

УДК 528.88

Бондур В.Г., Кузнецова Т.В., Воробьев В.Е., Замшин В.В.**ВЫЯВЛЕНИЕ ГАЗОПРОЯВЛЕНИЙ НА ШЕЛЬФЕ РОССИИ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ****Аннотация**

Проанализированы особенности газопроявлений (газовых сипов) в шельфовых зонах российской Арктики, Показано, что для организации и проведения мониторинга газовых проявлений на шельфе арктических морей необходимо комплексное использование данных дистанционного зондирования Земли и дополнительной геофизической, метеорологической и картографической информации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, аэрокосмический мониторинг, газовые сипы; шельфовые зоны; газопроявления, эмиссия метана.

Bondur V.G., Kuznetsova T.V., Vorobyev V.Y., Zamshin V.V.**DETECTION OF GAS SHOWS (GAS SEEPS) ON THE RUSSIAN SHELF USING SATELLITE DATA****Abstract**

The features of gas shows (gas seeps) on the Russian Arctic Shelf are analyzed. It is demonstrated that monitoring of them requires integrated use of satellite remote sensing data together with geophysical, meteorological and cartographic information.

Keywords: remote sensing of the Earth, airborne and satellite monitoring, gas seeps; shelf zones; gas shows; methane emission.

ВЫЯВЛЕНИЕ ГАЗОПРОЯВЛЕНИЙ НА ШЕЛЬФЕ РОССИИ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

В.Г. Бондур, Т.В. Кузнецова, В.Е. Воробьев, В.В. Замшин
Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга
«АЭРОКОСМОС» Минобрнауки и РАН,
e-mail: office@aerocosmos.info

Введение

Освоение шельфовых месторождений нефти и газа неразрывно связано с развертыванием и эксплуатацией добывающих платформ, транспортировкой углеводородов по подводным трубопроводам и танкерами (Аэрокосмический..., 2012; Бондур, 2010; 2012). Неглубокие придонные залежи свободного газа или газогидратов представляют высокую опасность при проведении буровых работ. Это подтверждается многочисленными выбросами газа с созданием аварийных ситуаций во всем Мировом океане, включая моря Северного Ледовитого океана (Богоявленский, 2012). Исследования в этих направлениях крайне важны для организации экологически безопасного функционирования морских нефтегазовых промыслов и их инфраструктуры, особенно в Арктическом регионе. Кроме того, при дегазации донных отложений изменяется плотность воды, что представляет большую опасность для судоходства (Хассол, 2004). Поэтому в настоящее время чрезвычайно важно увеличить объемы геолого-геофизических исследований в акваториях Арктики с картированием газопроявлений различной природы (подводные грязевые вулканы, поля покмарок, залежи свободных газов и газогидратов в донных отложениях и др.), являющихся, с одной стороны, индикаторами наличия месторождений углеводородов, а с другой стороны, представляющих опасность для объектов нефтегазового комплекса при разведке и эксплуатации месторождений. Необходимо также проводить регулярный мониторинг мест локализации подобных явлений с целью получения информации, важной для осуществления и планирования тех или иных видов хозяйственной деятельности (Аэрокосмический..., 2012; Богоявленский, 2012; Бондур, 2010; 2012)

Неотъемлемой составной частью любой современной системы мониторинга морей и океанов являются спутниковые средства дистанционного зондирования, которые обладают широкими возможностями и существенными преимуществами, по сравнению с наземными средствами (Савин, Бондур, 2000; Бондур, 1995; 2001; 2004; 2010; 2012; Аэрокосмический..., 2012). Космические методы обеспечивают: глобальное покрытие;

мгновенную съемку обширных акваторий; высокую оперативность получения данных; возможность регулярного повтора наблюдений; высокое пространственное разрешение (до 50 см); получение комплексных и мультисенсорных данных; возможность организации оперативного мониторинга в любой точке Мирового океана; использование одних и тех же данных для решения широкого круга задач по получению информации об океане (исследование ледового покрова, метеорология, экологические аспекты, анализ климатических изменений, оценка биологических ресурсов и пр.); существенно более низкая стоимость спутникового мониторинга по сравнению с другими геофизическими наблюдениями (Бондур, 2010; 2012).

Аэрокосмический мониторинг океана осуществляется во многих странах. Например, европейские страны проводят регулярный мониторинг экологического состояния в Северном, Балтийском и Средиземном морях с помощью специально оборудованных самолетов, кораблей и спутников. Поскольку регулярный воздушный контроль арктических морей России давно не проводится, то для нашей страны основными являются спутниковые системы мониторинга морской среды (Аэрокосмический..., 2012; Бондур, 2010; 2012; Лаврова и др., 2011).

Таким образом, спутниковая информация имеет важное практическое значение для рационального и экологически чистого природопользования при реализации проектов нефтегазовой отрасли в прибрежно-шельфовых зонах арктических морей России.

В настоящей работе обоснована необходимость разработки новых подходов к проведению комплексных исследований мест разведки, добычи и транспортировки углеводородов с использованием данных дистанционного зондирования, а также современных методов обработки и анализа космических изображений. Основное внимание уделено определению мест появления естественных газопроявлений (газовых сипов) в акваториях северных морей и выявлению их особенностей (источники происхождения, глубина, характерные размеры, возможности выхода на поверхность и др.), а также анализу возможности регистрации газовых сипов космическими методами.

Материалы, изложенные в настоящей статье, получены в процессе научно-исследовательской работы, выполняемой в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №27 «Фундаментальный базис инновационных технологий прогноза, оценки, добычи и глубокой комплексной переработки

стратегического минерального сырья, необходимого для модернизации экономики России» (проект 2.3.2а).

1. Источники естественных газопроявлений (газовых сипов) в акваториях северных морей

Метановые газовые высачивания (seeping) обнаружены лишь в 1984 г. (Kennicut et al., 1985) и в настоящее время изучены недостаточно полно. Название «холодные сипы» носит условный характер, поскольку температура газовых флюидов, как правило, превышает температуру придонной воды (Леин, Иванов, 2009). Источники естественных газопроявлений распределены в пространстве неравномерно, и их интенсивность может быть самой разной, вплоть до залповых выбросов. По теории вероятности зарегистрировать крупные природные выбросы газа удастся достаточно редко (Богоявленский, 2012).

Генезис метана в сипах может быть различным: диагенетический метан осадков; метан грязевых вулканов; метан, выделяющийся при разложении газовых гидратов. Встречаются также сипы подводных вулканов (Леин, Иванов, 2010).

Метан, попавший в воду, переносится путем диффузии и пузырьковым способом. Диффузия CH_4 в воду является медленным процессом. Далее растворенный CH_4 переносится океаническими течениями. Пузырьковый перенос метана значительно интенсивнее диффузионного. В глубоководной части Северного Ледовитого океана этот процесс может обеспечить вынос метана к поверхности морского льда, если объем пузырьков достаточно велик. В противном случае CH_4 успевает раствориться по мере поднятия пузырьков до полного их исчезновения (Шахова и др., 2009; Шахова, 2010). Метан, попавший на нижнюю границу морского льда, подвергается интенсивному окислению, которое сопровождается выделением сравнительно большого количества тепла. Это способствует изменению реологических свойств ледового покрова, прежде всего прочностных характеристик льда, что отражается на процессах торошения, образования трещин, разводий, каналов (Люшвин, 2013).

Ниже подробнее рассмотрены некоторые источники естественных выходов углеводородных газов в акваториях арктических морей с целью оценки возможности проведения мониторинговых исследований с помощью аппаратуры, установленной на космических носителях.

