

СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ БАРИТОВОЙ ЗАЛЕЖИ В КОТЛОВИНЕ ДЕРЮГИНА ОХОТСКОГО МОРЯ

А.С. Астахов, В.В. Ивин*, В.Н. Карнаух, А.А. Коптев, Б.Я. Ли, Е.Н. Суховеев

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия*

** Институт биологии моря им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Пальчевского, 17, Россия*

Изучался рельеф, строение верхней части осадочного чехла и масштабы баритовой минерализации в котловине Дерюгина Охотского моря. Составлена детальная карта рельефа залежи Баритовые холмы, проведено ее обследование с использованием телеуправляемого подводного аппарата «Comanche». Установлена интенсивная дислоцированность осадочного чехла, включая голоценовые осадки, в районе Баритовых холмов и на некоторых других участках котловины. Выявлены небольшие грязевые вулканы, подтверждена современная дефлюидизация осадочного чехла, проявленная, в том числе, в формировании новых баритовых построек. Они встречаются в осевой части поднятия и представляют собой наросты и столбообразные тела, наращивающие более старые постройки, имеющие зональное строение. Подтверждаются существующие гипотезы об образовании их за счет поставки бария глубинными барийсо-держателями низкотемпературными гидротермами.

Барит, котловина Дерюгина, грязевые вулканы, бактериальные маты, дефлюидизация, осадочный чехол, Кашеяровская рифтогенная зона.

BARITE MINERALIZATION IN THE DERYUGIN BASIN OF THE SEA OF OKHOTSK: ACTIVE PROCESSES AND FORMATION CONDITIONS

A.S. Astakhov, V.V. Ivin, V.N. Karnaukh, A.A. Koptev, B.Ya. Li, and E.N. Sukhoveev

The paper reports on seafloor terrains mapped to a high resolution, the structure of shallow-water sediments, and the extent of barite mineralization in the Deryugin Basin, Sea of Okhotsk. The data were collected by different methods of remote sounding of the bottom and a Comanche submersible in the area of the Barite Ridge deposit. The sedimentary cover, including Holocene sediments, is strongly deformed in this area and in some other areas of the basin. Several small mud volcanoes and new barite build-ups along the ridge axis are evidence of active fluid venting. Precipitated barite forms columns (chimneys) or grows over older layered barite build-ups. The research confirms the hypothesis of Ba supply by deep cold hydrotherms.

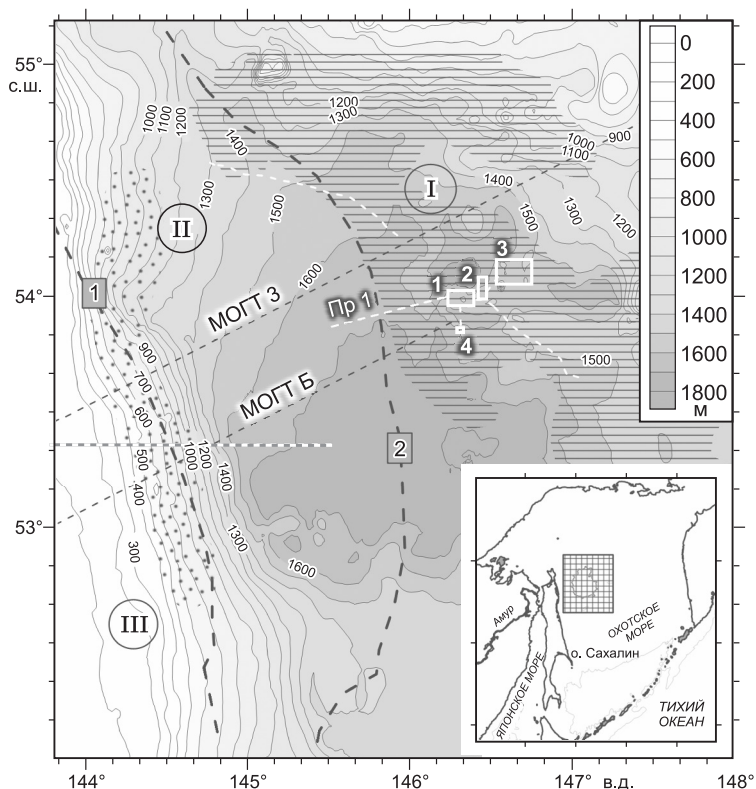
Barite, mud volcanoes, bacterial mats, defluidization, venting, sedimentary cover, Kashevarov rift zone, Deryugin Basin, Sea of Okhotsk

ВВЕДЕНИЕ

Задуговые рифтогенные бассейны в последнее десятилетия активно изучаются для понимания процессов дефлюидизации литосферы в зонах перехода континент-океан и формирования углеводородных и рудных залежей [Шарапов и др., 2013]. Котловина Дерюгина Охотского моря в этом ряду отличается, прежде всего, активной газовой эмиссией, проявленной в пределах Дерюгинского осадочного бассейна (рис. 1), что привлекает к ней интерес как в связи с проблемами нефтегазоносности и формирования газогидратов, так и для оценки глобального баланса парниковых газов в атмосфере [Obzhirov et al., 2004; Mazurenko et al., 2009]. Меньше внимания было уделено выявленным в середине прошлого века в центральной части впадины Дерюгина осадкам с очень высоким содержанием марганца и ряда микроэлементов [Остроумов, 1954; Безруков, 1960; Астахов и др., 2000, 2007б, 2008]. Парагенез рудных микроэлементов (Ba, Zn, Ni, Pb, Cu, Hg), образующих высокие концентрации в осадках, накапливающимися с высокими скоростями, подобен геохимическим полям, формирующимся над низкотемпературными эндогенными месторождениями и гидротермами [Спиридонов и др., 2014; Калинин, Астахов, 2014]. В начале 1980-х годов в рейсах НИС «Каллисто» (1981 г., начальник экспедиции Б.И. Васильев) и НИС «Пегас» (1986 г., начальник экспедиции О.С. Корнев) в восточной части впадины Дерюгина была обнаружена массивная баритовая минерализация [Астахова и др., 1987, 1990; Astakhova, 1993], впоследствии изучавшаяся во многих экспедициях [Деркачев и др., 2000; Greinert et al., 2002; SO178-

Рис. 1. Районы выполнения исследований, рельеф дна и некоторые геоструктурные элементы котловины Дерюгина.

Белыми прямоугольниками показаны полигоны (1—4) детальных исследований (1 — Баритовые холмы), белыми штриховыми линиями — отдельные профили геофизических работ; горизонтальной штриховкой выделены районы с положительными аномалиями магнитного поля, определяющие Кашеваровскую рифтогенную зону (по [Кулинич, Обжиров, 2003]); точками околнута область распространения метановых источников на склоне о. Сахалин; жирные штриховые линии — основные шовные зоны (1 — Западно-Дерюгинская, 2 — Восточно-Дерюгинская) разделяющие структурно-тектонические зоны [Варнавский и др., 2002]: I — Центрально-Охотская система, II — Дерюгинская спрединговая рифтогенная система, III — Хоккайдо-Сахалинская складчатая кайнозойская система. Тонкими штриховыми линиями показаны профили МОВ ОГТ, использованные в работе [Волгин и др., 2009; Ломтев, Литвинова, 2013]. На врезке — местоположение котловины Дерюгина, тонкой линией показана изобата 1500 м.



КОМЕХ..., 2004; Саломатин, Юсупов, 2009]. Общеизвестно, что формирование ее связано с поступлением с глубины несколько километров (температура зоны генерации флюидов составляет 60 °С [Деркачев, Николаева, 2007]) первично гидротермальных барийнесущих растворов. Они формируют при контакте с сульфатом морской воды трубообразные постройки травертиноподобного барита высотой до 12 м, а при проникновении в осадок — многообразные по форме конкреции, трубки, базальный цемент [Астахова и др., 1987, 1990; Astakhova, 1993; Деркачев и др., 2000]. Гидротермальная природа растворов доказывается результатами декрипитации газово-жидких включений в кристаллическом барите трубообразных построек [Обжиров и др., 1999] и специальными исследованиями их изотопно-геохимических особенностей [Ахманов и др., 2015]. В то же время обосновывается и наличие баритов, сформированных при температурах, близких придонным водам котловины [Деркачев, Николаева, 2007], что можно объяснить охлаждением первично низкотемпературных гидротерм при прохождении сквозь мощный осадочный чехол или переотложением барита при диагенетических процессах.

Неясным остается вопрос об источнике бария в гидротермальных водах. Многие исследователи считают, что он извлекается из осадочных толщ, в существенной мере представленными кремнистыми диатомовыми отложениями, обычно обогащенными барием [Деркачев и др., 2000; Greinert et al., 2002]. Есть точка зрения о поступлении бария из вулканогенно-осадочных толщ или при постмагматических процессах [Астахова и др., 1987; Кулинич, Обжиров, 2003], так как олигоценовые и позднемiocеновые известково-щелочные вулканы Охотского моря, известные в составе акустического фундамента на севере и северо-западе района работ, существенно обогащены барием (130—680 г/т) [Емельянова, 2004; Емельянов, 2007].

С определением источников бария тесно связано решение вопроса о современном развитии баритового проявления с исторически сложившимся названием «Баритовые холмы» (далее Баритовые холмы). При обследовании их системой OFOS были выявлены формирующиеся небольшие баритовые постройки (БП), надстраивающие старые, более высокие [SO178-КОМЕХ..., 2004], но неизвестно, образуются ли они в результате продолжающейся глубинной дефлюидизации либо это следствие перераспределения ранее накопившегося бария при раннедиагенетических изменениях баритосодержащих отложений. Выяснение указанных выше вопросов требует изучения современных геологических процессов и масштабов современной дефлюидизации осадочного чехла как в районе Баритовых холмов, так и в котловине Дерюгина в целом. В связи с этим в 54-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в мае—июне 2011 г. были проведены специальные исследования в котловине Дерюгина и более детально в районе Баритовых холмов с использованием комплекса дистанционных методов и уникального теле-

управляемого подводного аппарата (ТПА) «Comanche» [Адрианов и др., 2014], направленные на оценку масштабов неотектонических дислокаций и выявление признаков дефлюидизации осадочного чехла.

