 1,3 км) природного газа на газогидратном месторождении вблизи п-ова Ацуми, где общие разведанные запасы метана составляют около 10 трлн м³. Экспериментальную полномасштабную добычу гидрата метана здесь планируют начать в 2018 г.

В настоящее время по прямым и косвенным данным обнаружено более 250 мест возможных проявлений газогидратов в придонной части осадочной толщи морского дна в различных районах Мирового океана с прогнозными оценками запасов газогидратов до $1,5 \cdot 10^{16}$ м³ метана [Анфилатова, 2008; Макогон, 2010]. Около 98 % общих запасов приходится на Мировой океан, а остальные 2 % (около 300 трлн м³) — на при-

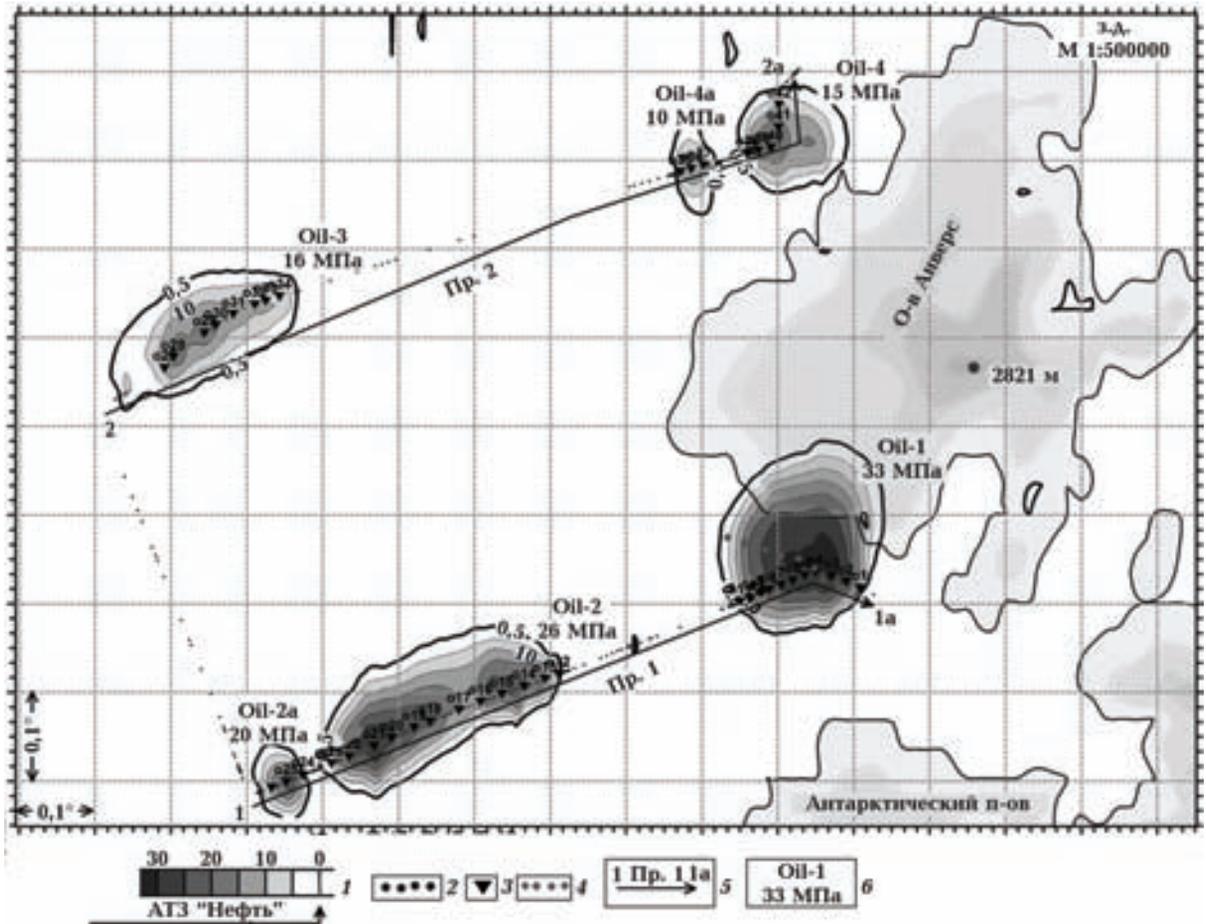


Рис. 5. Карта геоэлектрических аномальных зон типа "нефтяная залежь" на шельфе Антарктического полуострова (2012): 1 — шкала значений максимального пластового давления в коллекторах; 2 — точки съемки методом СКИП; 3 — пункты ВЭРЗ; 4 — точки съемки методом СКИП (2006 г.); 5 — положение профилей съемки Пр. 1, Пр. 2 (2012); 6 — значения пластового давления флюидов в АТЗ типа "нефть".

полярные районы материков. Природные газогидраты сохраняют стабильность в режиме сочетания низкой температуры и высокого давления, которые реализуются в осадочных толщах континентальных окраин Мирового океана [Анфилатова, 2008; Макогон, 2010].

Считается, что в структурах континентальных окраин биогенный метан лишь частично участвует в формировании скоплений газогидратов, а основным источником метана являются, преимущественно, глубинные углеводороды разного генезиса [Haascke et al., 2007; Анфилатова, 2008; Макогон, 2010; Loreto et al., 2011]. Масштабное образование скоплений газогидратов может быть частью глобального процесса мезо-кайнозойского нефтегазонакопления, происходящего в пределах континентальных окраин Мирового океана в результате дегазации Земли [Краюшкин, 2013].

Подобный механизм с вторжением глубинных недифференцированных и нетрансформированных углеводородных флюидов в вышележащие горизонты вероятно имел место при формировании группы крупных месторождений Аляски: Прадхо Бей—Эйлин—Купарук Ривер, где по разрезу прослеживается изменение общего и фазового состояния гигантских залежей от обычных до тяжелых нефтей, от скопления свободного газа в шапке до газогидратов [Haascke et al., 2007; Макогон, 2010].