2. Подводные грязевые вулканы

В настоящее время в Арктике известен всего один подводный грязевой вулкан, открытый в 1995 году между побережьем Норвегии и архипелагом Шпицберген в районе 72°с.ш., 15°в.д. Вулкан был назван Хаакон Мосби (Haakon Mosby) – по имени судна, участвовавшего в этой экспедиции (Vogt et al., 1994).

Вулкан расположен на континентальном склоне Норвегии в верхней части конуса выноса Медвежинского желоба в пределах подводной оползневой долины (Anderson et al., 2009). В рельефе дна вулкан представляет собой округлое образование высотой от 7 до 15 м над изобатой 1250 м. Диаметр этой вулканической структуры ~ 1.4 км (рис. 1).

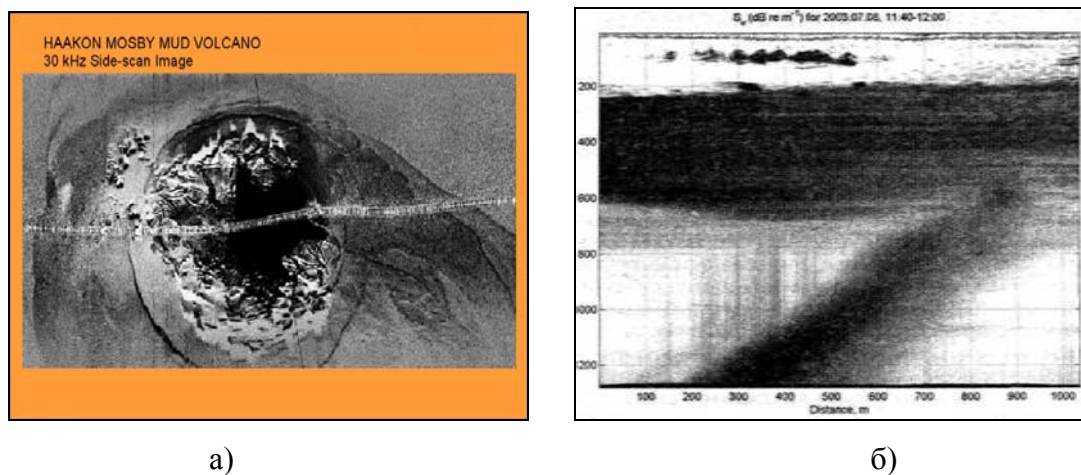


Рис. 1. Изображение подводного грязевого вулкана Хаакон Мосби (а); эхограмма пузырькового облака над донным источником пузырьков (б) (Anderson et al., 2009)

Одной из особенностей грязевого вулкана Хаакон Мосби является мощный тепловой поток. Температура в отложениях кратера вулкана в 1996 г. составляла 15.8 °C (Vogt et al., 1994). По данным более поздних измерений, абсолютная температура пород кратера была еще выше – ~25.8 °C (Kaul et al., 2006). Мощность осадочного чехла в районе этого вулкана ~6 км. Вулкан источает в воду большое количество грязи и газов, более 99% которых составляет метан. Все это поступает из земных недр по каналу, уходящему в глубину на 2–3 км. За пределами высокотемпературной зоны осадки, содержащие углеводороды, сменяются газогидратами в виде белого цемента, линз, пластинок, чешуек размером от 0.3 до 5 см (Anderson et al., 2009).

В 2005 г. с помощью эхолотационной съемки севернее центра подводного грязевого вулкана на расстоянии 150–200 м друг от друга были обнаружены несколько трещин и круглых воронок диаметром 0.2–0.6 м, из которых вытекали струи пузырьков. Диаметр рассеивающего облака имел форму пятна размером в поперечнике 400–500 м. Ни на одной из эхограмм область рассеяния не поднимается выше глубин 650–700 м., что соответствует глубине стабильности газовых гидратов для гидрологических условий в этом районе (см. рис. 1б).

3. Покмарки и плугмарки

Покмарки (округлые углубления в рельефе дна) и *плугмарки* (протяженные борозды), в том числе и газогидратоносные, известны в целом ряде арктических акваторий (Hovland, Judd, 1993; Vogt et al., 1994; Mazzini et al., 2004; Judd, Hovland, 2007 и др.). Их формирование связывают с эрозионными процессами, вызванными фокусированной разгрузкой газонасыщенной воды и/или нефти. Покмарки формируются в достаточно мягких морских отложениях и могут достигать более километра в диаметре (Ivanov et al., 2002). Большое количество таких объектов обнаружено на глубине 300 м в районе Штокмановского месторождения.

Размеры плугмарков в ряде случаев достигают нескольких километров в длину, 100–200 м в ширину и 5–10 м в глубину (Богоявленский, 2012). На геоакустических профилях в Обской губе были выявлены совсем небольшие рытвины, глубиной до 5 м и шириной 25–30 м, расположенные в глубокой части акватории с глубинами 25 м и более (Иванов, 2002).

Кроме отмеченных районов в пределах восточной части Баренцевоморского шельфа, подобные микроформы рельефа наблюдались также на юге и западе Баренцева моря. Участки развития этих микроструктур пространственно совпадают с полями распространения на дне большого количества железо-марганцевых конкреций, возникновение которых обычно связывают с глубинными флюидами, поднимающимися по проницаемым зонам в земной коре (Леин, Иванов, 2009).

На дне Норвежского моря обнаружены многочисленные нефтяные и газовые поля, с которыми, как правило, связывают (Judd, Hovland, 2007) распространение покмарков (рис. 2).

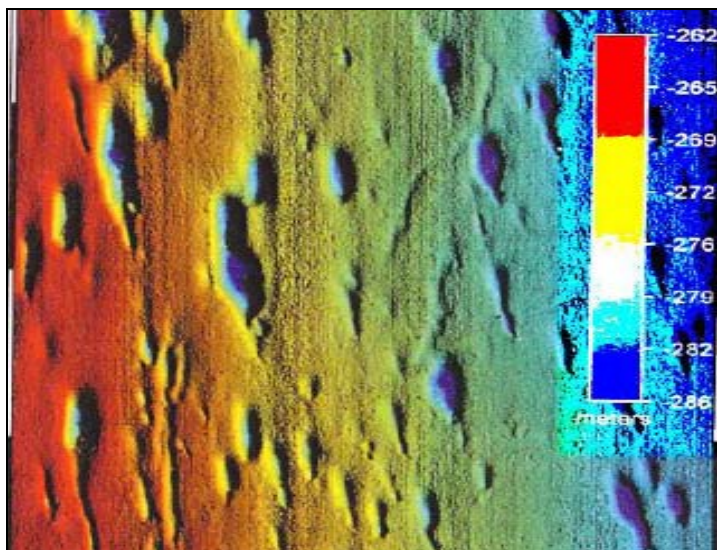


Рис. 2. Продолговатые покмарки (elongated rockmarks) на дне Норвежского моря (Judd, Novland, 2007)

Поля гигантских покмарков зафиксированы в Зюйдкапском желобе (некоторые покмарки достигают 500 м в диаметре при глубине 10 м) (Леин, Иванов, 2010). Диаметр покмарков районов Сторегга и Ньегга составляет 190 м (Anderson et al, 2009). Небольшие структуры (до нескольких метров в диаметре), напоминающие покмарки, зафиксированы в районе хребта Вестнезе (76° с.ш.). В придонном слое воды над ними была зарегистрирована повышенная концентрация метана (Vogt et al., 1994; Леин и др., 2000; Пименов и др., 2000). У берегов Норвегии на дне встречаются также положительные структуры высотой 30 м и шириной в несколько сотен метров. Их образование связывают с движением поровых вод с легкими углеводородами, мигрирующих из осадков и просачивающихся через тонкий покров (менее 10 м) четвертичных отложений (Judd, Novland, 2007).