МЕТОДИКА

Исследования включали обследование дна, водной толщи и верхней части осадочного чехла методами дистанционного зондирования (эхолотное, акустическое, геоакустическое) и обследование дна и придонных вод с использованием ТПА «Comanche».

Батиметрические измерения проводились с использованием штатного судового глубоководного эхолота ELAC LAZ-72 E-V. Отраженный эхосигнал после нормирования и фильтрации преобразуется дигитайзером ELAC STG-721 в цифровой вид. При регистрации скорость звука принималась равной 1500 м/с. Навигационная привязка осуществлялась с помощью двух спутниковых 12-канальных приемников GARMIN GPSMap 420s и GARMIN GPS-128 с поддержкой широкозонной технологии повышения точности (WAAS). Для обозначения отдельных форм рельефа в районе исследований используются исторически сложившиеся неофициальные названия (см. рис. 1), применявшиеся в российско-немецких экспедициях по проекту KOMEX [SO178-KOMEX ..., 2004].

Сейсмоакустические работы проводились методом непрерывных профильных наблюдений во время движения или дрейфа судна высокочастотным профилографом «GeoPulse Subbottom Profiler» (GeoAcoustics Limited), буксируемым на глубине 6 м ниже уровня моря. В условиях котловины Дерюгина этот метод дает возможность получить сведения о строении верхних 40—50 м осадочного чехла.

Акустические наблюдения выполнялись с помощью гидроакустического комплекса, созданного на основе модернизированных судовых эхолотов Сарган-ЭМ, ELAC и многоканальной системы цифровой регистрации гидроакустических эхосигналов по ранее отработанной методике [Саломатин, Юсупов, 2009].

При обследовании дна с использованием ТПА «Comanche» проводились видео- и фотосъемка поверхности дна, отбор проб манипулятором, отбор проб придонной воды, определение содержания метана в придонной воде и акустическое зондирование дна профилографом.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ КОТЛОВИНЫ ДЕРЮГИНА

Котловина Дерюгина является характерной неотектонической морфоструктурой, формирующейся в процессе рифтогенной деструкции земной коры. Здесь отмечено значительное уменьшение мощности континентальной земной коры до 20—25 км, предполагается наличие астеносферы и верхней мантии с аномальными свойствами [Родников и др., 2002; Волгин и др., 2009]. По данным некоторых авторов, мощность кайнозойского осадочного чехла в осевой части этого бассейна достигает 12 км [Харахинов, 1998; Волгин и др., 2011]. Восточная часть котловины Дерюгина относится к Кашеваровской рифтогенной зоне с резко изменчивой мощностью осадочного чехла, преобладанием морфоструктур северо-западного простирания и положительным магнитным полем (см. рис. 1). По мнению Р.Г. Кулинича и А.И. Обжирова [2003], это поле отражает границы распространения молодых (позднекайнозойских) вулканитов в осадочном чехле и акустическом фундаменте, которые определяют повышенный тепловой поток и флюидную активность района.

Особую роль в формировании современных флюидодинамических систем котловины играют Западно- и Восточно-Дерюгинская шовные зоны (сутуры) [Варнавский и др., 2002]. В Западно-Дерюгинской зоне при максимальной мощности неоген-четвертичных отложений выявлены многочисленные метановые источники, часто сопряженные с газогидратами и интенсивными постседиментационными преобразованиями в верхней части осадочного чехла [Обжиров и др., 1999] (рис. 2).

Восточно-Дерюгинская шовная зона (глубинный разлом, сутура) отделяет Кашеваровскую рифтогенную зону от позднекайнозойского осадочного бассейна. Интерпретация данных МОГТ различными авторами указывает на наличие в этой зоне системы разломов, выходящих на поверхность дна (см. рис. 2, низ). Проведенное нами высокоразрешающее геоакустическое профилирование через зону разлома выявило здесь интенсивную деформацию верхней части осадочного чехла, вплоть до голоценовых осадков (см. рис. 2, верх). Газовые источники в зоне разлома нехарактерны, но отмечаются признаки поступления водных флюидов — карбонатная в том числе марганцевая минерализация в осадках, находки нонтронита, сульфидов Cu, Pb [Астахов и др., 2004]. Выявлена максимальная скорость накопления Mn, Zn, Ni, Ba, Hg в голоценовых осадках [Астахов и др., 2007a, 2008].

К Восточно-Дерюгинской шовной зоне территориально тяготеют Баритовые холмы с интенсивной барит-карбонатной минерализацией и метановыми источниками. В соответствии с полем гравитационных аномалий участок баритовой минерализации располагается на окраине субширотного подня-

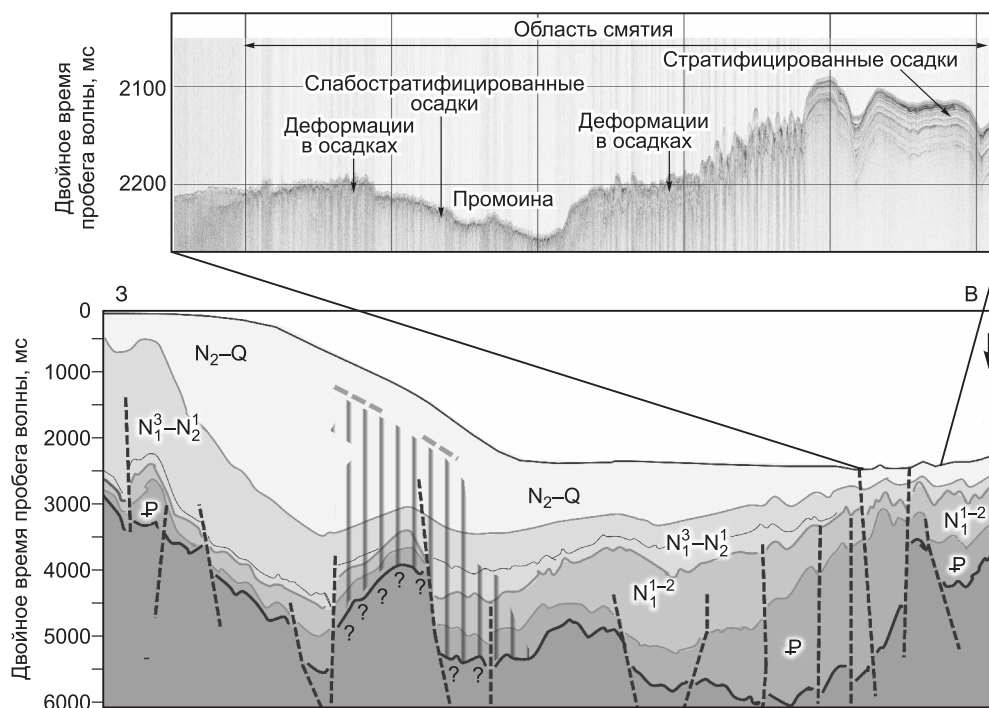


Рис. 2. Строение осадочного чехла и рельеф акустического фундамента котловины Дерюгина по профилю МОГТ Б (см. рис. 1) [Ломтев, Литвинова, 2013].

Жирной линией показана поверхность акустического фундамента, жирными штриховыми линиями — разломы. Вертикальная штриховка — область миграции свободного газа (показано условно по [Обжиров и др., 1999]); серая штриховая линия — участки формирования газогидратов. Стрелкой показано положение района Баритовые холмы (проекция); N_2-Q — плиоцен-четвертичные отложения нерасчлененные; $N_1^3 - N_1^2$ — нутовский сейсмокомплекс позднего миоцена — раннего плиоцена и окобыкайский сейсмокомплекс среднего—верхнего миоцена (граница между ними показана локально); N_1^{1-2} — дагинско-уйининский сейсмокомплекс нижнего—среднего миоцена; P — даехурийско-люкаминский сейсмокомплекс палеогена. Вверху — профиль 1 (см. рис. 1) высокоразрешающего сейсмоакустического профилирования (проекция на профиль МОГТ Б).

тия фундамента Герда на границе с вулканотектонической депрессией, морфологически выраженной в рельефе как Впадина [Кулинич, Обжиров, 2003].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

Особенности рельефа. В районе Баритовых холмов (рис. 3) рельеф дна детально изучался по системе галсов в пределах полигонов 1-4 (см. рис. 1) одновременно с акустическим и сейсмоакустическим профилированием. Для построения карты рельефа использовались также результаты эхолотирования, получаемые на всех переходах в этом районе, включая работу на станциях, при погружениях ТПА и нахождении судна в дрейфе. Использовались также данные промера нескольких предыдущих экспедиций. Построенная таким образом карта (см. рис. 3) явилась наиболее детальной цифровой картой рельефа для этой акватории.

Основными формами рельефа в пределах района исследований являются депрессия Впадина, максимальная глубина которой достигает 1730 м, и окружающие ее поднятия (см. рис. 3). В геологическом плане Впадина рассматривается как вулканотектоническая депрессия, сформировавшаяся в узле пересечения разнонаправленных разломных зон [Кулинич, Обжиров, 2003]. Согласно количественным оценкам, глубина погружения фундамента здесь относительно окружающих поднятий составляет около 3 км. В рельефе окружающих поднятий прослеживается ряд пологих валов и разделяющих их понижений, имеющих преимущественно северо-западное простирание, что совпадает с основным геоструктурным планом восточной части котловины Дерюгина [Волгин и др., 2011].

