

УДК 551.465

РЕГИСТРАЦИЯ ИЗ КОСМОСА ИНТЕНСИВНЫХ ВЫХОДОВ ГАЗА НА МОРСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ, СВЯЗАННЫХ С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ ГАЗОПРОВОДОВ СЕВЕРНЫЙ ПОТОК-1 И СЕВЕРНЫЙ ПОТОК-2

© 2024 г. Академик РАН В. Г. Бондур¹, В. В. Замшин¹, В. Н. Черникова^{1,*}

Поступило 27.09.2023 г.

После доработки 19.10.2023 г.

Принято к публикации 24.10.2023 г.

С использованием оптических (спутники Канопус-В, Sentinel-2B) и радиолокационных (спутник Sentinel-1A) космических изображений проанализированы аномально интенсивные газопроявления на морской поверхности, обусловленные повреждениями подводных газопроводов Северный поток-1 и Северный поток-2 в Балтийском море. В области таких газопроявлений обнаружены положительные контрасты удельной эффективной поверхности рассеяния (до 7.5 дБ), зарегистрированные радиолокационной аппаратурой спутника Sentinel-1A, а также спектральной отражательной способности (до 0.73 ед.), зарегистрированные оптической аппаратурой спутников Канопус-В и Sentinel-2B. Выявлены их характерные особенности на морской поверхности: куполообразные возвышения, фонтаны, сулой, пена, обрушения волн и искажения структуры поверхностного волнения, эффект возникновения ветровой тени. На основании учета объема и плотности газа, находившегося в поврежденных трубопроводах, показано, что общий объем выброса метана составил не более ~ 0.51 Тг, т.е. менее 0.1% от годового глобального выброса метана в атмосферу планеты.

Ключевые слова: газопроявления, морская поверхность, дистанционное зондирование Земли, спутниковые данные, многоспектральные изображения, радиолокационные изображения, подводные газопроводы, сулой

DOI: 10.31857/S2686739724020216

ВВЕДЕНИЕ

Выходы газа на морскую поверхность — газопроявления (ГП), обусловленные природными и антропогенными причинами, являются малоизученными аномальными явлениями. Существование таких явлений объясняется теоретическими предпосылками и подтверждается натурными измерениями [1–3]. Регистрация различных антропогенных и естественных аномальных процессов на морской поверхности производится различными контактными, например [4, 5], и дистанционными, например [6–8], методами, а также с использованием результатов математического моделирования, например [9]. Наиболее перспективными методами регистрации аномалий морской поверхности, особенно на больших площадях, являются аэрокосмические методы [6–8] и их использование совместно

с контактными методами и методами математического моделирования [8].

В связи с происходящим ростом потоков данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), развитием баз данных и возрастанием количества исследований, использующих спутниковые изображения морской поверхности, следует ожидать увеличения вероятности и количества случаев регистрации интенсивных ГП. Однако необходимо отметить, что результаты исследований из космоса проявлений интенсивных ГП, обусловленных масштабными повреждениями на морских газопроводах, до недавнего времени не публиковались и были в литературе не известны. В последнее время появились лишь две публикации [10, 11], посвященные исследованиям таких техногенных аварий с использованием спутниковых данных.

В настоящей работе рассмотрены особенности формирования ГП на морской поверхности, вызванных такими авариями, и возможности их регистрации методами дистанционного

¹ Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

*E-mail: office@aerocosmos.info

зондирования. С использованием оптических и радиолокационных спутниковых данных исследуются надежно опознанные с 29 сентября по 1 октября 2022 года интенсивные ГП на морской поверхности, обусловленные повреждениями газопроводов Северный поток-1 и Северный поток-2 в Балтийском море. На основании анализа космических изображений, полученных с борта спутников Канопус-В, Sentinel-1A и Sentinel-2B, выявлены особенности обнаруженных из космоса интенсивных ГП на морской поверхности, вызванных повреждениями газопроводов, выполнена предварительная физическая интерпретация зарегистрированных аномалий, которые сопоставлены с ранее полученными результатами.

ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОПРОЯВЛЕНИЙ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ РЕГИСТРАЦИИ СПУТНИКОВЫМИ МЕТОДАМИ

Морские ГП можно классифицировать на два типа: природные и антропогенные.

Основные природные подводные (донные) источники ГП обычно приурочены к определенным геологическим структурам, фокусирующим поток газа, таким как зоны тектонических деформаций (разрывные, складчатые и инъективные нарушения), осложненные стратиграфическим несогласием горных пород, диапировые структуры и др. [2, 3]. Высачивания газа из естественных донных источников различного типа иногда обобщенно называют сипами [7, 12]. Потоки газа могут поступать из залежей свободного газа в осадочном чехле, газогидратов и грязевых вулканов. Характерными формами донного рельефа в районах регистрации ГП являются покмарки, которые представляют собой округлые углубления, образующиеся в результате эпизодического выброса газа [7, 13]. Большинство природных источников расположено в диапазоне глубин от 50 до 650 м, включающем переходную зону между континентальным шельфом и материковым склоном [1]. Значительная часть подводных ГП представлена метаном [3].

На рис. 1 представлена условная схема, иллюстрирующая основные природные и антропогенные источники эмиссий газа в морскую среду и процесс формирования ГП на морской поверхности.

При прохождении донных отложений метан окисляется как в анаэробных (без доступа

кислорода), так и в аэробных (с доступом кислорода) условиях при участии метан-окисляющих архей и сульфатредуцирующих бактерий [1, 14]. При интенсивном потоке метана из недр, превышающем производительность процесса окисления в донных осадках, этот газ способен выделяться в толщу воды [3] (рис. 1).