Скопления газогидратов в структурах окраин формируются в самых верхних горизонтах осадочной толщи, образуя зоны гидратообразования (ЗГО) мощностью 100—1100 м [Haascke et al., 2007; Madrussani et al., 2010]. Наличие такой зоны в разрезе часто выявляется по данным МОВ—ОГТ, которые четко определяют положение подошвы ЗГО — сейсмической отражающей

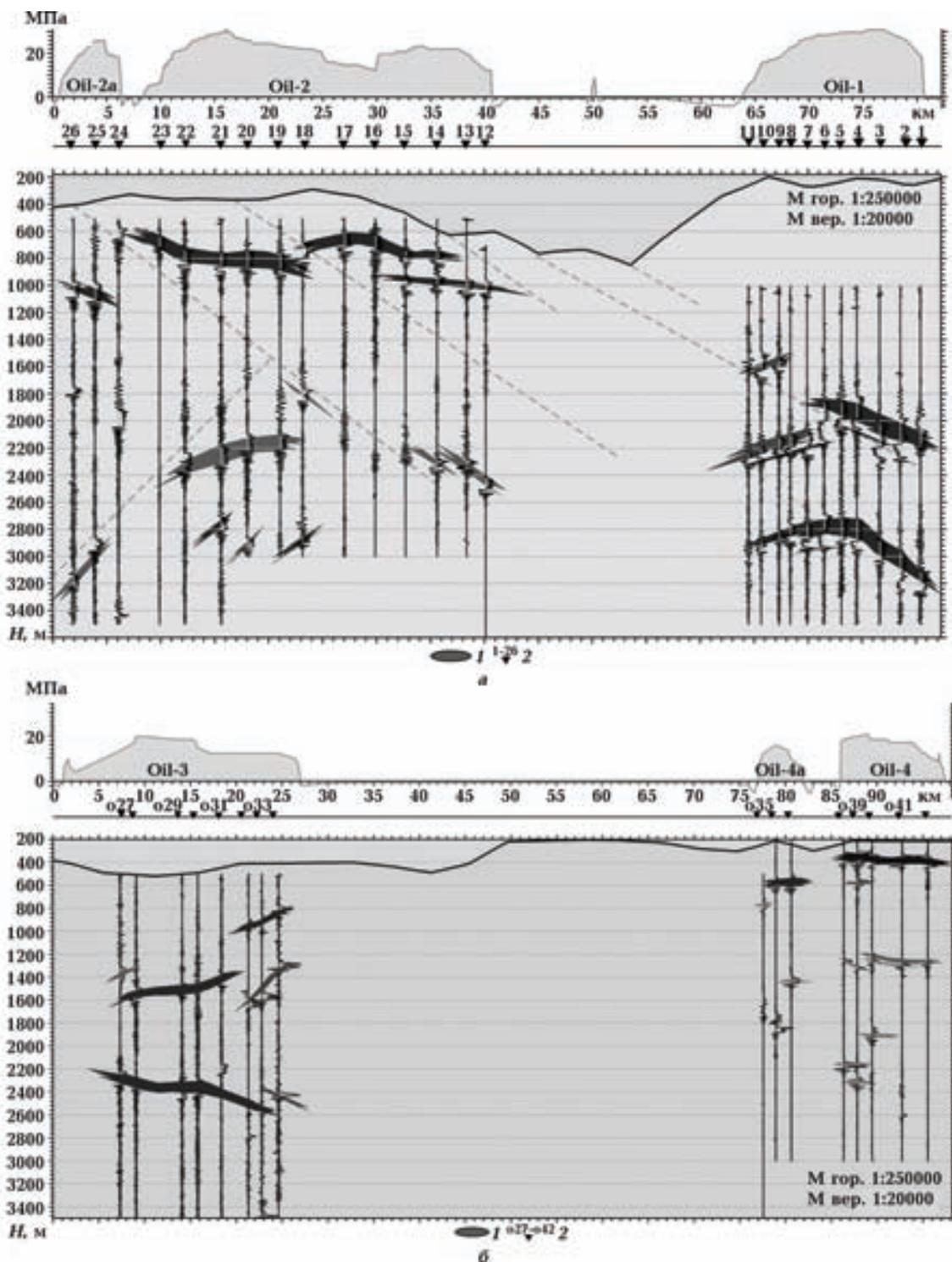


Рис. 6. Вертикальный разрез геоэлектрических аномальных зон типа "нефтяная залежь" (Oil-1—Oil-4) вдоль Пр. 1 (а) и Пр. 2 (б) на шельфе Антарктического полуострова в районе УАС "Академик Вернадский": а — график значений максимального пластового давления в коллекторах; б — вертикальный геоэлектрический разрез (1 — зоны аномально поляризованных пластов типа "нефтяная залежь"; 2 — пункты ВЭРЗ). Положение профилей приведено на рис. 5.

щей границы (BSR — Bottom Simulating Reflector), субпараллельной рельефу дна. Ее существование определяется инверсией скоростей на разделе газогидраты—подгидратный газ, где в верхнем слое осадков с газогидратами скорость повышается, а в слое с подгидратным газом она резко падает. Перепад скоростей может составить более 300—400 м/с, достигая 1500 м/с в подошве ЗГО [Haacke et al., 2007; Loreto et al., 2011]. Ниже (на 120—200 м) обычно наблюдается еще одна граница, которая может быть связана с подошвой зоны свободного (подгидратного) газа [Tinivella et al., 2002; Haacke et al., 2007; Madrussani et al., 2010; Geletti, Buseti, 2011; Loreto et al., 2011].

Вопрос о реальной мощности ЗГО остается дискуссионным, хотя возможность формирования толщ газогидратов мощностью в первые сотни метров доказана результатами бурения скважины на западе Канады, в дельте реки Маккензи [Анфилатова, 2008]. Типичная же мощность разведанных перспективных скоплений не превышает первые десятки метров при гидратонасыщении 30—80 % [Макогон, 2010].

Следует также отметить, что сам факт обнаружения BSR-границы не дает однозначного ответа на вопрос о степени гидратонасыщения вышележащих осадочных пород и наличии значительных скоплений газогидратов в этой зоне, а свидетельствует, в первую очередь, о возможной перспективности района на газогидраты.

Уникальный опыт промышленной разработки (с 1969 г.) газогидратов в условиях вечной мерзлоты был получен на Мессояхском газогидратногазовом месторождении в Западной Сибири, где суммарный объем добытого газа составил около $13 \cdot 10^9$ м³ [Макогон, 2010]. Предполагается, что эта газогидратная залежь на протяжении геологического времени претерпела существенные изменения под влиянием значительных воздействий климатических условий прошлого. Опыт разработки этого месторождения показал, что экономически выгодно добывать не газогидраты, а свободный, “подледный”, природный газ. В процессе его добычи падает пластовое давление, повышается пластовая температура и начинает “таять” газонасыщенный лед ЗГО, превращаясь в объект долговременной газодобычи

[Макогон, 2010]. Именно для этого месторождения была впервые выделена АТЗ типа “залежь газогидратов”, которая впоследствии была использована в качестве эталона для выделения и картирования газогидратов на континентальной окраине Антарктического полуострова [Solovyov et al., 2011].

При проведении геоэлектрических исследований методом ВЭРЗ в пределах ранее закартированных спутниковых аномалий типа “залежь газогидратов” удается определить параметры аномального пласта и его положение в разрезе, поскольку объектом поиска является определенное вещество (в данном случае газогидраты), а не сопутствующие аномалии и признаки (в данном случае BSR-границы). Понятно, что полученные результаты в этом случае имеют предварительный характер и нуждаются в последующей детализации.

