

УДК 528+550.837+553.98

## О ГАЗОГИДРАТНОМ ПОТЕНЦИАЛЕ СТРУКТУР ДНА КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ОКРАИН АНТАРКТИКИ (ПО ДАННЫМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ)

*С.П. Левашов<sup>1,2</sup>, Н.А. Якимчук<sup>1,2</sup>, И.Н. Корчагин<sup>3</sup>, Ю.М. Пищаний<sup>1</sup>,  
В.Г. Бахмутов<sup>3</sup>, В.Д. Соловьёв<sup>3</sup>, Д.Н. Божежа<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт прикладных проблем экологии, геофизики и геохимии, Киев, Украина*

<sup>2</sup>*Центр менеджмента и маркетинга в области наук о Земле ИГН НАНУ, Киев, Украина*

<sup>3</sup>*Институт геофизики им. С.И. Субботина НАНУ,  
Киев, Украина, e-mail: bakhmutovvg@gmail.com*

Систематизированы данные о расположении BSR-зон и возможных скоплениях газогидратов в структурах пассивных континентальных окраин Антарктики. Показана эффективность новой инновационной технологии комплексирования геоэлектрических и дистанционных геофизических методов для изучения скоплений газогидратов и построения детальных глубинных характеристик разрезов, содержащих аномально-поляризованные пласты типа «залежь газогидратов». Важной особенностью предложенной технологии является возможность её использования в качестве независимого индикатора обнаружения скоплений газогидратов на участках со слабо выраженными BSR-границами разного генезиса. Выявлены новые участки нахождения газогидратов вблизи УАС Академик Вернадский и определено их положение в осадочной толще. Показано, что изученный участок вблизи Южных Шетландских островов может быть отнесен к одному из перспективных районов (наряду с областью развития газогидратов в море Росса) скоплений газогидратов в Антарктике.

### **Про газогідратний потенціал структур дна континентальних окраїн Антарктики (за даними геофізичних досліджень)**

С.П. Левашов, М.А. Якимчук, І.М. Корчагін, Ю.М. Піщаний, В.Г. Бахмутов, В.Д. Соловійов, Д.М. Божежа  
**Реферат.** Систематизовано дані про розташування BSR-зон та можливі скупчення газогідратів у структурах пасивних континентальних окраїн Антарктики. Показано ефективність нової інноваційної технології комплексування геоелектричних і дистанційних геофізичних методів для вивчення скупчень газогідратів та побудови детальних глибинних характеристик розрізів, що містять аномально-поляризовані пласти типу «поклад газогідратів». Важливою особливістю запропонованої технології є можливість її використання в якості незалежного індикатора виявлення скупчень газогідратів на ділянках із невиразними BSR-зонами різного генезису. Виявлено нові ділянки знаходження газогідратів поблизу УАС Академік Вернадський і визначено їх положення в осадовій товщі. Показано, що досліджена ділянка поблизу Південних Шетландських островів може бути віднесена до одного з перспективних районів скупчень газогідратів в Антарктиці.

### **About the gas hydrate potential of the Antarctic continental margin bottom structures (by geophysical data)**

S.P. Levashov, N.A. Yakimchuk, I.N. Korchagin, Ju.M. Pischany, V.G. Bakhmutov, V.D.Solovyov, D.N. Bozhezha  
**Abstract.** Data on the location of BSR-zones and possible accumulations of gas hydrates in the structures of passive continental margins of Antarctica are summarized. The efficiency of the new innovative technology of geoelectric and remote geophysical methods using for the study of gas hydrate accumulations and deep cuts with abnormally polarized layers of the "deposit of gas hydrates" building is given. An important feature of this proposed technology is that it can be used as an independent indicator of gas hydrates detecting in areas with BSR-boundaries of different genesis. New gas hydrate accumulations near the Academician Vernadsky UAS were identified and their position in the sediment section with high accuracy were defined.

It's shown, that the region near the South Shetland Islands can be assigned to one of the most promising areas (with the area in the western part of Ross Sea) accumulations of gas hydrates in Antarctica.

**Keywords:** Antarctic continental margins, gas hydrates, geoelectric methods, remote studies, direct methods of prospecting and exploration of gas hydrates.

## 1. Введение

Интерес к изучению минеральных ресурсов Антарктики и оценке перспектив их возможной разработки является важным стимулом геолого-геофизических исследований материка и его континентальных окраин. Такие работы, проведенные за последние десятилетия, позволили получить новые данные о глубинном строении, тектонике и геодинамике региона, а также способствовали накоплению ценной информации о скоплениях и залежах многих видов полезных ископаемых (в том числе углеводородов) в структурах его континентальных окраин [11, 12, 15, 17, 20, 21, 24-29, 31-36, 39-46].

Выполненные исследования не противоречат основным положениям Протокола об охране окружающей среды региона Договора об Антарктике (1991 г.), ратифицированного в 1998 г. Договор запрещает разведку и добычу полезных ископаемых, но не накладывает ограничений на проведение научных исследований, направленных на изучение фундаментальных закономерностей геологического строения, глубинной структуры и истории формирования структур земной коры Антарктики, а также на выполнение научно обоснованного прогноза минерально-сырьевых ресурсов региона.

Геолого-геофизические исследования в районах континентальной окраины Антарктического полуострова, перспективных с точки зрения формирования важнейших видов полезных ископаемых, периодически выполняются украинскими специалистами на протяжении последних 15 лет и являются одним из основных направлений Государственной программы исследований Украины в Антарктике на 2011–2020 гг.

Во время проведения сезонных работ (2004, 2006, 2012 гг.) был выполнен значительный объем геолого-геофизических исследований в Западной Антарктике, в т.ч. геоэлектрическими методами становления короткоимпульсного поля (СКИП) и вертикального электрорезонансного зондирования (ВЭРЗ) совместно с методом частотно-резонансной обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Ранее нами были приведены основные сведения о методике проведения исследований, показаны результаты изучения глубинного строения земной коры, а также поисков и картирования скоплений углеводородов в пределах структур материковых окраин региона [8-12, 17, 32, 33, 39, 45].