Находясь в водной толще, метан участвует в различных биогеохимических и гидродинамических процессах, таких как газообмен между пузырьками газа и окружающей их водной средой, миграция метана к поверхности моря, вовлеченность в вертикальные и горизонтальные перемешивания вод, которые подвержены сезонным изменениям [15] (рис. 1). На процесс поднятия газовых пузырьков со дна к морской поверхности влияют такие факторы, как глубина, температура, мощность выбросов газа, размер пузырьков и др.

Антропогенные морские ГП обусловлены человеческой деятельностью. Основными источниками антропогенных морских ГП являются объекты нефтегазового комплекса, в том числе используемые при строительстве и эксплуатации поисковой и добывающей инфраструктуры, подводных трубопроводных систем, хранения и танкерной транспортировки газосодержащих продуктов [6, 7]. Особую роль при этом играют повреждения подводных газопроводов (рис. 1).

Как видно из рис. 1, морские ГП обусловлены источниками различных типов, при этом поступивший в водную среду газ вовлекается в комплекс разнородных процессов, которые в конечном счете влияют на особенности проявления газовых сипов на морской поверхности. Эти особенности необходимо учитывать при регистрации таких ГП различными методами. Контактные методы регистрации морских ГП предоставляют ограниченные возможности, прежде всего по пространственному охвату наблюдений. Они сопряжены также со значительными временными и финансовыми затратами. Поэтому целесообразно использовать средства ДЗЗ, особенно спутниковые, которые интенсивно развиваются [6, 7].

Из анализа работ [6, 7, 16, 17] следует, что обнаружение ГП может осуществляться с помощью спутниковых оптических и радиолокационных методов ДЗЗ.

Таковыми методами могут регистрироваться в том числе:

– изменения оптических свойств [7, 16, 17] и удельной эффективной поверхности рассеяния

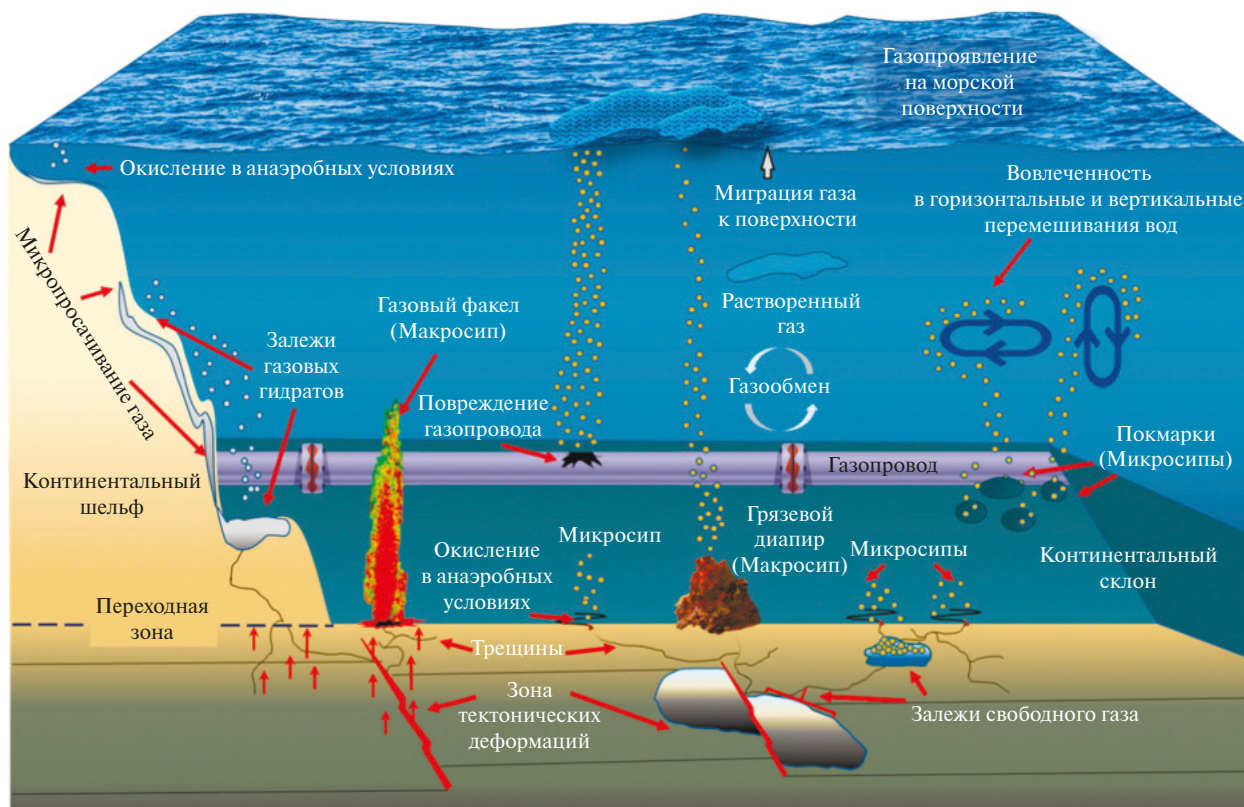


Рис. 1. Условная схема, иллюстрирующая основные природные и антропогенные источники эмиссии газа в морскую среду и процессы формирования ГП на морской поверхности.

(УЭПР) [6, 7] границы раздела морская среда – атмосфера, связанные с наличием бурлений и куполообразных возвышений на морской поверхности, наличием застывших пузырьков газа и проталин в ледовом покрове [6, 7];

– изменения оптических свойств приповерхностного слоя морской среды [6, 7] в связи со взмучиванием донных осадков потоками газа, наличием пузырьков газа в водной толще, развитием газо-окисляющих архей и сульфатредуцирующих бактерий;

– изменения температуры морской среды [6, 7], связанные с поднятием к поверхности теплых/холодных (в сравнении с окружающей морской средой) потоков газа и др.