Наиболее перспективными для промышленной разработки в отдаленном будущем можно считать только крупные скопления с высокой концентрацией газогидратов в зонах вечной мерзлоты, а также на отдельных локальных участках континентальных окраин.

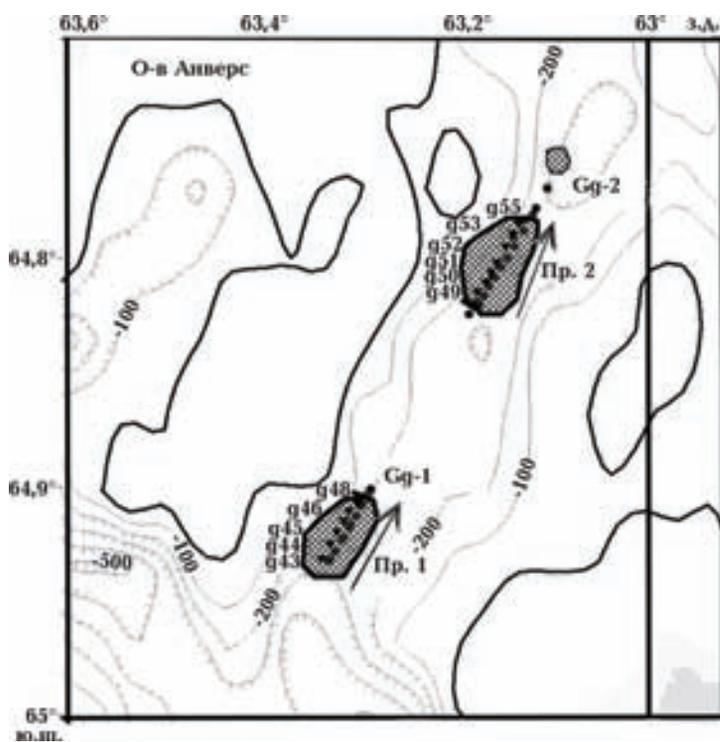


Рис. 7. Положение АТЗ Gg-1, Gg-2 (типа “залежь газогидратов”) на шельфе Антарктического полуострова в районе УАС “Академик Вернадский” (2012). Показано положение профилей съемки Пр. 1, Пр. 2 и точек зондирования ВЭРЗ (g43—g55).

Результаты исследований в районе УАС "Академик Вернадский". Во время проведения сезонных работ 2012 г. была проведена геоэлектрическая съемка в режиме поиска газогидратных аномалий вдоль двух профилей Пр. 1, Пр. 2 (рис. 7) вблизи о-ва Анверс (район УАС "Академик Вер-

надский"). Выявленные восточнее о-ва Анверс аномальные зоны типа "залежь газогидратов" (Gg-1, Gg-2) были изучены методом ВЭРЗ, что позволило определить параметры этих скоплений (рис. 8).

Залежь газогидратов Gg-1 сформирована на глубине 1000—1040 м в виде пласта перемен-

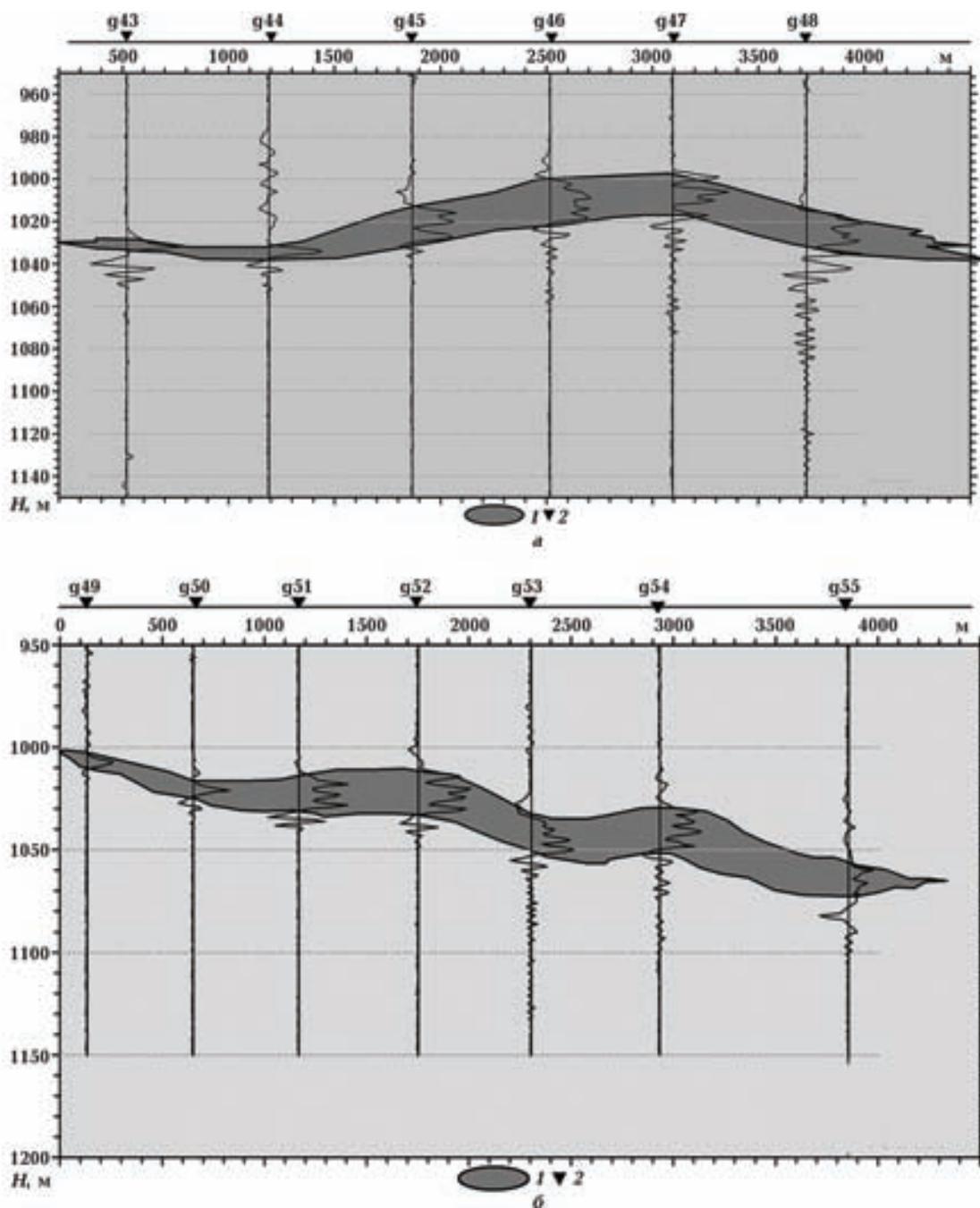


Рис. 8. Вертикальный разрез вдоль геоэлектрических аномальных зон типа "залежь газогидратов" (Gg-1, Gg-2) на шельфе Антарктического полуострова в районе УАС "Академик Вернадский" (2012): а — Пр. 1, б — Пр. 2; 1 — зона аномально поляризованных пластов типа "залежь газогидратов"; 2 — пункты ВЭРЗ. Положение профилей 1, 2 показано на рис. 7.