Ниже будут рассмотрены и обобщены результаты геолого-геофизических исследований последних лет, выполненных на материковых окраинах Антарктики с целью получения новых данных о возможном наличии газогидратов в структурах дна пассивных окраин данного региона.

## 2. Краткие сведения о скоплениях природных газогидратов

В 1970-х годах газогидраты впервые были обнаружены в скважине на Северном склоне Аляски и в образцах осадков на дне Черного моря. Результаты исследований 1980-х годов привели к тому, что газовые гидраты стали рассматриваться как новый и потенциально перспективный источник метана [1-7, 13, 14, 16, 22, 23, 30, 36, 39, 42-45]. Около 25 лет (с 1990-х годов) в ряде стран мира (Канада, США, Германия, Норвегия, Япония, Индия, Китай и др.) реализуются целенаправленные и широкомасштабные программы по изучению, обнаружению и разработке газовых гидратов [1, 3, 14, 16, 22, 23]. 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 году дополнительный импульс после успешной добычи (с глубины около 1.3 км) природного газа на газогидратном месторождении вблизи полуострова Ацуми, где общие разведанные запасы метана составляют около 10 трлн. м<sup>3</sup>. Экспериментальную полномасштабную добычу гидрата метана здесь планируют начать в 2018 году [22].

В настоящее время, по прямым и косвенным данным, обнаружено около 250 мест возможных проявлений газогидратов в придонной части осадочной толщи морского дна в различных районах Мирового океана [1, 3, 5, 14, 16, 22, 30]. Прогнозные оценки запасов газогидратов сильно варьируют, различаясь на несколько порядков – от  $2.0 \times 10^{14}$  до  $7.5 \times 10^{18}$  м<sup>3</sup> [1, 3, 5, 14, 22]. В настоящее время этот диапазон значительно сузился и оценивается величинами от  $(2 \times 10^{14} - 10^{15})$  м<sup>3</sup> [1-3] до  $1.5 \times 10^{16}$  м<sup>3</sup> [14].

Около 98% общих запасов приходится на Мировой океан, а остальные 2% (около 300 трлн. м<sup>3</sup>) – на приполярные районы материков [1, 14, 22].

Природные газогидраты сохраняют стабильность в режиме сочетания низкой температуры и высокого давления, которые реализуются в осадочных толщах континентальных окраин Мирового океана. Следует отметить, что генезис метана, составляющего основную часть газогидратов, как и сам механизм гидратообразования, изучен совершенно недостаточно [2-7, 14, 18, 19, 22, 35-38, 40, 43, 44].

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 [3-7, 14, 16, 22, 40, 43, 44]. Масштабное образование скоплений газогидратов может быть частью глобального процесса мезо-кайнозойского нефтегазонакопления, происходящего в пределах континентальных окраин Мирового океана в результате дегазации Земли [4, 22].

Как показано в [6], «при вторжении глубинных недифференцированных и нетрансформированных углеводородных флюидов в вышележащие горизонты с падением температуры и давления будет происходить их последовательная дифференциация и трансформация с обособлением битуминозных нефтяных и газовых компонентов. Подобный механизм, 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 скоплений газогидратов».

Все эти данные показывают необходимость проведения новых исследований «для определения роли глубинных процессов и структур в формировании локализованных потоков глубинных углеводородов, которые вносят, видимо, существенный вклад в образование скоплений природных газогидратов» [6].

Предполагается, что суммарные запасы метана в донных отложениях Мирового океана и зонах вечной мерзлоты (порядка  $1.5 \times 10^{16}$  м<sup>3</sup>) могут превысить прогнозируемые запасы природного газа известных месторождений мира. Самые крупные скопления сосредоточены в пределах структур континентальных окраин, различающихся глубиной дна, тектоническим положением, геодинамическими характеристиками, мощностью осадков и скоростью седиментации. Здесь обычно выделяется несколько горизонтов газогидратов с переменной гидратонасыщенностью, что усложняет оценку их перспективности и требует новых сложных технологий их возможного извлечения [3-7, 40, 44].

Результаты глубоководного океанического бурения 70–80-х годов прошлого столетия показали, что газогидраты распределены в структурах дна крайне неравномерно, а их скопления формируются в местах вероятного существования глубинных источников и разрывных нарушений, где возникают условия для активного поступления углеводородов, подпитывающих области гидратообразования. В акватории Мирового океана формирование газогидратных скоплений обычно ассоциируется со структурами инъекционного типа,

представленными диапирами, грязевулканическими аппаратами, разгрузками газонасыщенных вод (сипами) и трубообразными структурами типа VAMP. Корни этих структур часто прослеживаются в виде разрывных нарушений в основании осадочного разреза и в фундаменте [3-6, 22, 40, 44].

К континентальным склонам и шельфовым зонам Мирового океана, а также к глубоководным котловинам внутренних морей приурочены многие грязевые вулканы, которые можно рассматривать в качестве активных каналов поступления глубинных углеводородов. В периферийных областях грязевых вулканов часто, но далеко не всегда, возникают локальные участки скопления газогидратов, где может содержаться порядка  $10^{10}$ - $10^{12}$  м<sup>3</sup> метана [37].

Уникальный опыт промышленной разработки (с 1969 г.) газогидратов в условиях вечной мерзлоты был получен на Мессояхском газогидратно-газовом месторождении в Западной Сибири, где суммарный объем добытого газа составил около  $13 \times 10^9$  м<sup>3</sup> [13, 14]. Предполагается, что эта газогидратная залежь на протяжении геологического времени претерпела существенные изменения под влиянием значительных воздействий климатических условий прошлого [5, 13, 14]. 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 [3, 13, 22, 23].

