

В.Г. Бондур, Т.В. Кузнецова

4.4. Исследование естественных нефте- и газопроявлений на морской поверхности по космическим изображениям

Введение

Освоение топливно-энергетического потенциала шельфовой зоны входит в число приоритетов в развитии и расширенном воспроизводстве минерально-сырьевой базы Российской Федерации. Геолого-геофизическая изученность российского шельфа слабая. Широкомасштабные поисковые и разведочные работы велись здесь только в 80–90-е годы XX столетия. Именно тогда были открыты крупнейшие газовые и газоконденсатные месторождения в Баренцевом море, нефтяные в Печорском, Карском и Охотском морях (Дмитриевский, Белонин, 2004). Поиск и разведка морских месторождений углеводородов (особенно в условиях Арктики) требуют значительных инвестиций. Быстро решить эту задачу с помощью традиционных методов сейсморазведки, используемых для обнаружения месторождений нефти и газа, при имеющихся финансовых ресурсах невозможно. В связи с этим необходимо использовать новые, инновационные подходы к выявлению месторождений углеводородов в морских акваториях, важное место среди которых занимают аэрокосмические методы и технологии. Развитие отечественных космических технологий является неотъемлемой частью курса на инновационное развитие, выбранного нашей страной. Данные космической съемки Земли и специализированные информационные продукты, полученные на ее основе, находят все более широкое применение для решения практических задач нефтегазового комплекса (Бондур, 2010; 2012).

Применение методов космического мониторинга позволяет радикально уменьшить стоимость геологоразведочных работ, обеспечивая проведение комплексного исследования обширных территорий, зачастую недоступных для традиционных методов геологоразведки. Не менее важным обстоятельством является то, что аэрокосмические методы и технологии являются высоко экологичными. При их использовании не нарушается целостность и не происходит загрязнение окружающей природной среды исследуемых территорий. Это особенно важно для планирующегося масштабного освоения арктического шельфа России, где суровые климатические условия региона сочетаются с особой чувствительностью природных комплексов к внешним антропогенным воздействиям (Бондур и др., 2012).

Одним из методов поиска углеводородов в морских акваториях является регистрация из космоса нефте- и газопроявлений. Этот метод исследуется в настоящем разделе книги.

Проблемы исследования

Необходимость исследования особенностей возникновения на морской поверхности естественных нефтяных и газовых проявлений – сипов (от англ. Seep – просачивание) – затрагивает четыре наиболее актуальные в научном и практическом от-

ношении проблемы (Дмитриевский, Баланюк, 2009; Немировская, 2004; Шахова и др., 2009; Соловьев, 2003; Пиковский, 1993; Дегазация Земли..., 2010):

1. Вопросы поиска различных видов углеводородного сырья. Закономерная связь между нефтяными и газовыми проявлениями была выявлена еще на рубеже XIX и XX вв. и подтверждена многолетней практикой разработки известных морских месторождений. Миграционные потоки углеводородов на морском дне за счет их просачивания по разломам и трещинам из нефтегазоносных структур и газогидратных скоплений обнаружены во многих акваториях. Этот процесс идет на площади, составляющей более 10–15% от общей площади Мирового океана, в окраинных и внутриматериковых морях, где распространены нефтегазовые бассейны. Так как просачивания являются конечными пунктами путей миграции нефти и газа, их обнаружение на поверхности с высокой долей вероятности подтверждает наличие углеводородов. Необходимо отметить, что объем и постоянство просачивания не имеют прямого отношения к размеру месторождений, из которых они протекают (Дегазация Земли ..., 2010).

2. Широкое распространение подводных вулканов и газогидратов в донных отложениях морей и океанов помимо позитивной возможности прироста запасов углеводородов создает важнейшую серьезную проблему для промышленного освоения шельфа и эксплуатации месторождений. Разжижение грунта, нестабильность газогидратных отложений являются сложнейшей инженерной задачей при постройке нефтяных платформ и прокладке трубопроводов (Дмитриевский, Белонин, 2004).

3. Проблема, связанная с влиянием эмиссии метана из газогидратов на изменение климата. В последнее десятилетие во многих морях Мирового океана в районах шельфа и континентального склона с помощью акустического зондирования были выявлены газовые «факелы», поднимающиеся в водной толще облака пузырьков. В состав этих пузырьков входит преимущественно метан. Пространственное распределение концентраций отличается выраженной мозаичностью и наличием резких градиентов. Предполагается, что источником эмиссии метана являются газогидраты, которые представляют собой твердые кристаллические вещества – классические представители клатратных соединений и по внешнему виду напоминающие снег или рыхлый лед. Необходимыми условиями для формирования этих веществ являются низкие температуры и высокое давление, достаточное количество воды и газа (Дмитриевский, Баланюк, 2009; Шнюков, 2009; Шахова и др., 2009). Газогидраты образуются в районах распространения многолетней мерзлоты, а наиболее широко – в глубоководных осадках морей и океанов, в пределах зоны термодинамической устойчивости. В океанах эта зона начинается с глубин от 200 м в высоких широтах и до 700 м – в низких. В районах многолетней мерзлоты – почти от поверхности (Дядин, Гуцин, 1998; Кэрролл, 2007).

Повышенное внимание к газогидратам обусловлено не только огромными запасами углеводородов, но и в связи с тем, что газогидраты находятся на границе фазовой устойчивости, изменения температуры или давления могут привести к их разрушению с выделением значительного количества метана, что будет способствовать развитию «парникового эффекта» и соответственно изменению климата планеты. Прежде всего, это относится к арктическим регионам. Ученые считают, что в Арктике встречается немало мест выхода газовых плюмов, некоторые из которых могут быть настолько мощными, что их газы попадают непосредственно в атмосферу. Впрочем, даже полностью растворяясь в воде, испускаемый метан негативно сказывается на

климате планеты. Часть его преобразуется в углекислый газ, вызывающий повышение кислотности вод Мирового океана, губительное для многих хрупких океанических экосистем. Согласно современным оценкам, вклад метана в глобальное потепление составляет ~ 15%, поэтому знание источников и стоков этого парникового газа важно для предсказаний изменений климата (Шахова и др., 2009; Зенкевич, Шафранская, 2009; Круглякова и др., 2009).

4. Помимо того, что нефтепроявления и газовые сипы способствуют индикации залежей углеводородов, они являются еще источниками естественного загрязнения акваторий, которое необходимо знать и учитывать в частных и общих оценках экологического состояния морей.

