

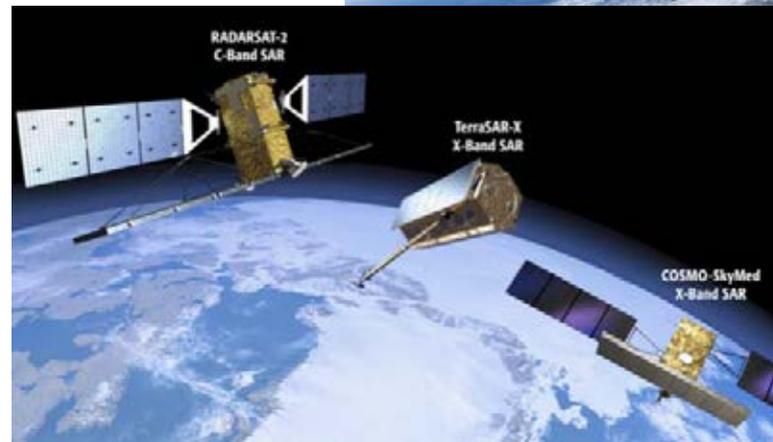
**СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ
ЕСТЕСТВЕННЫХ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ НА
МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

*М.И. Митягина**

Институт космических исследований РАН



RADio Detection And Ranging



ПЕРВЫЙ СПУТНИК, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА



Seasat (Seafaring Satellite), NASA JPL

Запуск - 27 июня 1978

Полезная нагрузка

1. Первый исследовательский (необоронного назначения) радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) L-диапазон (23 см), НН – поляризация
2. Альтиметр
3. СВЧ скаттерометр (направление и сила ветра)
4. СВЧ-радиометр (ТПО)
5. Радиометр оптического диапазона (видимый + ИК)

Seasat функционировал 110 дней

За это время было собрано больше информации об океане, чем за предыдущие 100 лет судовых исследований

РЛ-образ морской поверхности зависит от:

- ✓диапазона зондирования;
- ✓поляризации излучения;
- ✓угла падения зондирующего сигнала

Излучающее устройство радиолокатора передает электромагнитную волну.

Ее характеристиками являются:

длина λ ;

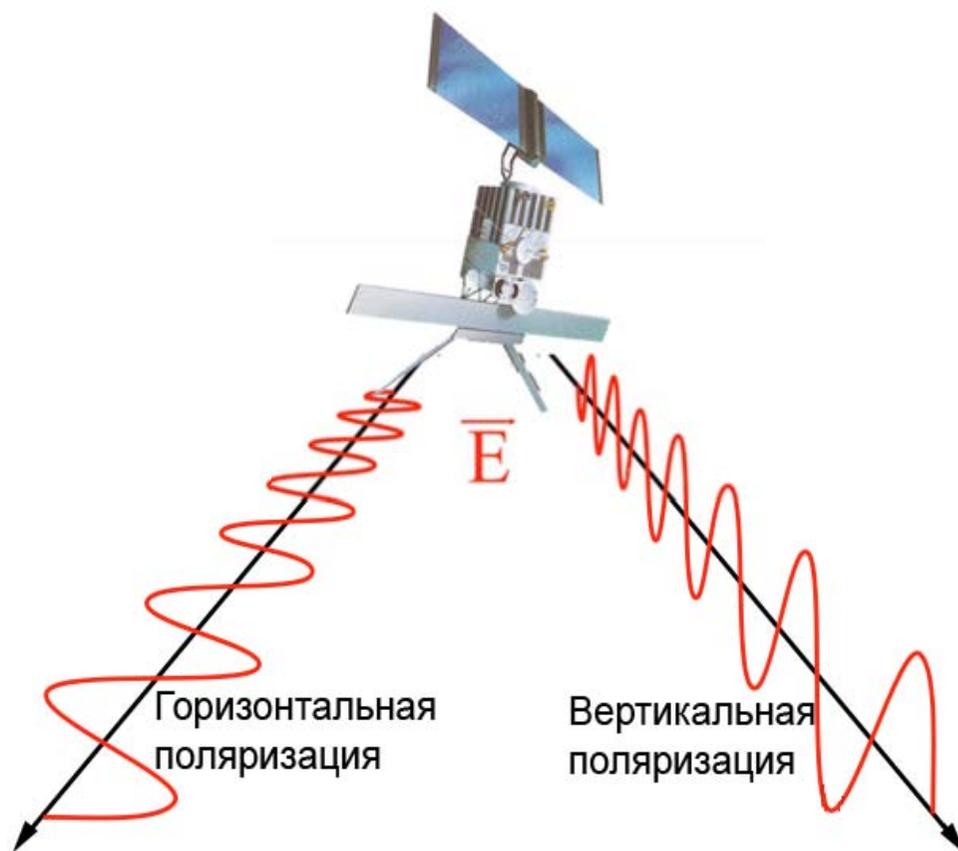
частота – величина $f = C/\lambda$, где C - скорость распространения электромагнитных волн в среде;

волновой вектор, указывающий направление распространения волны;

поляризация электромагнитной волны — очень важное свойство, от положения плоскости поляризации по отношению к отражающей поверхности зависит коэффициент отражения волны.



ТИПЫ ПОЛЯРИЗАЦИЙ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА

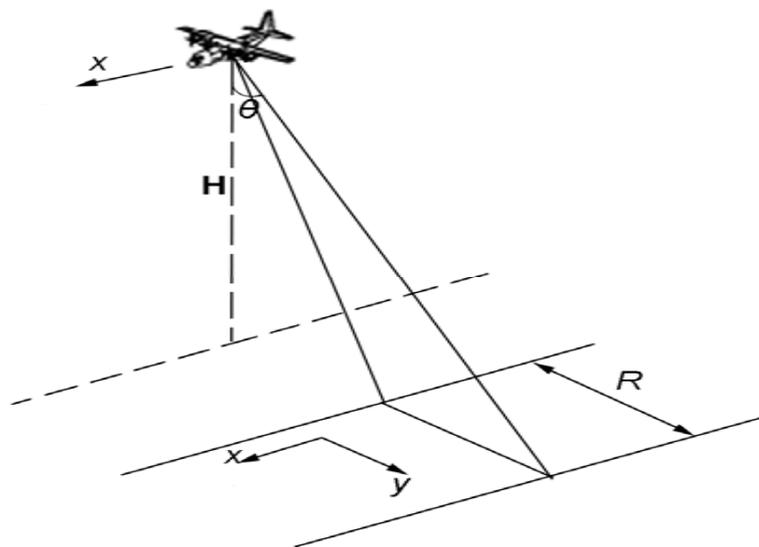


В зависимости от конструктивных особенностей и режима работы РЛС приемо-передающие системы могут осуществлять:

- ✓ -излучение и прием на вертикальной (ВВ) поляризации;
- ✓ -излучение и прием на горизонтальной (ГГ) поляризации;
- ✓ -излучение и прием на перекрестных поляризациях (ВГ и ГВ)

Вектор электрического поля при горизонтальной и вертикальной поляризации зондирующего сигнала

ГЕОМЕТРИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ (РАДИОЛОКАТОРЫ БОКОВОГО ОБЗОРА)



Геометрия съемки радиолокационной станции бокового обзора (РЛСБО).

Антенна такой станции вытягивается вдоль фюзеляжа самолета и обеспечивает боковое "видение".

В частности, при длине волны $\lambda=2$ см и длине антенны $L_a=6$ м (для самолетной антенны это довольно большая длина) и номинальной высоте полета 2 км имеем $\Delta\varphi \approx 1/300$ рад, элемент разрешения Δx на расстоянии $y=10$ км от оси полета составит $\Delta x = y \cdot \Delta\varphi / 2 = 15$ м.

В рассмотренном примере элемент разрешения ("пиксел") на плоскости x, y представляет собой квадрат размером 15 м x 15 м

Разрешение в боковом направлении (по наклонной дальности) определяется длительностью импульса τ :

$$\Delta y = \frac{C\tau}{2\sin\theta}$$

C - скорость света, θ - угол зондирования.

При типичной длине импульса $\tau=0,1$ мкс и высоких углах зондирования разрешение по наклонной дальности составит примерно 15 м.

Разрешение в азимутальном направлении, т.е. в направлении полета (ось x), зависит от угловой (азимутальной) ширины диаграммы направленности $\Delta\varphi$,

которая может быть оценена как отношение длины волны λ к длине антенны L_a : $\Delta\varphi \sim \lambda / L_a$.

Разрешение в азимутальном направлении определяется следующим образом: $\Delta x = \frac{H\Delta\varphi}{\cos\theta}$

ТРАДИЦИОННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНОВ

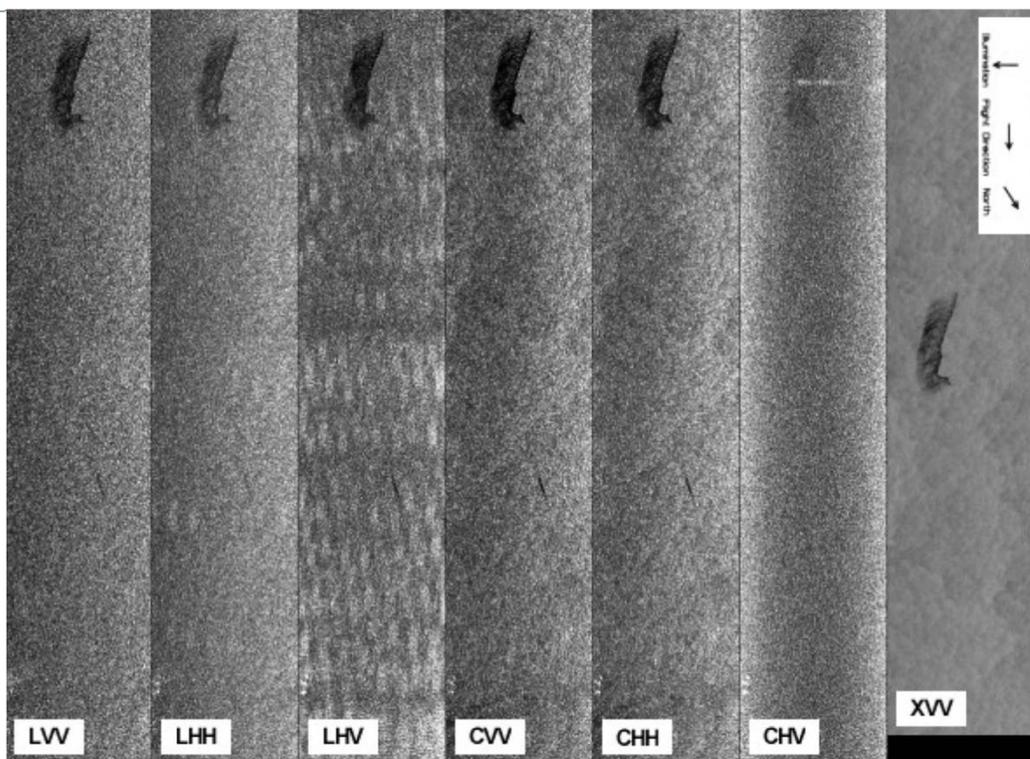
Диапазон	Этимология	Частоты	Длина волны	Применение
P	previous	< 300 МГц	> 1 м	Использовался в США на первых самолетах-лабораториях NASA
L	Long	1 — 2 ГГц	15 — 30 см	РСА на борту ИСЗ <i>SEASAT</i> (США) и <i>JERS-1</i> (Япония), сенсор SIR-C/X-SAR на борту космического челнока «Endeavor»(США) <i>ALOS-2</i> (Япония)
S	Short	2 — 4 ГГц	7,5 — 15 см	РСА ИСЗ «Алмаз-1»
C	Compromise промежуточный диапазон между X и S	4 — 8 ГГц	3,75 — 7,5 см	РСА на борту европейских спутников <i>ERS-1,2</i> и <i>Envisat</i> и канадских спутников <i>RADARSAT-1,2</i> <i>SENTINEL-1</i>
X		8 — 12 ГГц	2,5 — 3,75 см	РСА на борту германского спутника <i>TERRA/SAR-X</i> , <i>TANDEM</i> в США диапазон 10,525 ГГц ± 25 МГц используется в РЛС аэропортов <i>Costo-SkyMed</i> (Италия)
K_u	under K нем. Kurz — «короткий»	12 — 18 ГГц	1,67 — 2,5 см	Ледовая разведка, картографирование высокого разрешения, спутниковая альтиметрия. РЛСБО «Нить» и «Торос» на борту самолетов-лабораторий ТУ-134 Сх и Ан-24.