ной (от 4 до 20 м) мощности. Его длина достигает 4,5 км. Залежь газогидратов Gg-2 сформирована на глубине 1000—1040 м в виде пласта переменной (от 4 до 20 м) мощности и длиной более 4 км. Обе аномальные зоны обнаружены в проливе, где глубина дна не превышает 200 м. Авторам не известны какие-либо данные о находках газогидратов или их поисках в этом районе.

Еще одна аномальная зона типа "залежь газогидратов" выделена по спутниковым данным северо-восточнее аномалии Gg-2. По своим размерам эта аномалия подобна аномалии Gg-1. Зондирования ВЭРЗ на ней не проводились, поэтому положение залежи в разрезе не определено.

Подсчитанные запасы газогидратов (с учетом средней величины гидратонасыщения, равной 6,3%) для этих трех аномалий невелики и не превышают $3,0 \cdot 10^6$ м³ метана (при стандартных температуре и давлении) [Loreto et al., 2011].

Геоэлектрические исследования в районе Южных Шетландских островов. На обширных участках континентальной окраины Антарктического полуострова для существования газогидратов и формирования их скоплений имеются все необходимые термобарические условия, что доказано их обнаружением в разных

районах антарктического побережья, в том числе в районе Южных Шетландских островов [Tinivella et al., 2002; Loreto et al., 2011]. Здесь на Южно-Шетландской континентальной окраине (см. рис. 1) севернее о-ва Кинг Джордж масштабными сейсмическими работами была выявлена крупная область существования газогидратов [Tinivella et al., 2002; Jin et al., 2003; Loreto et al., 2011].

Особенности геодинамического режима данного региона определяются сложным взаимодействием разновозрастных структур континентального и океанического типов, а также активным разломообразованием, связанным с региональными и локальными процессами рифтогенеза. Предполагается, что появление BSR-зон на этом участке материковой окраины в значительной мере контролируется геологическими структурами побережья, а наиболее благоприятные условия их формирования существуют в северо-восточном секторе побережья Южных Шетландских островов, где развита сеть многочисленных активных разломов, способствовавшая миграции флюидов и газа с больших глубин.

При предположении, что газовые гидраты существуют только там, где наблюдаются BSR-гра-

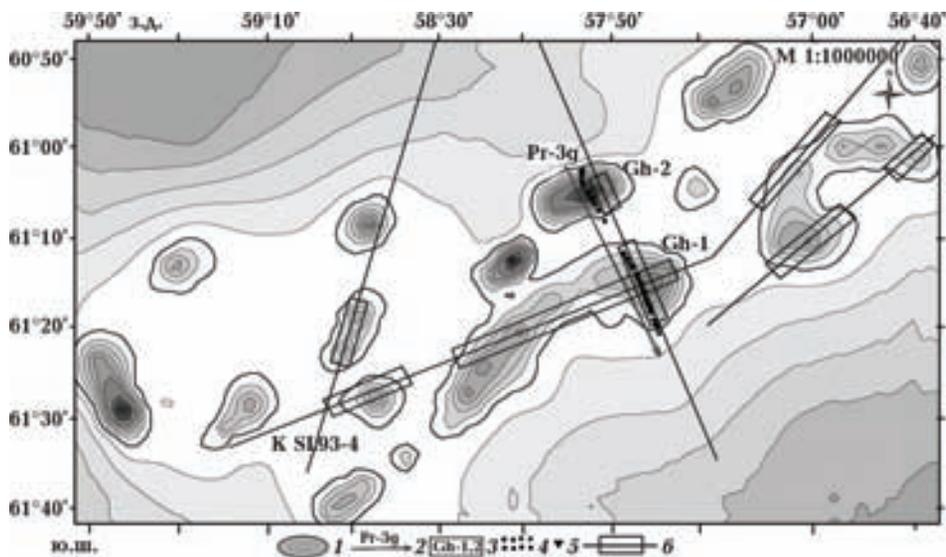


Рис. 9. Карта геоэлектрических аномальных зон типа "залежь газогидратов" на материковом склоне вблизи Южных Шетландских островов (2012): 1 — аномальные зоны типа "залежь газогидратов" по результатам обработки и дешифрирования данных ДЗЗ; 2 — профиль зондирования ВЭРЗ; 3 — аномальные зоны типа "залежь газогидратов", зарегистрированные морской геоэлектрической съемкой; 4 — точки съемки методом СКИП; 5 — пункты ВЭРЗ; 6 — положение сейсмических профилей МОВ—ОГТ [Tinivella et al., 2002]. KSL93-4 — сейсмический профиль через аномальную зону Gh-1, по [Jin et al., 2003].

ницы, общий объем газовых гидратов в районе оценивается примерно в $4,8 \cdot 10^{10} \text{ м}^3$ ($7,7 \times 10^{12} \text{ м}^3$ метана при стандартных температуре и давлении) [Tinivella et al., 2002; Loreto et al., 2011].

Для участков распространения зон BSR на континентальной окраине вблизи Южных Шетландских островов были проинтерпретированы спутниковые данные с различными вариантами параметров обработки, что позволило выделить несколько новых аномальных зон типа "залежь газогидратов" (рис. 9).

Эти результаты показывают, что аномальные зоны располагаются как вблизи зоны разломов Шеклтона (восточная часть участка), так и на значительном расстоянии от него ($57—59^\circ$ з. д.). Вероятно, существующие локальные разломы, секущие склон Южного Шетландского желоба, играют важную роль в формировании этих обширных полей газогидратов, характеризующихся прерывистостью выделения BSR-границ и их различной интенсивностью.

Одной из причин выделения по спутниковым данным в этом районе дополнительных АПП типа "залежь газогидратов" могло быть небольшое количество (или полное отсутствие) скоплений свободного газа на границе с газогидратом из-за сети локальных нарушений в осадочной толще пород. В таком случае BSR-границы теряют свою выразительность или совсем отсутствуют. Зондирования ВЭРЗ удалось выполнить лишь для двух аномальных зон, выявленных по спутниковым данным, где ранее были обнаружены BSR-зоны.