Экспериментальная добыча гидратов метана проведена в арктических зонах США и Канады. В 2002 году международный исследовательский консорциум при участии научных организаций США, Канады и Японии начал экспериментальную добычу метана с месторождения Маллик в дельте реки МакКензи Канадской Арктики. В начале 2012 года на месторождении «Ignik Sikumi» впервые добыли 28 тыс. м<sup>3</sup> метана, а пробная промышленная разработка месторождений газогидратов здесь может начаться в 2022 году [1, 14, 44]. Наличие крупных месторождений газогидратов в этих районах подтверждается не только данными комплексных геофизических исследований, но и результатами бурения многочисленных скважин, при этом общие технически извлекаемые ресурсы газогидратов только на Северном склоне Аляски превышают 2 трлн. м<sup>3</sup> [7, 22, 44].

За последние годы значительно расширился список тех районов, где были выявлены крупные газогидратные месторождения. Так, проведенные исследования показали, что предполагаемый объем метангидратов на севере Мексиканского залива составляет почти 600 млрд. м<sup>3</sup>, а очень крупные запасы метана обнаружены в территориальных водах Китая, Кореи, Японии, Индии [1, 23]. Требуется проведение дальнейших исследований и участки предполагаемых скоплений газогидратов в структурах дна Чёрного моря [23].

Наиболее перспективными для промышленной разработки в отдалённом будущем можно считать только крупные скопления с высокой концентрацией газогидратов в зонах вечной мерзлоты, а также на отдельных локальных участках континентальных окраин [1].

### **3.0 BSR-зонах и их использовании для обнаружения и изучения скоплений природных газогидратов в структурах континентальных окраин Антарктики**

Совместное использование различных геолого-геофизических, геохимических и других данных (включая результаты прямых измерений в скважинах и теоретического моделирования) способствует выявлению и картированию газовых гидратов и свободного газа в разрезе морских осадочных отложений. Возможное наличие гидратной зоны в разрезе достаточно уверенно определяется по данным МОВ-ОГТ, которые определяют положение сейсмической отражающей границы BSR (Bottom Simulating Reflector), субпараллельной рельефу дна и расположенной (рис. 1) в нижней части зоны гидратообразования (ЗГО).

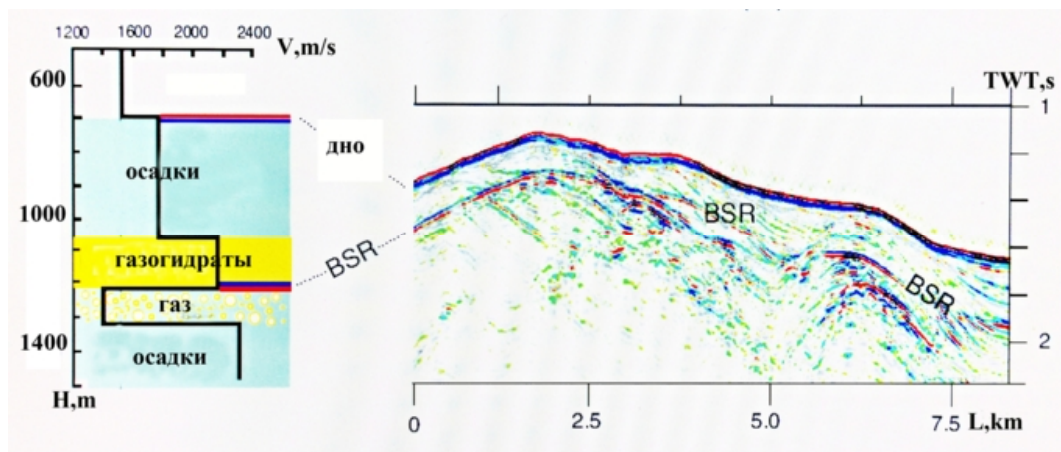


Рис. 1. Схематический глубинный разрез и скоростные характеристики осадочной толщи, в пределах которой выделена зона гидратообразования (ЗГО), расположенная между поверхностью дна (красно-синяя линия) и разделом (BSR-зона) на границе газогидрат – свободный (подгидратный) газ (сине-красная линия) [40].

Её существование в значительной мере определяется инверсией скоростей на разделе газогидраты – подгидратный газ, где в верхнем слое осадков с газогидратами скорость повышается, а в слое с подгидратным газом – резко падает. Перепад скоростей может составить более 300-400 м/с, достигая 1500 м/с в кровле ЗГО [14, 34, 36, 40-44], поскольку амплитуда отражений BSR-зон в значительной мере зависит от степени заполнения осадков газогидратами над границей и газом ниже её. Ниже (на 120-200 м) обычно наблюдается ещё одна граница, которая может быть связана с нижней границей (подошвой) зоны свободного газа [14, 18, 19, 22, 40] или являться дополнительным разделом, свидетельствующим о формировании сложной BSR-зоны на этом участке [18, 19, 38, 40-44].

Процессы образования и мощность ЗГО определяются не только соответствующими термобарическими параметрами, но и наличием путей для миграции достаточного количества газа и воды, химическим составом газов, солёностью вод, а также присутствием коллекторов и надёжных покрышек [3-7, 14, 18, 19, 38, 40-45]. Важную роль в их формировании играют и геологические факторы.

Например, соляные интрузии вызывают локальный рост температуры и солёности, что приводит к уменьшению мощности ЗГО. Воздействие локальных флюидных потоков и разломов приводит к повышению температуры и смещению зоны гидратообразования. Исследования показали, что стабильность газогидратов существенно зависит от состава поступающих газов и геохимии флюидных потоков. Их вариации (5-10%) могут изменить величину ЗГО на десятки и сотни метров [5-7, 14, 16, 18, 19, 22, 40-45]. Кроме того, изменения уровня моря, температуры придонного слоя и резкие колебания климата также влияют на стабильность этой зоны и положение BSR-границы в разрезе осадочной толщи [18, 19, 22, 40-45]. Расчёты показывают, что процессы глобального потепления океанских вод могли привести к разрушению ЗГО на многие десятки метров за 100-200 лет [45].