Обозначения сложились на Западе в ходе Второй мировой войны. В настоящее время они закреплены в США стандартом IEEE, а также международным стандартом ITU

HH	VV
«Алмаз-1»,	ERS-1, -2
Seasat,	
JERS-1	

Спутниковые радиолокаторы первого поколения обладали возможностью съемки на одной фиксированной поляризации зондирующего сигнала:

	VV	HH	VV/HH	VH	HV	VV/VH	HH/HV
Envisat	+	+	+			+	+
Radarsat-2	+	+	+			+	+
TerraSAR-X	+	+	+			+	+
Cosmo-SkyMed	+	+	+	+	+		
ALOS-2	+	+		+	+		
Sentinel-1	+	+				+	+



РЛ-изображение, полученное в районе течения Куроисио 04.10.1994, 20:25 UTC сенсором SIR-C/X-SAR одновременно в трех диапазонах и при различных поляризациях зондирующего сигнала. Ширина каждого фрагмента 21 км. В полосе обзора на морской поверхности находится нефтяное загрязнение, деформированное под воздействием ветра.

В апреле и октябре 1994 г. сенсор SIR-C/X-SAR, установленный на космическом челноке Endeavour был задействован в двух экспериментах, в ходе которых проводились измерения вариаций интенсивности обратнорассянного сигнала L-, C- и X-диапазонов на контролируемых разливах нефти и различных видов ПАВ.

Эксперименты проводились в Северном море, а также в Северной части Японского моря и в районе течения Куроисио [Gade et al., 1998].

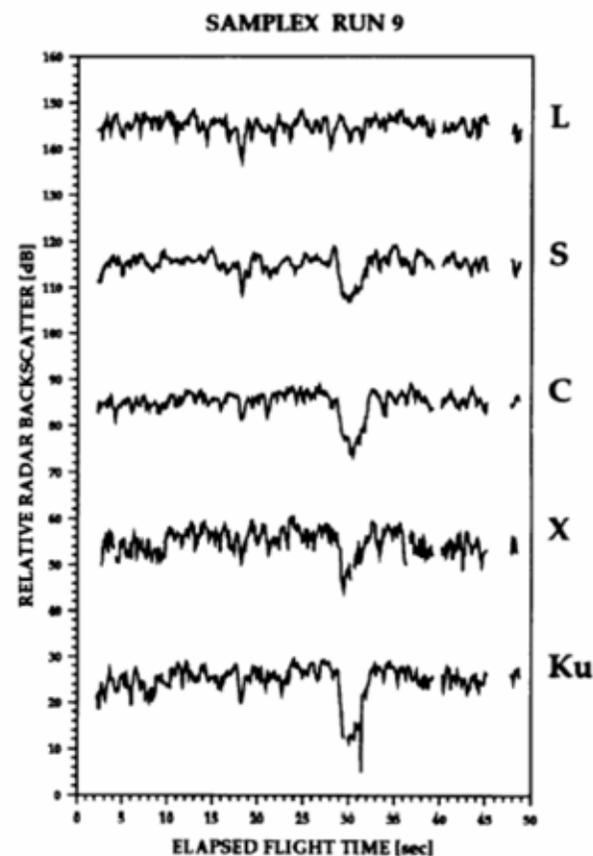
Ряд экспериментов с контролируемыми разливами нефти и поверхностно-активных веществ был проведен в Северном море (MARSEN79, SAXON FPN, SAMPLEX92). В этих экспериментах были задействованы многочастотные многополяризационные радиолокаторы и скаттерометры авиационного базирования, с помощью которых измерялись радиолокационные контрасты различных нефтяных пятен и пятен ПВА. Цель экспериментов состояла в определении зависимости радиолокационных контрастов от типа пленочного загрязнения и условий наблюдения, в частности, от приповерхностного ветра.

Было установлено, что модуляция сигнала для каждой частоты имеет различный тип зависимости от скорости ветра и типа пленочного загрязнения [Hühnerfuss et al., 1983].

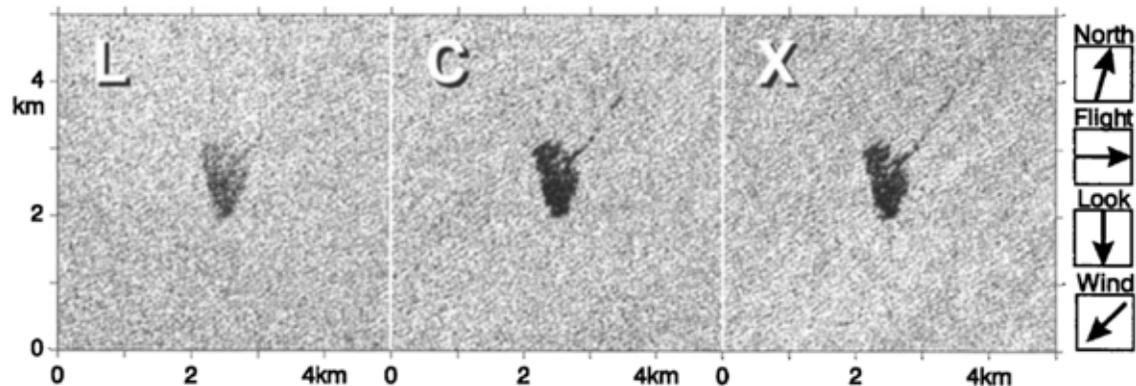
Наиболее значительные контрасты наблюдались в С-, Х- и Ку – диапазонах.

Контрасты, измеренные для разливов «легкой» нефти, составляли 5 дБ, а для разливов «тяжелого» топлива доходили до 10-15 дБ.

В то же время обратно-рассеянный сигнал L- и S-диапазонов слабо реагировал на присутствие поверхностных пленок

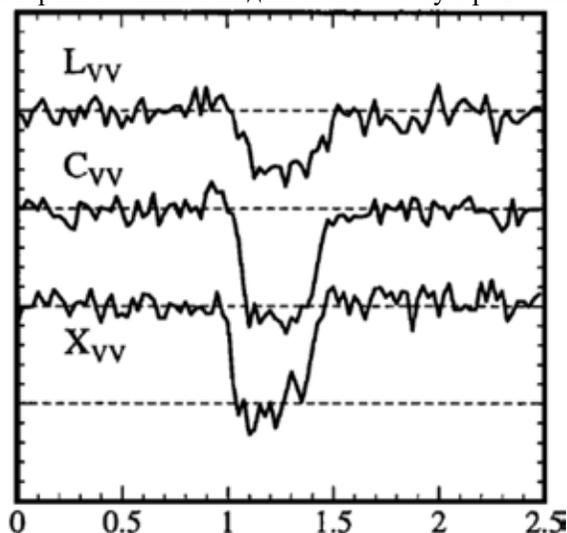


Вариации интенсивности обратно-рассеянного сигнала для 5 различных диапазонов на VV поляризации при угле зондирования 25° , полученные при полетах над разливом нефти 1 июня 1992 [согласно (Wismann, 1992)]



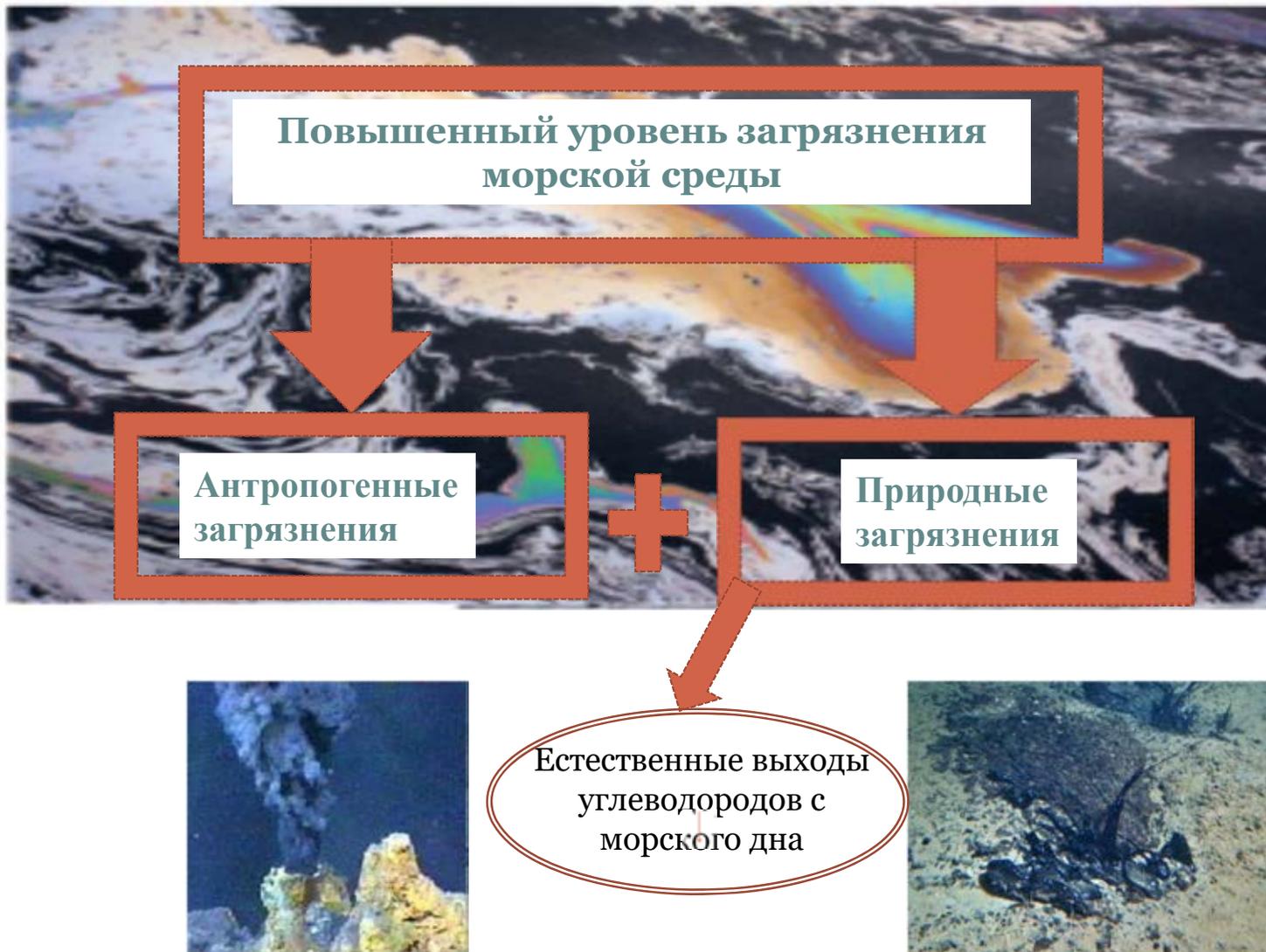
Неожиданным результатом оказалось, что биогенные слики естественного происхождения обуславливают более сильную модуляцию радиолокационных контрастов, чем пятна нефтяного загрязнения.