Поднятия Баритовые холмы и подобный по морфологии холм Клам представляют собой асимметричные рифоподобные постройки на склоне между осевой частью поднятия Герда и Впадиной. Общим для этих двух возвышенностей является баритовая или барит-карбонатная минерализация и признаки активной дефлюидизации осадочного чехла. Последние выражены в аномалиях метана в придонных водах, бактериальных матах, наличии специфической донной фауны [SO178-KOMEX..., 2004]. Если на

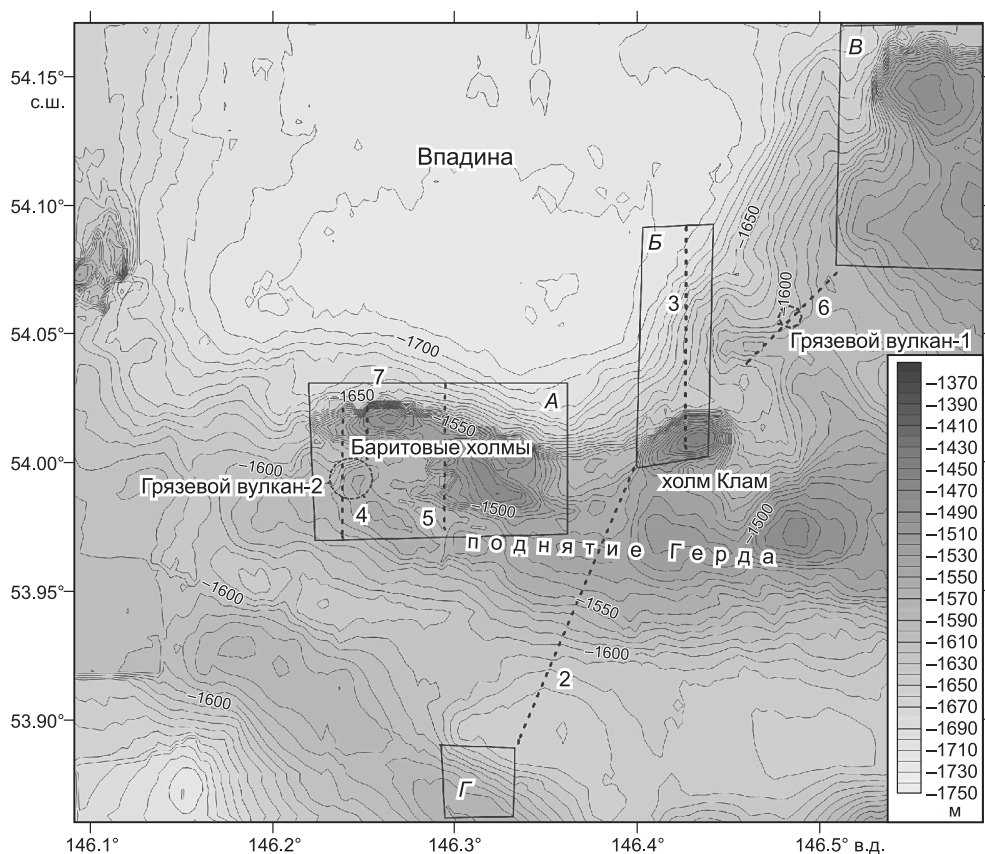


Рис. 3. Карта рельефа дна района вблизи Баритовых холмов.

Местоположение участков (А—Г) детальных работ (прямоугольники). Штриховыми линиями с цифрами показаны сейсмоакустические профили, приведенные на рис. 4—8 и 10. Кружки — грязевые вулканы.

холме Клам баритовая минерализация представлена тонкими корками на поверхности дна, то на Баритовых холмах выделен большой комплекс, включающий: крупные баритовые трубы диаметром до 0.5 м и высотой до 12 м, их основание, уходящее в осадочную толщу, баритовые и барит-карбонатные корки и покровы, конкреции (цементация баритом осадка), мелкие трубки в толще осадка, псевдоморфозы по биогенным остаткам и др. [Astakhova, 1993; Деркачев, Николаева, 2007]. Все это определяет особенности мезо- и микрорельефа дна, а также акустические свойства поверхности дна и осадочного чехла.

Для выявления особенностей строения осадочного чехла в районе Баритовых холмов и ближайших возвышенностей были выполнены 680 км сейсмоакустического профилирования. Общей особенностью всех изученных районов за пределами участков с баритовой минерализацией является параллельно-слоистое строение четвертичных отложений, слагающих верхнюю часть осадочного чехла (рис. 4). В районе исследований и на примыкающих участках Охотского моря эти отложения достаточно хорошо опробованы трубками и изучены на глубину до 10–12 м [Cruise..., 1999; Gorbarenko et al., 2012]. Они представлены чередованием межледниковых глинистых или глинисто-диатомовых илов и более грубозернистых отложений периодов оледенений. В южной части котловины Дерюгина и во Впадине выделяются горизонты акустически прозрачных отложений (рис. 5), которые представлены однородными серыми или черными пелитами, накопившимися в последний холодный период в условиях интенсивного выноса терригенного материала рекой Амур [Астахов и др., 2007б, 2008].

Наблюдается повсеместная деформация осадков, затрагивающая даже голоценовые отложения. Степень деформированности верхней части осадочного чехла увеличивается вблизи Баритовых холмов, холма Клам и, как уже указывалось, в Восточно-Дерюгинской шовной зоне (см. рис. 2). Деформации условно можно классифицировать как смятия осадочного чехла различной степени (см. рис. 5), оползни, разломные нарушения, грязевые вулканы (см. рис. 4, 5). Области развития баритовых построек и широкого распространения более мелких аутигенных баритовых и карбонатных включений в осадочном чехле на временных разрезах диагностируются как фации хаотических отражений, когда в осадках отсутствуют признаки слоистой структуры (см. рис. 6, 7). Распространение этой фации в общих чертах

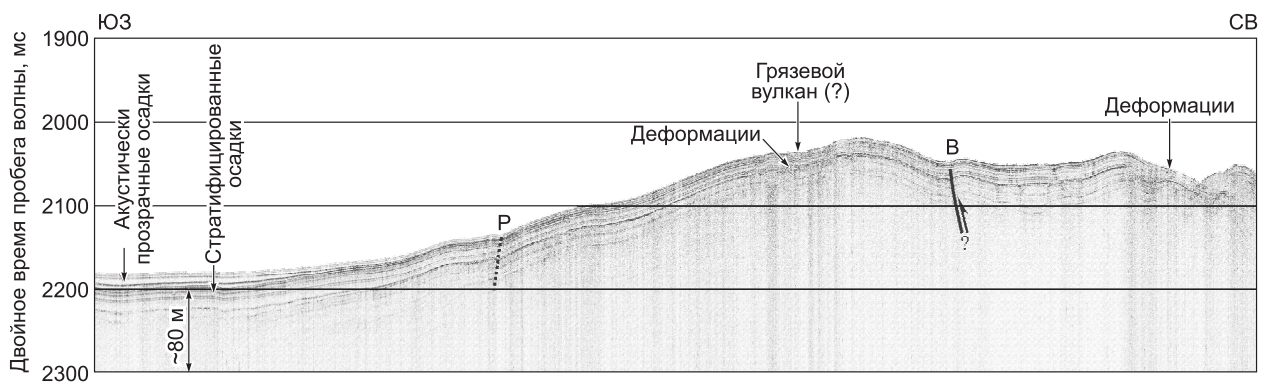


Рис. 4. Пример параллельно-слоистой структуры верхней части осадочного чехла поднятия Герда.

Р — разлом, В — взброс. Местоположение профиля показано на рис. 3 (пр. 2).

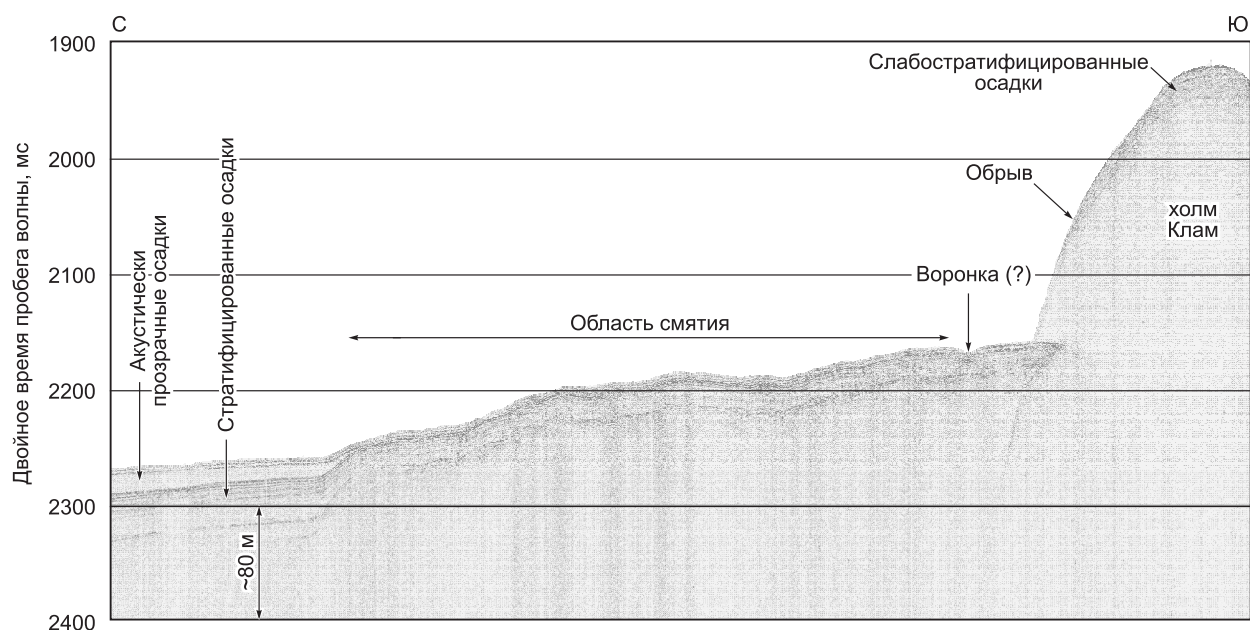


Рис. 5. Пример строения верхней части осадочного чехла на границе Впадины и холма Клам (см. рис. 3, пр. 3).