Многочисленные случаи естественного просачивания нефти на поверхность океана выявлены у берегов Австралии, Аляски, Венесуэлы, Канады, Мексики, США, в Персидском заливе, Каспийском море и т.д. Суммарные объемы самопроизвольного выхода жидких углеводородов иногда составляют значительные величины. Так, поступление в море нефти из линейного участка просачивания протяженностью около 1,5 км в проливе Санта-Барбара (Калифорния), оценивается в 10–15 т в день (Spies et al., 2005). На российском Арктическом шельфе такого рода процессы зафиксированы в Чукотском, Беринговом, Баренцевом и Карском морях (Израэль, Цыбань, 1992; Немировская, 2004).

Учитывая высокую нефтегазоносность Арктического шельфа России (Дмитриевский, Белонин, 2004), следует полагать, что этот природный источник обеспечивает не менее 30% от общего поступления нефти в арктические моря. По последним сводным данным (NAS, 2003), глобальное поступление нефти в морскую среду за счет просачивания с морского дна оценивается величинами от 0,2 до 2 млн. т ежегодно, что составляет около половины суммарного потока нефти в Мировой океан.

Объекты исследования и источники их происхождения

Естественные нефте- и газопроявления пространственно и генетически связаны, главным образом, с грязевыми вулканами, залежами нефти и газа, газогидратами, а также скоплениями свободного газа в верхней части осадочного разреза (Дмитриевский, Баланюк, 2009; Обжиров, 2006; Гранин и др., 2010; Алиев, 2006; Шнюков и др., 1986; Wilson et al, 1974; Etiope, 2009).

Выходы нефти и газа на поверхность воды условно можно разделить на 3 вида (Дегазация Земли..., 2010):

- локальные (сосредоточенные) выходы (грязевые вулканы, грифоны, сальзы, сипы и др.);
- продолжительная разгрузка газа из газогидратоносных осадков;
- площадное поступление углеводородов и их фракций из нефтегазоносных структур через сеть разломов.

Грязевые вулканы представляют собой широко распространенное геологическое явление. В настоящее время на нашей планете насчитывается более 1700 надводных и подводных грязевулканических построек. Подводные грязевые вулканы, как правило, расположены на шельфах океанов и внешних морей. Так же, как холодные потоки углеводородов («сипы»), они выявлены в пределах Западного и Восточного Тихооке-

анского побережий, на шельфах Атлантического океана, Норвежского, Баренцева и других морей. Среди подводных грязевулканических провинций самой крупной является Южно-Каспийская впадина; здесь с помощью эхолотирования, геоакустического профилирования и аэромагнитной съемки выявлено более 136 грязевулканических построек на дне моря (Етиоре, 2009; Холодов, 2002).

Обычная грязевулканическая деятельность четко распадается на два периода (Алиев, 2006). Извержения начинаются с взрыва газов в кратере, разрушения кратерной пробки и поступления на поверхность потоков полужидких грязебрекчий, содержащих большие количества воды, нефти, газа и рассеянных сульфидов. Извержение вулкана обычно длится несколько дней, иногда распаваясь на отдельные фазы, в течение которых преобладают то одни, то другие продукты грязевулканической деятельности. Затем вулкан надолго затихает. На кратерной площадке его появляются многочисленные сальзы и грифоны, непрерывно поставляющие на поверхность жидкую грязь, газ, нефть и воду (Холодов, 2002; Лимонов, 2004).

Как правило, грязевые вулканы значительны по своим размерам – около сотни метров. Мелкие грязевые вулканы называются грязевыми сопками (сальзами). На сопках или вулканах развиваются мелкие эруптивные аппараты – грифоны. Иногда вулканы или сопки располагаются обособленно, но чаще всего группами, имеющими общий глубинный эруптивный очаг. Группу вулканов или сальз называют грязевулканическим очагом (Алиев, 2006). Очаг грязевого вулкана представляет собой тело, сложенное глинами, реже – песками, часто содержащими большое количество твердых обломков вмещающих пород и разжиженных гомогенизированными газоводными флюидами (вода, нефть, газы разного состава). Оно формируется на больших глубинах за счет саморазвития элизионных систем и может при благоприятных обстоятельствах «питать» корни грязевулканических построек (Холодов, 2002).

В развитии подавляющего большинства грязевых вулканов различают три стадии: 1) стадию формирования грязевулканического очага, обусловленную особенностями развития элизионной системы; 2) стадию извержения; 3) стадию пассивной сальзово-грифонной деятельности, видоизменяющую последствия извержения грязевого вулкана и подготавливающую следующее извержение (Лимонов, 2004; Холодов, 2002; Алиев, 2006).

Первая стадия протекает на фоне аккумуляции терригенно-глинистых отложений, углубления впадин и поступления флюидогенерирующих глин в области повышенных температур и давлений.

Вторая стадия начинается с вскрытия грязевулканического очага системой разломов и трещин. Этот процесс сопровождается фазовой дифференциацией вещества и одновременным движением масс от очага к поверхности. Главным фактором, регулирующим извержение, является падение давления, связанное с перемещением грязевулканической массы по каналу от очага к поверхности. Очень большое значение при извержении грязевого вулкана имеет поведение трудносжимаемой воды. Ее резкое выделение из грязебрекчий и уход по каналу вулкана к поверхности может вызвать эффект «бешеной скважины», способствовать образованию дефицита массы на глубине и возникновению кальдеры проседания вокруг кратера вулкана.

Третий сальзово-грифонный этап развития грязевого вулкана, с одной стороны, можно рассматривать как завершение, а с другой – как подготовку следующего извержения.

Главным условием существования грязевого вулканизма является наличие мощного осадочного покрова, содержащего пластичные глинистые толщи, которые при обводнении способны разбухать, внедряться в лежащие выше породы и формировать инъективные дислокации. Активность этого процесса резко возрастает во время землетрясений (Алиев, 2006).

Подводные грязевые вулканы расположены, как правило, на мелководье, приурочены к диапировым структурам и могут служить признаками нефтегазоносности данного участка шельфа. Считается, что грязевые вулканы – это несостоявшиеся нефтяные или газовые месторождения. В спокойном состоянии они выделяют газ, пузыри которого поднимаются на поверхность вместе с мутью, обнаруживая место нахождения вулканов (Дмитриевский, Баланюк, 2009).

Грязевые вулканы являются следствием более общего природного явления – газового вулканизма. Единый механизм газового вулканизма проявляется либо через грязевой вулканизм с выбросами сопочной брекчии, воды, газов и твердых обломков, либо через *газовые факелы (сипы)* (Ратнер, 2007). Факел образуется в результате интенсивного потока свободных газов с поверхности дна, локализованного своеобразным кратером (англ. Rockmark) (Етиоре, 2009). В данном случае выходы газовых струй не сопровождаются выбросом значительных масс сопочной брекчии, поскольку формируются в условиях отсутствия мощных толщ покровных глинистых осадков (см. рис. 4.4.1).