Фрагменты РЛИ, полученного сенсором SIR-C/X-SAR одновременно в трех диапазонах на VV поляризации 18.04.1994, 05:26 UTC, на которых отчетливо видны мономолекулярные пятна (олеиновый спирт)



Подобные измерения проводились при различных скоростях ветра, и был сделан вывод, что для одного и того же ПАВ глубина модуляции интенсивности обратно-рассеянного сигнала существенным образом зависит от скорости ветра

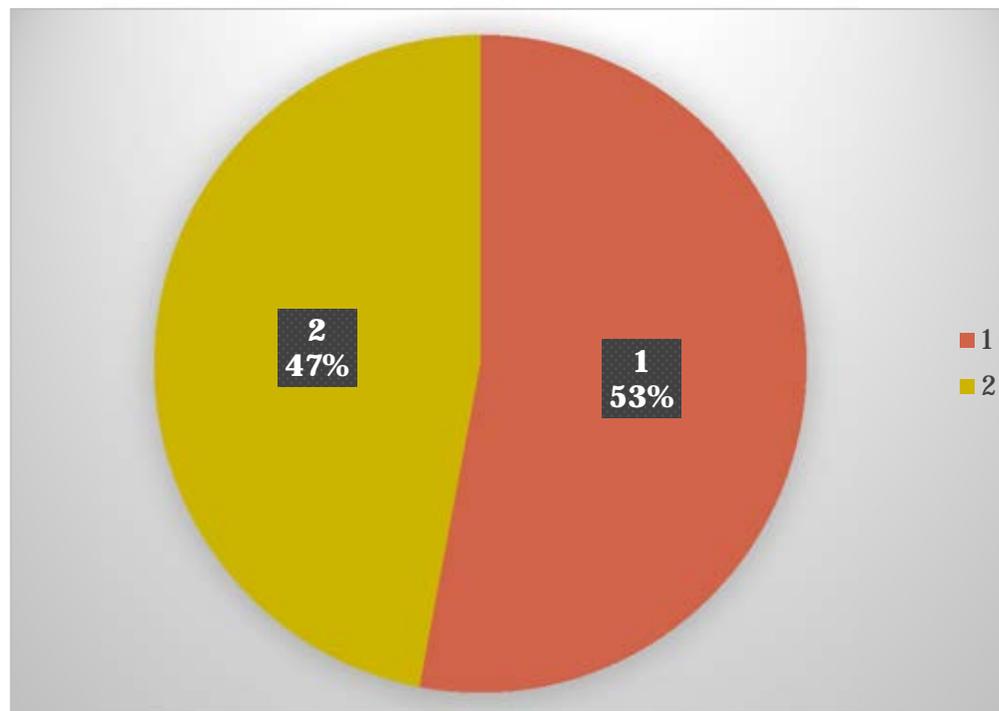
Вариации интенсивности обратно рассеянного сигнала для трех различных диапазонов на VV поляризации



Сырая нефть, поступающая в Мировой океан

47 %

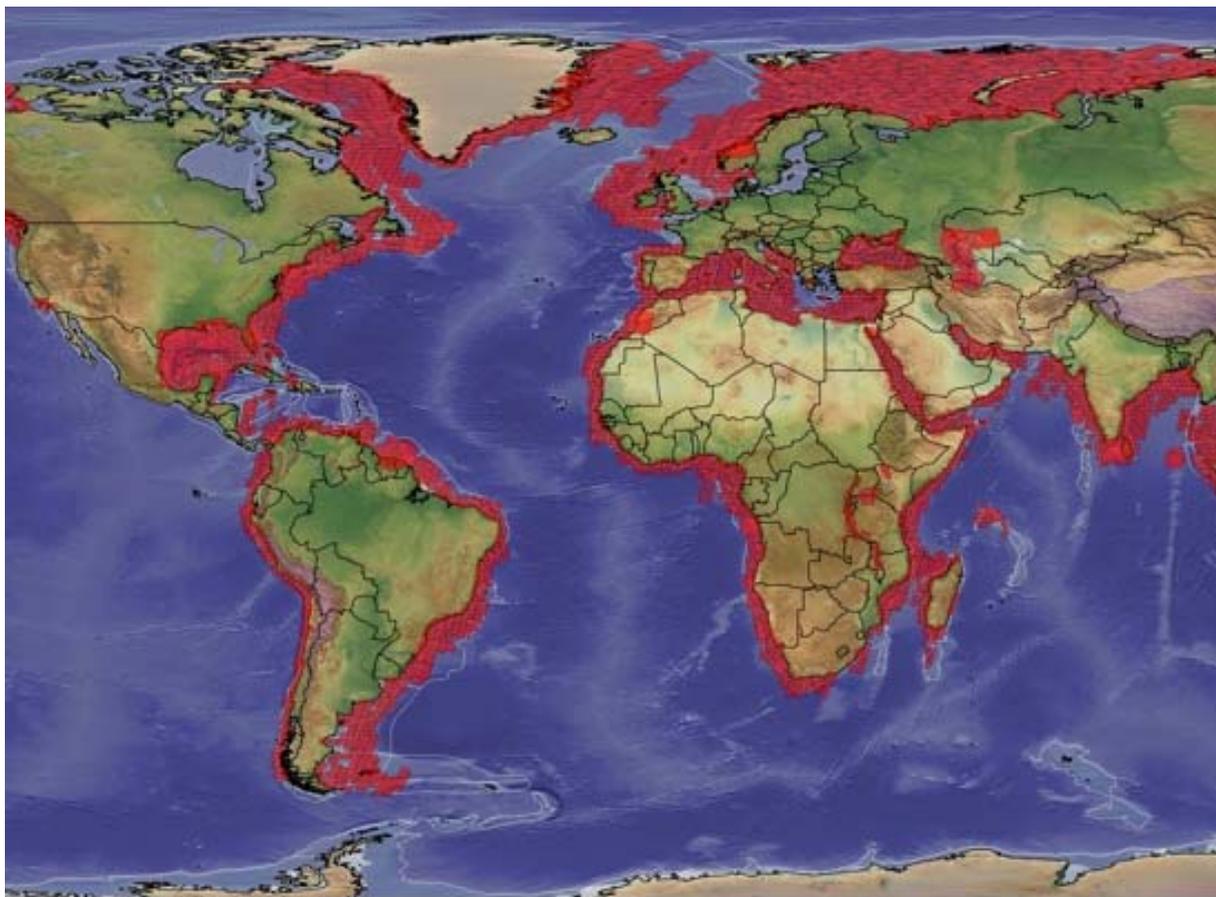
- обусловлено естественными выходами с морского дна



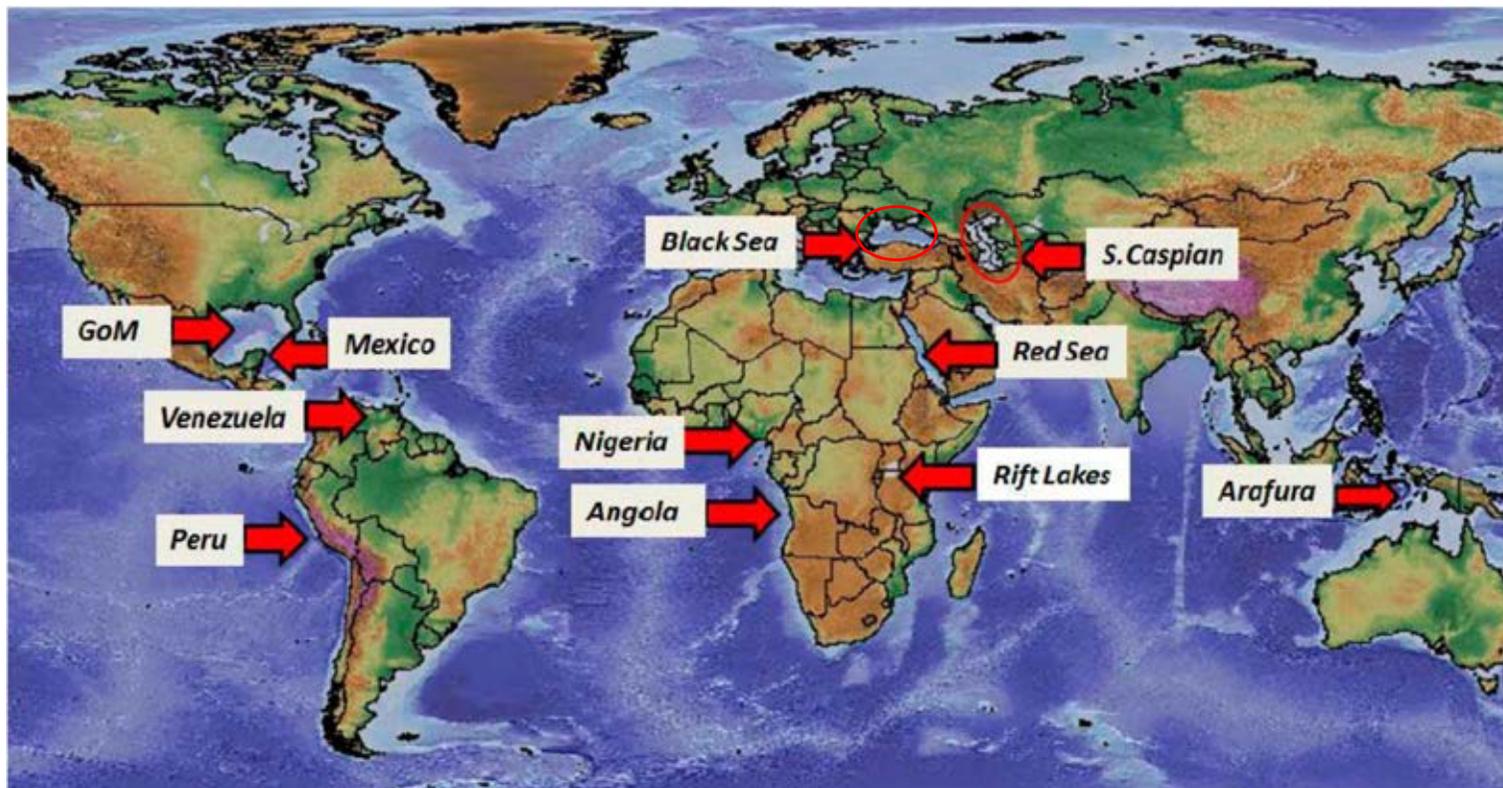
53%

- Утечки и разливы во время добычи, транспортировки, переработки, хранения и промышленного использования нефти
- Результате аварий на нефтяных платформах и судах,

GLOBAL OFFSHORE SEEPS DATABASE



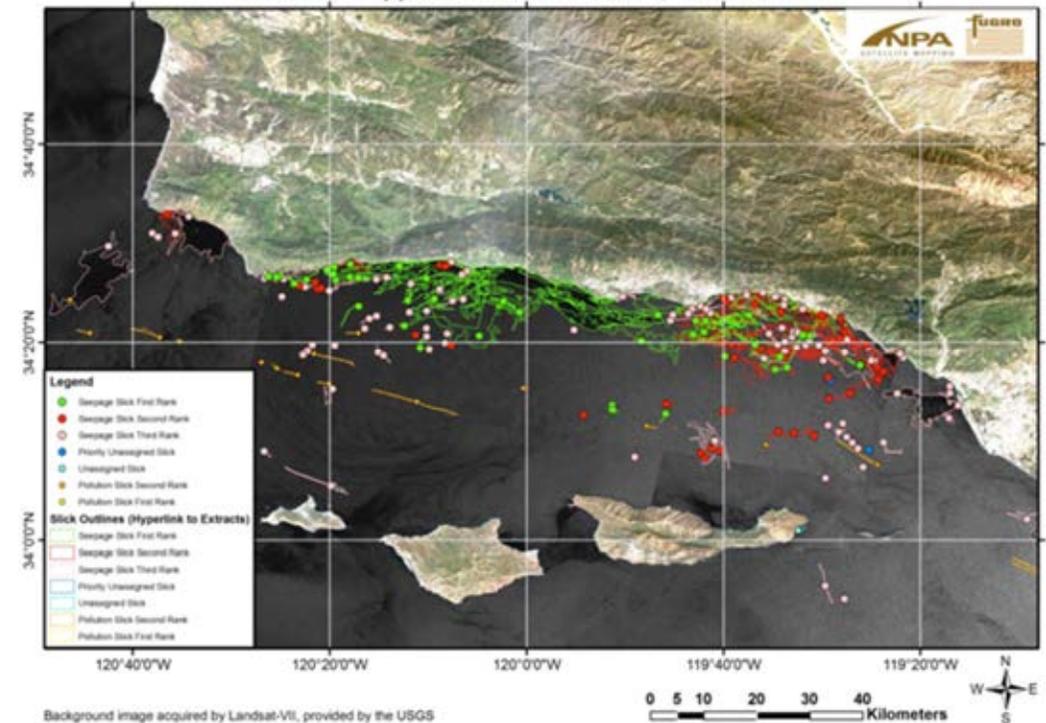
«ГОРЯЧИЕ ТОЧКИ» СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ



MARINE SEEPS IN THE SANTA BARBARA CHANNEL



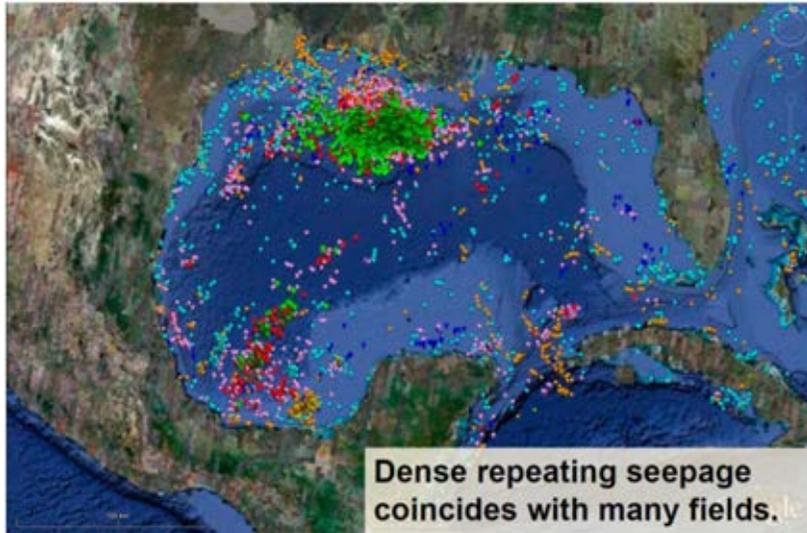
Oil slicks mapped from satellite SAR, Santa Barbara



The largest natural oil and gas seeps in the Western Hemisphere lie in the Santa Barbara Channel.