В настоящей работе изучаются несколько уникальных образов ГП, связанных с повреждением газопроводов Северный поток-1 и Северный поток-2, выявленных на спутниковых оптических и радиолокационных изображениях морской поверхности.

ОСОБЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

На рис. 2 приведена карта, на которой отображены места обнаружения изучаемых интенсивных ГП на морской поверхности с указанием дат и времени (по Гринвичу) спутниковых наблюдений. Обозначение типа “СП1-...” указывает на номер газопровода, к которому приурочено ГП. Обозначение типа “...-1-а” указывает на порядковый номер ГП (-1-) и эпизод его спутникового наблюдения (-а).

Географическое положение обнаруженных интенсивных ГП:

- для газопровода Северный поток-1:
 - 1) 55°33'18" с.ш. 15°47'46" в.д. (СП1–1);
 - 2) 55°32'5" с.ш. 15°42'7" в.д. (СП1–2);
- для газопровода Северный поток-2:
 - 1) 54°52'34" с.ш. 15°24'24" в.д. (СП2–1).

На рис. 3 приведены изображения этих газопрооявлений, полученные с борта авиационных

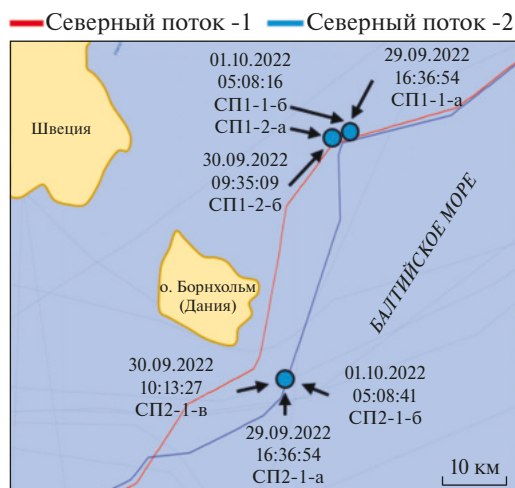


Рис. 2. Карта района обнаружения интенсивных антропогенных газопоявлений в Балтийском море по спутниковым данным.

средств 27 и 28 сентября 2022 года (<https://www.kustbevakningen.se/>, <https://dma.dk/>).

Дешифровочные признаки и априорные данные свидетельствуют о том, что эти объекты являются интенсивными ГП, сопровождающимися куполообразными возвышениями морской поверхности и большим количеством пены, а также

пузырей в приповерхностном слое. Они были зарегистрированы в местах повреждений подводных газопроводов Северный поток-1 и Северный поток-2, произошедших 26 сентября 2022 г. в Балтийском море.

При проведении исследований в качестве исходных данных использовались различные космические изображения, полученные в период с 29 сентября по 1 октября 2022 года, в том числе: радиолокационные (спутник Sentinel-1A, разрешение 10 м, режим съемки – Interferometric Wide) и оптические (спутник Канопус-В, разрешение 2 м, а также спутник Sentinel-2B, разрешение 10 м). Было проанализировано 5 космических изображений (3 изображения, полученных со спутника Sentinel-1A; по одному изображению, полученных со спутников Sentinel-2B и Канопус-В). На этих спутниковых изображениях были обнаружены наиболее интенсивные ГП.

Помимо космических изображений, анализировались гидрометеорологические характеристики, полученные с помощью модельных продуктов HYCOM, в том числе:

1. Температура морской среды ($^{\circ}\text{C}$) вдоль трасс газопроводов (на глубине ~ 70 м);
2. Осредненные по глубине скорость и направление течений в районах ГП.