Газовые сипы постоянно испускают метан со дна моря в толщу воды. Газовые факелы, состоящие из газовых пузырей и увлекаемой ими в восходящем потоке морской

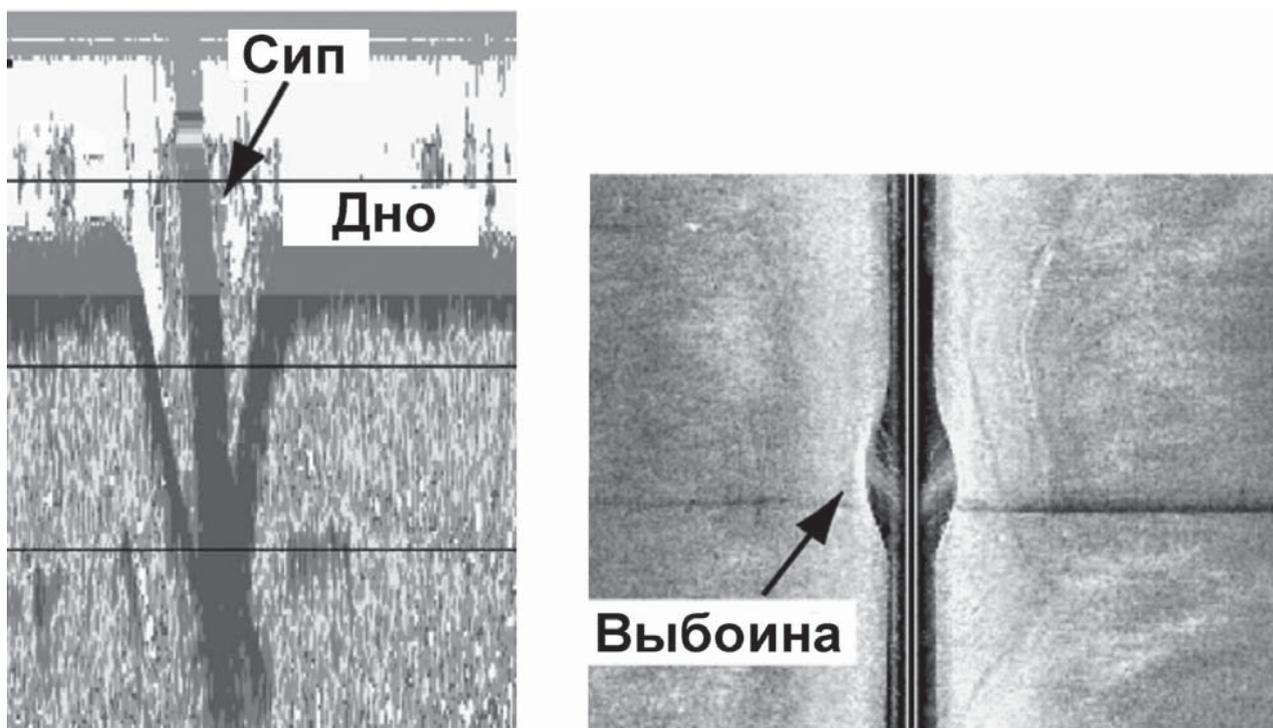


Рис. 4.4.1. Образование газовых факелов (сипов) (Етиоре, 2009)

воды, по форме можно подразделить на стабильные и пульсирующие. Диаметры сипов в различных акваториях различны и в среднем составляют от 10 до 40 м (Дегазация Земли..., 2010). Высота факелов обычно достигает 100–200 м. Большинство из них не достигает поверхности воды и диффузно расплывается. Чаще всего, это небольшие газовые струи, иногда – группы газовых струй (до 5, 10, 12), некоторые из них достаточно значительны и образуют своеобразные облака газа вблизи дна. Во многих случаях видна прерывистость газовых факелов, т.е. как бы пульсирующее извержение. Характер газовых факелов в разных морях примерно одинаков, изменяется лишь мощность струй (Кравченко, 2007). Основная масса газовых капель формирует шлейф, поднимающийся к поверхности моря подобно струе дыма. В процессе всплытия капли сначала образуют тонкий жгут, а затем рассеиваются турбулентностью морской среды в вертикальном и горизонтальном направлении и сносятся от места образования течением, формируя поднимающийся к поверхности моря шлейф (рис. 4.4.2, см. цветную вклейку) (Етиоре, 2009; Гранин и др., 2010; Соловьев, 2003; Дмитриевский, Баланюк, 2009).

Сипы высокой интенсивности выпускают газ не просто пузырьками, а в виде большого количества свободного газа. В этом случае плотность пузырьков, их размер и скорость подъема гораздо выше, чем в стабильных медленных сипах. Плотные пузырьковые образования и плюмы могут простираться до высоты 200 м в толще воды, а иногда выходить на поверхность (Етиоре, 2009).

Большинство сипов расположено в переходной зоне между континентальным шельфом и материковым склоном на глубине от 50 до 650 м. В некоторых акваториях глубина может достигать 800 м, а иногда 1200 м. На рис. 4.4.3 представлено распределение сипов по глубине (Зенкевич, Шафранская, 2009).

Сравнительный анализ различных геофизических данных показал, что метановые сипы не просто разбросаны по всей площади, а сконцентрированы на определенных участках и ассоциируются с вполне определенными морфологическими и приповерхностными структурами. На шельфе наибольшая концентрация сипов обнаружена в удлинённых впадинах над зонами разрывных нарушений (Дмитриевский, Баланюк, 2009).

Область существования *газогидратов* приурочена к морским донным осадкам и к областям многолетних мерзлых пород. Газовая составляющая газогидратов на 95% представлена метаном. При увеличении мощности осадков в море или при погружении или уменьшении мощности мерзлоты гидрат метана распадется, и на небольшой

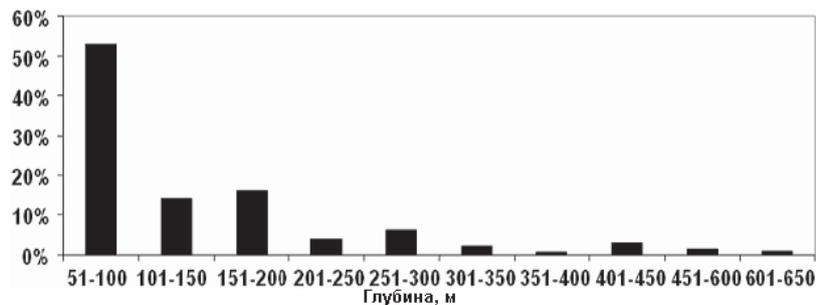


Рис. 4.4.3. Распределение газовых сипов по глубине

глубине образуется газовый резервуар, из которого газ может прорываться на поверхность (Обжиров, 2006; Дегазация Земли..., 2010).