According to the California State Lands Commission, they comprise more than 1,200 of the over 2,000 active submarine seeps along the California coast.

THE GULF OF MEXICO



A satellite survey published in January of 2000 counted at least 600 natural oil seeps within the Gulf of Mexico. And they release a lot of oil.

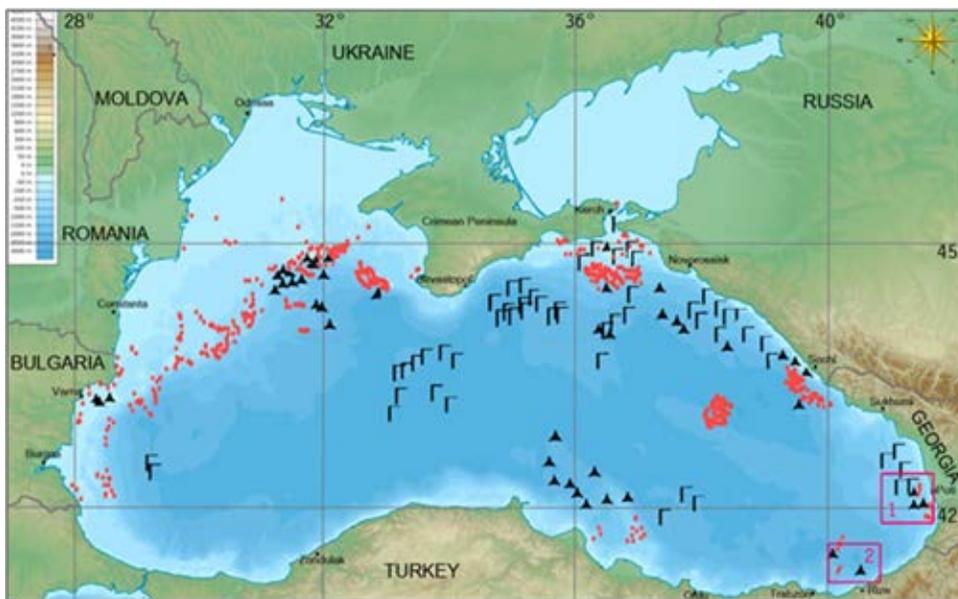
Studies in parts of the Gulf of Mexico (MacDonald et al., 1993; MacDonald, 1998; Mitchell et al., 1999), have resulted in an estimated seepage rate for the entire Gulf of Mexico of 140,000 tonnes per year (range of 80,000 to 200,000 tonnes per year).

The SAR images indicate that water is covered with oil amounts to,

- a) conservatively ~850 sq. km of the in the northern Gulf of Mexico
- b) and ~150 sq. km in the southern Gulf of Mexico.

1. Mitchell, R., MacDonald, I. R. & Kvenvolden, K. Estimates of total hydrocarbon seepage into the Gulf of Mexico based on satellite remote sensing images. EOS Supplement 80, OS242 (1999).
2. MacDonald, I. R. et al. Asphalt volcanism and chemosynthetic life, Campeche Knolls, Gulf of Mexico. Science 304, 999-1002 (2004).

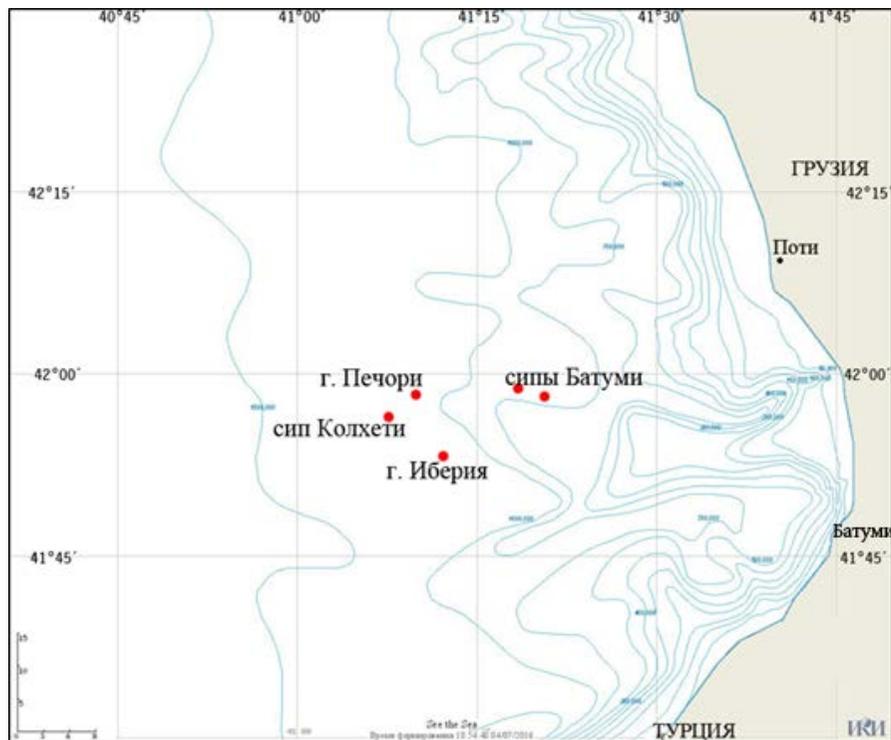
КАРТА-СХЕМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАНОВЫХ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ В ЧЁРНОМ МОРЕ



- Красные точки – задокументированные метановые выделения.
- Черные треугольники – выходы нефти и газа на поверхность.
- Г- грязевые вулканы

Районы наиболее интенсивных проявлений разгрузки углеводородных газов из недр в толщу воды :

- шельф Болгарии (свыше 480 выходов газа на дне моря);
- северо-западный шельф Черного моря (около 200);
- Керченско-Таманский шельф;
- шельф России по всей площади Сочи-Адлерской депрессии;
- грузинский шельф и континентальный склон (565);
- турецкий шельф в прибрежной зоне восточных Понтид в районе Ризе;
- глубоководная часть. Свыше 60-ти грязевых вулканов задокументировано к настоящему времени в Чёрном море, преимущественно, в центральной его части и в прогибе Сорокина на глубинах свыше 1500 м



Батиметрическая карта морского дна в грузинском секторе Черного моря с нанесёнными на неё исследованными метановыми сипами

В районе Поти-Батуми, на дне на расстоянии примерно 50 км от береговой черты расположены 4 холодных метановых сипа

ВОСТОЧНАЯ ЧАСТЬ АКВАТОРИИ ЧЁРНОГО МОРЯ В РАЙОНЕ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО СКЛОНА ВБЛИЗИ ПОБЕРЕЖЬЯ ГРУЗИИ

На спутниковых изображениях этого участка акватории выявляются сликовые образования, радикально отличающиеся по своим структурным характеристикам как от нефтесодержащих сликов, образовавшихся в результате судовых сбросов, так и от сликов, образованных на морской поверхности плёнками биологического происхождения, повсеместно и постоянно встречающихся на морской поверхности.

ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ РАБОТЫ В ГРУЗИНСКОМ СЕКТОРЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

НИС «Профессор Водяницкий» (42–й рейс, июнь 1993 г.).

НИС «Профессор Водяницкий» (46–й рейс, август 1994),

«Посейдон» (Германия) (317–й рейс, октябрь – ноябрь 2004 г.)

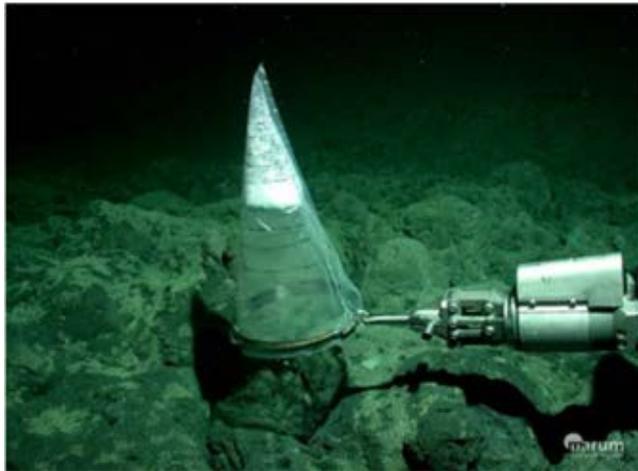
НИС «Профессор Логачев» (26-й рейс, июнь 2005г) - часть учебной и исследовательской программы ЮНЕСКО

«Метеор» (Германия) (72–й рейс, март – апрель 2007 г.,

84-й рейс, март 2011 г) - проект METRO (Methane and methane hydrates within the Black Sea).

ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ РАБОТЫ В ГРУЗИНСКОМ СЕКТОРЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

- Акустические исследования
- Детальные геохимические анализы
- Заборы проб грунта
- Определение состава газогидратов и выделяющихся газов



Gas bubble catcher



Gas hydrate experiment

ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ РАБОТЫ В ГРУЗИНСКОМ СЕКТОРЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

ВЫВОДЫ:

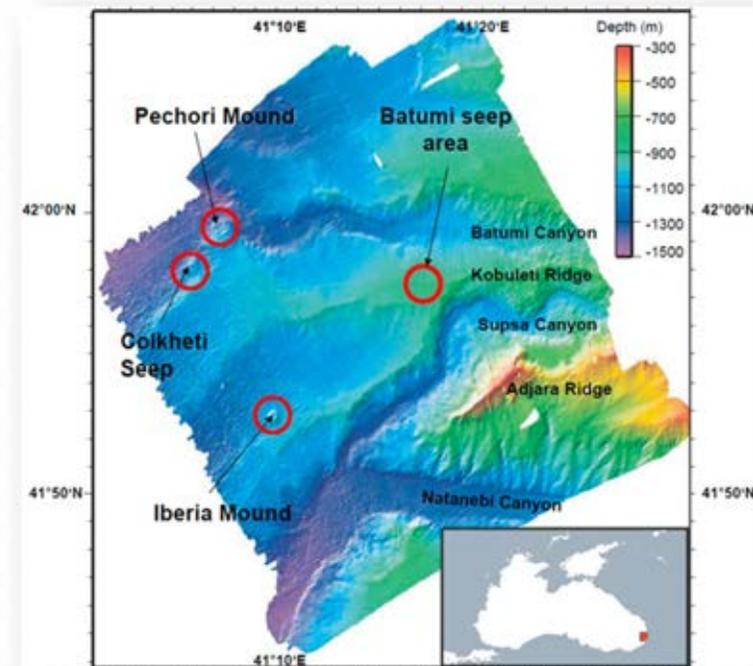
- I. Глубоководные сипы в грузинских водах представляют собой уникальный для Чёрного моря тип струйных газовыделений, в которых метан сосуществует одновременно в свободной форме и в виде газогидратов.
- II. Отличительной чертой этих сипов является присутствие следов нефти в донных газогидратах и полное отсутствие признаков грязевого вулканизма.
- III. На поверхности моря в районах обнаружения этих сипов различными исследователями отмечалось присутствие нефтяных пятен природного происхождения.