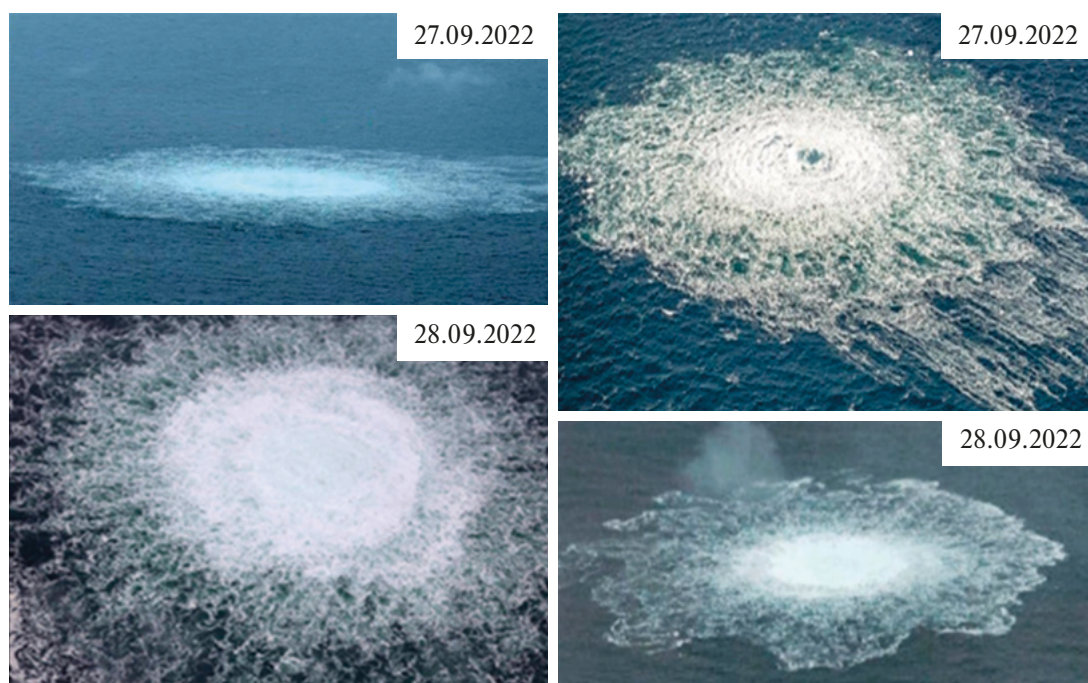


Рис. 3. Изображения интенсивных антропогенных газопоявлений на морской поверхности, вызванных повреждениями на газопроводах Северный поток-1 и Северный поток-2 в Балтийском море, полученные с борта авиационных средств 27 и 28 сентября 2022 года (<https://www.kustbevakningen.se/>, <https://dma.dk/>).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 4 приведены результаты обработки спутниковых оптических и радиолокационных изображений изучаемых интенсивных ГП, позволившие выявить текстуру, размеры, спектральные и радиолокационные контрасты, а также другие особенности объектов интереса. Кроме того, результаты обработки спутниковых изображений сопровождались данными о скоростях и направлениях течений. Зарегистрированные количественные данные о наблюдаемых ГП обобщенно представлены в табл. 1, приведенной ниже.

На рис. 4 а приведен пример оптического изображения ГП (СП1–2-б), полученного в панхроматическом канале аппаратуры спутника Канопус-В. Данное изображение, а также профиль яркости, сделанный в направлении запад–восток, позволяют оценить структуру и размеры ГП в районе СП1–2 (30 сентября 2022 года, 09:35:09 UTC). Анализ рис. 4 а показывает, что в структуре интенсивного ГП можно выделить центральную часть с поперечным размером ~ 200 м, которая, по всей видимости, представляет собой куполообразное возвышение (бурление, сулой). Этому структурному элементу ГП соответствуют относительно высокие уровни принятого сигнала (80% и выше от максимального уровня яркости исследуемого фрагмента изображения¹).

Возможность существования ГП с такой формой проявления на морской поверхности рассматривалась в работах [6, 7]. Центральная часть ГП окаймлена периферийной частью, в целом увеличивающей поперечный размер объекта интереса до ~ 500 и более метров. Анализ текстуры периферийной части, а также анализ доступных авиационных изображений (рис. 3), указывает на то, что периферийная часть представлена пеной и участками водной поверхности с искаженным (по сравнению с фоновой водной поверхностью) спектром ветрового волнения. Периферийная часть ГП СП1-2-б образует шлейф, вытянутый на север (рис. 4 а), в направлении действия ветра.

На рис. 4 б приведен пример космического оптического изображения, полученного с помощью многоспектральной аппаратуры спутника Sentinel-2В. На этом рисунке изображено ГП СП2-1-в (30 сентября 2022 года, 10:13:27 UTC). Размеры этого ГП не превышают 300 м. Анализ

графика, приведенного на рис. 4 б, показывает, что во всех трех каналах видимой области спектра (RGB) наблюдается существенное усиление сигнала (до 0.65 и более ед. спектральной отражательной способности²), которое свидетельствует о наличии большого количества пены, интенсивных обрушений морских волн, сулой. При этом шлейф, окаймляющий ГП, с несколько сниженными (по отношению к центральной части ГП) уровнями спектральной отражательной способности, вытянут в северо-восточном направлении.

На рис. 4 в, г представлены радиолокационные образы ГП, полученные на согласованной вертикальной (VV) поляризации аппаратурой спутника Sentinel-1А со средним пространственным разрешением (10 м). Образы радиолокационных космических изображений с проведенными поперек них профилями значений УЭПР³ позволили оценить размеры и контрасты ГП, а также выявить особенности их структуры и форм (табл. 1). Размеры ГП варьировались от 400 до 700 м (табл. 1, столбец 2). Значения УЭПР фоновой водной поверхности, приведенные на графиках (рис. 4 в, г), были всегда ниже, чем у ГП (положительный контраст), и варьировались от -25 до -15 дБ в зависимости от угла зондирования и гидрометеорологических факторов. При этом значения УЭПР для ГП составляли от -7 до -13 дБ. Анализ данных, приведенных в табл. 1, показал, что контрасты УЭПР в области ГП изменялись в диапазоне от 2.5 до 7.5 дБ (табл. 1, столбец 4).

Из данных работы [7] следует, что интенсивные газопроявления на морской поверхности при умеренном волнении или штиле на радиолокационном изображении должны отображаться в виде аномалий с положительным контрастом УЭПР. Полученные нами результаты (табл. 1) подтверждают эти положения.

Радиолокационные образы интенсивных ГП СП1-1-а и СП2-1-а (рис. 4, а также табл. 1) отличаются наличием сликов, приуроченных к ГП, характеризующихся отрицательным контрастом (-5 дБ и -3 дБ). Справедливо предположить, что эти слики обусловлены ветровыми тенями, возникающими в связи с перекрытием приповерхностного потока ветра бурлением и сулой в центральной части ГП. В пользу гипотезы

² Данные Sentinel-2 представлены в единицах “спектральной отражательной способности”.

³ Данные Sentinel-1А представлены в единицах удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) в децибелах.

¹ Данные Канопус-В представлены в единицах “приборной яркости”.