Присутствие *газогидратов* в приповерхностных горизонтах осадков шельфа западного побережья Африки и части Атлантического океана обнаружено в результате проведения сейсмоакустических исследований (Emery, 1974). Подобные газогидратные слои были обнаружены также в Черном море (Шнюков, 2009), в Мексиканском заливе у побережья Мексики, Гватемалы и США (Broocks et al., 1984; Bouleque., 1987), у берегов Японии (Broocks et al., 1984), в акватории Охотского моря (Шакиров, Обжиров, 2009), морях Северного Ледовитого океана (Дмитриевский, Баланюк, 2009; Шахова и др., 2009) и др.

На рис. 4.4.4. приведена схема распространения гидрата метана.

Транспорт метана в водном столбе осуществляется двумя способами: диффузионным и пузырьковым. При разгрузке по типу пузырьковых газовыделений значительная часть метана по мере всплытия пузырьков с больших глубин растворяется в морской воде. В условиях резкой потери устойчивости газогидратных залежей и подстилающих пород возможно возникновение залповой разгрузки недр и поступление в водную среду факельных потоков метана. При этом скорость поступления метана к поверхности увеличивается (достигая 3 м/с), а его относительная растворимость в воде уменьшается (Шахова и др., 2009).

В работе (Арэ, 2001) описаны многочисленные случаи, когда в ходе выполнения работ на российском Арктическом шельфе неоднократно наблюдались прорывы газовых струй из дна на поверхность.

Одной из возможных причин выделения из осадков газа в виде факела является прогрев газогидратных залежей. Натурные наблюдения, выполненные американскими геохимиками в течение года за поведением газогидрата на дне Мексиканского залива на глубине 540 м, подтвердили, что увеличение температуры на величину 0,5–0,7°C приводит практически к полному разложению твердого газогидрата (Etiope, 2009).

Геологические процессы, связанные с современной тектонической активностью подводных недр, также периодически разрушают газогидратные залежи, под которыми залегают обычный природный газ в донных осадках. В результате возникают неистово мощные газовые фонтаны, образующие на поверхности моря кипящий газом водяной купол или колоссальные сводообразные объемы воды и газа. Огромные выбросы газа из-под газогидратных залежей могут образовывать в паковых и иных морских льдах крупные вздутия (Шахова и др., 2009; Обжиров, 2006).

Как было отмечено выше, еще одним источником поступления углеводородов и их фракций на поверхность морей являются *нефтегазоносные структуры* (MacDonald, 1998; Wilson et al., 1974). Большинство месторождений через сеть разломов пропускают небольшое количество нефти или газа на поверхность. В нефтегазоносных районах морей на поверхности часто обнаруживаются скопления пятен нефти, которая поступает на поверхность в виде всплывающих пузырьков газа, покрытых оболочкой нефти и растворяющихся по мере всплытия. Далее нефть в виде отдельных капель всплывает на поверхность и образует небольшие пятна, которые, растекаясь и дрейфуя, объединяются в более обширные образования размером в несколько километров. Образовавшиеся нефтяные пленки имеют характерный цвет (серый, серебристый, радужный) и незначительную толщину (менее 1 мкм), что возможно указывает на выделение углеводородов легких фракций (MacDonald, 1998; Иванов и др., 2007).

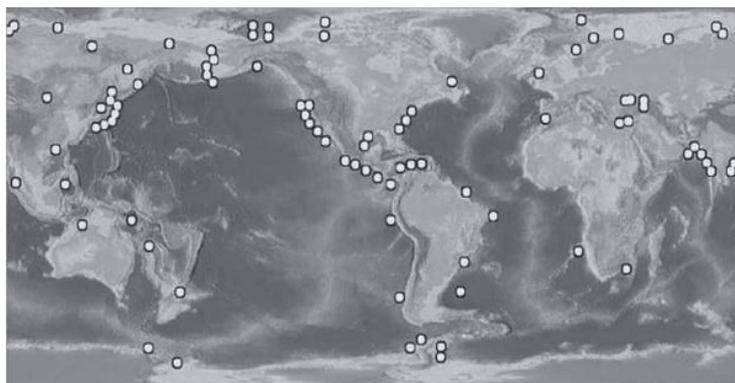


Рис. 4.4.4. Схема распространения гидрата метана в различных акваториях (www.ogbus.ru/eng/)

Признаки естественных нефте- и газопроявлений на водной поверхности

Нефтепроявления, происходящие из естественных источников на дне, имеют ряд характерных признаков, которые позволяют отличить их от антропогенных нефтяных загрязнений и других процессов на поверхности моря (Бондур, 2010, 2012; Бондур, Замшин, 2012; Иванов, 2007; Лаврова и др., 2011; MacDonald, 1998; Scantland, Biegert, 1996):

1. Пленки имеют толщину 0,1–0,01 мкм.
2. Цвет пятен – от серебристо-серого до радужного.
3. Нефтяные пятна очень часто имеют так называемую точку всплытия, или кляксообразное утолщение, где всплывшая нефть аккумулируется на поверхности.
4. Постоянный источник на дне подпитывает пятна и способствует их росту во времени и пространстве.
5. Только в редких случаях на дне имеются одиночные источники. Обычно они расположены группами, а более крупные осложнены второстепенными – грифонами, сальзами и т.п., в результате чего на морской поверхности образуются хорошо выраженные кластеры или группы подобных по форме пятен.
6. Как тонкие пленки, они достаточно хорошо отслеживают поле преобладающих течений.
7. Формы и размеры пятен достаточно характерны: это длинные (иногда десятки километров) линейные образования, часто имеющие форму запятых, зигзагов или петель; только что всплывшая нефть имеет форму круглых пятен небольшой площади.
8. Время существования на морской поверхности – от 8 до 24 часов, в среднем 12 часов.
9. В связи с естественным происхождением эти пятна привязаны к известным районам нефтегазонакопления или сосредоточения на дне грифонов, грязевых вулканов, сальз, сипов, которые источают нефть.
10. Периодичность появления пятен нефти отражает чередование импульсов грязевого вулканизма с периодами спокойной разгрузки флюидов по проницаемым зонам разрывных нарушений.