В ходе геофизических исследований в 2003 и 2009 гг. (Mayer et al., 2008; Judd, Novland, 2007) в Чукотском море на глубине более 400 м было обнаружено более 50 донных воронок, напоминающих покмарки (рис. 3). Воронки имеют диаметр 150–850 м, глубина в их центральной части – 40–50 м. Наблюдаемое расположение воронок связывают с наличием разломов в подстилающих отложениях, а некоторые наиболее крупные покмарки расположены в вероятных точках их пересечения. Признаков присутствия газа в отложениях на сонограммах через исследованные воронки замечено не было (Ласточкин, Нарышкин, 1989; Виноградов и др., 2004).

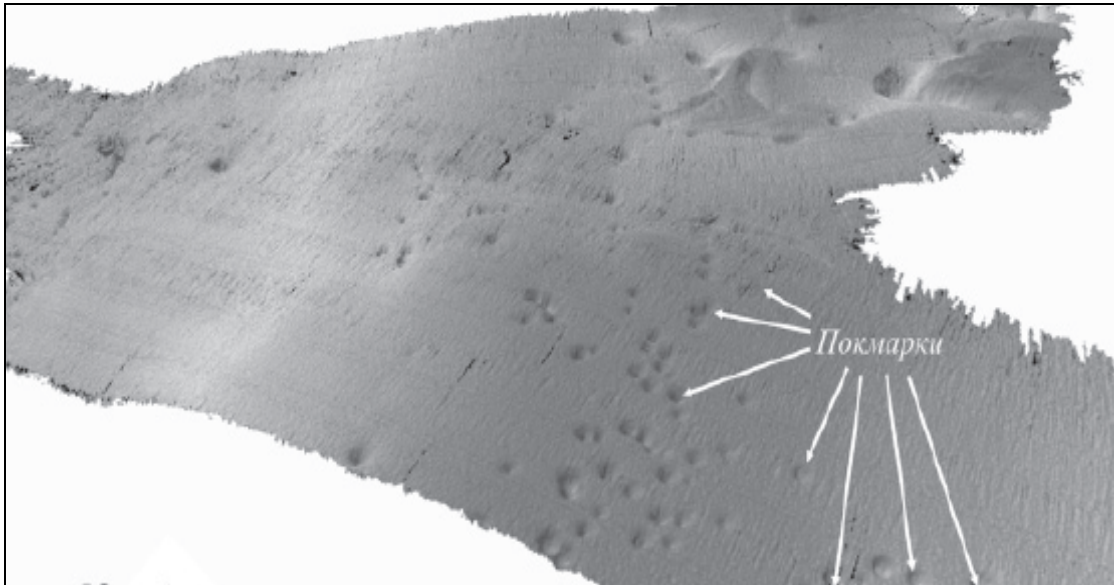


Рис. 3. Поля покмарков в северной части Чукотского моря по данным съемки многолучевого эхолота (<http://www.ccom-jhc.unh.edu>)

В сериях морских экспедиций было установлено (Шнюков, 2009), что биологическая активность вод над газопроявлениями превышает фоновое значение на 1–2 порядка. Флюидопроявление на дне сопровождается не только выходом пузырьков газа, но и выносом вместе с ними питательных веществ из осадков, что способствует развитию бентосных и планктонных сообществ и является критерием обнаружения потоков флюидов при дистанционном зондировании (Аэрокосмический..., 2012).

Грязевой вулканизм и образование покмарок генетически тесно связаны с сейсмическими событиями. В период подготовки землетрясений происходит активизация вулканической деятельности и содержание некоторых компонентов в составе выделяемых флюидов (газов, вод) аномально увеличивается (Леин, Иванов, 2009).

4. Газовые гидраты в шельфовых зонах арктических морей

В настоящее время в мире выявлено более 220 залежей гидратов метана в шельфовых зонах морей и океанов. В Северном Ледовитом океане наиболее значимыми являются (Анфилатова, 2008; <http://www.globalcarbonproject.org/news/MethaneHydrates.ht>):

1. Грязевой подводный вулкан Хаакон Мосби (Баренцево море). Газогидраты залегают на глубине 1250 м (см. п. 2).
2. Район в дельте реки Маккензи Канадской Арктики (газогидратное скопление Маллик). Интервал залегания 880–1100 м; мощность зоны, содержащей газогидраты, – 200 м; Координаты: 69.5° с.ш.; 139.2° з.д.

3. Континентальный склон Аляски (море Бофорта). Основной ареал залегания газовых гидратов расположен между крупнейшими нефтегазовыми месторождениями Прадхо-Бей и Купарук Ривер в 70–200 км от берега. Газогидраты приурочены к шести горизонтам песчаников и залегают в интервале глубин от 550 до 700 м; мощность слоев – от 7 до 30 м. Координаты: 70.1°–70.4° с.ш.; 148.4°–149.1° з.д.

На шельфе Арктических морей России сложились все необходимые условия для образования газовых гидратов (Богоявленский, 2012).

5. Струйная эмиссия метана из осадочной толщи донных отложений

В ряде российских и международных экспедиций на шельфе моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря выявлена широкомасштабная эмиссия газа (преимущественно метанового состава). Потоки метана в водной толще (газовые факелы), выходящего из донных отложений, наблюдались при высокоразрешающей сейсморазведке и на эхограммах (Шахова, 2009; Шахова, 2010). На отдельных участках исследователи наблюдали бурление морской поверхности, названное «метановыми печными трубами». Высвобождение метана было таким интенсивным, что газ не успевал раствориться в воде и выходил пузырьками на поверхность. На некоторых участках концентрация метана в 100 раз превышала фоновые значения. На относительно небольшой площади порядка 10000 квадратных миль было зарегистрировано более сотни «фонтанов», вырывающихся сквозь толщу воды в атмосферу (рис. 4). Диаметр просачивающихся со дна пузырей газа достигал примерно 1000 м (Юсупов и др., 2010).

Измерения концентрации метана на разных уровнях шельфа – от придонного слоя до поверхности – показали, что содержание этих газов в морях Восточной Арктики очень неоднородно. Мощные выбросы метана выявлены на участках, подверженных береговой и донной эрозии, а также в зонах повышенной тектонической и сейсмической активности.

Самые высокие концентрации метана были зафиксированы (В.И. Сергиенко и др., 2012 г.) на разрушающемся острове Муостах в заливе Буор-Хая моря Лаптевых (рис. 5).

На Восточно-Сибирском шельфе зоны разломов могут формировать области концентрированной разгрузки, через которые возможны массивные выбросы газа из восходящего газового фронта. Вероятно, именно такое явление было зарегистрировано вблизи о-ва Беннетта в 80-е годы прошлого столетия (Масуренков и др., 2012).