отражает границы зоны баритовой минерализации с высотой баритовых построек более 1—2 м [Саломатин, Юсупов, 2009]. Появление фации хаотических отражений может быть объяснено нарушением первичной слоистости осадочного разреза вследствие внедрения барийнесущих растворов. Оно сопровождалось формированием баритовых «столбов» на поверхности дна и в чехле, а также последующим диагенетическим перераспределением барита с формированием мелких баритовых или карбонатных трубок, конкреций и корок. Эта фация могла формироваться и при накоплении осадков и продуктов разрушения баритов в депрессиях между баритовыми постройками.

Характерной формой проявления флюидодинамических процессов являются грязевые вулканы. Грязевой вулкан-1 был обнаружен у юго-восточной границы Впадины при профилировании между участками работ В и А в днище неглубокого трога (см. рис. 3) северо-западного простирания. На рис. 8 он проявлен как небольшая сопка высотой 8—10 м диаметром около 200 м с акустически более прозрачной поверхностью, чем окружающее днище трога. При сейсмопрофилировании в трого и на его бортах хорошо прослеживается слоистая осадочная толща четвертичного возраста (см. рис. 8). Под грязевым вулканом эта слоистость прерывается, в куполе же имеется собственная слоистость. По характеру сейсмозаписи эта структура подобна выявленным в абиссальной котловине Тихого океана в районе Магеллановых гор [Ломтев и др., 2007].

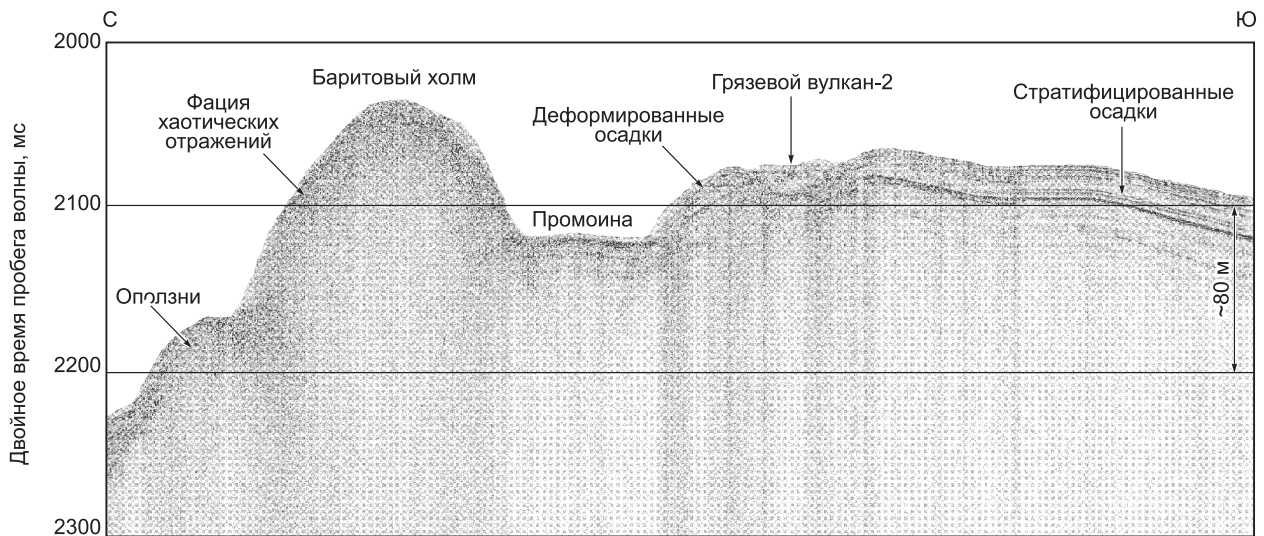


Рис. 6. Пример строения верхней части осадочного чехла в западной части полигона А.

Местоположение профиля показано на рис. 3 (пр. 4).

Грязевой вулкан-2 находится к югу от Западной вершины Баритовых холмов на склоне небольшой возвышенности (см. рис. 3). Он хорошо виден на сейсмопрофиле 4 (см. рис. 6). Особенности рельефа дна примыкающего поднятия и сейсмоакустические данные позволяют предполагать, что вулкан представляет собой единую большую грязевулканическую постройку с основным эруптивным центром на ее вершине (см. рис. 6). Подобные формы характерны для многих грязевулканических построек окраинных и внутренних морей [Stewart, Davies, 2006; Perez-Garcia et al., 2009]. На северо-западном склоне установлены зоны деформации осадочного чехла и покровы грязевулканической брекчии по крайней мере двух генераций. В пробах, отобранных на этих покровах, присутствуют раковины хемотрофных моллюсков, в одной отмечается сильное сероводородное заражение осадков. При погружении ТПА у подножия древнего потока наблюдались полосы выходов каких-то более плотных осадков (сопочная брекчия?), частично перекрытых молодыми илами.

Основным методом изучения баритовых построек в рейсе было зондирование дна с использованием модифицированных судовых эхолотов ELAC LAZ72 и Сарган-ЭМ. Ранее [Саломатин, Юсупов, 2009]

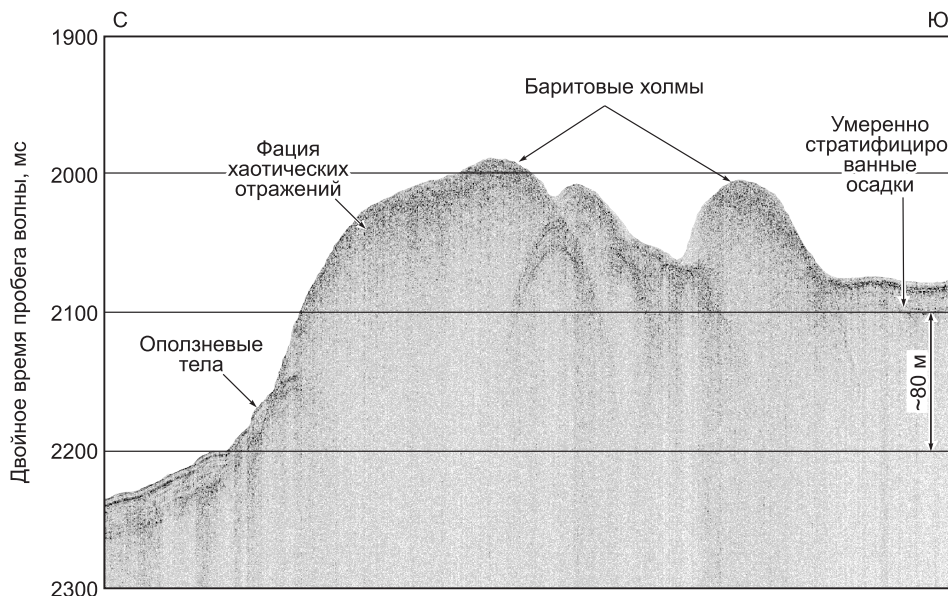


Рис. 7. Пример распространения фации хаотических отложений в осевой части полигона А.

Местоположение профиля показано на рис. 3 (пр. 5).

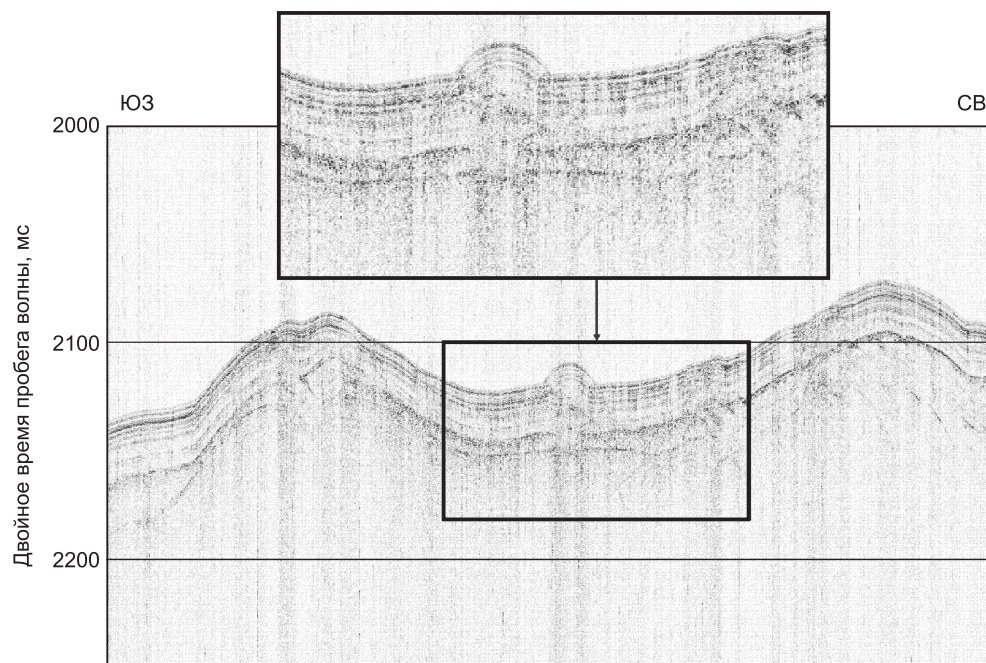


Рис. 8. Фрагмент сейсмоакустической записи, иллюстрирующей строение осадочного чехла в районе грязевого вулкана-1 (в центре).