На рис. 4.4.5 (см. цветную вклейку) приведены примеры естественных нефтепроявлений на водной поверхности (Иванов, 2011).

Характер газопроявлений на поверхности воды несколько отличается от нефтепроявлений и имеет следующие особенности (Огай и др., 2007; Шахова и др., 2009):

1. Образование на поверхности моря области скопления газовых пузырей различного диаметра.

2. При выбросе пузырьков газа на поверхности воды образуется куполообразное возвышение, именуемое «фонтаном», или кипящий газом сводообразный водяной купол.

3. Диаметр и высота «фонтана» зависят от того, под каким пластовым давлением и с какой глубины поступает газ.

4. В зоне «фонтана» наклон поверхности жидкости относительно среднего уровня моря может достигать $\sim 10^\circ$ при среднем уровне взволнованной морской поверхности, равном нулю.

5. В зимнее время газовые сипы проявляются на поверхности льда в виде пропарин диаметром от полуметра до сотен метров.

6. Огромные выбросы газа из-под газогидратных залежей могут образовывать в паковых и иных морских льдах крупные вздутия.

На рис. 4.4.6 (см. цветную вклейку) приведены примеры естественных газопроявлений на водной поверхности.

Физические основы обнаружения и методы дистанционного зондирования, используемые при исследовании естественных нефте- и газопроявлений на водной поверхности

В основе методов дистанционного обнаружения нефтяных и газовых сипов в морских акваториях лежат несколько основополагающих физических процессов и явлений.

1. При наличии на водной поверхности легких фракций нефти (нефтяных пленок) или поднимающихся к поверхности пузырей газа происходит изменение спектрального состава морского волнения, связанное с эффектом «выглаживания» мелкоструктурных составляющих (Бондур 2004; 2010; 2012; Бондур, Гребенюк, 2001; Bondur, 2006, 2011). В океанологии подобные явления именуют «сликами» (от англ. slick – гладкий, блестящий). Такие изменения могут надежно регистрироваться оптическими и радиолокационными методами (Бондур, 2004; 2010; 2012; Бондур, Гребенюк, 2001; Bondur, 2006, 2011).

2. Наличие примесей с резко отличными от чистой воды свойствами приводит к изменению коэффициента диэлектрической проницаемости и, соответственно, величины уровня отраженного радиосигнала (контрасты составляют $\sim 2-8$ дБ) (Бондур, 2004, 2010; 2012; Иванов, 2007; Огай и др., 2009; Bondur, 2011).

3. При наличии на водной поверхности нефтяных пятен и пузырьков газа изменяются коэффициенты спектральной яркости в различных спектральных диапазонах, что может регистрироваться многоспектральной оптической аппаратурой (Бондур, 2004; 2010; 2012; Бондур, Зубков, 2005; Bondur, 2011).

4. При наличии на морской поверхности нефти и выбросов газа изменяется температура водной среды, что может регистрироваться тепловыми методами (Бондур, 2004, 2010; 2012; Bondur, 2011).

5. В области поверхностных проявлений потоков газовых пузырьков происходит изменение радиояркостной температуры. При этом радиотепловые контрасты, возникающие на возмущенной морской поверхности при выбросе газа, различаются при горизонтальной и вертикальной поляризации зондирующего сигнала. Эти явления могут быть зарегистрированы аппаратурой СВЧ-диапазона (Бондур, 2004; 2010; 2012; Поспелов, 2005; Bondur, 2011).

6. При появлении растворенных, эмульгированных и дисперсных нефтяных фракций в толще воды изменяются спектры флуоресценции. Сигналы флуоресценции водной среды в этом случае отличаются более высокой интенсивностью по сравнению с фоновыми сигналами. При этом наблюдается подавление линии комбинационного рассеяния воды. Эти эффекты могут обнаруживаться флуоресцентными лидарами (Межерис, 1987; Бондур, 2004; 2010; 2012; Бондур, Зубков, 2001; Абрамов и др., 2012).

Таким образом, физическими причинами появления контрастов, обусловленных нефтяными и газовыми сипами, являются изменения: спектрального состава участков морской поверхности за счет подавления высокочастотных гравитационно-капиллярных компонент поверхностного волнения; температуры среды; коэффициентов спектральной яркости; спектров флуоресценции; поляризации; диэлектрической проницаемости, которые могут регистрироваться радиолокационными, оптическими, тепловыми методами, методами СВЧ-радиометрии и флуоресцентными лидарами (Бондур, 2004, 2010, 2012; Bondur, 2006, 2011).

Основными преимуществами радиолокационных методов являются (Рис, 2006; Бондур, 2004, 2010, 2012; Бондур, Замшин, 2012):

- всепогодность и независимость от солнечного освещения;
- высокое пространственное разрешение, сравнимое с разрешением датчиков оптического диапазона;
- широкая полоса обзора современных радиолокационных систем (400–500 км);
- высокая чувствительность к шероховатости поверхности моря или мелкомасштабному ветровому волнению.

К недостаткам радиолокационных методов можно отнести следующее (Бондур, 2004, 2010; Рис, 2006):

- надежное распознавание возможно в диапазоне скоростей ветра от 2 до 8 м/с;
- сликообразующие явления в нижней атмосфере и верхнем слое океана создают похожие сцены на поверхности моря, что значительно снижает вероятность правильной идентификации естественных нефте- и газопроявлений.

Основными достоинствами оптических методов съемки являются (Рис, 2006; Кашкин, Сухинин, 2001; Бондур, 2004; Бондур, Зубков, 2005):

- высокое пространственное и спектральное разрешение современных датчиков, установленных на космических носителях;
- большое количество спектральных каналов (многоспектральная и гиперспектральная аппаратура);

- простота интерпретации полученных данных, т.к. они получены в различимом глазом человека диапазоне спектра.

Основным недостатком оптических методов, ограничивающих их применение при исследовании нефтяных и газовых сипов, является зависимость их результатов от условий освещения и метеорологической ситуации, связанную, в первую очередь, с наличием облачного покрова. Но несмотря на отмеченные недостатки, изображения, полученные в оптическом диапазоне спектра с космических и авиационных носителей, продолжают успешно использоваться при изучении естественных нефте- и газопроявлений на морской поверхности.

При исследовании поверхностных нефте- и газопроявлений в акваториях морей и океанов тепловыми методами получены противоречивые данные. Возможно, это объясняется следующими причинами (Тараненко и др., 2000):

- низким пространственным разрешением аппаратуры ИК и СВЧ диапазонов, установленной на космических аппаратах;
- влиянием атмосферы (погрешность измерения температуры морской поверхности может составлять 5–10°К).