Рис. 4. Аномальное выделение метана в морях Восточной Арктики
(<http://www.oceanology.ru/goto/http://www.nature.com>)

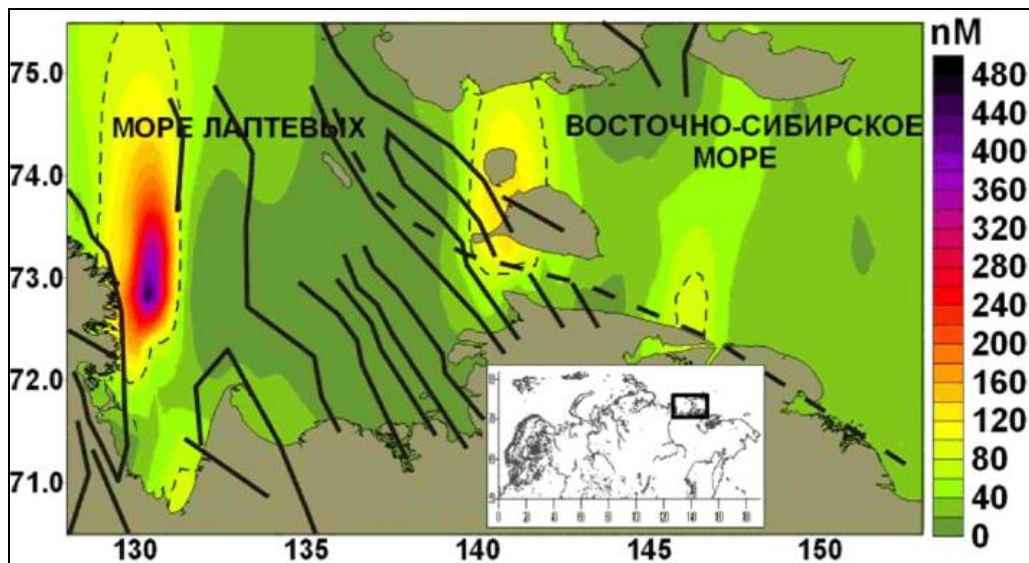


Рис. 5. Концентрация метана в водной толще в морях Восточной Арктики
(В.И Сергиенко и др., 2012 г.)

6. Газовые шлейфы у острова Беннетта архипелага Де-Лонга в Восточно-Сибирском море

Впервые газовый шлейф у о-ва Беннетта был выявлен в 1983 году по результатам дешифрирования космического снимка, полученного в тепловом ИК-диапазоне спектра. Американские геофизики указывали на вулканическую природу шлейфообразования.

Позднее анализ архивных космических снимков о-ва Беннетта, проведенный в Институте вулканологии ДВО РАН, показал, что за период с 1973 по 1986 г. было обнаружено около 150 подобных событий (Кузьмин, Овсянников, 2012). В последующем было зарегистрировано еще несколько подобных явлений (http://www.polarpost.ru/Library/Kupetskiy/text-zagadki_beennetta.html), последнее из которых датируется 14 февраля 2013 года (рис. 6).

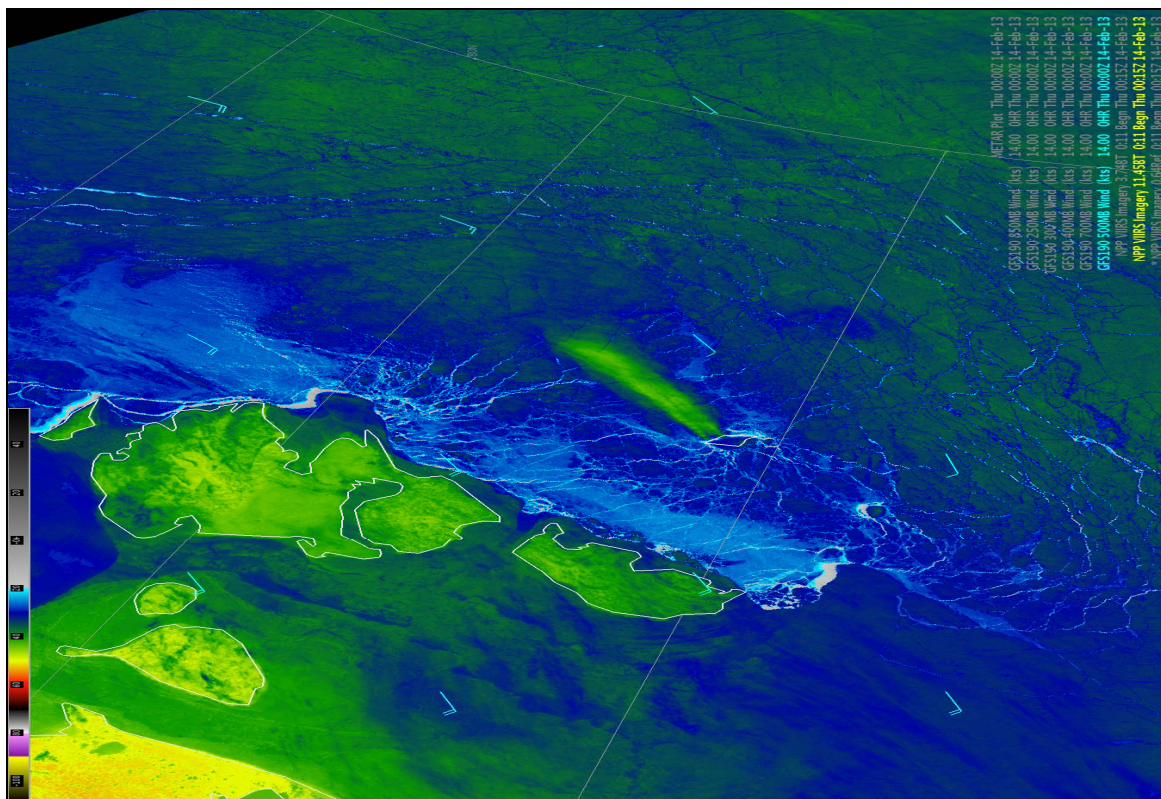
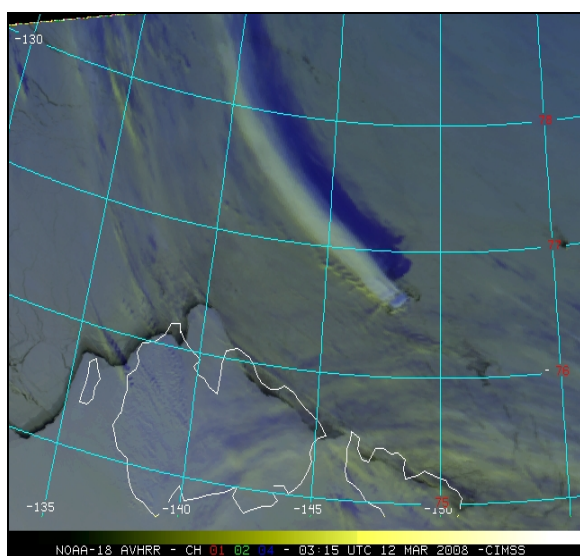


Рис. 6. Газовый шлейф у о-ва Беннетта 14.02.13 по данным спутника Suomi NPP VIIRS 11.45 μm IR (<http://npp.gsfc.nasa.gov>)

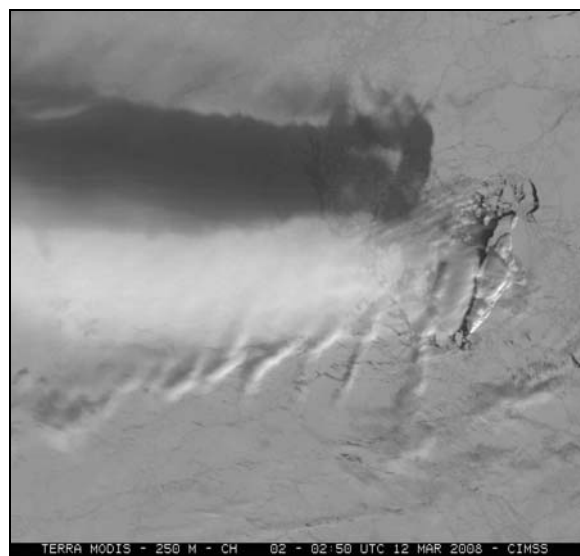
На вулканическую природу шлейфообразования у о-ва Беннетта указывают и данные о газовом составе хвостов шлейфов: резкое возрастание концентраций аэрозолей, углекислого газа и сульфатов – компонентов, характерных для вулканических эксгаляций (Федоров и др., 2005). Длина шлейфов обычно составляет сотни километров. В 2008 г. был зафиксирован шлейф длиной более 1000 км (рис. 7).