Данные глубоководного бурения в ряде регионов (хребет Блейк Аутер на Атлантическом склоне США, Гвинейский залив и др.) показали, что отчётливая BSR-зона выделяется и в случае присутствия в поровом пространстве всего нескольких процентов свободного газа и при низкой (2-3%) гидратонасыщенности порового пространства осадков над разделом BSR [2-7, 18, 19, 22, 40-45]. Зависимость процесса формирования BSR-границы от многих факторов приводит к тому, что на многих континентальных окраинах выявленные скопления газогидратов не имеют четко выраженного раздела на подошве ЗГО

[7, 16, 22, 44]. Природа BSR-границы не может считаться окончательно установленной, поскольку в различных регионах и на разных глубинах она имеет свои особенности, не всегда поддающиеся однозначной интерпретации. Особый интерес представляют сложно-построенные BSR-разделы (рис. 2), которые, вероятно, отражают положение нижних границ зон гидратообразования, соответствующих последовательным изменениям климата в регионе [18, 22, 38, 40-45].

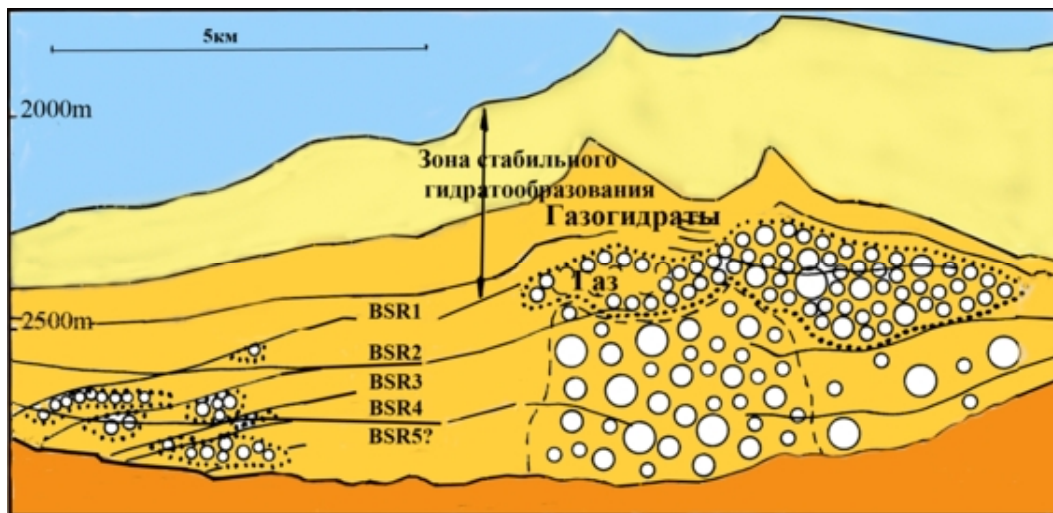


Рис. 2. Положение сейсмических BSR-границ в осадочном комплексе Дунайского глубоководного конуса выноса (Чёрное море), по [38].

Сложные BSR-границы обнаружены в различных регионах мира, поэтому другие гипотезы их возможного формирования будут рассмотрены на примере глубинного разреза [27] материковой окраины Антарктиды в море Росса, где ЗГО отделена от нижележащей толщи двумя BSR-границами (рис. 3, 4). (Рис. 3-6 см. цв. вклейку 1.) Следует отметить, что западная часть моря Росса относится к тем немногочисленным участкам континентальных окраин Антарктики, где сейсмические исследования, направленные в том числе и на изучение возможных скоплений газогидратов, носили достаточно системный характер [27].

За последние 20–25 лет по результатам сейсмических исследований в структурах материковых окраин Антарктики выявлен ряд участков (рис. 3), в пределах которых обнаружены BSR-зоны различного генезиса [16, 26, 27, 29-31, 34-36, 41-43]. Впервые BSR-зоны были выявлены мористее Земли Уилкса, а также вблизи Южных Шетландских островов и в море Росса [16, 27, 29, 31, 35, 36, 41-43]. Выявленные ранее участки развития BSR-зон (рис. 3) в пределах материкового склона в заливе Прюдс, море Уэдделла (вблизи Южно-Оркнейского микроконтинента) и проливе Дрейка (на Тихоокеанской континентальной окраине Антарктического полуострова) были отнесены к т.н. диагенетическим разделам, представленным в разрезе серией тонких кремнистых слоёв вблизи глубинных поверхностей тектонического срыва [16, 31, 35].

Интенсивная протяженная BSR-граница, выявленная на материковой окраине Антарктического полуострова между скважинами DSDP-1095 и DSDP-1096 (рис. 3), также может быть связана с процессами диагенеза кремнистых пород, в которых плотность резко (до 20%) возрастает с глубиной [19, 35].

На участке шельфа (ODP-695 и ODP-696) к востоку от Южно-Оркнейского микроконтинента (рис. 3) BSR-отражения интерпретируют как результат изменения состава и физических характеристик кремнистых осадков под воздействием фронта диагенеза на

глубине 500–550 м ниже уровня дна. Определение геотермического градиента в этих скважинах показало, что его высокие значения могут препятствовать стабильному существованию ЗГО на этих глубинах. Возможно, зафиксированные выходы метана в скважине ODP-695 указывают на наличие отдельных локальных зон глубинного подтока газа [31].

Значительный объём сейсмических исследований был выполнен (1990 г.) в западной части моря Росса, где BSR-границы, связанные с наличием газогидратов, были закартированы на трёх протяжённых профилях в котловине Земли Виктории [27].

В результате детальной переинтерпретации этих материалов были выделены не только зоны BSR-отражений, но и дополнительные границы (BSR0), расположенные ниже зоны стабильности газогидратов (рис. 4). Интервальные скорости в осадочных породах, расположенных над BSR-границей, составляют 1900–2050 м/с, уменьшаясь до 1360–1400 м/с под этим разделом [27]. BSR0 – граница расположена на 100–150 м ниже BSR-раздела (рис. 4).

Сейсмические характеристики (низкая скорость и низкие значения частот) горизонта, расположенного между разделами BSR и BSR0, дают основания предполагать наличие здесь свободного газа [27].