Следует отметить еще одну потенциальную проблему: тепловое изображение регистрирует температуру слоя толщиной ~ 0,02 мм, а в океанологии «поверхностью» называется слой в несколько сантиметров. Физическая температура этого слоя меняется на 1°К с каждой десятой миллиметра. Причем это изменение может быть и положительным, и отрицательным в зависимости от охлаждения за счет испарения и солнечного нагрева (Рис, 2006).

Существующие микроволновые радиометры, установленные на спутниках, позволяют регистрировать только крупномасштабные процессы в океане и атмосфере ввиду низкого пространственного разрешения.

Лидарные методы могут быть использованы для определения плотности газовых пузырьков, обнаружения нефтяных пятен, оценки площади и направления их распространения (Межерис, 1987; Глушков и др., 1994; Бондур, 2004; 2010, 2012; Бондур, Зубков, 2001; Абрамов и др., 2012). Аппаратура для лидарной съемки, как правило, устанавливается на низколетящих носителях, что значительно ограничивает их применение.

Таким образом, в настоящее время для исследования естественных нефте- и газопроявлений на поверхности моря наиболее эффективными являются радиолокационные и оптические методы. Космическая радиолокация и съемка в оптическом диапазоне спектра широко используются для изучения естественных нефтепроявлений, что неоднократно отмечалось в отечественных (Бондур, 2004, 2010, 2012; Бондур, Замшин, 2012; Иванов А.И., 2011; Иванов А.Ю., 2007; Иванов А.Ю. и др., 2007; Лаврова и др., 2011; Лаврова, Митягина, 2011; Евтушенко, Иванов, 2011; Огай и др., 2009; Гранин, Гранина, 2002; Bondur, 2006, 2011) и зарубежных (MacDonald I., 1998; Van Rensbergen P. et al 2002; Etiope, 2009; Wilson et al, 1974 и др.) публикациях.

В настоящее время для изучения этого явления рядом компаний, таких как InfoTerra (www.infoterra.com), NPA Group (www.npagroup.com) и др., организован сбор, обработка и анализ изображений с целью совершенствования методологии надежно-

го распознавания газо- и нефтепроявлений естественного происхождения на фоне образований другого характера.

На рисунках 4.4.7–4.4.12 (рис. 4.4.11 и 4.4.12 см. цветную вклейку) приведены примеры выявления нефтяных и газовых сипов в различных акваториях с использованием сенсоров оптического и радиодиапазонов.

Заключение

Как следует из приведенных примеров, с помощью аэрокосмических методов возможно надежное распознавание естественных нефте- и газопроявлений на водной поверхности. Однако учитывая, что нефтяные и газовые сипы сохраняются на поверхности моря только в течение нескольких часов, достаточно быстро подвергаясь процессам испарения, диффузии, поглощения, рассеяния и эмульгации, их дальнейшее

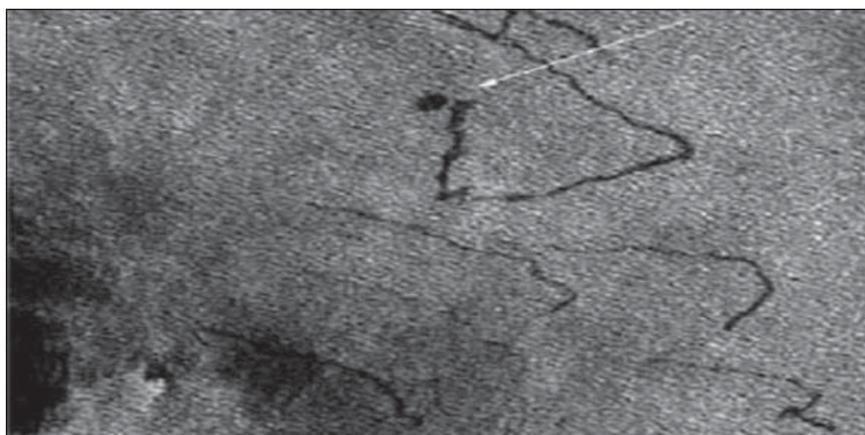


Рис. 4.4.7. Естественное нефтепроявление в акватории Атлантического океана у побережья Анголы. РЛИ со спутника ERS-2 (www.goes.gsfc.nasa.gov)

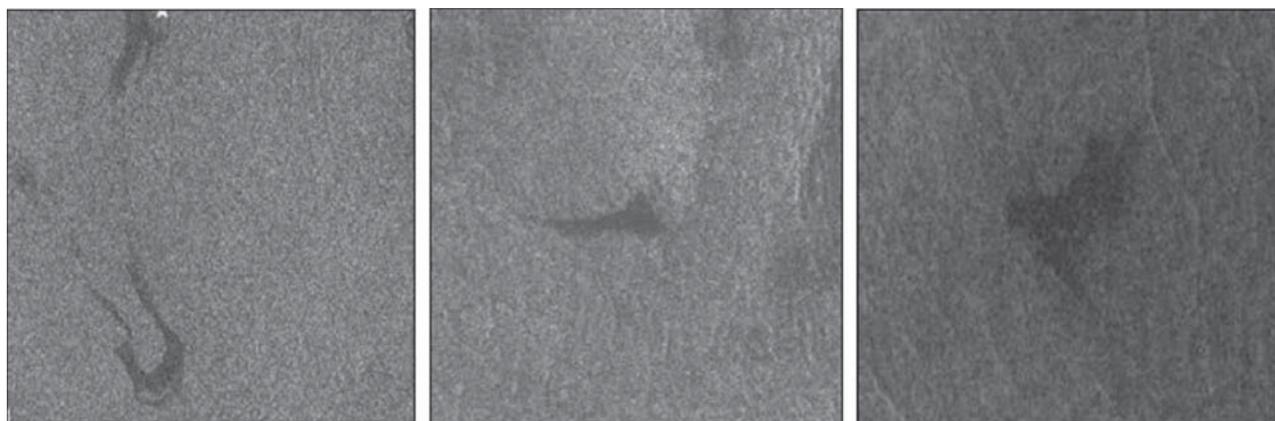


Рис. 4.4.8. Естественные нефтепроявления на шельфе Охотского моря. Фрагменты изображений со спутника Envisat (июнь 2007 г.) (Иванов и др., 2008)