Анализ подводного рельефа у острова Беннетта и сопоставление его результатов с данными батиметрии за 1974 год показали, что процесс шлейфообразования у этого острова сопровождается изменениями подводного рельефа, которые связывают с образованием подводных конусов, подобных конусам вулканов. Высота этих конусов

составляет не более 10 м, и они не достигают поверхности воды (глубина моря здесь более 30–40 м). Местоположение обнаруженных конусов точно соответствует положению мест шлейфообразования (76.5°N; 149°E). Именно в этом районе (предполагаемой зоне ареального вулканизма с повышенным тепловым потоком) расположена Великая Сибирская полынья (Масуренков и др., 2012).



а)



б)

Рис. 7. Газовые шлейфы у о-ва Беннетта 12.03.08:
а) по данным спутника NOAA-18/аппаратура AVHRR; б) по данным спутника
TERRA/аппаратура Modis (<http://npp.gsfc.nasa.gov>)

7. Заприпайные полыньи в Северном Ледовитом океане

Время от времени в арктических морях возникают обширные пространства открытой воды – заприпайные полыньи. В Арктическом бассейне участки открытой воды или тонких (до 30 см) припайных льдов составляют от 3 до 7% (Гуков, 2009). В юго-восточной части Баренцева моря зафиксирована Печорская полынья. К северо-западу от Новой Земли часто образуется Западно-Новоземельская заприпайная полынья. В Карском море выделяются Амдерминская, Ямальская, Обь-Енисейская и Западно-Североземельская полыньи. Целая система таких объектов образуется в море Лаптевых. Обычно среди них выделяют Восточно-Североземельскую, Таймырскую, Ленскую и Новосибирскую полыньи. Последняя расположена к северу от Новосибирских островов и в отдельные годы может занимать огромные площади двух морей – Лаптевых и Восточно-Сибирского (Атлас..., 2011).

В Центральной Арктике, к северу от Земли Гранта (о-в Элсмир), на широте около 84° располагается Великая полынья, в северной части моря Баффина наблюдается Северная вода, а в море Бофорта в отдельные годы возникает Аляскинская полынья. Отсутствуют заприпайные полыньи в восточной части Восточно-Сибирского моря и на западе Чукотского моря (Атлас..., 2011).

Совершенно уникальное явление – Великая Сибирская полынья (Атлас..., 2011), которая представляет собой непрерывную полосу открытой воды и молодых льдов, регулярно образующихся за внешней кромкой припая на участке от о-ва Большой Бегичев в море Лаптевых до Медвежьих о-вов в Восточно-Сибирском море (рис. 8).

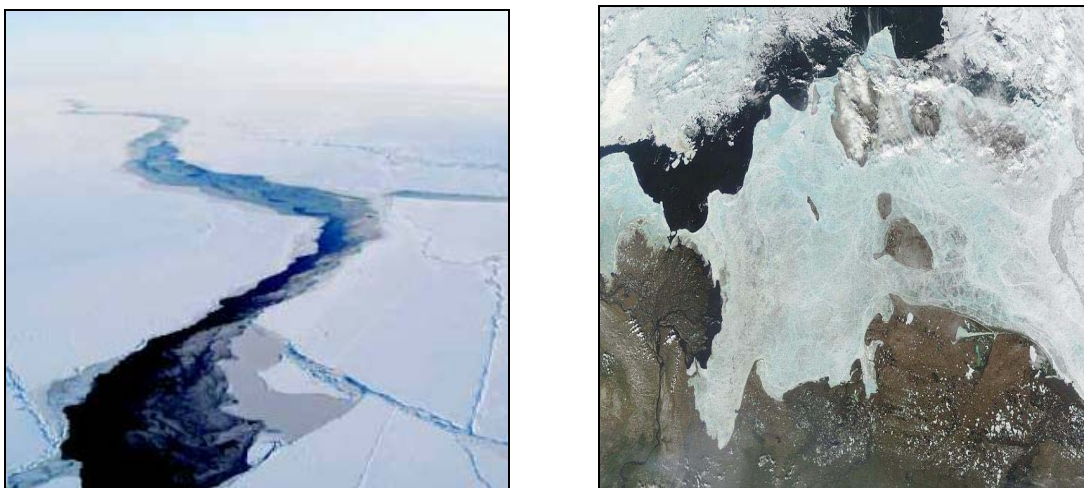


Рис. 8. Великая Сибирская полынья: а) вид с вертолета; б) вид со спутника TERRA/аппаратура Modis

Феномен открытой воды в Арктике связывают с особенностями гидродинамики морских течений и атмосферной циркуляцией в этих районах, влиянием проникающего до моря Лаптевых Северо-Атлантического течения, метановыми флюидами и современным вулканизмом (Гуков, 2009; Люшвин, 2013; Добрынин, 2011; Масуренков и др., 2012).

8. Анализ возможности регистрации и выявления газовых сипов по космическим изображениям

8.1. Признаки источников дегазации и их проявлений на поверхности и в водной толще

По результатам анализа, проведенного выше, были выбраны участки на арктическом шельфе, где могут наблюдаться естественные газопроявления с целью проведения мониторинга с использованием космических средств (см. табл. 1).

Источники дегазации, координаты и признаки проявления газовых сипов на водной поверхности

Источники дегазации	Координаты	Признаки проявления на поверхности и в водной толще
Подводный газовый вулкан Наакон Mosby (Баренцево море)	72° с.ш., 15° в.д.	Куполообразные выбросы газа; изменение температуры поверхности; повышенная мутность; аномальное развитие фитопланктона; наличие пузырьков в водной толще
Покмарки хребта Вестнезе (Норвежское море)	76° с.ш., 10° в.д.	Куполообразные выбросы газа; аномальное развитие фитопланктона; наличие пузырьков в водной толще
Месторождения газовых гидратов на континентальном склоне Аляски (море Бофорта)	70.1°–70.4° с.ш.; 148.4°–149.1° з.д.	Куполообразные выбросы газа; наличие пузырьков в водной толще и на поверхности; наличие пузырьков и трещин в ледовом покрове
Струйная эмиссия метана из осадочной толщи донных отложений (море Лаптевых)	71.7° с.ш., 130.4° в.д.	Наличие пузырьков газа в водной толще и на поверхности; наличие пузырьков и трещин в ледовом покрове
Газовые шлейфы у о-ва Беннетта (Восточно-Сибирское море)	76.5° с.ш.; 149° в.д.	Газовые шлейфы

Выходы струйных метановых газовыделений проявляются на морской поверхности за счет различных механизмов. Физические основы их дистанционного обнаружения подробно изложены в работах (Бондур, 2001; 2004; 2010; 2012; Бондур, Гребенюк, 2001; Бондур, Кузнецова, 2012; Бондур, Зубков, 2005; Бондур и др., 2006; Bondur, 2011).