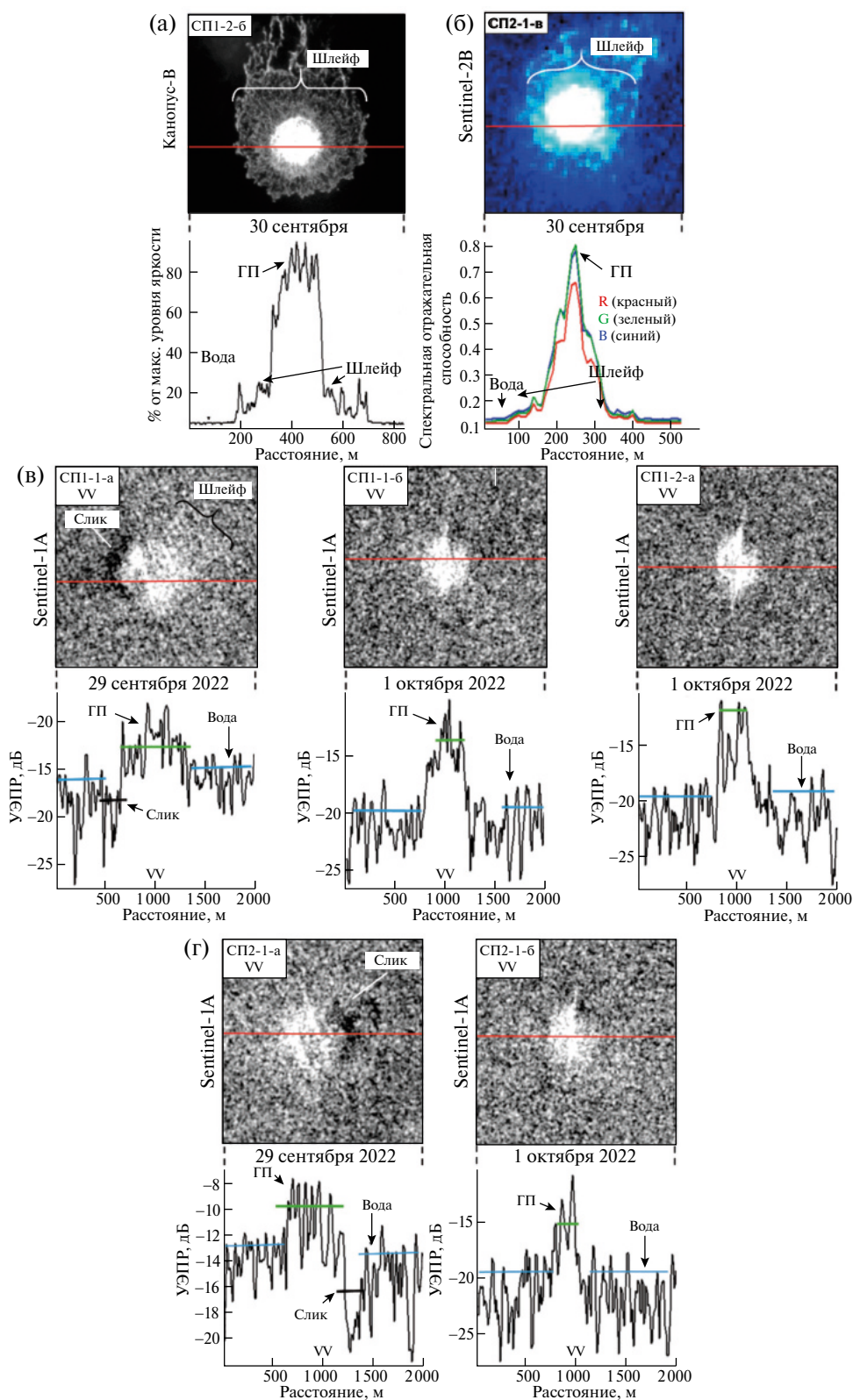


Рис. 4. Результаты обработки спутниковых оптических (а, б) и радиолокационных (в, г) изображений интенсивных антропогенных ГП, связанных с повреждениями газопроводов в Балтийском море. Красные линии на изображениях соответствуют графикам профилей яркости (для данных Канопус-В, панхроматический канал), спектральной отражательной способности (для данных Sentinel-2B, спектральные каналы видимого диапазона) и УЭПР (для Sentinel-1A). Синие, зеленые и черные линии на профилях УЭПР демонстрируют средний уровень сигналов для воды (фона), ГП и сликов соответственно.

Таблица 1. Обобщенные количественные результаты обработки спутниковых изображений интенсивных антропогенных ГП, вызванных повреждениями газопроводов в Балтийском море

Номера ГП и случаи их наблюдений	Размер ГП, м	Угол зондирования, °	Контраст ГП, дБ	Контраст слика, дБ	Скорость течения, м/с	Направление течения, °	Направление шлейфа, °	Направление слика, °
1	2	3	4	5	6	7	8	9
СП1–1-а (РЛИ, рис. 4 в)	700	33.61	4	–5	0.97	241	45	270
СП1–1-б (РЛИ, рис. 4 в)	450	43.51	7.5		0.40	229		
СП1–2-а (РЛИ, рис. 4 в)	400	43.72	7.5		0.34	288		
СП2–1-а (РЛИ, рис. 4 г)	550	30.92	2.5	–3	0.97	242		90
СП2–1-б (РЛИ, рис. 4 г)	450	44.17	6		0.34	229		
СП2–1-в (оптика, рис. 4 б)	300				0.73	234	45	
СП1–2-б (оптика, рис. 4 а)	500				0.73	234	0	

о ветровых тенях свидетельствует также то, что они выявлены для ГП, характеризующихся невысокими контрастами УЭПР (2.5 и 4 дБ). Такие невысокие контрасты для ГП указывают на то, что фоновая морская поверхность подвержена ветровому воздействию. Примечательно, что на радиолокационном образе СП1-1-а отчетливо различимы и шлейф, и слик. При этом они располагались с разных сторон от ГП, что указывает на различную физическую природу этих явлений.