Выделение ЗГО и наличие свободного газа ниже BSR-раздела здесь достаточно уверенно подтверждается не только определённым комплексом сейсмических характеристик этой границы (подобие морфологии её залегания и рельефа дна; высокая амплитуда отражений, обратная полярность сигнала; низкие частоты; аномальное распределение скоростей  $V_p$  и  $V_s$  волн; наличие AVO-эффекта), но и результатами моделирования зон стабильности для разных газов, участвующих в формировании скоплений газогидратов [27].

При рассмотрении возможной природы сложно-построенных BSR-границ и возникновения дополнительного (BSR0) раздела (рис. 2, 4) были выдвинуты следующие гипотезы [18, 19, 27, 38] его формирования:

1. возникновение раздела связано с палеоизменениями климата и ранее существовавшими в этом месте P-T условиями, благоприятными для формирования газогидратов;
2. граница обусловлена наличием у подошвы осадков устойчивой смеси газов, способной резко сместить положение ЗСГГ в разрезе при включении в состав газовой смеси 3-5% этана или пропана;
3. граница вызвана диагенетическими процессами (и плотностными изменениями) кремнистых пород в разрезе;
4. граница отражает процессы миграции ЗГО в результате активных тектонических подвижек, приводивших к изменениям глубины моря, температуры поверхности морского дна, концентрации газа, а также физических параметров придонных осадочных толщ, содержащих газогидраты.

Учитывая сложное геологическое строение этой части континентальной окраины Антарктики и отсутствие достоверной информации о важнейших параметрах, влияющих на положение ЗГО осадочных в разрезе осадочной толщи, можно лишь в общих чертах представить её модель. Предполагается, что наиболее приемлемой причиной формирования BSR0-границы можно считать [27] наличие вблизи подошвы осадков смеси газов, в состав которой входит не только метан, но также этан (3%) и пропан (1%). Проведенные модельные расчёты 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 тектонической раздробленности разреза, характерной для всех изученных профилей в западной части моря Росса (рис. 4).

Учитывая значительную мощность осадочного чехла структур дна моря Росса, следует предположить наличие существенных изменений физических характеристик (уменьшение вязкости и проницаемости) осадков, приводящих к смещению BSR-границ в разрезе. Именно такими изменениями можно объяснить формирование множественных разделов BSR в районах с интенсивным осадконакоплением (рис. 2, 4). Нарушенный характер границ BSR и BSR0 на сейсмическом разрезе (рис. 4) вероятно связан с локальными зонами

активной миграции флюидов и газов, участвующих в формировании грязевого вулкана Тергест. Этот довольно крупный подводный вулкан (высотой более 80 м и шириной около 1000 м) приурочен к системе разломов с подпитывающими глубинными каналами. По этим каналам газ и флюиды под высоким давлением мигрируют к придонным осадкам, формируя грязевые вулканы и крупные участки газовых сипов на морском дне. Имеющиеся сейсмические данные отражают строение лишь части разреза грязевого вулкана (рис. 4). Вероятно, его корни расположены в низах осадочной толщи, общая мощность которой в море Росса достигает 14 км [27]. В вертикальном сейсмическом разрезе выделяется участок, расположенный между разделами BSR и BSR0, который можно считать промежуточной областью питания грязевого вулкана Тергест (рис. 4).

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 [27] в керне скважин (DSDP 271-273).

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о достаточно высокой перспективности на газогидраты структур моря Росса.

Целая серия подводных грязевых вулканов была выявлена вблизи интенсивных зон BSR-отражений на материковой окраине вблизи Южных Шетландских островов. Предполагается, что вулканы (вместе с разломами) оказывают существенное воздействие на распределение и мощность скоплений газогидратов в осадочной толще [34, 36, 41, 42].

Во время проведения 17 УАЕ (2012 г.) были получены дополнительные данные о глубинном положении и мощности отдельных пластов газогидратов в структурах материковой окраины Антарктического полуострова, что позволяет говорить о возможности привлечения нового комплекса методов в качестве индикатора для поиска и картирования скоплений газогидратов различного генезиса [8-12, 17, 24, 39, 46]. Важной особенностью применения этих методов является возможность выделения BSR-границ, обусловленных именно скоплениями газогидратов в породах осадочного чехла.

Во время проведения сезонных (2012 г.) работ 17 УАЕ геоэлектрическая съёмка была проведена в режиме «поиск газогидратных аномалий» вдоль двух профилей [46] вблизи о. Анверс (район УАС Академик Вернадский).

Выявленные восточнее о. Анверс аномальные зоны типа «залежь газогидратов» (Gh-1, Gh-2) были изучены методом ВЭРЗ, что позволило определить параметры этих скоплений. Залежи газогидратов сформированы на глубине 1000-1040 м в виде пластов переменной (от 4 до 20 м) мощности. Их длина достигает 4,0-4,5 км. Обе аномальные зоны обнаружены в проливе, где глубина дна не превышает 200-500 м. Результаты зондирования приведены в [11, 46].

#### **4. Геоэлектрические исследования глубинного строения пролива Дрейка и картирование скоплений газогидратов в районе Южных Шетландских островов**

Наиболее крупными и изученными сейсмическими методами являются скопления газогидратов вблизи Южных Шетландских островов в проливе Дрейка, сформировавшиеся на склоне активной континентальной окраины в результате субдукционных процессов [15, 29, 34, 36, 41, 42].

Наш опыт использования материалов геоэлектрических измерений методом ВЭРЗ для построения глубинных разрезов показал принципиальную возможность применения этого метода для изучения строения земной коры структур дна Западной Антарктики и процессов геодинамической эволюции тектонической системы Тихоокеанской континентальной окраины [12, 20, 21, 24, 32, 33, 45].

Построенные глубинные геоэлектрические разрезы земной коры характеризуют строение центральной части пролива Дрейка на глубину более 24 км, что позволило выделить характерные границы внутри комплексов пород континентальной и океанической коры, показать сложный характер разломных зон вблизи побережья Южной Америки и



Антарктического полуострова, а также выделить крупные мантийные неоднородности. Наличие в разрезе нескольких характерных геоэлектрических границ ниже раздела Мохо (M2), а также возможных высокотемпературных зон глубинных пород может свидетельствовать о гетерогенности структур дна пролива и процессах тектоно-магматической активности и рифтогенеза [20, 21].