Местоположение профиля показано на рис. 3 (пр. 6).

было установлено, что наличие БП приводит к появлению непосредственно перед эхосигналом от поверхности дна дополнительного сигнала, длительность которого определяется высотой построек, а энергия — их количеством в зоне, принимающей участие в формировании сигнала обратного рассеяния (радиус около 250 м). В результате на эхограммах выделяется слой придонного рассеяния (СПР), нижняя темная граница которого определяется поверхностью дна, а верхняя — вершинами наиболее высоких БП (рис. 9). По энергии сигнала в пределах СПР можно определить площадь, покрытую постройками. Толщина этого слоя отражает высоту построек. На профиле 9 выделяются баритовые постройки разных генераций. На вершине холма они имеют высоту до 10—12 м и являются, вероятно, более поздним образованием по сравнению БП высотой 4—6 м, преобладающими на других участках.

Полученные в рейсе данные подтвердили имеющиеся сведения [Саломатин, Юсупов, 2009] о площадном распространении и высоте БП (рис. 10). Вне самих Баритовых холмов, преимущественно к югу от них, также выявлены отдельные БП или их группы. Ранее масса барита, находящаяся в СПР, была оценена в 3 млн т [Саломатин, Юсупов, 2009]. Другая опубликованная оценка 3—10 млн т [Обжиров и др., 2006] включала условно и массу баритов в осадочном чехле.

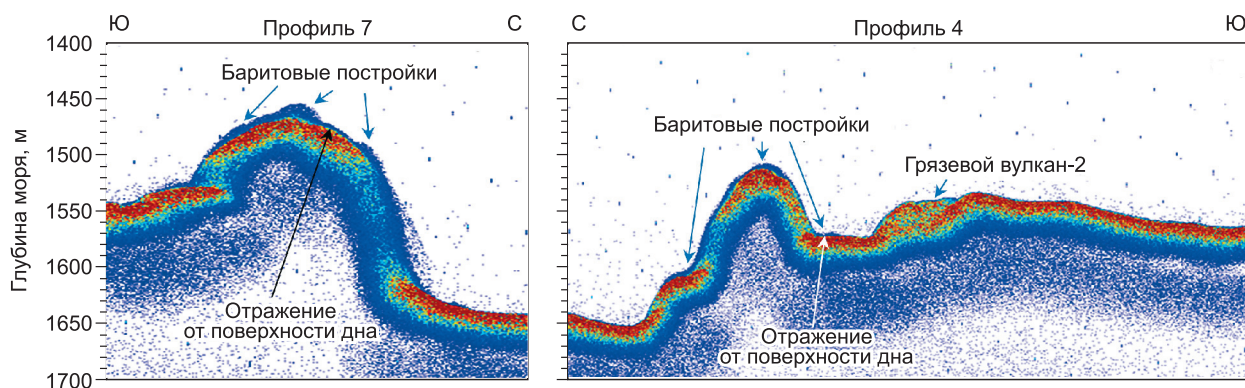


Рис. 9. Пример регистрации баритовых построек с использованием геоакустического комплекса.

Положение профилей см. на рис. 3.

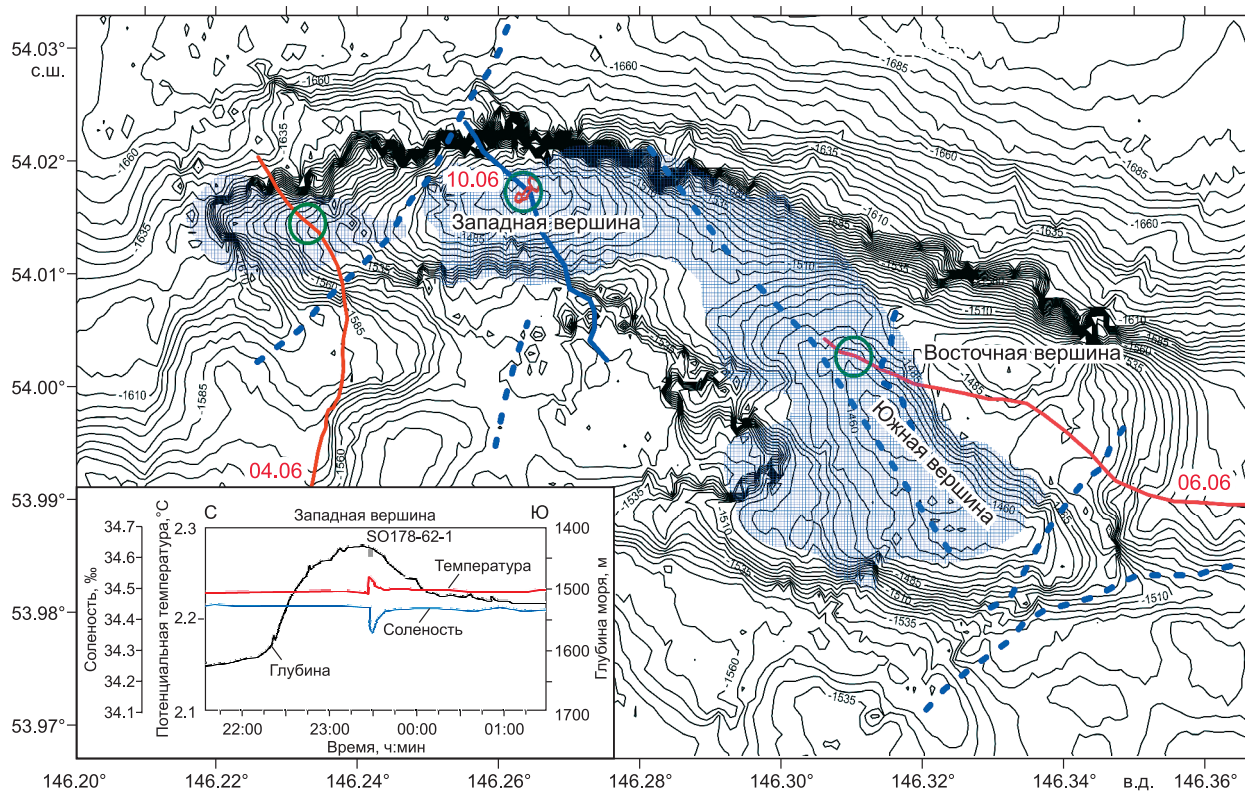


Рис. 10. Рельеф дна района Баритовых холмов и маршруты погружений ТПА «Comanche».

Синей штриховкой показана основная область распространения высоких (более 2 м) БП (по [Саломатин, Юсупов, 2009] с изменениями); красными линиями — маршруты погружений ТПА «Comanche»; синими штриховыми и сплошной линиями — маршруты погружений системы OFOS [Cruise..., 1999; Aloisi et al., 2004]; зелеными кружками — участки, где при погружениях ТПА «Comanche» обнаружены формирующиеся баритовые постройки.

На врезке: вариации солёности и потенциальной температуры придонных вод, полученные системой OFOS на профиле SO178-57-1 (на карте показан синей сплошной линией) и место отбора колонки SO178-62-1 [Wallmann et al., 2004].

При визуальном обследовании дна в районе Баритовых холмов с использованием ТПА «Comanche» наблюдались БП самых разнообразных форм: одиночные «столбы» и «колонны» (рис. 11, А), их группы и скопления, трудно регистрируемые фотосъемкой из-за ограниченного освещения, полуразрушенные БП, в различной степени покрытые биогенным налетом и осадками (см. рис. 11, А; 12, А), баритовые «плиты» и «платформы», оставшиеся на месте полностью разрушенных построек (см. рис. 12, В), скопления обломков и валунов барита на крутых склонах и другие формы. Повсеместно, даже там, где, по данным дистанционного зондирования, присутствует фация хаотических отложений и (или) СПР, встречаются участки, покрытые осадками без барита (см. рис. 11, А). Если площадь таких участков и мощность неизменных отложений незначительна, они не регистрируются акустическими методами. В то же время БП и небольшие участки с СПР встречаются вместе со стратифицированными осадками, особенно деформированными (см. рис. 6).

Последовательность формирования БП может быть определена по степени их разрушения, обрастания и покрытия органическим налетом или черной пленкой марганцевых гидроксидов. На большей части обследованной поверхности Баритовых холмов распространены старые сглаженные и частично разрушенные постройки высотой до 1.0—1.5 м, покрытые черной марганцевой пленкой или бурым и черно-бурым покровом органики с многочисленными обрастателями (см. рис. 11, А, 12, А — задний план) или такие же черные глыбовые развалы баритов. В осевых частях поднятия встречены лучше сохранившиеся (см. рис. 11, А — передний план) и менее обросшие постройки, покрытые только бурым или буроватым органическим налетом, а также белые или серовато-белые образования, формирующиеся в настоящее время (см. рис. 11, Б, В, Г; 12, А, Б). На рис. 11, Г видны три генерации баритов: наиболее старый коричневый — в нижней части, светло-коричневый, составляющий основную часть постройки, и белый, наращивающий ее по периметру и вверху. Стадийность формирования БП может быть продемонстрирована также рисунками 11, Б, В; 12, А.