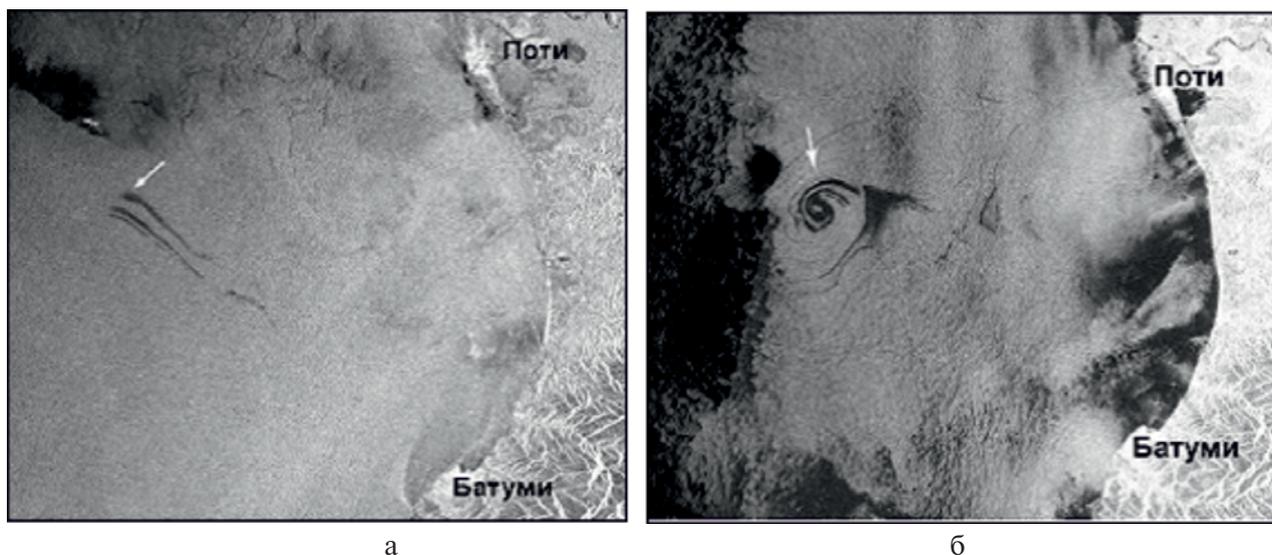


Рис. 4.4.9. Примеры проявлений на морской поверхности метановых сипов (отмечены стрелочкой). Фрагменты РЛИ со спутника ENVISAT: а – 05.06.2011 г.; б – 06.01.2011 г. (Лаврова, Митягина, 2011)

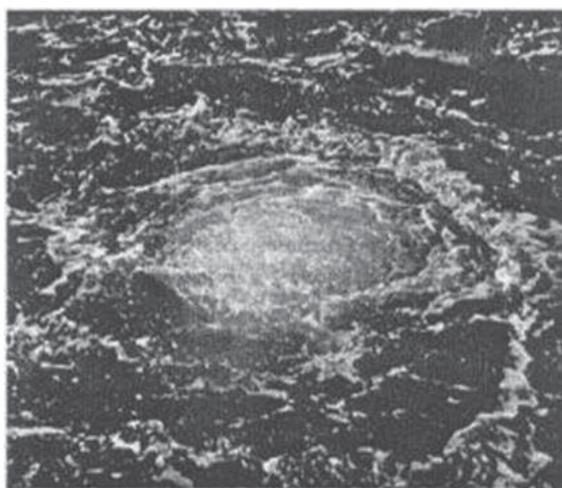


Рис. 4.4.10. Пример газового сипа высокой интенсивности в акватории Каспийского моря (аэрофотосъемка) (Огай и др., 2007)

исследование необходимо проводить в режиме оперативного мониторинга с использованием комплекса дистанционных средств. Кроме этого целесообразно применять не только способы визуального дешифрирования при идентификации нефтяных и газовых сипов, но и специализированные методы обработки изображений, позволяющие обнаруживать эти объекты не только на поверхности океана, но и в водной толще.

Литература

1. *Абрамов О.И., Бондур В.Г., Васильчиков П.М., Пелевин В.В.* Авиационный флуоресцентный сканирующий лидар (флуоровизор) для мониторинга районов добычи и транспортировки нефти. В настоящей книге. 2012. С. 478–486.
2. *Алиев А.И.* Грязевые вулканы – очаги периодической газогидродинамической разгрузки быстропогружающихся осадочных бассейнов и важные критерии прогноза газоносности больших глубин // Геология нефти и газа. 2006. № 5. С. 126–134.
3. *Арэ Ф. Э.* Тепло- и массообмен. Конспект лекций. СПб.: ПГУПС. 2001. 58 с.
4. *Бондур В.Г.* Аэрокосмический мониторинг нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса. Реальности и перспективы. В настоящей книге. 2012. С. 15–37.
5. *Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы в современной океанологии / В кн. Новые идеи в океанологии. Т. 1. Физика. Химия. Биология. М.: Наука. 2004. С. 55–117+8 стр. цв. вклеек.
6. *Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17+6 с. цв. вклеек.
7. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В.* Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исследование Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49–67.
8. *Бондур В.Г., Зубков Е.В.* Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многозональным спутниковым изображениям высокого разрешения // Исследование Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54–61.
9. *Бондур В.Г., Зубков Е.В.* Лидарные методы дистанционного зондирования загрязнений верхнего слоя океана // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 2. С. 142–155.
10. *Бондур В.Г., Замшин В.В.* Космический радиолокационный мониторинг морских акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов. В настоящей книге. 2012. С. 255–271.
11. *Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Жуков Н.А., Замшин В.В., Карачевцева И.П., Черепанова Е.В.* Экологические проблемы арктических регионов, связанные с добычей и транспортировкой углеводородов, и возможности их решения на основе результатов космического мониторинга. В настоящей книге. 2012. С. 329–342.
12. *Глушков С.Н., Фадеев В.В., Филиппова Е.М.* и др. Проблемы лазерной флуориметрии органических примесей в природных водах // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 4.
13. *Гранин Н.Г., Гранина Л.З.* Газовые гидраты и выходы газов на Байкале // Геология и геофизика. 2002. Вып. 43 (7). С. 629–637.
14. *Гранин Н.Г., Макаров М.М., Кучер К.М., Гнатовский Р.Ю.* Метановые струи на озере Байкал // Природа. 2010. № 3. С. 29–41.
15. Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь. Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кропоткина, 18–22 октября 2010 г. (Отв. ред. ак. А.Н. Дмитриевский, д.г.-м.н. Б.М. Валяев). М.: ГЕОС. 2010. 712 с.
16. *Дмитриевский А.Н., Баланюк И.Е.* Газогидраты морей и океанов. М.: ООО «ИРЦ Газпром». 2009. 416 с.
17. *Дмитриевский А.Н., Белонин М.Д.* Перспективы освоения нефтегазовых ресурсов Российского шельфа // Природа. 2004. № 9. С. 3–10.