На участках континентальной окраины Антарктического полуострова для существования газогидратов и формирования их залежей имеются все необходимые термобарические условия, что доказано их обнаружением в четырёх разных районах Антарктического побережья, в т.ч. в районе Южных Шетландских островов [16].

Здесь, на Южно-Шетландской континентальной окраине севернее о. Кинг Джордж (рис. 5), масштабными сейсмическими работами 1996-1997 и 2003-2004 гг. была выявлена обширная область существования BSR-зон, соотносимая с формированием скоплений газогидратов [29, 36, 41-43]. Наиболее благоприятные условия для их формирования существуют в северо-восточном секторе Южно-Шетландского побережья, где развита сеть многочисленных активных разломов, способствовавшая дополнительной миграции газа с больших глубин. Результаты сейсмических исследований указывают на наличие больших скоплений газогидратов (на глубине 1000–4800 м). Общее количество газогидратов на изученном участке может составить  $(1.6-2.0) \times 10^{10} \text{ м}^3$ , а объём газа в газогидратах составит примерно  $(1,68-2,8) \times 10^{12} \text{ м}^3$  [29, 34, 36, 42]. Известна и несколько другая оценка общего объёма газогидратов ( $4.1 \times 10^{10} \text{ м}^3$ ) и метана ( $6.7 \times 10^{12} \text{ м}^3$ ), рассчитанная для тех участков сейсмических профилей, где были выявлены BSR-зоны [29].

Следует отметить, что при интерпретации результатов сейсмических исследований в этом районе также были выделены дополнительные разделы, залегающие ниже границы BSR на 150–200 м [41, 42]. Эта сейсмическая граница (раздел BSR0) повторяет в общих чертах рельеф дна и может быть связана с положением нижней границы зоны свободного газообразования, образованной в результате разложения газогидратов под действием изменения климатических условий. Появление дополнительной границы могло быть вызвано и наличием смеси газов, участвующих в формировании газогидратов [41-43].

Для участков распространения зон BSR на континентальной окраине вблизи Южно-Шетландских островов были проинтерпретированы спутниковые данные, что позволило выделить несколько новых аномальных зон типа «залежь газогидратов» (рис. 5), располагающихся как вблизи зоны разломов Шеклтона (восточная часть участка), так и на значительном расстоянии от него ( $57^\circ-59^\circ$  з.д.).

Основная часть выделенных аномалий пространственно совпадает с положением BSR-зон, определённых по сейсмическим данным [34, 36].

В восточной части площади, где обнаружена преобладающая часть BSR-зон, наблюдается хорошее совпадение аномалий обоих типов. Здесь сейсмические наблюдения выполнены по густой сети профилей, выявивших ряд крупных, а также и менее интенсивных аномалий. В восточной части участка интерпретация спутниковых данных указывает на возможное наличие ряда аномалий, на которых сейсмические работы не проводились.

Во время проведения сезонных работ 2012 г. для части спутниковых аномалий типа «залежь газогидратов», приуроченных к материковому склону Южно-Шетландских островов, вдоль профиля 3g были выполнены геоэлектрические зондирования на 33-х пунктах ВЭРЗ (рис. 5). По результатам этих исследований были определены параметры двух аномально поляризованных пластов мощностью от 100 до 500 м, залегающих на глубине от 2500 до 5000 м при глубинах дна от 2000 до 4000 м [11, 46]. Верхняя кромка пластов располагается на глубине от 400 м до 900 м ниже уровня дна. Параметры выделенных пластов могут быть в значительной степени искажены, поскольку предполагается, что в формировании скопления газогидратов здесь участвует смесь газов, в которую входят метан, этан, пропан, бутан, пентан и другие газы [43]. Не исключено, что в состав выделенного пласта газогидратов мог частично войти и подгидратный газ, особенно в тех его частях, где мощность выделенной

толщи достигает 400–500 м. Разрыв аномальных зон вдоль профиля наблюдений можно объяснить наличием ранее выявленной по сейсмическим данным серии разломов, секущих склон жёлоба [36, 43, 46], подтверждаемой результатами сейсмических работ [29]. Прерывистый характер BSR-границы отмечен и для профилей 19211 и 19212, что подтверждает и распределение пластов газогидратов в аномальных зонах Gg-1 и Gg-2.

Итальянскими исследователями в 2003-2004 гг. были получены новые данные о батиметрии и тектонической обстановке, контролирующей особенности распределения BSR-зон в этой части материковой окраины [43]. Показано, что эти зоны часто ограничены разломами, служащими каналами поступления глубинных флюидов. Были исследованы вулканические хребты с грязевыми вулканами, высота которых достигает 250 м над уровнем дна, а площади отдельных грязевых вулканов колеблются от 10 до 45 км<sup>2</sup> [43]. Полученные данные подтверждают общность формирования грязевулканических структур, участков выделения BSR-зон и мест скоплений газогидратов в этой части Южно-Шетландской континентальной окраины. Значительное количество подпитывающих флюидов и смеси газов импульсно проникало в придонную часть осадочной толщи с глубин, как показывают сейсмические данные, превышающих глубину формирования газогидратов [36, 43]. Наличие сети крупных и мелких тектонических нарушений чехла осадков с достаточно высокой проницаемостью создаёт необходимые условия для циркуляции внедряющихся под высоким давлением растворов. При возникновении региональной реактивации палео-разломов и ослабленных зон происходили неоднократные внедрения растворов, способствовавших накоплению газов и формированию скоплений газогидратов в структурах пассивной континентальной окраины (рис. 6).

Подобные результаты были получены и для структур дна моря Росса, где глубина формирования поднимающихся флюидов также значительно превышает глубину зон BSR-отражений (рис.4). Для них характерно также наличие дополнительной (BSR0) отражающей границы, возможно связанной с наличием смеси газов (метан, пентан, этан, пропан и др.), образующих газогидраты. Общим фактором 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 материалы геофизических исследований в регионе показали, что в результате длительного воздействия потоков глубинных флюидов здесь сформировалась сложная система локальных структур, считающихся типичными для пассивных континентальных окраин.