8.2. Космические методы регистрации газопроявлений в море

Исходя из технических характеристик существующей дистанционной аппаратуры (пространственное разрешение, период обновления информации, ширина полосы обзора и др.), доступности, простоты обработки и интерпретации данных, а также вероятности обнаружения и правильной идентификации объектов (см. табл.2), в настоящее время при исследовании газовых сипов на водной поверхности наиболее эффективными средствами

являются радиолокационные, оптические и тепловые датчики, установленные на аэрокосмических носителях (Бондур, 2010; 2012; Бондур, Кузнецова, 2012).

Таблица 2

Признаки газопроявлений на поверхности и в водной толще и методы их регистрации с использованием космической съемки

№ п.п.	Признаки газопроявлений на поверхности и в водной толще	Космические методы регистрации
1	Изменение температуры водной поверхности	Тепловая съемка
2	Зоны повышенной мутности	Многоспектральная съемка в оптическом диапазоне среднего пространственного разрешения
3	Аномальное развитие фитопланктона	Многоспектральная съемка в оптическом диапазоне среднего и низкого пространственного разрешения
4	Наличие пузырьков газа на поверхности воды	Радиолокационная съемка при скорости ветра 0-0.5 балла (аномалии положительного контраста); оптическая съемка высокого пространственного разрешения в зоне блика
5	Наличие пузырьков газа в водной толще	Радиолокационная съемка путем регистрации на изображении внутренних волн, возникающих при наличии градиента плотности по глубине
6	Куполообразные выбросы газа	Оптическая съемка высокого пространственного разрешения; радиолокационная съемка высокого пространственного разрешения при вертикальной поляризации сигнала
7	Наличие пузырьков и трещин в ледовом покрове	Оптическая съемка высокого пространственного разрешения при благоприятных метеоусловиях
8	Газовые шлейфы	Данные метеорологических спутников в видимом и ИК-диапазонах спектра

В работе (Бондур, Кузнецова, 2012) приведены основные достоинства и недостатки (ограничения) каждого из методов. Ниже приводятся объяснения подходов к выбору космических методов для исследования естественных газопроявлений в море.

8.3. Особенности регистрации газопроявлений в море космическими методами

По спутниковым данным в оптическом диапазоне спектра среднего и низкого пространственного разрешения (Аэрокосмический..., 2012; Бондур, 2004; 2010; 2012; Бондур и др., 2006; Лаврова и др., 2011; Bondur, 2011) хорошо прослеживаются пространственное распределение и скорость формирования и распространения фитопланктона в шельфовых зонах (рис. 9 и 10).

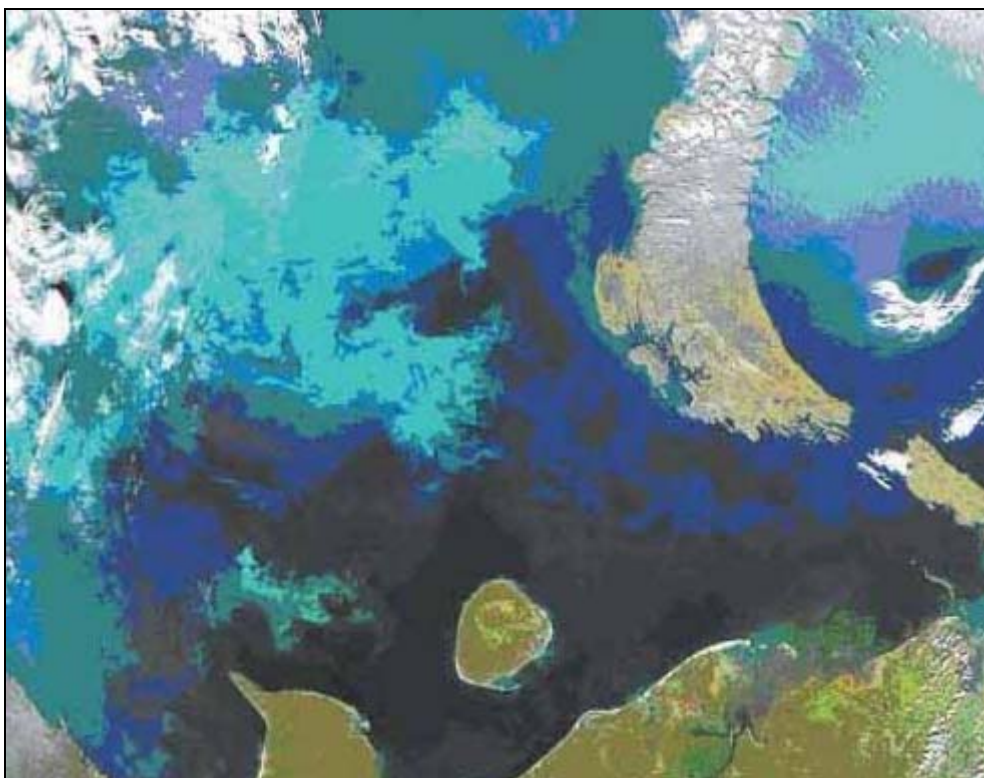


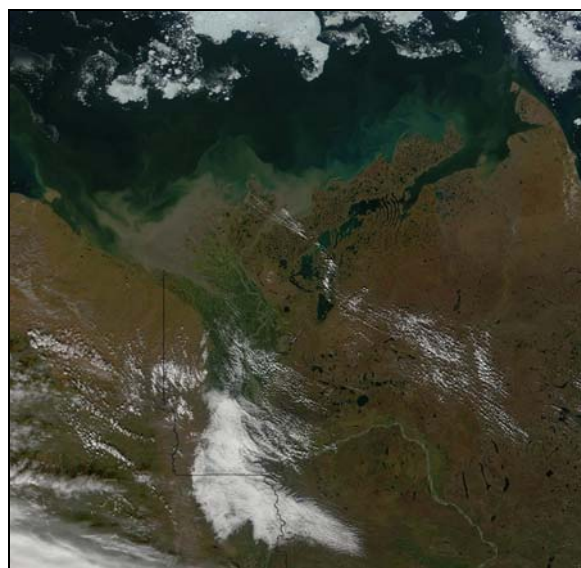
Рис. 9. Массовое развитие фитопланктона по данным спутника SeaWiFS (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>)

Кроме этого, спутниковые оптические данные позволяют проводить измерения параметров водной среды, таких, например, как цветовые характеристики океана, обнаруживать взвешенные вещества и области повышенной мутности и др. (Бондур, 2004; 2010; 2012; Бондур, Зубков, 2005; Бондур и др., 2006; Bondur, 2010).

Ввиду высокой пространственной изменчивости таких явлений, как куполообразные выбросы газа, для морских исследований могут использоваться спутниковые приборы высокого пространственного разрешения видимого диапазона спектра.



а)



б)

Рис. 10. Спутниковые оптические изображения
а) берег Байдарацкой губы, изображение со спутника SPOT- 5;
б) дельта реки Маккензи, изображение со спутника TERRA/аппаратура Modis
(<http://www.gisa.ru/>)

Многоспектральная и гиперспектральная космические съемки с высоким и средним пространственным разрешением (при условии проведения синхронных подспутниковых контактных измерений) позволяют определять абсолютные значения ряда характеристик морской среды по измерениям цвета океана (мощности восходящего излучения в узких спектральных интервалах) и в дальнейшем проводить анализ пространственно-временной изменчивости этих параметров (Бондур, 2004; 2014; Бондур, Зубков, 2005; Бондур и др., 2006; Bondur, 2011).