Шлейфы, окаймляющие центральные части ГП, уверенно дешифрируются в трех случаях для СП1-1-а, СП2-1-б, СП2-1-в (рис. 4). Обращает на себя внимание (табл. 1, столбцы 7, 8), что шлейфы во всех трех случаях направлены в сторону, противоположную течению. При этом углы ориентации шлейфов и течений отличаются приблизительно на 196°, 189° и 234°. С учетом этого можно предположить, что под воздействием течений основная часть потока газа в процессе всплытия отклонялась от вертикали, оставляя при этом шлейф, ориентированный в сторону проекции источника ГП на морскую поверхность, который образован отделившимися фрагментами газовой струи.

В работе [18], посвященной моделированию подъема струи газа из донного источника,

сообщается, что с приближением газа к поверхности радиус области пузырькового шлейфа увеличивается. Сообщается, что капли воды вблизи межфазной границы расходятся в радиальных направлениях вдоль горизонтальной поверхности, унося за собой пузырьки газа, тем самым интенсифицируя периферийный шлейф. В настоящей работе на основании данных спутникового дистанционного зондирования показано, что в реальных условиях шлейф интенсивного ГП на морской поверхности имеет сложную форму, которая преимущественно обусловлена влиянием течения (рис. 4 и табл. 1). Указанное обстоятельство может использоваться в дальнейшем как для изучения особенностей морских ГП (в том числе путем моделирования), так и для определения параметров водной среды по спутниковым изображениям ГП.

Как видно из табл. 1 (столбец 2), размеры ГП, обнаруженных на морской поверхности, изменяются в пределах от 300 до 700 м. Справедливо связать вариации размеров ГП с возможными изменениями интенсивности потока газа. На основании проведенного анализа было выявлено, что 29 сентября 2022 г. размер ГП, обнаруженного по спутниковому изображению для СП1–1-а, составил 700 м. Это было на 250 м больше, чем размер того же ГП, зарегистрированный

по космическим данным 1 октября 2022 г. для СП1-1-б, что свидетельствовало о снижении выброса газа, связанного с повреждениями на газопроводе Северный поток-1. Такая же ситуация наблюдалась для случая СП2-1-а (29 сентября 2022 г.), когда размер ГП составил 550 м, и для случая СП2-1-б (1 октября 2022 г.), когда размер ГП составил 450 м. Таким образом, размер ГП уменьшился на 100 м, что также свидетельствовало о снижении выброса газа, связанного с повреждениями и на газопроводе Северный поток-2. Отметим, что в работе [10] продемонстрирована общая тенденция к снижению интенсивности выброса газа, возникшего в результате рассматриваемого инцидента, по мере принятия мер по снижению давления газа в трубопроводах и по контролю утечки.

Представляется важным оценить массу газа, поступившего в окружающую среду в результате рассматриваемого инцидента. В настоящей работе представлен подход к решению этой задачи на основании учета объема газопроводов и плотности находящегося в нем газа. В табл. 2 приведены основные исходные и вычисляемые данные, на основании которых определялась масса газа, находящегося в каждой нитке (трубе) газопроводов Северный поток-1 и Северный поток-2.

В качестве исходных для проведения оценок использовались данные, которые приведены ниже.

Каждый из двух газопроводов состоит в свою очередь из двух “ниток”. При этом в результате инцидента были повреждены 3 нитки из 4 (табл. 2).

Нитки газопроводов имеют длины L , различающиеся на 10 км (столбец 3 табл. 2). При этом

внутренний диаметр труб всех ниток d был одинаковым (столбец 4 табл. 2).

Средняя температура морской среды вдоль трасс газопроводов за период наблюдений (с 26 сентября по 2 октября) была определена по модельным данным НУСОМ и составляла $\sim 5.3^{\circ}\text{C}$ (столбец 5 табл. 2). Поставки газа по обоим ниткам Северного потока-1 были приостановлены с конца августа 2022 года по причине выявленных неисправностей на газоперекачивающем агрегате компрессорной станции “Портовая”. Поставки газа по Северному потоку-2 не осуществлялись, однако газопровод был заполнен и приведен в рабочее состояние (<https://www.kommersant.ru/doc/5692721>). Следовательно, в связи с тем, что газ, находящийся в трубопроводах, длительное время не обновлялся, его температура приблизительно была равна температуре окружающей среды.

По данным оператора проекта Nord Stream 2 AG (https://ria.ru/organization_Nord_Stream_2/), давление в нитках газопроводов на момент их повреждения оценивалось в 16.3 МПа для Северного потока-1 и 10.3 МПа для Северного потока-2 (столбец 6 табл. 2).

Вычисляемыми данными являлись следующие:

– Внутренний объем V каждой нитки газопроводов, который может быть оценен, как объем цилиндра $V = \pi \cdot d^2 / 4 \cdot L$ (столбец 7 табл. 2).

– Плотность газа вычислялась с использованием значения его средней температуры (5.3°C) и давления (16.3 МПа – Северный поток-1; 10.3 МПа – Северный поток-2), исходя из ориентировочного состава природного газа ($\sim 97\%$

Таблица 2. Основные исходные данные и результаты вычисления массы выброшенного газа

№ столбца	Исходные данные				Вычисляемые данные				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Название газопровода	Нитка (труба)	Режим использования на момент повреждения	Длина нитки L , км	Внутренний диаметр труб d , м	Температура газа T , $^{\circ}\text{C}$	Давление газа P , МПа	Внутренний объем труб V , м^3	Плотность газа ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Масса выброшенного газа m , Тг
Северный поток-1	№ 1	Заполнена	1224	1.153	5.3	16.3	1277 959	153	0.196
	№ 2	газом, поставки остановлены. Повреждена	1224	1.153	5.3	16.3	1277 959	153	0.196
Северный поток-2	№ 1	Заполнена газом, поставки не начаты	1234	1.153	5.3	10.3	1288 400	92	0.118

метана) для одного из месторождений [19], являющегося ресурсной базой для поставки газа через “Северные потоки”, на основании алгоритма и стандарта ISO 12213-2 NATURAL GAS [20]. Вычисленная плотность газа ρ для Северного потока-1 составила 153 кг/м^3 , а для Северного потока-2 $\sim 92 \text{ кг/м}^3$ (столбец 8 табл. 2).