## 5. Выводы

1. Приведенные данные о расположении BSR-зон и их генезисе свидетельствуют о слабой изученности распределения газогидратов в структурах дна континентальных окраин Антарктики.

2. Показана эффективность новой инновационной технологии для обнаружения скоплений газогидратов и построения детальных глубинных характеристик разрезов, содержащих аномально-поляризованные пласты типа «залежь газогидратов». Важным преимуществом предложенной технологии является возможность её использования в качестве дополнительного и независимого индикатора обнаружения скоплений газогидратов на участках с выделенными BSR-границами разного генезиса. Дистанционный метод может использоваться при поисках газогидратов в условиях отсутствия сейсмических данных о BSR-границах, что подтверждает его эффективность при проведении рекогносцировочных работ на углеводороды в отдалённых районах Антарктики. Выявлены новые участки нахождения газогидратов вблизи УАС Академик Вернадский и определено их положение в осадочной толще.

3. Показано, что исследованный участок материковой окраины вблизи Южных Шетландских островов может считаться (наряду с морем Росса) перспективным районом скопления газогидратов в Антарктике. Выделены сходные элементы, характеризующие положение газогидратов в разрезе осадочной толщи в море Росса и проливе Дрейка (связь с активной грязе-вулканической деятельностью; наличие сети тектонических нарушений, контролирующей положение и мощность газогидратов; наличие участков, где наблюдаются BSR-зоны, осложнённые BSR0-отражениями). Приведенные данные могут указывать на общность региональных факторов их формирования в результате поступления глубинных углеводородов в структуры континентальных окраин Антарктики.

**Работа выполнена при поддержке Государственного учреждения Украинский антарктический научный центр с использованием данных, полученных во время проведения украинских антарктических экспедиций на УАС Академик Вернадский.**

### Литература

1. **Анфилатова Э.А.** Аналитический обзор современных зарубежных данных по проблеме распространения газогидратов в акваториях мира. [Electronic resource] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2008. – №3. – Access: [http://www.ngtp.ru/rub/9/44\\_2008.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/9/44_2008.pdf)
2. **Баренбаум А.А.** О возможной связи газогидратов с субмаринными подземными водами // Водные ресурсы, 2007, 34, №4. С. 1–6.
3. **Валяев Б.М.** Нетрадиционные ресурсы и скопления углеводородов: особенности распространения и процессов нефтегазоаккумуляции // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений: (к 100-летию со дня рождения П.Н. Кропоткина) / Отв. ред. А.Н. Дмитриевский, Б.М. Валяев. М., 2011. С. 390–404.
4. **Геворкьян В.Х., Сокур О.Н.** Газогидраты – продукт мантийной дегазации. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2012. – №1. – Киев. – С.52–65.
5. **Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М.** Природные ресурсы и значимость гидратов природного газа // Газовая пром-сть. 2002. №11. С. 22–25.
6. **Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М.** Углеводородная дегазация через дно океана: локализованные проявления, масштабы, значимость // Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. М.: ГЕОС, 2002. С. 7–36.
7. **Коллетт Тимоти С., Льюис Рик, Учида Такаши.** Растущий интерес к газовым гидратам. Нефтяное обозрение. Осень 2001. – Т. 6. – №2. – С. 38–53.
8. **Левашов С.П., Бахмутов В.Г., Корчагин И.Н.** и др. Геоэлектрические исследования во время проведения сезонных работ 11-ой Украинской антарктической экспедиции // Геоинформатика. – 2006. – № 2. – С. 24–33.
9. **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. 22–43.
10. **Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н.** и др. Методические аспекты применения технологии обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли при проведении поисковых работ на нефть и газ в акваториях // Геоинформатика. – 2012. – № 1. – С. 5–16.
11. **Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н.** и др. Обнаружение скопления газогидратов в районе Антарктического полуострова в 17-ой Украинской антарктической экспедиции // Матеріали доповідей науково-практичної конференції «Нафтогазова геофізика – нетрадиційні ресурси», Івано-Франківськ, 20-24 травня 2013 р. – С. 120–125.
12. **Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н.** и др. Новые данные о глубинных неоднородностях структур пролива Дрейка и углеводородном потенциале материковой окраины Антарктического полуострова // Геодинаміка, 2012. – 2(13). – С.74-84
13. **Макогон Ю.Ф., Омельченко Р.Ю.** Мессояха – газогидратная залежь, роль и значение. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2012. – №3. – Киев. – С. 5–19.