Другой подход, не связанный с измерением абсолютных величин и ориентированный, в большей степени, на выявление различных динамических процессов в океане, основан на использовании характеристик относительной изменчивости сигналов обратного рассеяния в различных участках спектра электромагнитных волн (Бондур, 2014; Бондур, Зубков, 2005). В качестве такой характеристики может быть использован индекс цвета:

$$I_{ц} = B(450)/B(520),$$

где $B(450)$ и $B(520)$ – яркости восходящего из морской среды излучения на длинах волн 450 и 520 нм при наблюдении в надир.

Индекс цвета получил распространение как самостоятельная характеристика, используемая для представления результатов исследований океана и их интерпретации на качественном уровне (Оптика океана, 1983). Этот индекс чувствителен к множеству факторов, определяющих состояние морской среды. Можно предложить и другие варианты индекса цвета с использованием иных участков спектра. Смысловая нагрузка индекса в каждом конкретном случае будет зависеть от сочетания длин волн (Бондур, 2004; Бондур, Зубков, 2005; Бондур, Воробьев, 2012).

Рассмотрим некоторые основные особенности радиолокационного обнаружения естественных газовых проявлений. При слабом волнении или штиле в местах выхода естественных газовых компонент при наличии пузырьковой составляющей будут наблюдаться аномалии положительной контрастности по отношению к уровню собственного шума приемника (Бондур, 2004; 2010; 2012). Возникновение газовых компонент в толще воды приводит к появлению градиента плотности по глубине, что может вызвать генерацию внутренних волн (рис. 11), которые, взаимодействуя с поверхностным волнением, приводят к появлению гладких полос (сликов), что в свою очередь отразится на радиолокационном изображении (Бондур, 2004; 2010; 2012; Бондур, Гребенюк, 2001).

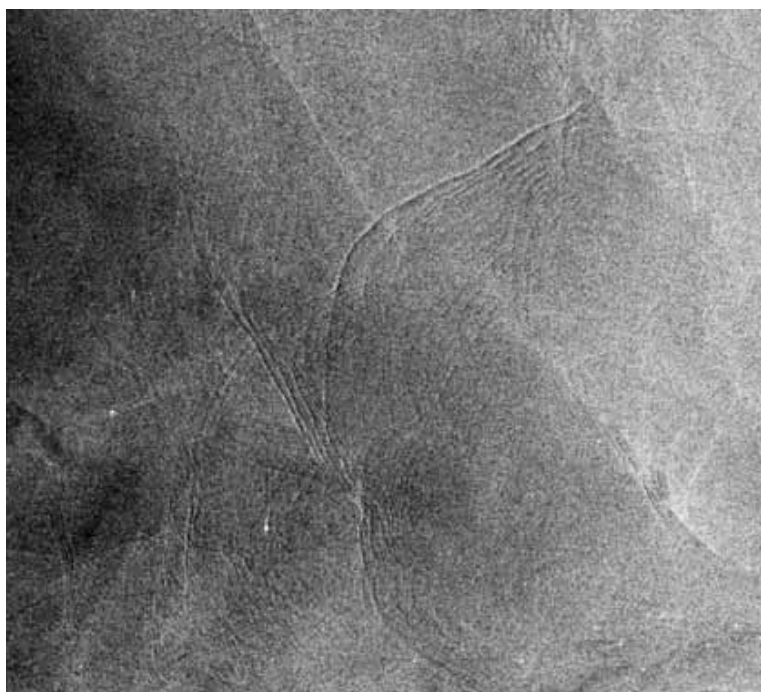


Рис. 11. Пример проявления внутренних волн в проливе Скагеррак. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat

Мощность обратно-рассеянного сигнала, попадающего в приемную антенну РЛС, зависит от поляризации излучения и от взаимного направления поляризаций при излучении и приеме (Бондур, 2004; Бондур, Замшин, 2012). В общем случае, коэффициент рассеяния водной поверхности при вертикальной поляризации выше, чем при горизонтальной или перекрестных поляризациях.

Вертикальная поляризация (VV) применяется для изучения многочисленных процессов и явлений, которые проявляются на морской поверхности посредством модуляции гравитационно-капиллярной составляющей спектра поверхностного волнения (Бондур, 2004; 2012; Bondur, 2011). Горизонтальная поляризация (HH), будучи менее чувствительной к вариациям мелкомасштабной шероховатости морской поверхности, широко применяется для наблюдения морских льдов и разделения радиолокационных образов ледяного покрова и открытой воды (Бондур, Замшин, 2012). Поскольку интенсивность рассеяния морской поверхностью существенно понижается при использовании излучения и приема на перекрестных поляризациях (VH и HV), такие режимы используются для выделения на морской поверхности объектов, обуславливающих многократное рассеяние, таких, например, как корабли, объекты нефтегазовой инфраструктуры, деформации ледового покрова (Бондур, 2004; 2010; 2012; Бондур, Замшин, 2012; Лаврова и др., 2011).

При проведении мониторинга газопроявлений на шельфе арктических морей должны привлекаться данные метеорологических спутников и иная сопутствующая геофизическая и картографическая информация.

Для решения задач дистанционной регистрации газовых сипов также важно использовать различные подходы к обработке и анализу спутниковых изображений с целью получения требуемых характеристик (Бондур, 2014; Бондур, Воробьев, 2012).

Комплексное использование данных, различных по своей физической природе, предоставит возможность более полно восстановить целостную картину происходящих процессов и явлений в шельфовых зонах Арктики.

Заключение

1. Проанализированы особенности естественных газопроявлений (сипов) в акваториях арктических морей: источники происхождения, глубина, размеры, возможности выхода на поверхность и др. Выявлены характерные признаки их проявлений на поверхности и в водной толще.

2. Выбраны участки на Арктическом шельфе, где могут наблюдаться естественные газопроявления, включая подводные грязевые вулканы, залежи газовых гидратов, покмарки и другие источники, с целью проведения их последующего мониторинга с использованием космических средств.
3. Проведен анализ возможностей регистрации и выявления газовых сипов по различным типам космических изображений. Исходя из технических особенностей существующей дистанционной аппаратуры, доступности, простоты обработки и интерпретации данных, а также высокой вероятности обнаружения и правильной идентификации образов, показано, что в настоящее время наиболее эффективными средствами исследования подобных объектов являются радиолокационные, многоспектральные и гиперспектральные оптические и тепловые датчики.
4. Показано, что при проведении мониторинга газопроявлений на шельфе арктических морей целесообразно привлекать данные различных спутников и иную сопутствующую геофизическую и картографическую информацию. Комплексное использование данных, различных по своей физической природе, позволит восстановить целостную картину процессов и явлений, происходящих в шельфовых зонах российской Арктики.

ЛИТЕРАТУРА

- Анфилатова Э.А.* Аналитический обзор современных зарубежных данных по проблеме распространения газогидратов в акваториях мира // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008. № 3. С. 1–8.
- Атлас биологического разнообразия морей и побережий Российской Арктики / под ред. В.А. Спиридонова, М.В. Гаврило, Е.Д. Красновой, Н.Г. Николаевой. М.: WWF России, 2011. 64 с.
- Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / под ред. В.Г. Бондура. М.: Науч. Мир, 2012. 558 с.
- Богоявленский В.И.* Перспективы и проблемы освоения месторождений нефти и газа шельфа Арктики // Бурение и нефть. 2012. Ноябрь. С. 4–10.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии. М., 2004. Т. 1: Физика. Химия. Биология. С. 55–117+8 стр. цв. вклеек.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.