– Масса газа, выброшенного в результате утечек, вычислялась исходя из его плотности и объема по формуле $m = V \cdot \rho$ и составила (столбец 9 табл. 2) 0.196 Тг для каждой нитки Северного потока-1 и 0.118 Тг для одной нитки Северного потока-2 (вторая нитка этого газопровода не была повреждена).

С учетом вышеизложенного общая масса газа, выброшенного в окружающую среду, составила $2 \cdot 0.196 \text{ Тг} + 0.118 \text{ Тг} = 0.510 \text{ Тг}$.

В работе [11] систематизированы различные ранее полученные оценки массы этого выброса (на основании 8 источников, в том числе научных статей), которые суммарно для обоих газопроводов охватывают диапазон от 0.07 до 0.5 Тг . Полученная в настоящей работе общая оценка массы выброшенного газа приблизительно соответствует верхнему пределу диапазона ранее полученных оценок. Такое соотношение новой и ранее опубликованных оценок обусловлено в том числе тем, что в некоторых ранее выполненных исследованиях учитывались не все нитки газопроводов. Кроме того, результаты натурных и дистанционных измерений, использованные при выполнении предыдущих оценок, учитывали обычно только активную фазу выброса, когда регистрировались только существенные превышения концентрации метана над фоновыми уровнями. Мы же исходим из того, что весь газ, находящийся в трубопроводах, попадал в конечном счете в окружающую среду (преимущественно в атмосферу).

Необходимо отметить, что, по данным работы [3], глобальная интенсивность антропогенных источников метана в атмосферу составляет в среднем $357 \text{ Тг CH}_4/\text{год}$, а глобальная интенсивность естественных источников метана оценивается в $248 \text{ Тг CH}_4/\text{год}$. Исходя из этого, выброс газа, произошедший в результате повреждений трех ниток газопроводов Северный поток-1 и Северный поток-2 (0.510 Тг), сопоставим приблизительно с $1/700$ долей годового глобального антропогенного выброса CH_4 и с $1/1186$ долей годового суммарного антропогенного и естественного выброса метана в атмосферу Земли.

Таким образом, из результатов настоящей работы следует, что в результате повреждений в конце сентября 2022 г. ниток газопроводов Северный поток-1 и Северный поток-2 в Балтийском море, с одной стороны, произошел беспрецедентный по своим масштабам газовый выброс, а с другой стороны, этот выброс не внес существенного вклада в глобальный уровень антропогенных и естественных эмиссий метана в атмосферу Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов анализа радиолокационных и оптических спутниковых изображений выявлены аномально интенсивные газопоявления (ГП) на морской поверхности, связанные с повреждениями ниток газопроводов Северный поток-1 и Северный поток-2 в Балтийском море. Показано, что эти ГП проявлялись в виде куполообразных возвышений морской поверхности, областей интенсивного пенообразования, обрушения волн и искажений структуры поверхностного волнения. Поперечные размеры зон таких ГП достигали $\sim 700 \text{ м}$.

Основными дешифровочными признаками таких ГП являлись положительные контрасты УЭПР (до 7.5 дБ), регистрировавшиеся по радиолокационным изображениям, полученным со спутника Sentinel-1A, а также контрасты спектральной отражательной способности (до 0.73 ед. по формуле Вебера), регистрировавшиеся по многоспектральным оптическим изображениям, полученным со спутников Канопус-В и Sentinel-2В. Кроме того, дешифровочным признаком этих ГП являлась также характерная форма с окаймлением (шлейфом). Выявленные ГП, связанные с повреждениями ниток газопроводов Северный поток-1 и Северный поток-2, регистрировались по спутниковым данным в течение 3 дней (с 29 сентября по 1 октября 2022).

На основании анализа радиолокационных изображений интенсивных ГП был зарегистрирован эффект возникновения ветровой тени, свидетельствующий о значимых возвышениях морской поверхности, проявляющихся в виде куполообразного возвышения, способного снизить ветровое воздействие на морское волнение с подветренной стороны от ГП и уменьшить генерацию поверхностных волн брэгговского диапазона, регистрируемых на радиолокационных изображениях [6].

Комплексный анализ пространственно-геометрических характеристик ГП и полей

течений позволил выявить эффект отклонения струи газа в направлении течения.

На основании обобщения полученных данных и анализа результатов смежных исследований показано, что объем эмиссий газа в атмосферу при повреждении трех ниток газопроводов Северный поток-1 и Северный поток-2 в Балтийском море, произошедших в конце сентября 2022 г., составил ~ 0.51 Тг. Это значение приблизительно сопоставимо с $1/700$ долей годового глобального антропогенного выброса CH_4 и с $1/1186$ долей годового суммарного антропогенного и естественного выброса метана в атмосферу Земли, что свидетельствует о ничтожно малом влиянии этого техногенного события на состояние окружающей среды.