Сравнение данных, полученных разными методами, позволяет утверждать, что глубина аномально поляризованного пласта типа "залежь газогидратов" в зоне Gh-1, ранее выявленного по спутниковым данным (рис. 10, а), близка по глубине положению BSR-зоны, определенному в этом же месте по данным сейсмических исследований [Tinivella et al., 2002; Jin et al., 2003; Loreto et al., 2011]. Разрыв аномальных зон вдоль профиля наблюдений (ПК 6—20, рис. 10, а) можно объяснить ранее выявленной по сейсмическим данным [Jin et al., 2003; Loreto et al., 2011] зоной разломов, секущей склон желоба, а также спорадическим характером образования BSR-зон под воздействием локальных факторов.

Под отчетливо выраженной BSR-зоной выделяется достаточно мощная зона свободного (подгидратного) газа, что может быть причиной значительной мощности аномально поляризованных пластов, выделенных по данным ВЭРЗ (рис. 10, а).

Наличие целого ряда "спутниковых" аномальных зон (см. рис. 9), выходящих за пределы выявленных ранее BSR-зон [Tinivella et al., 2002; Jin et al., 2003; Loreto et al., 2011], показывает, что реальные запасы газогидратов и свободного (подгидратного) газа могут значительно (на 25—30 %) превысить ранее подсчитанные. Это позволяет относить изученный участок к одному из перспективных скоплений газогидратов Западной Антарктики.

Полученные результаты согласуются с предложенной схемой формирования скоплений газогидратов и подгидратного газа в структурах пассивных континентальных окраин Арктики [Madrussani et al., 2010], где благодаря различной величине тепловых потоков и наличию сети локальных тектонических нарушений реализуются условия для миграции глубинных флюидов в осадочную толщу (рис. 10, б). Вероятно, формирование скоплений газогидратов в структурах континентальных окраин Антарктики происходит в результате сходных процессов, в которых определяющим является подъем глубинных флюидов (по локальной сети разломов) в осадочные горизонты различной мощности.

Особенности условий формирования газогидратов в различных структурах континентальной окраины Антарктического полуострова. Сравнение особенностей формирования скоплений газогидратов в структурах континентальной окраины Антарктического полуострова в районе Южных Шетландских островов и моря Росса представляет определенный интерес с точки зрения выявления общих закономерностей формирования газогидратов в регионе.

Значительный объем сейсмических исследований ранее был выполнен в западной части моря Росса, где на трех протяженных профилях были закартированы BSR-границы, связанные с наличием скоплений газогидратов. В результате детальной переинтерпретации этих материалов были выделены не только зоны BSR-отражений, но и дополнительные границы (BSR0), расположенные ниже зоны стабильности газогидратов (рис. 12). Интервальные скорости в осадочных породах, расположенных над BSR-границей, составляют 1900—2050 м/с, уменьшаясь до 1360—1400 м/с под этим разделом. Сейсмические характеристики (низкая скорость и низкие значения частот) горизонта, расположенного между разделами BSR и BSR0, дают основания предполагать наличие здесь свободного газа [Geletti, Busetti, 2011].

Предполагается, что наиболее приемлемой причиной формирования BSR0-границы явля-

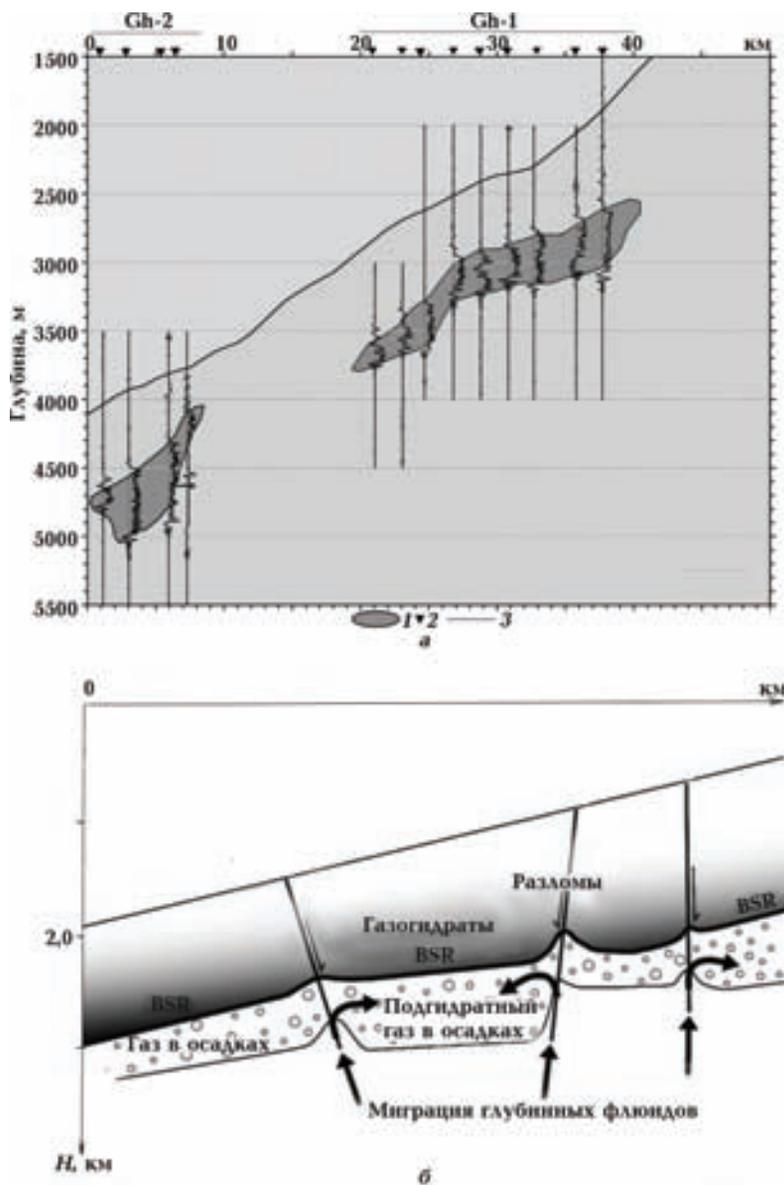


Рис. 10. Вертикальный разрез вдоль геоэлектрических аномальных зон типа “залежь газогидратов” (Gh-1, Gh-2) на материковом склоне вблизи Южных Шетландских островов (а) и принципиальная схема формирования скоплений газогидратов и подгидратных газов в осадках материкового склона (б), по [Madruzzani et al., 2010]: 1 — аномально поляризованные пласты типа “залежь газогидратов”, 2 — пункты ВЭРЗ, 3 — профиль ВЭРЗ. Положение аномальных зон показано на рис. 9.