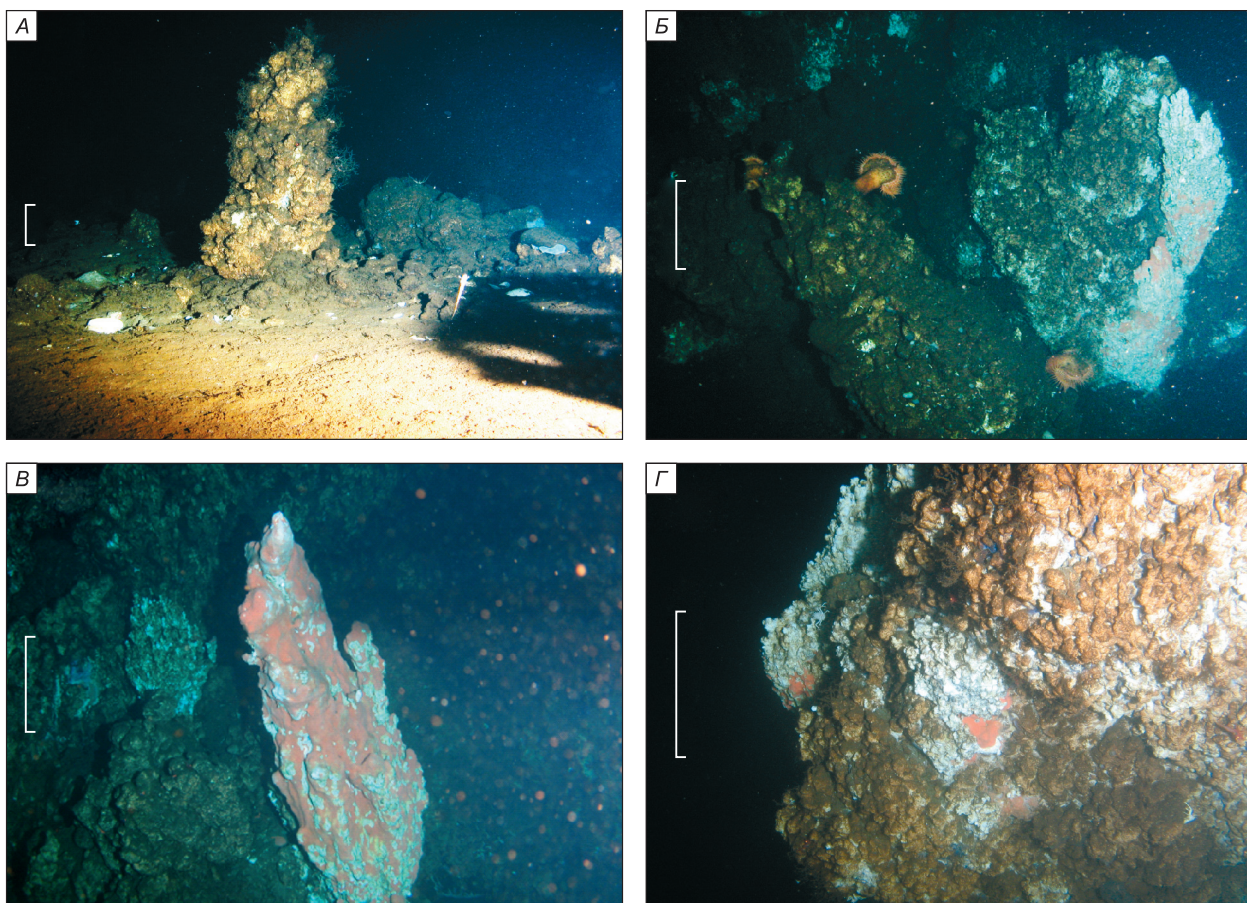


Рис. 11. Баритовые постройки различного возраста на западной вершине Баритовых холмов, зафиксированные при погружении 10 июня 2011 г.

Снимки панорамные, выполнены ТПА «Comanche» (погружение 10.06, см. рис. 10) при нахождении на грунте; масштабная линейка 0.2 м отражает размеры на уровне основного объекта съемки. *А* — относительно молодая одиночная баритовая постройка, покрытая биогенным налетом и гидроидами *Abietinaria* sp., на поверхности старых разрушенных баритовых образований; на переднем плане — дно, покрытое окисленными осадками, населенными двусторчатыми моллюсками *Archivesica ochotica* (сем. Vesicomidae), справа по центру серые пятна бактериальных матов; *Б* — разновозрастные БП, покрытые биогенным налетом и заселенные актиниями *Phelliactis* cf. *callicyclus*, справа формирующиеся баритовые тела; *В* — формирующаяся баритовая постройка (белая с розовыми пятнами) на поверхности более старых, покрытых коричневатым биогенным налетом; справа оптические аномалии, вызванные, вероятно, неоднородностью водной толщи; *Г* — боковая поверхность крупной, относительно молодой постройки с наростами нового барита (белое).

В какой-то мере стадийность формирования БП проявлена и в результатах акустического зондирования. По толщине СПР на Западной вершине (см. рис. 9, пр. 7) выделяется осевая часть с предположительно молодыми постройками высотой до 12 м, а на прилегающих участках высота их не превышает 5—7 м. В целом Западная вершина отличается значительно большим распространением молодых построек. Здесь же в 2004 г. при профилировании системой OFOS [Aloisi et al., 2004] выявлены придонные воды с повышенной температурой и пониженной соленостью (см. рис. 10, врезка). Такие воды не могут находиться у дна, они должны подниматься вверх, рассеиваясь в водной толще, и обнаружить их возможно только в случае постоянной подпитки из какого-то источника. К. Валлманн с соавторами [Wallmann et al., 2004], изучавшие иловые воды в этой же точке (колонка SO178-62-1; см. рис. 10, врезка), предполагают, что они формируются пресными водами, образовавшимися на глубине нескольких километров при трансформации (дегидратации) глинистых минералов (сметтит-иллит) горных пород в условиях повышенной температуры. Они резко обеднены магнием и хлором, не содержат сульфатов, но богаты кремнием. Эти данные могут быть достаточно надежным доказательством поступления низкотемпературных гидротермальных вод в современных условиях.

Еще одной особенностью БП Западной вершины является наличие розового покрова на поверхности белых формирующихся построек (см. рис. 11, *Б, В, Г*). Такого не было отмечено на других верши-

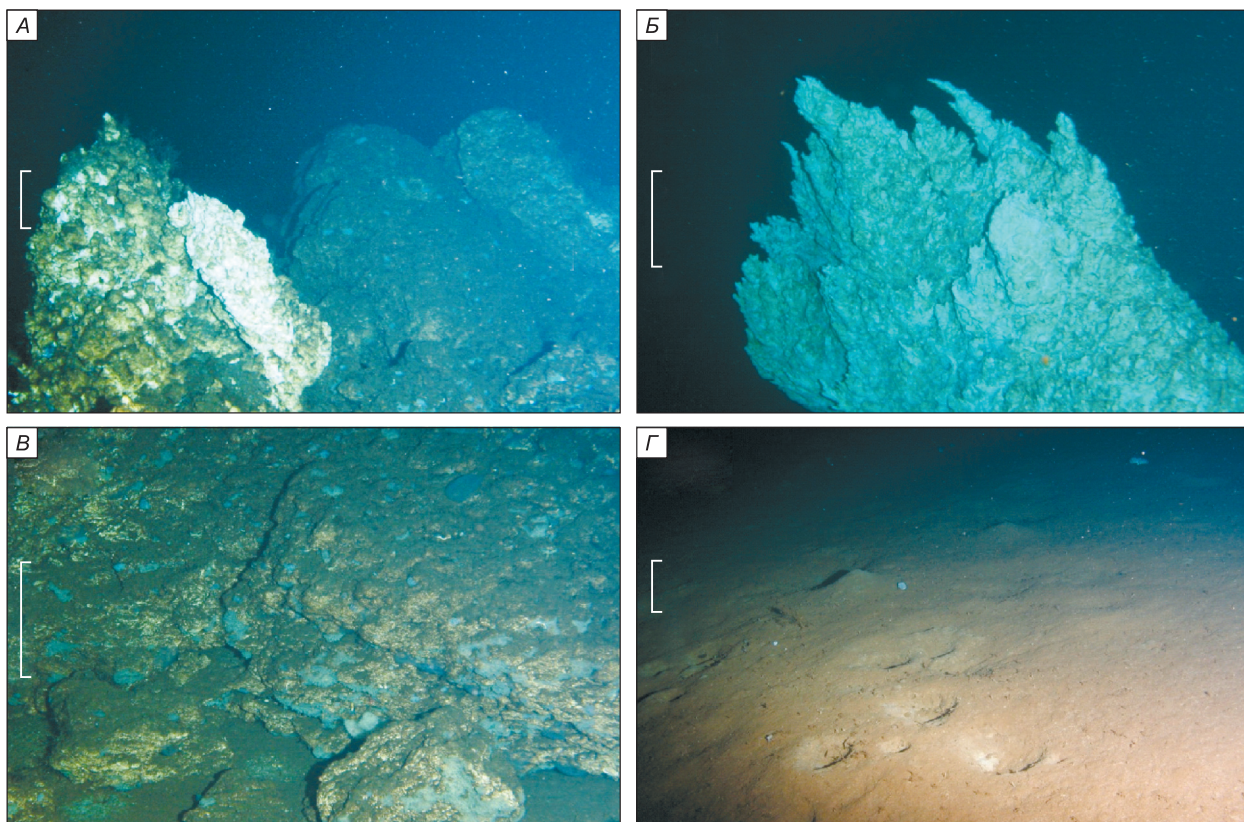


Рис. 12. Фотографии баритовых образований (А, Б, В) и поверхности дна (Г) в районе южной вершины Баритовых холмов (погружение 06.06).

Снимки панорамные, выполнены ТПА «Соманче» (погружение 06.06, см. рис. 10) при нахождении на грунте; масштабная линейка 0,2 м отражает размеры на уровне основного объекта съемки или центральной части кадра.

А — разновозрастные, частично разрушенные БП с пятнами бактериальных матов (серое в правом нижнем углу) и формирующаяся баритовая постройка (белое в центре); Б — вершина формирующейся БП с отдельными «ветвями», отклоняющимися по направлению преобладающих течений; В — баритовая «плита», покрытая эпизодичным покровом диатомовых илов (темный зеленовато-серый) и бактериальными матами (светло-серые пятна); Г — поверхность дна, покрытого окисленными осадками с воронками роющих организмов, в которых видны мелкие обломки барита (белое).