18. *Дядин Ю.А., Гуцин А.Л.* Газовые гидраты // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 3. С. 55–64.
19. *Евтушенко Н.В., Иванов А.Ю.* Нефтепроявление в Юго-Восточной части Черного моря и его исследование из космоса // Исследование Земли из космоса. 2011. № 6. С. 62–81.
20. *Зенкевич Б.А., Шафранская Н.В.* Тектоническая позиция зоны газовых факелов Северо-Западной части Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 3. С. 35–54.
21. *Иванов А.И.* Нефть и нефтепроявления озера Байкал // Земля из космоса. 2011. Вып. 8. С. 44–52.
22. *Иванов А.Ю.* Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исследование Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
23. *Иванов А.Ю., Голубов Б.Н., Затягало В.В.* О нефтегазоносности и разгрузке подземных флюидов в Южной части Каспийского моря по данным космической радиолокации // Исследование Земли из космоса. 2007. № 2. С. 62–81.
24. *Израэль Ю.А., Цыбань А.В.* Исследование экосистем Берингова и Чукотского морей. СПб.: Гидрометеиздат. 1992. 655 с.
25. *Кашкин В.Б., Сухинин А.И.* Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос. 2001. 246 с.
26. *Кравченко В.Г.* Механизм функционирования подводных газовых факелов Черного моря // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2007. № 1. С. 106–115.
27. *Круглякова Р.П., Круглякова М.В., Шевцова Н.Т.* Геолого-геохимическая характеристика естественных проявлений углеводородов в Черном море // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 1. С. 37–51.
28. *Кэрролл Дж.* Гидраты природного газа. М.: Технопресс. 2007. 316 с.
29. *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.
30. *Лаврова О.Ю., Митягина М.И.* Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2011. № 6. С. 55–63.
31. *Лимонов А.Ф.* Грязевые вулканы // Соросовский образовательный журнал. 2004. Т. 8. № 1. С. 63–69.
32. *Межерис А.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир. 1987. 552 с.
33. *Немировская И.А.* Углеводороды в океане (снег-лед-вода-взвесь-донные осадки). М.: Научный мир. 2004. 328 с.
34. *Обжиров А.И.* История открытия газогидратов в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. 2006. С. 72–80.
35. *Огай Е.К., Уразаева С.Б., Петровский В.Б.* Новые перспективы и направления нефтегазопоисковых работ с использованием современных технологий дистанционного зондирования Земли // Геология и охрана недр. 2007. № 3. С. 82–89.
36. *Пиковский Ю.И.* Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М.: МГУ. 1993. 208 с.
37. *Поспелов М.Н.* Применение микроволновой поляриметрии для дистанционного зондирования морской поверхности // Исследование Земли из космоса. 2005. № 1. С. 39–50.
38. *Ратнер С.В.* Изучение грязевого вулканизма в Черном море для обеспечения безопасности навигации и нефтегазовой инфраструктуры // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2007. № 10. С. 6–10.

39. *Рис У.Г.* Основы дистанционного зондирования. М.: Техносфера. 2006. 336 с.
40. *Соловьев В.А.* Природные газовые гидраты как потенциальное полезное ископаемое // Российский химический журнал. 2003. Т. 48. № 3. С. 59–69.
41. *Тараненко Е.И., Безбородов Р.С., Хакимов М.Ю.* Тепловой эффект формирования залежей нефти и газа // Геология нефти и газа. 2000. № 2. С. 56–58.
42. *Холодов В.Н.* Грязевые вулканы: закономерности размещения и генезис // Литология и полезные ископаемые. 2002. № 3. С. 227–241; № 4. С. 339–358.
43. *Шакиров Р.Б., Обжиров А.И.* Морфотектонический контроль потоков метана в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 1 (7). С. 31–39.
44. *Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П.* Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестник РАН. 2009. Т. 79. № 6. С. 507–518.
45. *Шнюков Е. В.* Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану // Гідроакустичний журнал. 2009. № 6. С. 42–55.
46. *Шнюков Е.В., Соболевский Ю.В., Гнатенко Г.И., Кутний В.А.* Грязевые вулканы Керченско-Таманской области. Киев: Наукова думка. 1986. 152 с.
47. *Bondur V.G.* Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas. 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE. 2006. 7 p.
48. *Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // In Tech «Waste Water» <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>, 26 p.
49. *Boulegue J., Benedett E., Dron D., Mariotti A. and Letolle R.* (1987) Geochemical and biogeochemical observations on the biological communities associated with fluid venting in Nankai Trough and Japan Trench subduction zones. *Earth. Planet. Sci. Lett.* 83: 343-3.
50. *Brooks M., Kennicutt M., Fisher C., Macko S, Cole K, Childress J, Bidigare R, and Vetter R.* (1987) Deep-sea hydrocarbon seep communities: Evidence for energy and nutritional carbon sources. *Science* 238: 1138–1142.
51. *Emery K.* Pagoda structures in marine sediments. In: *Natural Gases in Marine Sediments*, 1974, № 4. California coast // *Mar. Environm. Pollut.* 1980. V. 1. P. 229–263.
52. *Etiopie G.* A Global Dataset of Gas and Oil Seeps: a new Tool for Hydrocarbon Exploration // *Oil and Gas Business*, 2009.
53. *MacDonald I.R.* Natural oil spills // *Scientific American*. 1998. 279(5). P. 51–66.
54. NAS (National Academy of Sciences). *Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects*. National Research Council. – Washington, D.C.: The National Academies Press, 2003. 265 p.
55. *Scantland S., Biegert E.K.* Radar locates offshore oil slicks // *Earth Observation Magazine*. 1996. 5. P. 30–32.
56. *Spies R.V., Davis P.H., Stuermer D.H.* Ecology of a submarine petroleum seep off the Synthetic Aperture Radar Marine Users Manual (2005), NOAA/NESDIS, U.S. Department of Commerce, Washington (<http://www.sarusersmanual.com>).
57. *Van Rensbergen P., De Batist M., Klerkx J. et al.* Sublacustrine mud volcanoes and methane seeps caused by dissociation of gas hydrates in Lake Baikal // *Geology*. 2002. V. 30. P. 631-634.
58. *Wilson R.D., Monaghan P.H., Osanik A. et al.* Natural marine oil seepage // *Science*, 1974, 184, 857-865.
59. www.ogbus.ru/eng.
60. www.goes.gsfs.nasa.gov.