ется наличие вблизи подошвы осадков смеси газов, в состав которой входит не только метан, но также этан (3 %) и пропан (1 %) [Geletti, Vusetti, 2011]. Проведенные модельные расчеты и полученные кривые для равновесного состояния метангидратов и гидратов разного состава согласуются с этой гипотезой, хотя длительная устойчивость такой системы вряд ли могла сохраниться в условиях значительной тектони-

ческой раздробленности разреза, характерной для всех изученных профилей в море Росса.

Нарушенный характер границ BSR и BSR0 на сейсмическом разрезе (см. рис. 12) вероятно связан с локальными зонами активной миграции флюидов и газов, участвующих в формировании грязевого вулкана Тергест — крупного подводного вулкана (высотой более 80 и шириной около 1000 м), приуроченного к сис-

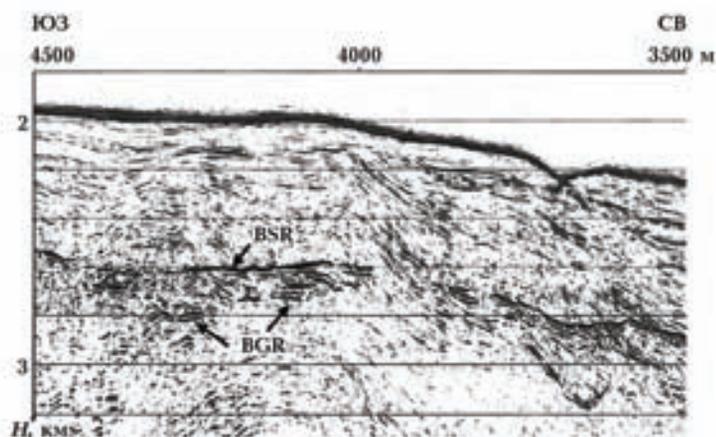


Рис. 11. Сейсмический разрез МОВ—ОГТ вдоль части профиля KSL93-4, на котором выделены контрастная BSR-зона и расположенная под ней BGR-зона, соответствующая подошве зоны свободного газа [Madrussani et al., 2010]. Положение профиля показано на рис. 9.

теме разломов с подпитывающими глубинными каналами. Имеющиеся сейсмические данные отражают строение лишь части разреза грязевого вулкана (см. рис. 12). Вероятно, его корни расположены в низах осадочной толщи, общая мощность которой в море Росса достигает 14 км [Geletti, Busetti, 2011]. В вертикальном сейсмическом разрезе выделяется участок, расположенный между разделами BSR и BSR0, который можно считать промежуточной областью питания грязевого вулкана Тергест (см. рис. 12).

Следует отметить, что в море Росса метан в малых количествах был выявлен по результатам донных опробований осадков (1—3 м ниже дна), а высокая концентрация метана (на глубине 64—365 м) была обнаружена в керне скважин DSDP 271-273 [Geletti, Busetti, 2011].

Приведенные характеристики разреза служат дополнительной иллюстрацией к выявленным общим закономерностям формирования газогидратов в пределах тех участков шельфовых зон и континентальных склонов, где выявлены структуры инъекционного типа, представленные диапирами, грязевулканическими аппаратами, разгрузками газонасыщенных вод (сипами) и трубообразными структурами типа VAMP. Их корни, часто прослеживаемые в виде разрывных нарушений в основании осадочного разреза и в фундаменте, служат в качестве активных каналов поступления глубинных углеводородов [Milkov, 2000; Haacke et al., 2007; Madrussani et al., 2010; Geletti, Busetti, 2011; Краюшкин, 2013]. Такие инъекционные структуры и целая серия подводных грязевых вулканов бы-

ли обнаружены и на участках континентальной окраины вблизи Южных Шетландских островов, где их связь с процессами формирования скопленных газогидратов подтверждается данными сейсмических исследований.

Структурная и генетическая связь подводных вулканов с местами скопления газогидратов доказана геолого-геофизическими исследованиями, выполненными в различных регионах Мирового океана. В периферийных областях грязевых вулканов Мирового океана часто, но далеко не всегда, возникают локальные участки скопления газогидратов, где может содержаться порядка 10^{10} — 10^{12} м³ метана [Milkov, 2000].

Можно считать, что подводные вулканы являются важным звеном в процессе миграции глубинных геофлюидов при формировании зон нефтегазоаккумуляции в различных структурах Мирового океана.

Выводы. Представлены результаты региональных исследований углеводородного потенциала отдельных структур материковой окраины.

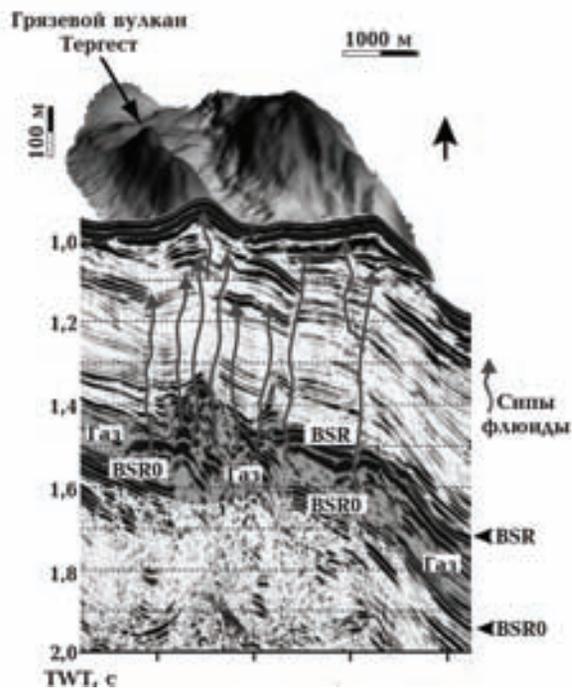


Рис. 12. Схематический разрез вдоль профиля через зону грязевого вулкана Тергест в море Росса, по [Geletti, Busetti, 2011]. Показано положение глубинных границ BSR и BSR0, фиксирующих положение ЗГО в разрезе.

ины Антарктического полуострова, полученные в 2004—2012 гг. По материалам этих исследований в структурах континентальных окраин Антарктического полуострова (Западная Антарктика) выявлен ряд АТЗ ("скопления углеводородов"), определены параметры аномальных пластов и их положение в разрезах.

Полученные данные подтверждают высказанное ранее предположение о возможном существовании в этой части Западной Антарктики крупных скоплений нефти и газогидратов. Их формирование в структурах пассивной континентальной окраины Антарктического полуострова происходило в результате неоднократных внедрений глубинных геофлюидов в разноуровневые горизонты земной коры при региональной реактивации палеоразломов и ослабленных зон.