ЧИСЛОВАЯ МОДЕЛЬ РЕЛЬЕФА ДНА В ГРУЗИНСКОМ СЕКТОРЕ ЧЕРНОГО МОРЯ, ПОСТРОЕННАЯ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Два конусообразных поднятия:

- 1) диапировая гора Печори, диаметром 2-2,5 км и высотой 75 м
- 2) диапир у сипа Колхети диаметром 1,4 км и высотой 20 м

В районе Поти-Батуми, на дне на расстоянии примерно 50 км от береговой черты расположены 4 холодных метановых сипа



Батиметрическая карта морского дна в грузинском секторе Черного моря с нанесёнными на неё исследованными метановыми сипами

ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ РАБОТЫ В ГРУЗИНСКОМ СЕКТОРЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

Подводные выходы газов:

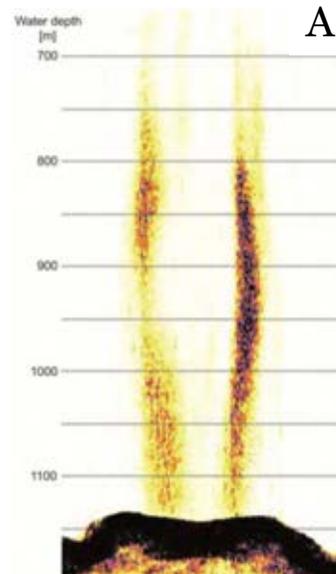
(А) - два газовых факела сипа Колхети,
функционирующие одновременно

(Б) - газовый факел из кратера
диапировой горы Печори

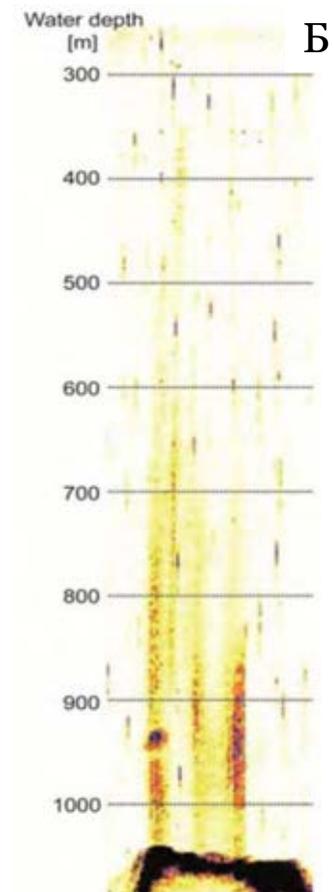
Ширина газовых факелов соответствует
ширине кратеров у горы Печори и сипа
Колхети

Ослабление интенсивности отражённого в
газовом факеле эхо-сигнала по
направлению от морского дна к
поверхности свидетельствует о том, что
потенциально морской поверхности
достигают лишь достаточно крупные
пузырьки диаметром около 1 см
более мелкие пузырьки при всплытии
разрушаются на первых 100 м

PARASOUND echograms showing acoustic anomalies
('flares') originating from rising gas bubbles or oil coated
gas bubbles.

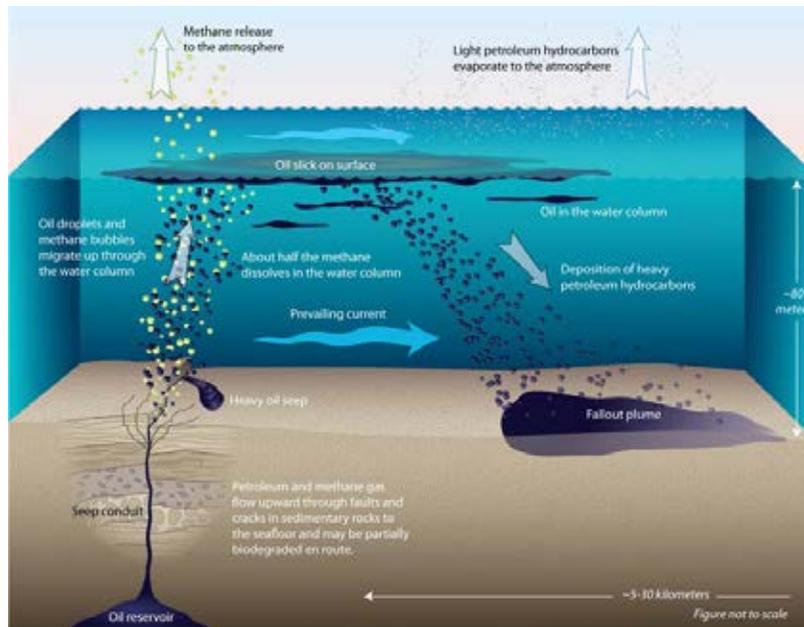


Two flares at the Colkheta
seep



Pechory mound

ТРИ ФОРМЫ ВЫХОДА НЕФТЕГАЗОВЫХ КОМПОНЕНТ



При естественных выходах углеводорода только малая часть органического вещества попадает на поверхность моря в виде нефтяной пленки, тогда как наибольшим углеводородным загрязнениям подвержены морское дно и нижние слои водного столба в окрестности естественного источника.

Oil and gas are released from a seep vent in three forms: gas bubbles, oil drops and oily bubbles (gas bubbles coated with a thin layer of oil)

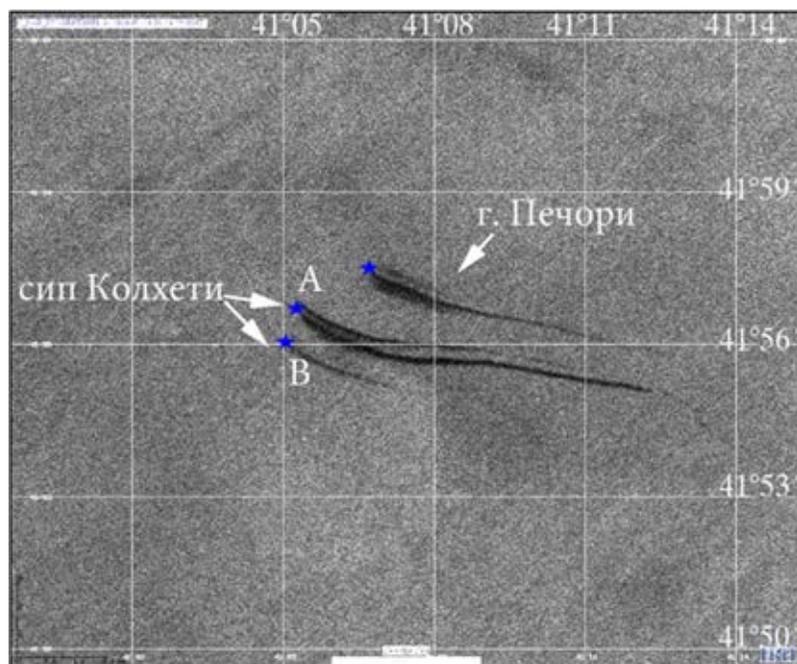
Only big enough bubbles of about 1 cm in diameter are able to reach the surface, whereas smaller ones are getting dissolved while rising the first hundred meters of the water column

Rising gas bubbles are quickly dissolved releasing organic matter into the water. Oil drops with high density are cooled by contact with water and sink to the floor near the vent

Low-density oil drops dissolve or mix with water while rising from deep locations

Only oily bubbles having small mass and significant size are able to cover large distances at high speed. Inside such a bubble, there is a drop of oil formed due to thickening of the bottom of oil coating during rise, and surface tension force prevents the bubble from collapsing. The oil drop inside the bubble is protected by the coating from contact with water, it safely reaches the surface where the coating collapses with the gas released to the atmosphere and the oil left on the sea surface

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ В НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ БЛИЗОСТИ ОТ ТОЧКИ ВЫХОДА НА МОРСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ



Фрагмент РЛИ SAR Sentinel -1A
от 24.05.2016, 03:24 UTC

Характерный признак, общий для естественных нефтепроявлений на морской поверхности в рассматриваемом районе – их «полосчатая» структура.

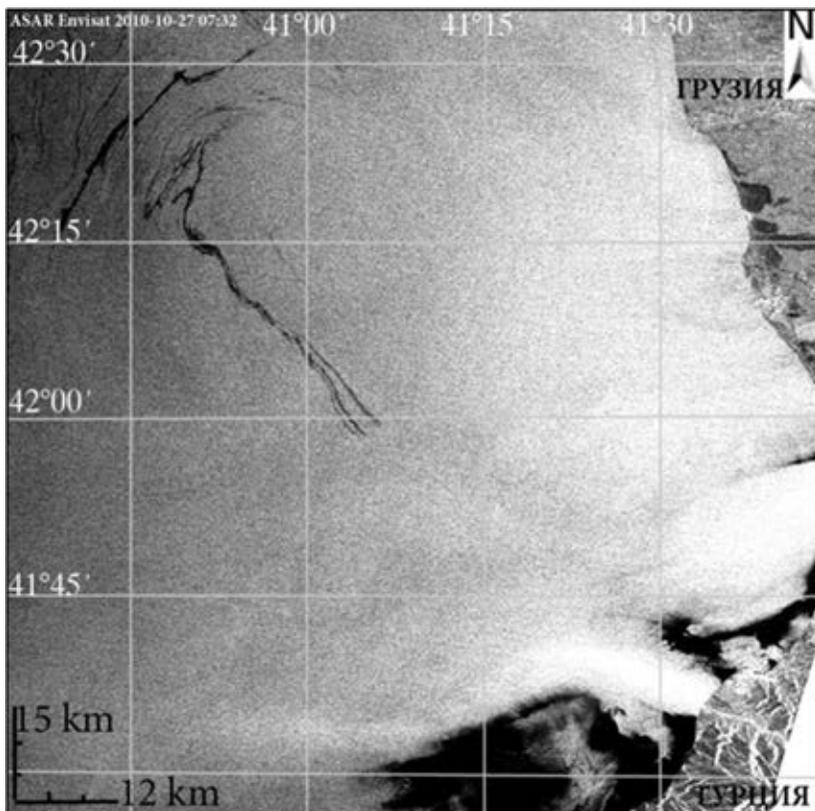
Факт наличия трех четко различимых полос объясняется тем, что нефть доставляется на морскую поверхность газовыми пузырьками в результате одновременной активности трёх газовых факелов: из горы Печори и двух ядер прорывания сипа Колхети

Вблизи точки всплытия наблюдаются три сликовые полосы различной ширины. В процессе эволюции и дрейфа слика эти полосы могут слиться, а могут продолжать эволюционировать относительно синхронно, сохраняя при этом свою обособленность.

Наибольшая толщина плёнки наблюдается вблизи точки всплытия. Поверхностный слик формируется под влиянием поля ветра и течений.

В зависимости от условий формирования поверхностная плёнка либо вытягивается вдоль направления приповерхностного ветра, либо вовлекается в вихревые движения воды.

ПРИМЕР ПОВЕРХНОСТНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА СПУТНИКОВОМ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ИЗОБРАЖЕНИИ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ



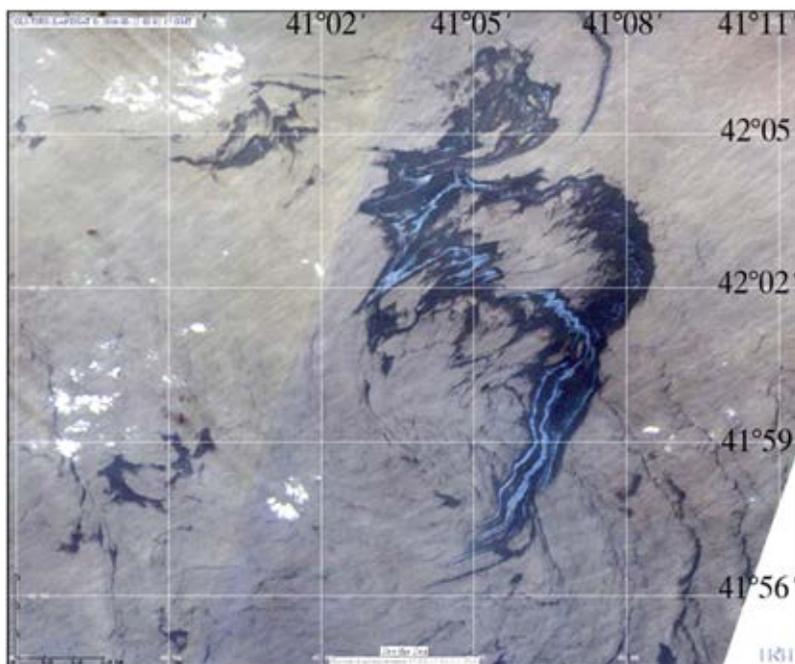
РЛИ ASAR Envisat от 27.10.2010, 07:32 UTC

После всплытия на поверхность нефтяная плёнка начинает распространяться в северо-западном направлении, принимая под влиянием сильного приповерхностного ветра форму узкой вытянутой извилистой полосы.

На расстоянии около 39 км от начальной точки нефтяная плёнка захватывается поверхностным течением, вовлекается в вихревые движения и продолжает мигрировать вместе с вихревой структурой.

Общая площадь нефтесодержащего слика - 44,5 км².

ПРИМЕР ПОВЕРХНОСТНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА СПУТНИКОВОМ ИЗОБРАЖЕНИИ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ



Фрагмент цветосинтезированного изображения сенсора Landsat-8 OLI (4, 3 и 2 спектральные каналы) от 22.08.2016, 08:02 UTC

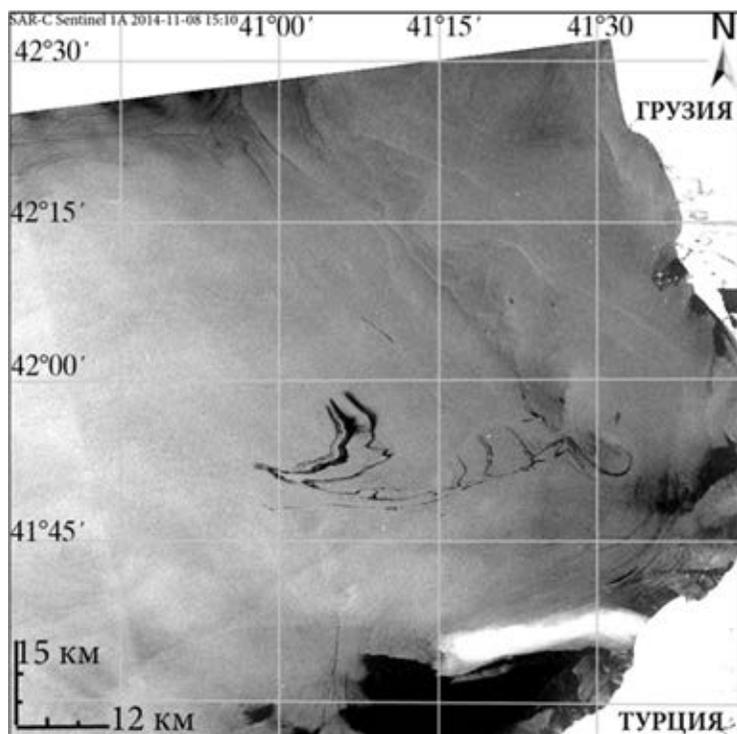
Отчётливо просматриваются три сформированные тонкие протяжённые полосы повышенной яркости, окружённые тёмным ореолом, расширяющимся по мере растекания плёнки.

После выхода на поверхность три полосы нефтепроявления распространяются в северо-восточном направлении на расстояние примерно 10 км от точки всплытия.

После этого, две струи отклоняются на запад, двигаясь по траектории со множеством изломов, а третья полоса продолжает движение в первоначальном направлении, и несколько позже, описав дугу, присоединяется к общей траектории.

Общая площадь нефтесодержащего слика - 53,7 км².

ПРИМЕР ПОВЕРХНОСТНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА СПУТНИКОВОМ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ИЗОБРАЖЕНИИ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ



РЛИ SAR Sentinel -1A от 08.11.2014, 15:10 UTC

Три сликовых полосы, образованных вышедшей на поверхность нефтяной пленкой.

После всплытия на поверхность нефтяные плёнки немедленно вовлекаются в движения, обусловленные субмезомасштабным антициклоническим вихрем, развивающимся в непосредственной близости от точки выхода нефти на поверхность.

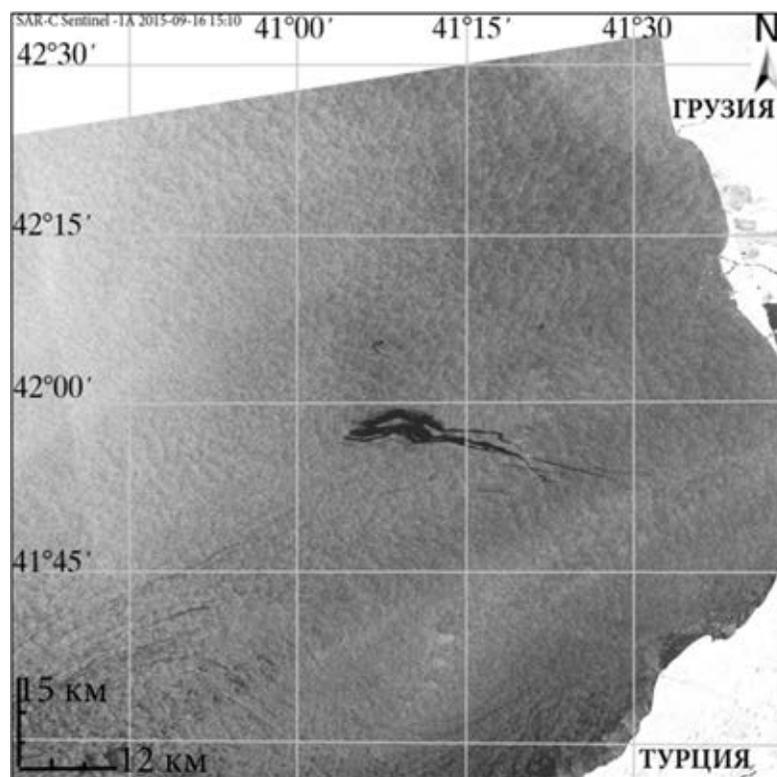
Вблизи точки всплытия наблюдается область, покрытая достаточно толстой плёнкой, по мере распространения слики изгибаются, толщина пленки уменьшается.

Пройдя по дуге около 24 км, на расстоянии 14 км к юго-западу от точки всплытия, слик изламывается под острым углом и пленка начинает распространяться в восточном направлении в сторону берега, перемещаясь более чем на 54 км.

По мере продвижения в направлении берега от основного слика ответвляются компоненты, захваченные на этот раз уже вдольбереговым течением, и начинают двигаться вдоль береговой черты.

Общая площадь нефтесодержащего слика - около 28 км².

ПРИМЕР ПОВЕРХНОСТНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА СПУТНИКОВОМ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ИЗОБРАЖЕНИИ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ



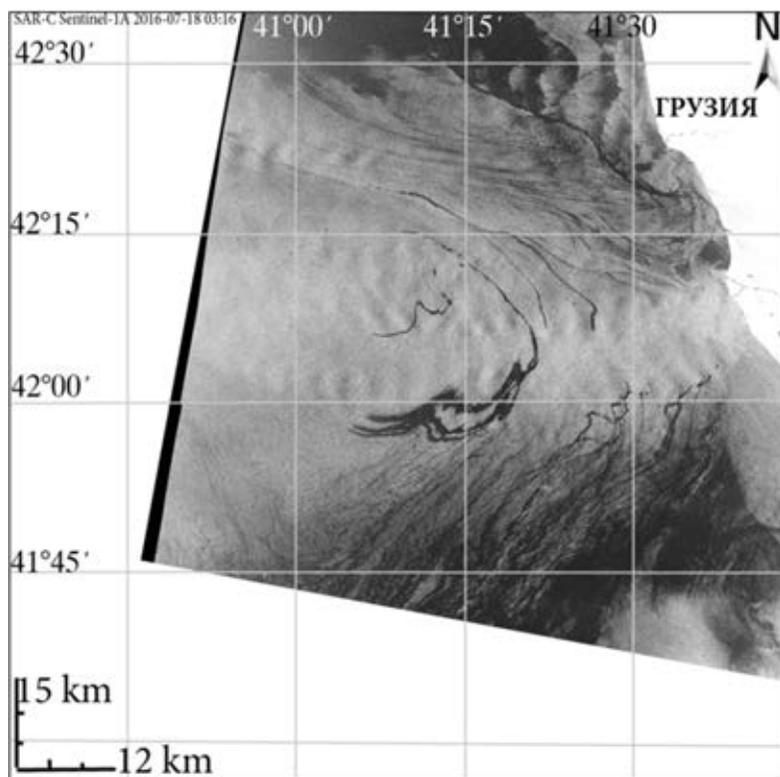
РЛИ SAR Sentinel -1A от 16.09.2015,
15:10 UTC

Плѐнка под воздействием ветра практически прямолинейно распространяется в восточном направлении, в сторону береговой черты, формируя параллельные сужающиеся полосы, постоянно превращающиеся в тонкие нитевидные слики, просматривающиеся на РЛИ вплоть до расстояния 37 км от точки всплытия.

Хорошо заметна «полосчатая» структура сликов.

Общая площадь нефтесодержащего загрязнения - 45,5 км².

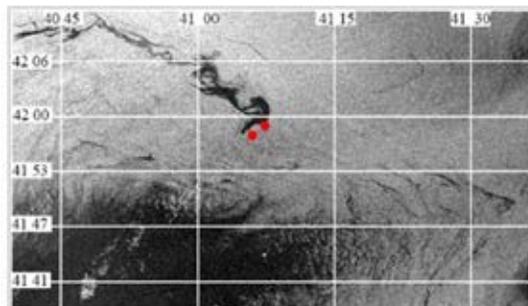
ПРИМЕР ПОВЕРХНОСТНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА СПУТНИКОВОМ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ИЗОБРАЖЕНИИ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ



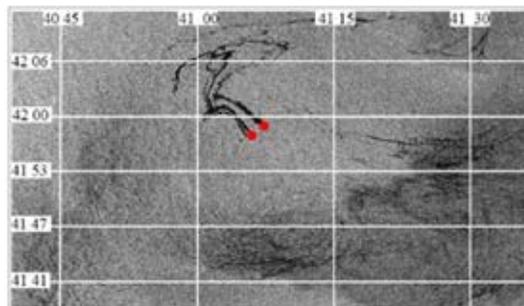
РЛИ SAR Sentinel -1A от 18.07.2016,
03:16 UTC

После выхода на поверхность нефтяная пленка распространяется на северо-восток, постепенно растекаясь и принимая под влиянием сложной структуры течений прихотливую изломанную форму. Постепенно слик сужается, а затем, вовлекаясь в вихревые движения, сильно искривляется и распространяется в западном направлении.

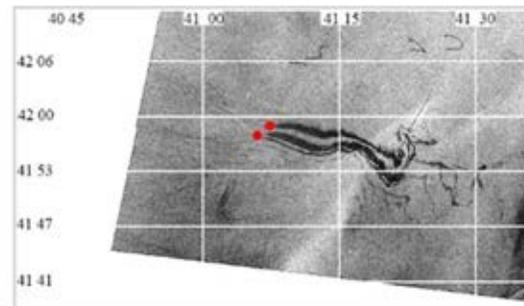
Общая площадь нефтесодержащего слика – около 60 км².



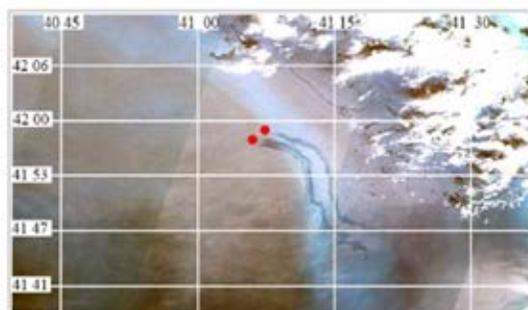
а



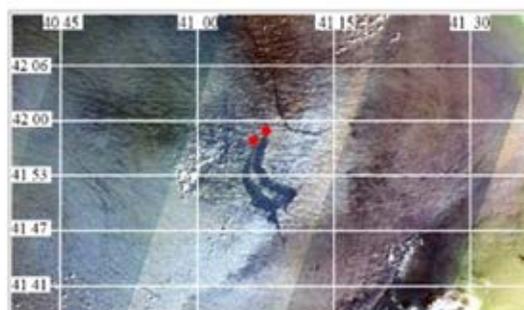
б



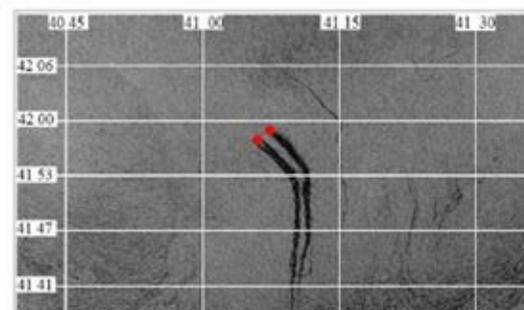
в



г



д



е

Примеры проявлений сликовых структур в спутниковых данных, полученных над выходами нефтеуглеводородов с морского дна в районе грузинского шельфа:

ASAR *Envisat* от 19 сентября 2011, 19:01 GMT (а),

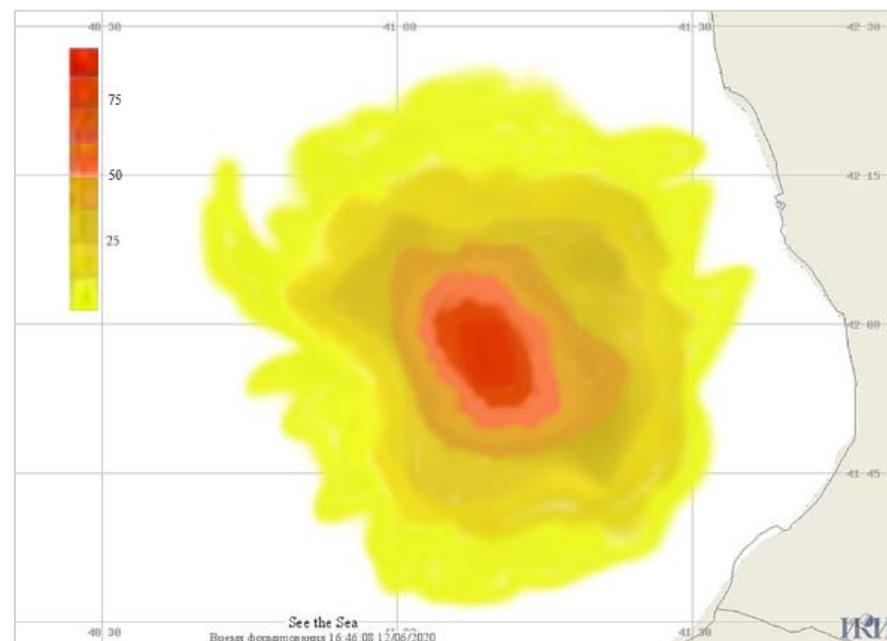
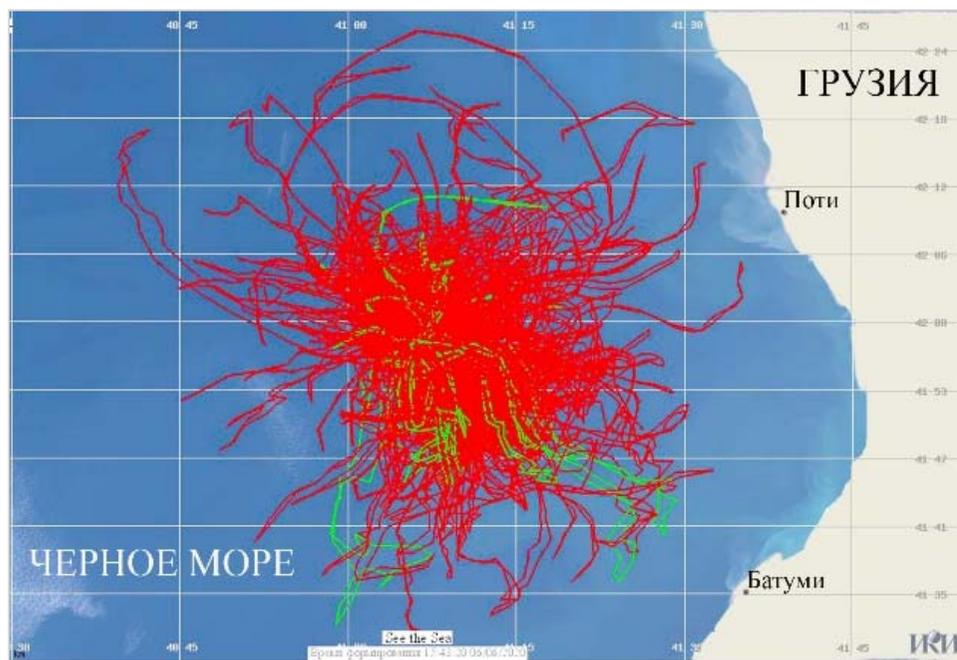
SAR-C *Sentinel-1B* от 26 июня 2018, 15:10 GMT (б),

SAR-C *Sentinel-1A* от 4 мая 2019, 03:16 GMT (в),

MSI *Sentinel-2A* от 18 мая 2019, 08:17 GMT (г),

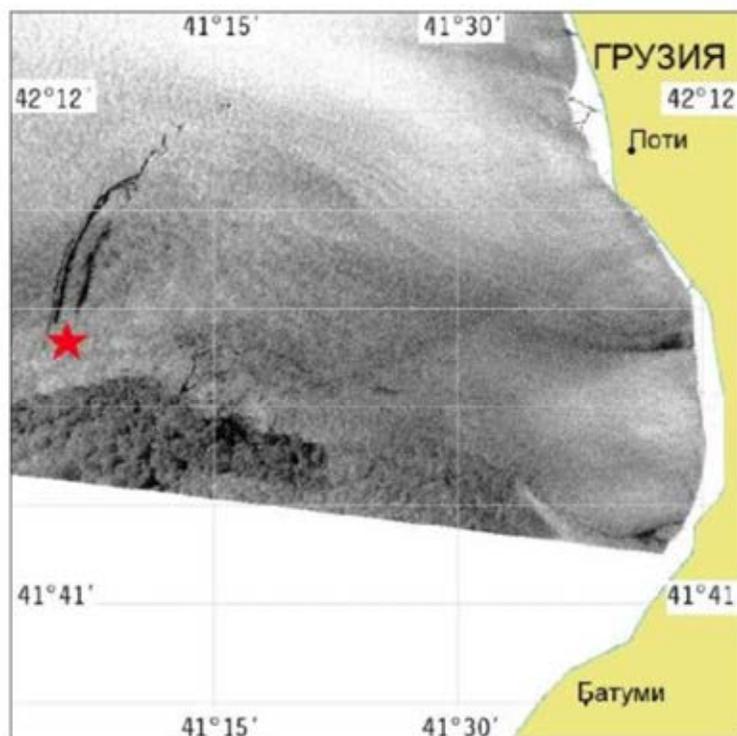
MSI *Sentinel-2A* от 7 июля 2019, 08:17 GMT (д),

SAR-C *Sentinel-1B* от 27 июля 2019, 15:10 GMT (е)

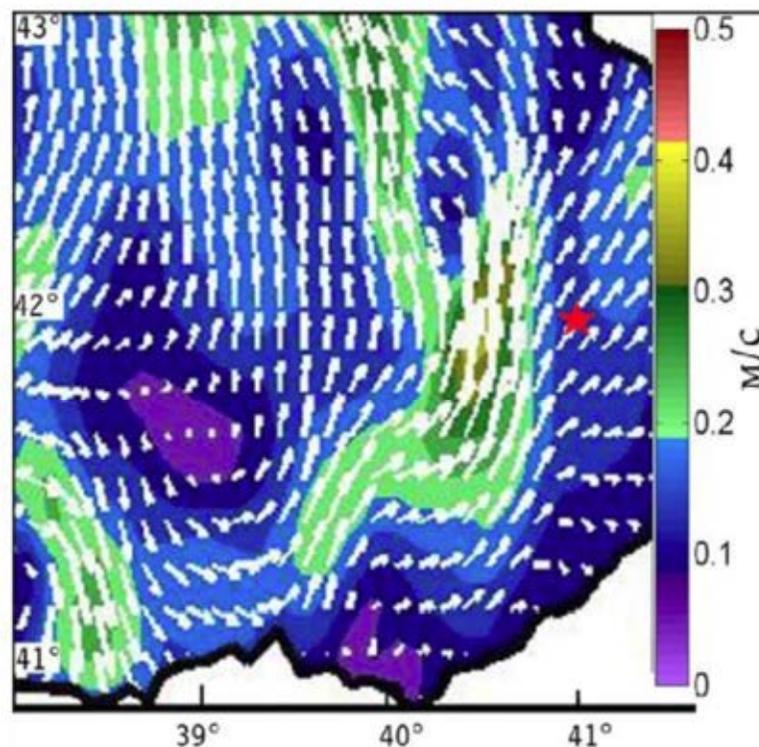


Обобщенная схема нефтяного загрязнения морской поверхности над районом естественных выходов углеводородов со дна в юго-восточной части Черного моря, построенная по спутниковым данным (слева); пространственная плотность (%) нефтяного загрязнения морской поверхности, выявленного на спутниковых изображениях (справа);

I. Наличие основного черноморского течения (ОЧТ), которое способствует переносу загрязнений по циклонической схеме



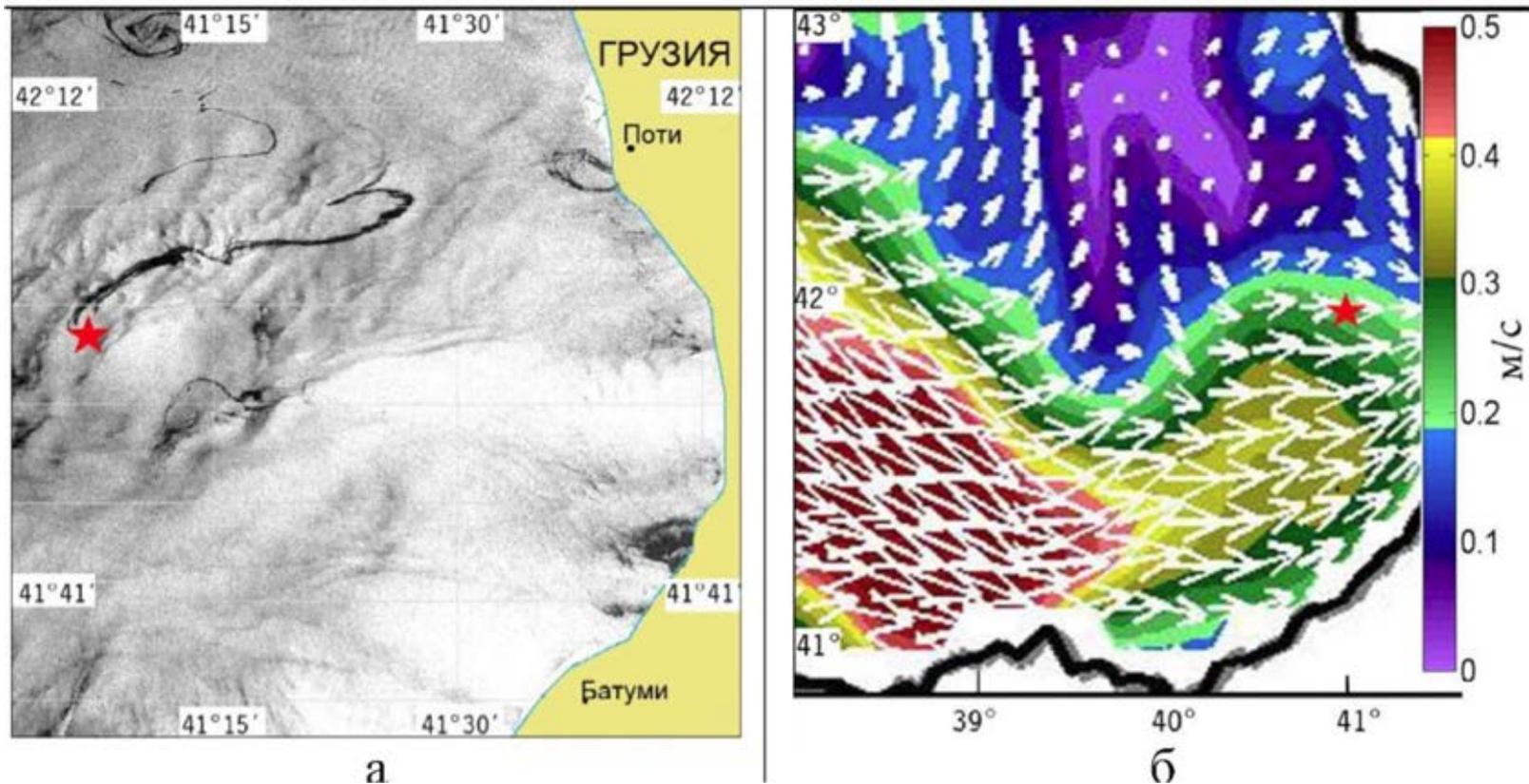
а



б

Перенос загрязнений по циклонической схеме. а) РЛИ SAR Sentinel-1A. 21 октября 2014, 03:16 UTC. Слик распространяется на северо-восток на расстояние 28 км от точки всплытия;
б) рассчитанные по модели поверхностные течения на 21 октября 2014, 06:00 UTC