нах. К сожалению, образцы этих баритов не были подняты, они также не встречались ранее среди драгированных образцов [Астахова и др., 1987; Деркачев, Николаева, 2007]. Можно предполагать, что розовый налет образован организмами, способными к обитанию в распресненных и теплых водах со специфическими гидрохимическими условиями.

Помимо отмеченных выше особенностей придонных и иловых вод на Западной вершине и проявлений грязевулканической деятельности можно отметить и другие признаки современной дефлюидизации осадочного чехла. Это широкое распространение бактериальных матов (см. рис. 11, А; 12, А, В) и бентосных хемотрофных двустворчатых моллюсков *Archivesica ochotica* (сем. Vesicomylidae) и актиний *Phelliactis* cf. *callicyclus*. Весьма интересным представляется обнаружение на некоторых фотоснимках оптических аномалий в водной толще (см. рис. 11, В). Они возникают в неоднородной водной среде при освещении фотовспышкой и, очевидно, могут быть признаками интенсивного перемешивания вод разного состава.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования выявили характерные формы рельефа и микрорельефа, сильную дислоцированность осадочного чехла, затрагивающую и голоценовые отложения, интенсивную флюидодинамическую деятельность, свидетельствующие об активной неотектонической обстановке в районе Баритовых холмов и Восточно-Дерюгинской шовной зоны. Это не противоречит существующей неотектонической модели о приуроченности баритовой залежи к разлому северо-западного направления [SO178-KOMEX..., 2000], характерного для восточной части котловины, но не продолжающегося за

пределы Восточно-Дерюгинской шовной зоны [Cruise..., 1999; Волгин и др., 2011]. Сама залежь представляет собой рифообразную постройку, осложняющую северо-западный борт поднятия Герда. Образование ее как возвышенности могло быть следствием многократного формирования БП и накопления осадков. Поля БП служили каркасом, удерживающим осадочный материал, что обеспечило более высокие темпы накопления осадков по сравнению с окружающими участками и привело к образованию возвышенностей (холмов).

В осевой части поднятия Баритовые холмы продолжается формирование БП в результате поступления низкотемпературных гидротерм из осадочного чехла. Однако отсутствие крупных, вновь образованных построек и узкая локализация этих процессов только в осевой части баритовой залежи дает основание полагать, что формирование последней происходило при более интенсивном поступлении барийнесущих растворов. Возможно, усиление флюидодинамической деятельности было связано с периодами тектонической активизации, как это установлено для метановых источников западного борта котловины Дерюгина [Кулинич и др., 2007]. При изучении колонок донных осадков вблизи Баритовых холмов выделены несколько этапов интенсивного поступления барийнесущих флюидов. Последний соответствовал середине голоцена, отмечены также эпизоды 20-25 и 49 тыс. лет назад [Вагина, Астахова, 1988; Деркачев, Николаева, 2007].

Одним из возможных источников бария для формирования новых построек или наращивания старых может быть барий, высвобождающийся при диагенетических процессах в толще баритосодержащих отложений. О наличии этих процессов свидетельствует многообразие форм выделения барита в осадочном чехле: трубчатые тела различной формы, конкреции, микроконкреции, корки, базальный цемент в песчаниках и др. [Астахова и др., 1987; Astakhova, 1993; Деркачев и др., 2000]. Наиболее многообразны трубчатые тела, обычно представляющие собой псевдоморфозы по ходам илоедов с баритовым или карбонатным цементом. Существует мнение, что такие образования формируются и при медленной, рассеянной миграции к поверхности дна глубинных барийнесущих флюидов [Деркачев и др., 2000]. В любом случае полученные данные свидетельствуют о продолжающемся наращивании БП с поверхности дна. Соответственно, в случае промышленной разработки этой залежи и извлечения барита, формирующего постройки на поверхности дна, они могут возникнуть вновь по истечению какого-то времени. В какой-то мере это может означать восстановление запасов месторождения, что существенно увеличивает его экономическую значимость.

Проведенные исследования, так же как и многочисленные работы предшественников, не позволяют однозначно судить об источниках бария в низкотемпературных гидротермах Баритовых холмов. Наши данные, подтвердившие неотектоническую дислоцированность осадочного чехла в пределах многих участков котловины и его интенсивную дефлюидизацию, не выявили признаков баритовой минерализации за пределами поднятия Герда и примыкающего участка Впадины. Хотя осадочный чехол котловины Дерюгина, повсеместно включающий кремнистые толщи, на многих участках дислоцирован и имеет признаки интенсивной дефлюидизации. На северо-восточном склоне о. Сахалин, например, в придонном горизонте выявлены аномалии теплых и распресненных вод [SO178-KOMEX..., 2004], подобные установленной на Западной вершине Баритовых холмов (см. рис. 10, врезка). Это, а также новые данные по изотопно-геохимическим особенностям баритов Баритовых холмов, по которым они соответствуют известным гидротермальным месторождениям на суше [Ахманов и др., 2015], и уникальность масштабов минерализации, не имеющей аналогов в районах проявления холодных, водно-газовых источников, делают более приемлемыми модели формирования залежи, учитывающие влияние вулканогенной поставки бария. В пользу этого свидетельствуют и проявления андезитового вулканизма позднеолигоцен-раннемиоценового времени, известные на периферии котловины Дерюгина [Леликов, Емельянова, 2007]. Этот же возраст (раннемиоценовый) имеют глубинные барийсодержащие флюиды района Баритовых холмов [Greiner et al., 2002; Деркачев, Николаева, 2007].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили составить детальную цифровую карту рельефа Баритовых холмов и окружающих участков и выявить особенности их микрорельефа. Морфология возвышенностей с баритовой минерализацией позволяет предполагать их формирование путем наращивания за счет ускоренного осадконакопления по сравнению с окружающими участками. Выявленные небольшие грязевые вулканы вблизи возвышенностей свидетельствуют в пользу ранее высказанной версии о подобии флюидодинамических процессов, сформировавших залежь, грязевулканическим. Этому не противоречит и интенсивная дислоцированность верхней части осадочного чехла в пределах южного борта Впадины. Она проявлена в хаотичном смятии осадков или их умеренных деформациях с сохранением структуры, разрывных нарушениях в отложениях, включающих и голоценовые, в оползнях у подножий возвышенностей, специфических структурах (в том числе подводные каналы грязевых вулканов), обусловлен-

ных миграцией флюидов. Наиболее интенсивно осадочный чехол нарушен вблизи Баритовых холмов и холма Клам, где проявлены все отмеченные формы дислокаций. Интенсивная дислоцированность четвертичных отложений выявлена и в пределах крупного глубинного разлома, входящего в Восточно-Дерюгинскую шовную зону, что свидетельствует об общей неотектонической активности региона.

Баритовые постройки на поверхности Баритовых холмов диагностируются по присутствию фации хаотических отложений в осадочном чехле и слое придонного рассеяния по данным акустического зондирования. Обследование этих участков с использованием ТПА «Comanche» выявило наличие «старых» БП, частично или полностью разрушенных и покрытых налетом органики или гидроксидов марганца. На отдельных участках сформированы выровненные баритовые «платформы», перемежающиеся с участками дна, полностью покрытыми осадками. В осевых частях поднятия встречаются относительно молодые БП, имеющие признаки стадийности образования. Современное поступление флюидов из осадочного чехла по косвенным признакам отмечается повсеместно как в пределах Баритовых холмов, так и вокруг них, на участках, где отсутствуют крупные постройки, хаотическая сейсмофаия или слой придонного акустического рассеяния. Это бактериальные маты, хемотрофная фауна, заселяющая отдельные участки дна, придонные воды с видимыми оптическими аномалиями, специфические формы мезо- и микрорельефа. Формирование же новых построек происходит в относительно узкой осевой зоне Баритовых холмов. Они наращивают старые и, как правило, имеют ограниченные размеры. Наиболее интенсивно этот процесс идет на Западной вершине, где ранее отмечались признаки поступления гидротермальных вод. Здесь же установлены и специфические бентосные организмы, покрывающие поверхность формирующихся БП. Полученные данные позволяют заключить, что поступление глубинных барийнесущих флюидов продолжается и в настоящее время, хотя и весьма медленными темпами. Однако наличие этого процесса определяет возможность восстановления баритовой залежи в случае ее промышленной разработки, что увеличивает экономическую значимость проявления.

Авторы выражают благодарность капитану В.Б. Птушкину и экипажу 54-го рейса НИС «Академик М.А. Лаврентьев», слаженная работа которых позволила в сложных погодных условиях выполнить обширный комплекс исследований на судне, не оснащенном системой динамического позиционирования. Авторы признательны В.А. Ломтеву за помощь в редактировании рукописи.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта «Дальний Восток» 15-И-6-017о.

ЛИТЕРАТУРА

Адрианов А.В., Ивин В.В., Щербатюк А.Ф. Использование подводной робототехники в биологических исследованиях на Дальнем Востоке России // Биологическая безопасность дальневосточных морей Российской Федерации: материалы Целевой комплексной программы ориентированных фундаментальных научных исследований Дальневосточного отделения РАН на 2007—2012 гг. / Ред. А.В. Адрианов. Владивосток, Дальнаука, 2014, с. 89—131.

Астахов А.С., Горбаренко С.А., Ващенко Н.Г., Волохин Ю.Г. Распределение и скорости накопления марганца в донных осадках Охотского моря // Тихоокеанская геология, 2000, т. 19, № 5, с. 47—60.

Астахов А.С., Крецер Ю.Л., Кулинич Р.Г., Тиедемани Р. Карбонатная и сульфидная рудная минерализация в осадках Дерюгинской рифтогенной зоны Охотского моря // ДАН, 2004, т. 395, № 4, с. 511—516.