Подобные результаты были получены и для

структур дна моря Росса, где глубина формирования поднимающихся под высоким давлением геофлюидов также значительно превышает глубину зон BSR-отражений. Материалы геофизических исследований в регионе показали наличие сложной системы локальных структур, считающихся типичными для пассивных континентальных окраин. Общими для этих структур континентальной окраины Антарктики, как и для других подобных структур Мирового океана, является достаточно тесная пространственная, а возможно, и генетическая связь грязевых вулканов с выявленными участками BSR-отражений и местами формирования скоплений газогидратов. Приведенные данные свидетельствуют о значительной роли глубинных флюидов в формировании скоплений углеводородов в различных горизонтах земной коры пассивных окраин Западной Антарктики.

Список литературы

- Анфилатова Э. А. Аналитический обзор современных зарубежных данных по проблеме распространения газогидратов в акваториях мира. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2008. № 3. С. 1—8.
- Грикуров Г. Э., Лейченко Г. Л., Михальский Е. В., Голынский А. В., Масолов В. Н. Минеральные ресурсы Антарктики: геологические предпосылки и перспективы освоения. *Разведка и охрана недр*. 2000. № 12. С. 59—63.
- Иванов В. А. Геологические предпосылки прогноза нефтегазоносности недр Антарктики. *Советская геология*. 1985. № 2. С. 3—14.
- Корзун В. А. Оценка возможностей использования ресурсов Антарктики. Москва: Изд. ИМЭМО РАН, 2009. 116 с.
- Краюшкин В. А. Небиогенная природа гигантского газонефтенакопления на мировом континентальном шельфе. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2013. № 4. С. 29—45.
- Левашов С. П., Якимчук Н. А., Корчагин И. Н. Новые возможности оперативной оценки перспектив нефтегазоносности разведочных площадей, труднодоступных и удаленных территорий, лицензионных блоков. *Геоинформатика*. 2010. № 3. С. 22—34.
- Левашов С. П., Якимчук Н. А., Корчагин И. Н. Оценка относительных значений пластового давления флюидов в коллекторах: результаты проведенных экспериментов и перспективы практического применения. *Геоинформатика*. 2011. № 2. С. 19—35.
- Левашов С. П., Якимчук Н. А., Корчагин И. Н. Частотно-резонансный принцип, мобильная геоэлектрическая технология: новая парадигма геофизических исследований. *Геофиз. журн.* 2012а. Т. 34. № 4. С. 166—176.
- Левашов С. П., Якимчук Н. А., Корчагин И. Н., Божежа Д. Н., Прилуков В. В. Мобильные прямопоисковые технологии: факты обнаружения и локализации каналов вертикальной миграции флюидов — дополнительные свидетельства в пользу глубинного синтеза углеводородов. *Геоинформатика*. 2016. № 2. С. 5—35.
- Левашов С. П., Якимчук Н. А., Корчагин И. Н., Самсонов А. И., Божежа Д. Н. Методические аспекты применения технологии обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли при проведении поисковых работ на нефть и газ в акваториях. *Геоинформатика*. 2012б. № 1. С. 5—16.
- Макогон Ю. Ф. Газогидраты. История изучения и перспективы освоения. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2010. № 2. С. 5—21.
- Соловьев В. Д., Корчагин И. Н., Бахмутов В. Г., Левашов С. П., Якимчук Н. А., Божежа Д. Н., Прилуков В. В. Новые данные о перспективности шельфа Антарктического полуострова на нефть и газ (по результатам геофизических исследований). *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики: Зб. наук. пр.* Киев, 2011. С. 33—47.

- Шуман В. Н. Электромагнитно-акустические преобразования и высокоразрешающие зондирующие системы: новые возможности и новые формулировки старых вопросов. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 3. С. 32—39.
- Geletti R., Busetti M., 2011. A double bottom simulating reflector in the western Ross Sea, Antarctica. *J. Geophys. Res.* 116, B04101. doi: 10.1029/2010JB007864.
- Haacke R. Ross., Westbrook G. K., Hyndman R. D., 2007. Gas hydrate, fluid flow and free gas: Formation of the bottom-simulating reflector. *Earth Planet. Sci. Lett.* 261(3-4), 407—420. doi: 10.1016/j.epsl.2007.07.008.
- Janik T., Grad M., Guterch A., Środa P., 2014. The deep seismic structure of the Earth's crust along Antarctic Peninsula — A summary of the results from polish geodynamical expeditions. *Global Planet. Change* 123, 213—222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.08.018>.
- Jin Y. K., Lee M. W., Kim Y., Nam S. H., Kim K. J., 2003. Gas hydrate volume estimations on the South Shetland continental margin, Antarctic Peninsula. *Antarct. Sci.* 15(2), 271—282. doi: 10.1017/S0954102003001275.
- Loreto M. F., Tinivella U., Accaino F., Giustiniani M., 2011. Offshore Antarctic Peninsula gas hydrate reservoir characterization by geophysical data analysis. *Energy* (4), 39—56.
- Madrussani G., Rossi G., Camerlenghi A., 2010. Gas hydrates, free gas distribution and fault pattern on the west Svalbard continental margin. *Geophys. J. Int.* 180(2), 666—684. doi: 10.1111/j.1.1365-246X.2009.04425.x.
- Milkov A. V., 2000. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Mar. Geol.* 167(1), 29—42.
- Mineral resources potential in Antarctica, 1990. Ed. J. F. Spletstoeser, G. A. M. Dreschhoff. Antarctic Res. Ser. Vol. 51, 319 p.
- Rebesco M., Camerlenghi A., De Santis L., Domack E., Kirby M., 1998. Seismic stratigraphy of Palmer Deep: a fault-bounded late Quaternary sediment trap on the inner continental shelf, Antarctic Peninsula Pacific margin. *Mar. Geol.* 151(1), 89—110.
- Solovyov V. D., Bakmutov V. G., Korchagin I. N., Levashov S. P., Yakymchuk N. A., Bozhezha D. N., 2011. Gas Hydrates Accumulations on the South Shetland Continental Margin: New Detection Possibilities. Hindawi Publishing Corporation. *Journal of Geological Research* 2011, Article ID 514082, 8 p. doi: 10.1155/2011/514082.
- Solovyov V. D., Bakmutov V. G., Korchagin I. N., Levashov S. P., 2009. Crustal structure of Palmer Deep (West Coast of the Antarctic Peninsula) by geophysical data. *Укр. антаркт. журн.* (7), 85—93.
- Tinivella U., Accaino F., Camerlenghi A., 2002. Gas hydrate and free gas distribution from inversion of seismic data on the South Shetland margin (Antarctica). *Mar. Geophys. Res.* 23, 109—123.