Полученные результаты могут быть использованы для последующих исследований аномалий морской поверхности, связанных с интенсивными выбросами газа природными и антропогенными источниками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемов Ю. Г., Егоров В. Н., Гулин С. Б. Поступление струйного метана в аноксические воды Черноморской впадины // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 6. С. 952–963. DOI: 10.31857/S0030-1574596952-963.
2. Мишукова Г. И., Яцук А. В., Шакиров Р. Б. Распределение потоков метана на границе вода–атмосфера в различных районах Мирового океана // *Геосистемы переходных зон*. 2021. Т. 5. № 3. С. 240–254. DOI: 10.30730/gtrz.2021.5.3.240-247.247-254.
3. Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты / Под ред. академика РАН В. Г. Бондура, академика РАН И. И. Мохова, члена-корреспондента РАН А. А. Макоско. М.: Российская академия наук. 2022. 388 с. ISBN 978-5-907036-54-3.
4. Keeler R. N., Bondur V. G., Vithanage D. Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology*. 2004. V. 45. No. 4. P. 53–58.
5. Бондур В. Г., Филатов Н. Н., Гребенюк Ю. В., Долотов Ю. С., Здореннов Р. Э., Петров М. П., Цидилина М. Н. Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 6. С. 827–846.
6. Бондур В. Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // *Исследование Земли из космоса*. 2010. № 6. С. 3–17.
7. Бондур В. Г., Кузнецова Т. В. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 4. С. 30–43. DOI: 10.7868/S020596141504003X
8. Bondur V. G. Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // *Waste Water — Evaluation and Management*, 2011. ISBN 978-953-307-233-3. P. 155–180. DOI: 10.5772/16134. <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>.
9. Бондур В. Г., Журбас В. М., Гребенюк Ю. В. Математическое моделирование турбулентных струй глубинных стоков в прибрежные акватории // *Океанология*. 2006. Т. 46. № 6. С. 805–820.
10. Jia M., Li F., Zhang Y., Wu M., Li Y., Feng S., Wang H., Chen H., Ju W., Lin J., Cai J., Zhang Y., Jiang F. The Nord Stream pipeline gas leaks released approximately 220,000 tonnes of methane into the atmosphere // *Environmental Science and Ecotechnology*. 2022. V. 12. P. 100210. DOI: 10.1016/j.es.2022.100210.
11. Chen X., Zhou T. Negligible Warming Caused by Nord Stream Methane Leaks // *Adv. Atmos. Sci.* 2023. V. 40. № 4. P. 549–552. DOI: 10.1007/s00376-022-2305-x.
12. Kennicut M. C., Brooks J. M., Bidigare R. R., Fay R. R., Wade T. L., McDonald T. J. Vent type taxa in a hydrocarbon seep region on the Louisiana slope // *Nature*. 1985. V. 317. No. 6035. P. 351–353. DOI: 10.1038/317351a0.
13. Fannin N., Hovland M., Judd A. G. Seabed Pockmarks and Seepages. Impact on Geology, Biology and Marine Environment // *Geological Magazine*. 1990. V. 127. № 1. С. 85–86. DOI: 10.1017/S001675680001428X.
14. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment // Cambridge University Press. 2007. 475 p. DOI: 10.1017/CBO9780511535918.
15. Keeling R. F. On the role of large bubbles in air-sea gas exchange and supersaturation in the ocean // *Journal of Marine research*. 1993. V. 51. No 2. P. 237–271. DOI: 10.1357/0022240933223800.
16. Бондур В. Г., Зубков Е. В. Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многозональным спутниковым изображениям высокого разрешения. Часть 1. Эффекты сброса дренажных каналов в прибрежные акватории // *Исследования Земли из космоса*. 2005. № 4. С. 54–61.

17. *Pugach S. P., Pipko I. I., Shakhova N. E., Shirshin E. A., Perminova I. V., Gustafsson O., Bondur V. G., Ruban A. S., Semiletov I. P.* Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // *Ocean Science*. 2018. V. 14. No. 1. P. 87–103. DOI: 10.5194/os-14-87-201.
18. *Чжан Ч., Меньшов И. С.* Численное моделирование истечения природного газа из подводного газопровода // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2017. № 74. С. 1–18. DOI: 10.20948/prepr-2017-74.
19. *Рябов Д. Ю., Истомин В. А., Сергеева Д. В.* Распределение пластовой температуры по площади туронской залежи Южно – Русского месторождения // *Вести газовой науки*. 2022. Т. 52. № 3. С. 4–13.
20. *Starling K. E., Savidge J. L.* Compressibility factors of natural gas and other related hydrocarbon gases // *American Gas Association/ Transmission Measurement Committee Report*. Second Edition. 1992. No. 8. 205 p.

REGISTERING FROM SPACE INTENSIVE GAS SEEPS ON THE SEA SURFACE DUE TO DAMAGE TO NORD STREAM 1 AND NORD STREAM 2 GAS PIPELINES

Academician of the RAS **V. G. Bondur^a, V. V. Zamshin^a, V. N. Chernikova^{a, #}**

^a*Scientific Research Institute of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: office@aerocosmos.info*

Anomalously intensive gas seeps on the sea surface due to damage to Nord Stream 1 and Nord Stream 2 underwater gas pipelines in the Baltic Sea have been analyzed using optical (Kanopus-B and Sentinel-2B) and radar (Sentinel-1A) satellite images. Positive contrasts of NRCS (up to 7.5 dB) registered by Sentinel-1A radar and of spectral reflectance (up to 0.73 units) registered by Kanopus-B and Sentinel-2B optical sensors have been detected in the area of such gas seeps. Those seeps' features were revealed on the sea surface, namely dome-shaped swells, fountains, vortices, foam, wave breaking, surface wave structure disturbance, and wind shadow. Taking into account the volume and density of gas located in the damaged pipelines, it is shown that the total volume of methane release was no more than ~ 0.51 Tg, i.e., less than 0.1% of the annual global methane emissions into the atmosphere.

Keywords: gas seeps, marine surface, remote sensing, satellite data, multispectral imagery, radar imagery, underwater pipelines, vortices