14. **Макогон Ю.Ф.** Газогидраты. История изучения и перспективы освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2010. – №2 (20). – Киев. – С. 5–21.
15. **Новые идеи** в океанологии. / Отв. ред. М.Е. Виноградов, С.С. Лаппо / Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова. – М.: Наука. – Т. 2: Геология. – 2004. – 407 с.
16. **Соловьёв В.А.** Природные газовые гидраты как потенциальное полезное ископаемое. Газовые гидраты // Российский химический журнал. 2003. Т. 47, №3. С. 59–69.
17. **Соловьёв В.Д., Корчагин И.Н., Бахмутов В.Г.** и др. Новые данные о перспективности шельфа Антарктического полуострова на нефть и газ (по результатам геофизических исследований) / В сб. Теоретические и прикладные аспекты геоинформатики. – Киев, 2011. – С. 33–47.
18. **Суетнова Е.И.** Возможный механизм образования двойных сейсмических границ (double BSR), связанных с накоплением газовых гидратов в морских осадках. – М., 2012
19. **Суетнова Е.И.** Влияние режима осадконакопления и уплотнения осадков в субаквальных условиях на аккумуляцию газогидратов в зоне их стабильности // Физика Земли. 2008. №9. С. 65–70.
20. **Удинцев Г.Б., Шенке Г.В.** Очерки геодинамики Западной Антарктики. – Москва: ГЕОС, 2004. – 132 с.
21. **Удинцев Г.Б., Береснев А.Ф., Куренцова Н.А.** и др. Пролив Дрейка и море Скоша – океанские ворота Западной Антарктики / Строение и история развития литосферы. – М.: Paulsen. – 2010. – С. 66–90.
22. **Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Пасынков А.А.** Газовый вулканизм Чёрного моря.- К.: Логос, 2013. – 384 с.
23. **Шнюков Е.Ф., Гожик П.Ф., Краюшкин В.А.** В трех шагах от субмаринной добычи газогидратов // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2007. – №2. – Киев. – С. 32–51.
24. **Bakhmutov V., Solovyov V., Korchagin I.** et al. Drake Passage: crustal structure, tectonic evolution and new prognosis for local HC accumulations along the Antarctic Peninsula margin // Геофиз. журн. – 2010. – Т. 32, № 4. – С. 12–15.
25. **Barker P.F., Dalziel W.D., Storey B.C.** Tectonic development of the Scotia Arc region // The Geology of Antarctica. – Oxford. – 1991. – P. 215–248.
26. **Berndt, C.** (2005), Focused fluid flow in passive continental margins // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 363(1837), P. 2855–2871.
27. **Geletti R., Busetti M.** A double bottom simulating reflector in the western Ross Sea, Antarctica // Journ Geoph Res. – 2011. – 116. – B04101. doi:10.1029/2010JB007864, 2011
28. **Grad M., Guterch A., Janik T.** Seismic structure of the lithosphere across the zone of subducted Drake Plate under the Antarctic Plate, West Antarctica // Geophys. J. Int. – 1993. 115. P. 568–600.
29. **Jin Y.K., Lee M.W., Kim Y.** et al. Gas hydrate volume estimations on the South Shetland continental margin, Antarctic Peninsula // Antarctic Science. – 2003. – 15, 2. – P. 271–282. DOI: 10.1017/S0954102003001275
30. **Kvenvolden K.A. and Lorenson T.D.** The global occurrence of natural gas hydrate, in Natural Gas Hydrates, Occurrence, Distribution, and Detection. Geophysical Monograph, C. K. Paull and W. P. Dillon, Eds., vol. 124, pp. 3–18, American Geophysical Union, Washington, DC, USA, 2001.
31. **Kvenvolden K.A., Hostettler F.D., Frank T.J.** Hydrocarbons in sediment of the Weddell Sea, Antarctica, in Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 113, P. 199-207, 1990.
32. **Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N.** et al. Drake Passage and Bransfield Strait – new geophysical data and modelling of the crustal structure in Antarctica / A. Keystone in a Changing World. Online Proceedings of the 10th ISAES X. Edited by A.K. Cooper and C.R. Raymond / USGS Open-File Report 2007 – 1047.
33. **Levashov S.P., Yakymchuk N.A., Korchagin I.N.** et al. Geophysical models of Drake Passage and Bransfield Strait crustal structure // Ukrainian Antarctic Journal. – 2008. – № 6. – P. 9–14.

34. **Lodolo E., Camerlenghi A., Madrussani G.** et al. Assessment of gas hydrate and free gas distribution on the South Shetland Margin (Antarctica) based on multichannel seismic reflection data // *Geophys. J. Int.* 2002. V. 148. P. 103–119.
35. **Lonsdale M.J.** The relationship between silica diagenesis, methane, and seismic reflections on the South Orkney microcontinent, in *Proc. ODP, Sci. Results*, Vol. 113, P. 27–37, 1990.
36. **Loreto M.F., Tinivella U., Accaino F.** et al. Offshore Antarctic Peninsula Gas Hydrate Reservoir Characterization by Geophysical Data Analysis // *Energy*. 2011. 4(1). P. 39–56.
37. **Milkov A.V.** Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Mar. Geol.* 2000, 167, P. 29–42.
38. **Popescu I., De Batist M., Lericolais G.** et al. Multiple bottom simulating reflections in the Black Sea: potential proxies of past climate conditions // *Marine Geology/ – 227(3-4).* – 2006. – P. 163–176
39. **Solovyov V.D., Bakhmutov V.G., Korchagin I.N.** et al. Gas Hydrates Accumulations on the South Shetland Continental Margin: New Detection Possibilities // *Hindawi Publishing Corporation. Journal of Geological Research*. Volume 2011, Article ID 514082, 8 pages. doi:10.1155/2011/514082.
40. **Suess E.** Marine gas hydrate research: changing views over the past 25 years // *Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011)*, Edinburgh, Scotland, United Kingdom, July 17–21, 2011.
41. **Tinivella U., Accaino F., Camerlenghi A.** Gas hydrate and free gas distribution from inversion of seismic data on the South Shetland margin (Antarctica). // *Marine Geophysical Researches*, 23, P. 109–123, 2002.
42. **Tinivella U., Guistiniani M.** Gas Hydrate, free gas and overpressure, in *Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (IGGH 2011)*. Edinburgh, Scotland, UK, July 17–21, 2011.
43. **Tinivella U., F. Accaino, B. Della Vedova.** Gas hydrates and active mud volcanism on the South Shetland continental margin, Antarctic Peninsula // *Geo-Mar. Lett.* 2008, 28, 97–106.
44. **Trehu A.M, Ruppel C., Holland M.** et al. Gas hydrates in marine sediments // *Oceanography*, 19, V. 4, P. 124–142, 2006.
45. **Vadakkepuliyambatta S.** Sub-seabed fluid-flow systems and gas hydrates of the SW Barents Sea and North Sea margins. 2014.
46. **Yakymchuk N.A., Levashov S.P., Korchagin I.N.** et al. I.N. Geophysical Investigations for Study of Hydrocarbon Accumulations in the Bottom Structures of West Antarctic Region. // 75nd EAGE Conference and Technical Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013. London, 10-13 June 2013. CD-ROM Abstracts volume. 5 pages. DOI: 10.3997/2214-4609.20130581. <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=68438>
47. **Yegorova T., Bakhmutov V., Gobarenko V.** et al. New insight into the deep structure of Antarctic Peninsula continental margin by methods of 2-D Gravity/Magnetic modeling and 3-D seismic tomography // *Ukrainian Antarctic Journal*, 8, P. 46–66, 2009.