Астахов А.С., Валлманн К., Иванов М.В., Колесов Г.М., Саттарова В.В. Распределение ртути и скорость ее накопления в верхнечетвертичных отложениях котловины Дерюгина Охотского моря // Геохимия, 2007а, № 1, с. 54—70.

Астахов А.С., Саттарова В.В., Свининников А.И., Астахова Н.В., Доманов М.М., Иванов М.В. Марганцевые металлоносные осадки котловины Дерюгина Охотского моря: особенности химического состава, геологические условия формирования // Тихоокеанская геология, 2007б, т. 26, № 5, с. 13—31.

Астахов А.С., Астахова Н.В., Сатарова В.В., Свининников А.И., Грецкая Е.В., Ващенко Н.Г., Иванов М.В. Осадконакопление и рудогенез во впадине Дерюгина (Охотское море). Владивосток, Дальнаука, 2008, 243 с.

Астахова Н.В., Липкина М.И., Мельниченко Ю.В. Гидротермальная баритовая минерализация во впадине Дерюгина Охотского моря // Докл. АН СССР, 1987, т. 295, № 1, с. 212—215.

Астахова Н.В., Нарнов Г.А., Якушева И.Н. Карбонатно-баритовая минерализация во впадине Дерюгина (Охотское море) // Тихоокеанская геология, 1990, № 3, с. 37—42.

Ахманов Г.Г., Егорова И.П., Михайлик П.Е., Гревцев В.А., Наумкина Н.И., Семенова Г.М. К генезису травертиноподобных баритов впадины Дерюгина (Охотское море) // Отечественная геология, 2015, № 1, с. 82—88.

Безруков П.Л. Донные отложения Охотского моря // Тр. Ин-та Океанологии АН СССР, 1960, т. 32, с. 15—97.

Вагина Н.К., Астахова Н.В. О возрасте гидротермальной минерализации во впадине Дерюгина Охотского моря // Стратиграфия и корреляция четвертичных отложений Азии и Тихоокеанского региона (Тезисы докладов Международного симпозиума). Находка, Изд-во ДВО АН СССР, 1988, т. 1, с. 17—19.

Варнавский В.Г., Жаров А.Э., Кириллова Г.Л., Кровушкина О.А., Кропп Э.Я., Куделькин В.В., Троян В.Б., Чуйко Л.С. Геология и нефтегазоносность Охотско-Шантарского осадочного бассейна. Владивосток, ДВО РАН, 2002, 148 с.

Волгин П.Ф., Лютая Л.М., Кочергин А.В. Плотностной разрез земной коры впадины Дерюгина (Охотское море) по результатам гравитационного моделирования // Тихоокеанская геология, 2009, т. 28, № 3, с. 12—22.

Волгин П.Ф., Семакин В.П., Кочергин А.В. Структурные элементы осадочного чехла района впадины Дерюгина (Охотское море) // Тихоокеанская геология, 2011, т. 30, № 5, с. 14—21.

Деркачев А.Н., Николаева Н.А. Особенности аутигенного минералогенеза в осадках Охотского моря // Дальневосточные моря России. Кн. 3 / Под ред. В.А. Акуличева, Р.Г. Кулинича. М., Наука, 2007, с. 223—239.

Деркачев А.Н., Борман Г., Грайнерт Й., Можеровский А.В. Аутигенная карбонатная и баритовая минерализация в осадках впадины Дерюгина (Охотское море) // Литология и полезные ископаемые, 2000, № 6, с. 568—585.

Емельянова Т.А. Вулканизм Охотского моря. Владивосток, Дальнаука, 2004, 147 с.

Калинчук В.В., Астахов А.С. Атмохимические ореолы рассеяния ртути над активными геологическими структурами северной части Японского моря // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (12), с. 1728—1737.

Кулинич Р.Г., Обжиров А.И. Барит-карбонатная минерализация, аномалии метана и геофизические поля во впадине Дерюгина (Охотское море) // Тихоокеанская геология, 2003, т. 22, № 4, с. 35—40.

Кулинич Р.Г., Бессонова Е.А., Обжиров А.И. О корреляции метановых эманацій со структурой фундамента северо-восточного шельфа и склона острова Сахалин и сейсмической активностью региона // Дальневосточные моря России. Кн. 3 / Под ред. В.А. Акуличева, Р.Г. Кулинича. М., Наука, 2007, с. 277—282.

Леликов Е.П., Емельянова Т.А. Вулканогенные комплексы Охотского и Японского морей (сравнительный анализ) // Океанология, 2007, т. 47, № 2, с. 294—303.

Ломтев В.Л., Литвинова А.В. К строению подводной окраины Северного Сахалина // Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 2013, № 1 (31), с. 93—103.

Ломтев В.Л., Ильев А.Я., Гуринов М.Г. Новые данные о строении Магеллановых гор (Восточно-Марианская котловина, ЮЗ Пацифика) // Литосфера, 2007, № 6, с. 125—136.

Обжиров А.И., Астахова Н.В., Липкина М.И., Верещагина О.Ф., Мишукова Г.И., Сорочинская А.В., Югай И.Г. Газогеохимическое районирование и минеральные ассоциации дна Охотского моря. Владивосток, Дальнаука, 1999, 184 с.

Обжиров А.И., Деркачев А.Н., Баранов Б.В., Алоизи Дж., Грайнерт Й., Борман Г., Бибоу Н. Аномалии метана и сопряженные с ними бариты во впадине Дерюгина Охотского моря // Подводные технологии и мир океана, 2006, № 2, с. 32—44.

Остроумов З.А. Марганец в донных отложениях Охотского моря // Докл. АН СССР, 1954, № 2, с. 285—288.

Родников А.Г., Сергеева Н.А., Забаринская Л.П. Глубинное строение впадины Дерюгина (Охотское море) // Тихоокеанская геология, 2002, № 4, с. 3—8.

Саломатин А.С., Юсупов В.И. Акустическая оценка проявлений баритовой минерализации в Охотском море // Океанология, 2009, т. 49, № 3, с. 474—477.

Спиридонов А.М., Зорина Л.Д., Романов В.А. Типы эндогенных геохимических полей и их поисковое значение // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (2), с. 370—380.

Харахинов В.В. Тектоника Охотоморской нефтегазоносной провинции: Автореф. дис. ... д. г.-м. н. М., Ин-т литосферы РАН, 1998, 77 с.

Шарапов В.Н., Лапухов А.С., Смолянинова Л.Г. Временные характеристики развития вулканоплутонических рудно-магматических систем окраин Тихого океана // Геология и геофизика 2013, т. 54 (11), с. 1731—1753.

Aloisi G., Haeckel M., Wallmann K., Baranov B., Werner R. OFOS observations // SO178-KOMEX Cruise Report July 22 — September 15, 2004 / Eds. W.-Chr. Dullo, N. Biebow, K. Georgeleit, p. 71—97.

Astakhova N.V. Hydrothermal barite in the Okhotsk Sea // Res. Geol., 1993, № 17, p. 169—172.

Cruise Reports: KOMEX I and II. RV Professor Gagarinsky. Cruise 22, RV Akademik Lavrentiev Cruise 28 / Eds. N. Biebow, E. Hutten // GEOMAR Report, 82, Kiel, 1999, 188 p.

Gorbarenko S.A., Vasilenko Y.P., Bosin A.A., Derkachev A.N., Harada N., Malakhov M.I., Velivetskaya T.A., Ignatiev A.V., Goldberg E.L. Responses of the Okhotsk Sea environment and sedimentology to global climate changes at the orbital and millennial scale during the last 350 kyr // *Deep Sea Research, Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, v. 61—64, p. 73—84.

Greinert J., Bollwerk S.M., Derkachev A., Bohrmann G., Suess E. Massive barite deposits and carbonate mineralization in the Derugin Basin, Sea of Okhotsk: precipitation processes at cold seep sites // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, v. 203, № 1, p. 165—180.

Mazurenko L.L., Matveeva T.V., Prasolov E.M., Logvina E.A., Prilepskiy E.B., Shoji H., Minami H., Sakagami H., Hachikubo A., Obzhairov A.I., Salomatin A.S., Salyuk A.N., Jin Y.K., Poort J. Gas hydrate forming fluids on the NE Sakhalin slope, Sea of Okhotsk // *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 2009, v. 319, p. 51—72.

Obzhairov A., Shakirov R., Salyuk A., Salomatin A., Suess E., Biebow N. Relations between methane venting, geological structure and seismo-tectonics in the Okhotsk sea // *Geo-Marine Letters*, 2004, v. 24 (3), p. 135—139.

Perez-Garcia C., T. Feseker, J. Mienert, C. Berndt The Hakon Mosby mud volcano: 330 000 years of focused fluid flow activity at the SW Barents Sea slope // *Mar. Geol.*, 2009, v. 262, p. 105—115.

SO178-KOMEX Cruise Report: RV SONNE. Mass exchange processes and balances in the Okhotsk Sea / Eds. W.-Chr. Dullo, N. Biebow, K. Georgeleit. Kiel, Germany, 2004, 125 p.

Stewart S.A., Davies R.J. Structure and emplacement of mud volcano system in the South Caspian Basin // *AAPG Bull.*, 2006, v. 90 (5), p. 771—786.

Wallmann K., Tishchenko P., Pavlova G., Haeckel M., Aloisi G., Mosch T. Pore water geochemistry // *SO178-KOMEX Cruise Report July 22 — September 15, 2004* / Eds. W.-Chr. Dullo, N. Biebow, K. Georgeleit. 2004, p. 50—70.

*Рекомендована к печати 6 июля 2016 г.
И.С. Новиковым*

*Поступила в редакцию
8 декабря 2015 г.*