- Бондур В.Г.* Аэрокосмический мониторинг нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса. Реальности и перспективы // Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / под ред. В.Г. Бондура. М., 2012. С. 15–37.
- Бондур В.Г.* Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических и природно-ресурсных целях // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1995. № 2. С. 14–38.
- Бондур В.Г.* Проблемы аэрокосмического мониторинга океана. // Исследования в области океанологии, физики атмосферы, географии, экологии, водных проблем и геокриологии: сб. докл. М., 2001. С. 87–94.
- Бондур В.Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С.3–17.
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е.* Методы обработки аэрокосмических изображений, полученных при мониторинге объектов нефтегазовой отрасли // Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / под ред. В.Г. Бондура. М., 2012. С. 397–411.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В.* Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49–67.
- Бондур В.Г., Замшин В.В.* Космический радиолокационный мониторинг морских акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов // Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / под ред. В.Г. Бондура. М., 2012. С. 257–273.
- Бондур В.Г., Зубков Е.В.* Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многозональным спутниковым изображениям высокого разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54–61.
- Бондур В.Г., Кузнецова Т.В.* Исследование естественных нефте- и газопроявлений на морской поверхности по космическим изображениям // Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / под ред. В.Г. Бондура. М., 2012. С. 272–287.

- Бондур В.Г., Килер Р.Н., Старченков С.А., Рыбакова Н.И.* Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий океана с использованием многоспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 6. С. 42–49 + 9 стр. цв. вклеек.
- Виноградов В.А., Гусев Е.А., Лопатин Б.Г.* Возраст и структура осадочного чехла Восточно-Арктического шельфа России // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб., 2004. Вып. 5. С. 202–212.
- Гуков А.Ю.* Великая Сибирская полынья // Наука и техника в Якутии. 2009. № 1. С. 99–103.
- Добрынин Д.В.* Анализ динамических процессов в Арктике на основе данных дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2011. Вып. 10. С. 7–16.
- Иванов Г.И.* Методология и результаты экогеохимических исследований Баренцева моря. СПб.: ВНИИОкеанология, 2002. 155 с.
- Кузьмин Ю.Д., Овсянников А.А.* Современная активность эндогенных процессов у острова Беннетта (Архипелаг Де-Лонга, Арктика). М.: ИФЗ РАН, 2012. 160 с.
- Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
- Ласточкин А.Н., Нарышкин Г.Д.* Новые представления о рельефе дна Северного Ледовитого океана // Океанология. 1989. Т. XXIX, вып. 6. С. 968–973.
- Лейн А.Ю., Иванов М.В.* Биохимический цикл метана в океане // Природа. 2010. № 2. С. 12–21.
- Лейн А.Ю., Иванов М.В.* Биохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. 576 с.
- Лейн А.Ю., Пименов Н.В., Саввичев А.С., Павлова Г.Л., Русанов И.М., Миллер Ю.М., Иванов М.В.* Геохимические особенности диагенеза голоценовых отложений в районе архипелага Шпицберген // Океанология. 2000. Т. 40, № 2. С. 247–256.
- Люшвин П.В.* Метанотрофное таяние льда // Электронное научное издание Альманах пространство и время. 2013. Т. 2, вып. 1. Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/journal/n/elektronnoe-nauchnoe-izdanie-almanah-prostranstvo-i-vremya>.
- Масуренков Ю.П., Собисевич А.Л., Петрова В.В., Слезин Ю.Б., Флеров Г.Б., Шувалов Р.А., Кузьмин Ю.Д., Овсянников А.А.* Современная активность эндогенных процессов у о. Беннетта (архипелаг Де Лонга, Арктика). М.: ИФЗ РАН, 2012. 160 с.

- Оптика океана. Т.1. Физическая оптика океана / под ред. А.С. Моница. М.: Наука, 1983. 372 с.
- Оценка климатических воздействий в Арктике. // Под редакцией Хассол С. АСИА, Изд-во Кэмбриджского ун-та, 2004. 144 с.
- Пименов Н.В., Саввичев А.С., Русанов И.М., Леин А.Ю., Иванов М.В.* Микробиологические процессы цикла углерода и серы на холодных метановых сипах Северной Атлантики // Микробиология. 2000. Т. 69, № 6. С. 831–843.
- Савин А.И., Бондур В.Г.* Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 46–62.
- Федоров П.И., Флеров Г.Б., Головин Д.И.* Новые данные о возрасте и составе вулканических пород острова Беннетта (Восточная Арктика) // Докл. РАН. 2005. Т. 400, № 5. С. 666–670.
- Шахова Н.Е.* Метан в морях Восточной Арктики: автореф. дисс.... д.г.-м.н. М.: Дальнаука, ДВО РАН, 2010. 48 с.
- Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П.* Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестн. РАН. 2009. Т. 79, № 6. С. 507–518.
- Шнюков Е.В.* Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану // Гідроакуст. журн. 2009. № 6. С. 42–55.
- Юсупов В.А., Салюк А.Н., Карнаух В.Н., Семилетов И.П., Шахова Н.Е.* Обнаружение областей пузырьковой разгрузки метана на шельфе моря Лаптевых в Восточной Арктике // Докл. РАН. 2010. Т. 430, № 1.
- Andersen C., Boetius A. et al.* Biodiversity of cold seep ecosystems along the European margins // *Oceanography*. 2009. Vol. 22. P. 119–135.
- Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // *Waste Water – Evaluation and Management*. Croatia, 2011. P. 155–180. – Режим доступа: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>.
- Hovland M., Judd A.G., Burke P.A.* The global flux of methane from shallow submarine sediments // *Chemosphere*. 1993. Vol. 26. P. 559–578.

- Ivanov M.V., Pimenov N.V., Rusanov I.I., Lein A.Yu.* Microbial processes of the methane cycle at the North-western shelf of the Black Sea // *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.* 2002. Vol. 54. P. 589–599.
- Judd A., Hovland M.* Seabed fluid flow. The impact on Geology, Biology and the Marine Environment // Cambridge: Cambridge University Press. 2007. 475 p.
- Kaul N., Foncher Y.-P., Heesemann M.* Estimating mud expulsion rates from temperature measurements on Haakon Mosby Mud Volcano, SW Barents Sea // *Mar. Geol.* 2006. Vol. 229. P. 1–14.
- Kennicut M.C, Brooks J.M., Bidigare R.J.R.* et al. Vent type taxa in a hydrocarbon seep region on the Louisiana slope // *Nature.* 1985. Vol. 317. P. 351–353.
- Mazzini A., Ivanov M.K., Parnell J., Stadnitskaya A., Cronin B.T., Poludetkina E., Masurenko L., van Weering T.C.E.* Methane-related authigenic carbonates from the Black Sea geochemical characterization and relation to seeping fluids // *Mar. Geol.* 2004. Vol. 212. P. 153–181.
- Mayer L.A., Brumley K., Andronikov A., Chayes D.N., Armstrong A.A., Calder B., Hall J.K., Clyde W.C., Bothner W.A., Gardner J.V.* Resent mapping and sampling on the Chukchi Borderland and Alpha / Medeleev Ridge Complex // *Eos Trans. AGU. Fall Meet. Suppl.*, 2008. Vol 89(53). Abstract C11C-0516.
- Vogt P.R., Cherkashev G., Ginsburg G., Lein A.Yu.* et al. Haakon Mosby mud volcano provides unusual example of Venting // *EOS 1997 – Transactions of the American Geophysical Union.* 1994. Vol. 78. P. 556–557.
- <http://npp.gsfc.nasa.gov>
- <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>
- <http://www.ccom-jhc.unh.edu>
- <http://www.gisa.ru>
- <http://www.globalcarbonproject.org/news/MethaneHydrates.ht>
- <http://www.oceanology.ru/goto/http://www.nature.com>
- http://www.polarpost.ru/Library/Kupetskiy/text-zagadki_beennetta.html