The experiment of integrated mobile technologies used for deep hydrocarbon accumulation prospecting and geophysical mapping at the West Antarctic bottom structures

© V. D. Solovyov, S. P. Levashov, N. A. Yakimchuk, I. N. Korchagin, D. N. Bozhezha, 2017

The data obtained confirm earlier assumption about possible existence of large accumulations of oil and gas hydrates in this part of the West Antarctica. Their formation in the structures of passive continental margin of the Antarctic Peninsula occurred as a result of repeated intrusions of deep geo-fluids into the earth crust different horizons during regional reactivation of paleo-fractures and attenuated zones. Materials of geophysical studies in the region have shown the presence of complicated system of local structures, considered as typical for passive continental margins. Shared feature for these structures of continental margin of Antarctica as well as for other similar structures of the great ocean is sufficiently close regional, and possibly genetic connection of mud volcanoes with explored areas of BSR-reflections and the places of

formation of gas and gas hydrates accumulations. The data obtained attest the considerable role of deep fluids in formation of hydrocarbon accumulations in different horizons of the Earth's crust of the passive margins of West Antarctica.

Key words: West Antarctica, continental margins, mud volcanoes, oil, gas hydrates, mobile technologies, geo-electric prospecting methods.

References

- Anfilatova E. A., 2008. A review of modern foreign data on the problem of occurrence of gas hydrates the world offshore. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika* (3), 1—8 (in Russian).
- Grikurov G. E., Leychenko G. L., Mikhalskiy E. V., Golynskiy A. B., Masolov B. N., 2000. Mineral Resource of the Antarctic: geological background and development prospects. *Razvedka i okhrana neдр* (12), 59—63 (in Russian).
- Ivanov V. L., 1985. Geological conditions forecast oil and gas potential of the Antarctic interior. *Sovetskaya geologiya* (2), 3—14 (in Russian).
- Korzun V. A., 2009. Assessment of possibilities of using resources in Antarctica. Moscow: Publ. House. IMEMO RAS, 116 p. (in Russian).
- Krayushkin V. A., 2013. Non-biogenic nature of the giant gas and oil accumulation at the world continental shelf. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana* (4), 29—45 (in Russian).
- Levashov S. P., Yakimchuk N. A., Korchagin I. N., 2010. New possibilities for rapid assessment oil and gas potential exploratory areas, inaccessible and removed areas, the licensed blocks. *Geoinformatika* (3), 22—43 (in Russian).
- Levashov S. P., Yakimchuk N. A., Korchagin I. N., 2011. Evaluation of the relative values of the reservoir pressure of fluids in the reservoirs: the results of experiments and prospects of practical applications. *Geoinformatika* (2), 19—35 (in Russian).
- Levashov S. P., Yakimchuk N. A., Korchagin I. N., 2012a. Frequency resonance principle, mobile geoelectric technology: A new paradigm geophysical research. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(4), 166—176 (in Russian).
- Levashov S. P., Yakimchuk N. A., Korchagin I. N., Bozhezha D. N., Prilukov V. V., 2016. Mobile direct-prospecting technology: facts of channels detection and localization of fluids the vertical migration — additional evidence for deep hydrocarbon synthesis. *Geoinformatika* (2), 5—35 (in Russian).
- Levashov S. P., Yakimchuk N. A., Korchagin I. N., Samsonov A. I., Bozhezha D. N., 2012b. Methodological aspects of the remote sensing data processing and interpretation technology in oil and gas prospecting of offshore. *Geoinformatika* (1), 5—16 (in Russian).
- Makogon Yu. F., 2010. Gas hydrates. The history of the study and the prospects for commercial exploitation. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana* (2), 5—21 (in Russian).
- Solovyov V. D., Korchagin I. N., Bakmutov V. G., Levashov S. P., Yakimchuk N. A., Bozhezha D. N., Prilukov V. V., 2011. New data oil and gas prospects of the Antarctic Peninsula shelf (based on geophysical studies results). *Theoretical and applied aspects of geoinformatics: Collection of sci. works*. Kiev, 33—47 (in Russian).
- Shuman V. N., 2012. Electromagnetic-acoustic transformations and high-resolution sounding systems: new possibilities and new formulations of the old questions. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(3), 32—39 (in Russian).
- Geletti R., Busetti M., 2011. A double bottom simulating reflector in the western Ross Sea, Antarctica. *J. Geophys. Res.* 116, B04101. doi: 10.1029/2010JB007864.
- Haacke R. Ross., Westbrook G. K., Hyndman R. D., 2007. Gas hydrate, fluid flow and free gas: Formation of the bottom-simulating reflector. *Earth Planet. Sci. Lett.* 261(3-4), 407—420. doi: 10.1016/j.epsl.2007.07.008.
- Janik T., Grad M., Guterch A., Środa P., 2014. The deep seismic structure of the Earth's crust along Antarctic Peninsula — A summary of the results from polish geodynamical expeditions. *Global Planet. Change* 123, 213—222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.08.018>.
- Jin Y. K., Lee M. W., Kim Y., Nam S. H., Kim K. J., 2003. Gas hydrate volume estimations on the South Shetland continental margin, Antarctic Peninsula. *Antarct. Sci.* 15(2), 271—282. doi: 10.1017/S0954102003001275.
- Loreto M. F., Tinivella U., Accaino F., Giustiniani M., 2011. Offshore Antarctic Peninsula gas hydrate reservoir characterization by geophysical data analysis. *Energy* (4), 39—56.
- Madrussani G., Rossi G., Camerlenghi A., 2010. Gas

- hydrates, free gas distribution and fault pattern on the west Svalbard continental margin. *Geophys. J. Int.* 180(2), 666—684. doi: 10.1111/j.1.1365-246X.2009.04425.x.
- Milkov A. V., 2000. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Mar. Geol.* 167(1), 29—42.
- Mineral resources potential in Antarctica, 1990. Ed. J.F. Spletstoesser, G.A.M. Dreschhoff. Antarctic Res. Ser. Vol. 51, 319 p.
- Rebesco M., Camerlenghi A., De Santis L., Domack E., Kirby M., 1998. Seismic stratigraphy of Palmer Deep: a fault-bounded late Quaternary sediment trap on the inner continental shelf, Antarctic Peninsula Pacific margin. *Mar. Geol.* 151(1), 89—110.
- Solovyov V. D., Bakhmutov V. G., Korchagin I. N., Levashov S. P., Yakymchuk N. A., Bozhezha D. N., 2011. Gas Hydrates Accumulations on the South Shetland Continental Margin: New Detection Possibilities. Hindawi Publishing Corporation. *Journal of Geological Research* 2011, Article ID 514082, 8 p. doi: 10.1155/2011/514082.
- Solovyov V. D., Bakhmutov V. G., Korchagin I. N., Levashov S. P., 2009. Crustal structure of Palmer Deep (West Coast of the Antarctic Peninsula) by geophysical data. *Укр. антаркт. журн.* (7), 85—93
- Tinivella U., Accaino F., Camerlenghi A., 2002. Gas hydrate and free gas distribution from inversion of seismic data on the South Shetland margin (Antarctica). *Mar. Geophys. Res.* 23, 109—123.