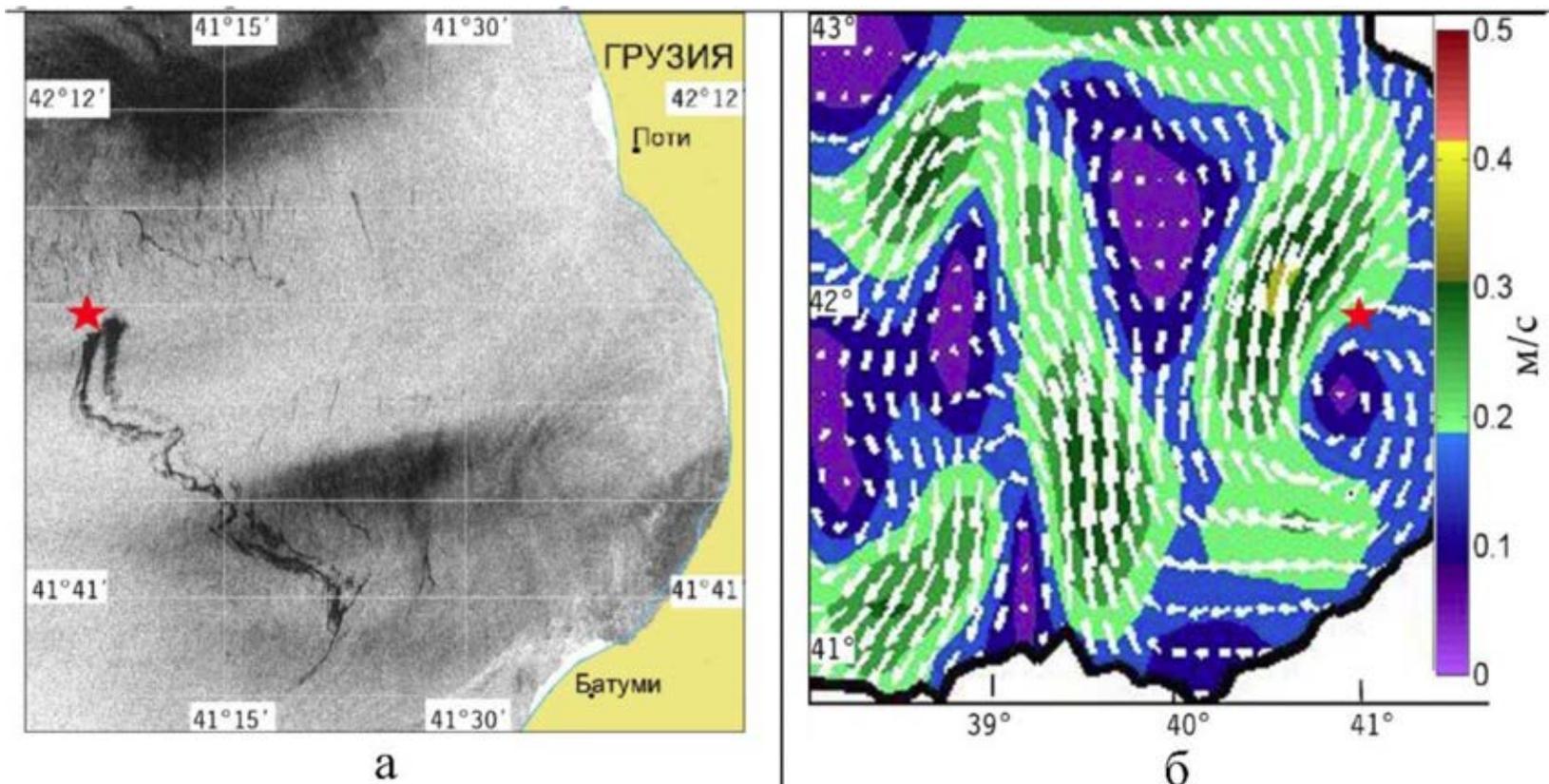
II. Вихревые структуры разных знаков завихренности, которые способствуют кросс-шельфовому переносу загрязнений



Кросс-шельфовый перенос загрязнений:

- а) РЛИ SAR Sentinel-1A. 2 июня 2016, 03:24 UTC. Слик, вовлеченный в вихревое движение, распространяется поперек шельфа на расстояние 33 км от точки всплытия;
- б) рассчитанные по модели поверхностные течения на 2 июня 2016, 12:00 UTC

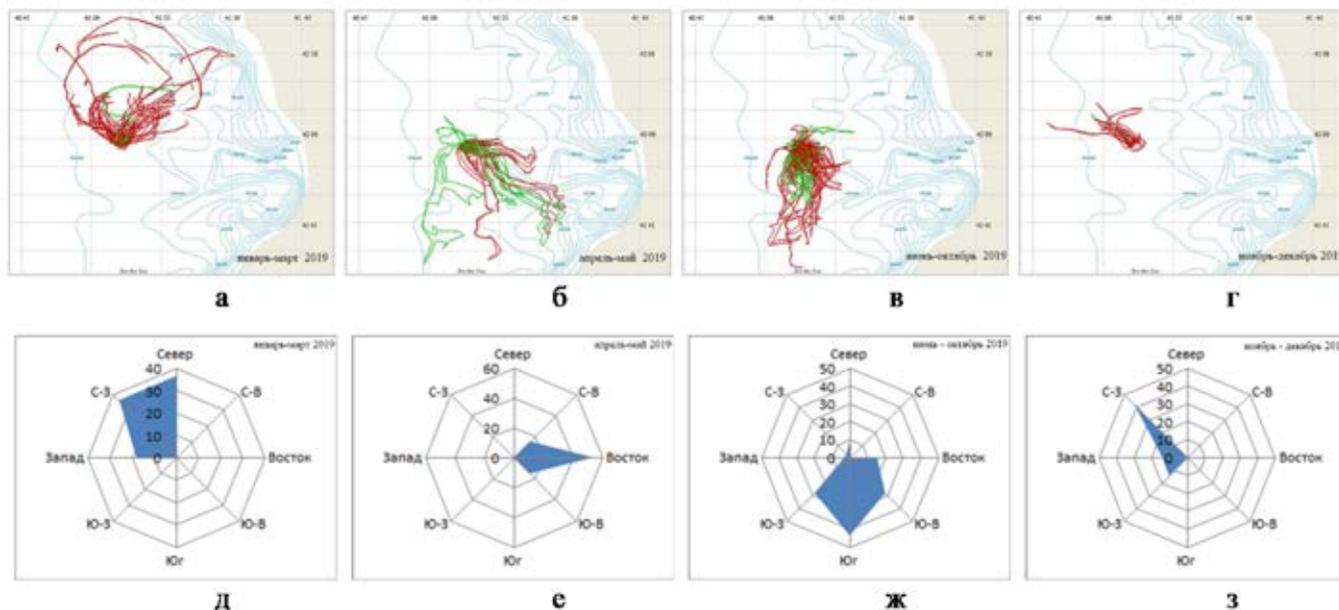
III. Квазистационарный батумский антициклонический вихрь, под влиянием которого нефтяные пленки, распространяются в южном направлении



Перенос загрязнений в южном направлении: а) РЛИ SAR Sentinel-1A. 7 мая 2015, 15:10 UTC. Слик, вовлеченный в вихревое движение, распространяется на юго-восток на расстояние 50 км от точки всплытия; б) рассчитанные по модели поверхностные течения на 7 мая 2015, 12:00 UTC

Сезонная изменчивость распространения естественных нефтепроявлений, выявленная по спутниковым данным

Схемы траекторий нефтяных slickов, выявленных по спутниковым данным в 2019 г



Распространение пленок естественных нефтепроявлений на морской поверхности по результатам спутниковых наблюдений в различные месяцы 2019 г:

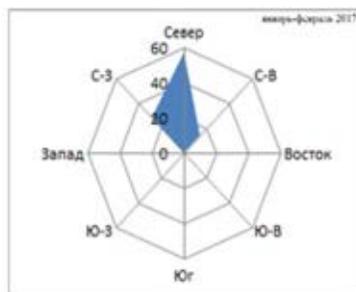
а) январь–март; б) апрель–май; в) июнь–октябрь; г) ноябрь–декабрь.

Диаграммы распределения направлений дрейфа пленок естественных нефтепроявлений на морской поверхности по результатам спутниковых наблюдений в различные месяцы 2019

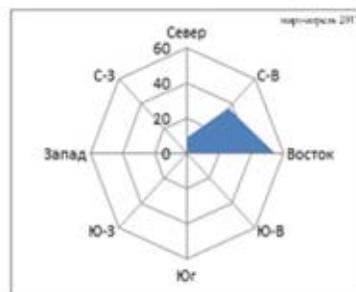
г: д) январь–март; е) апрель–май; ж) июнь–октябрь; з) ноябрь–декабрь

На основе спутниковых данных нами установлено, что сезонная изменчивость распространения нефтяных пленок присутствует во все годы наблюдения, однако характер ее проявления варьируется год от года. В частности, варьируются длительности интервалов, на которых сохраняется то или иное доминирующее направление распространения пленок естественных нефтепроявлений.

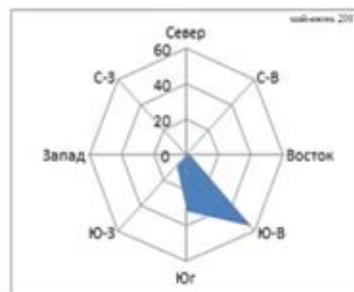
Диаграммы распределения направлений дрейфа пленок естественных нефтепроявлений на морской поверхности по результатам спутниковых наблюдений в различные месяцы 2017 г:



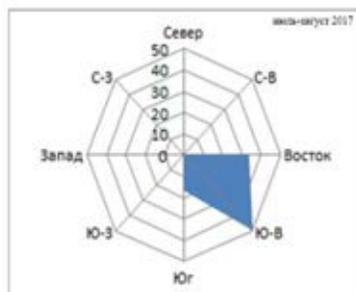
а



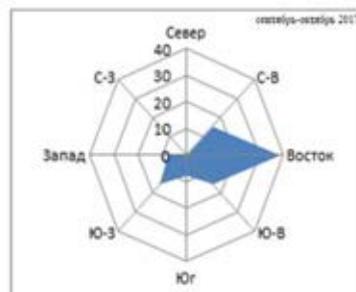
б



в



г



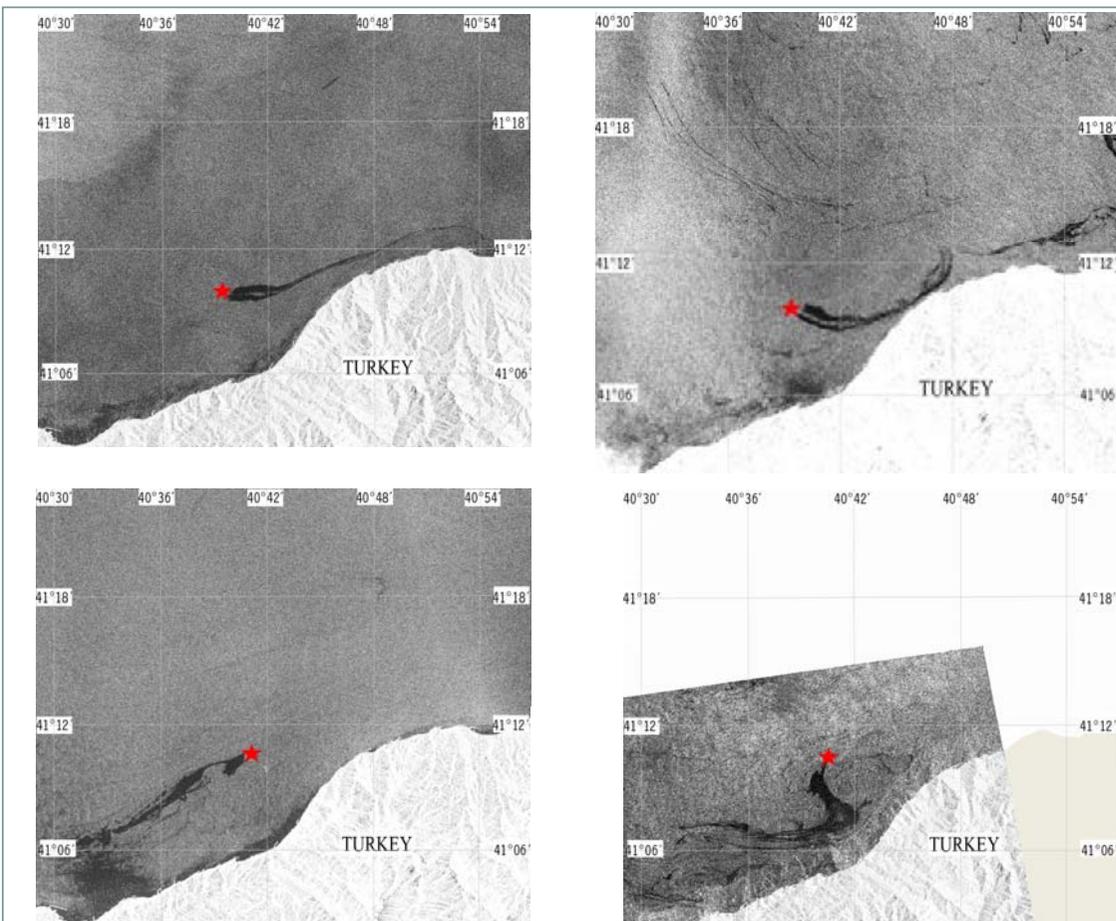
д



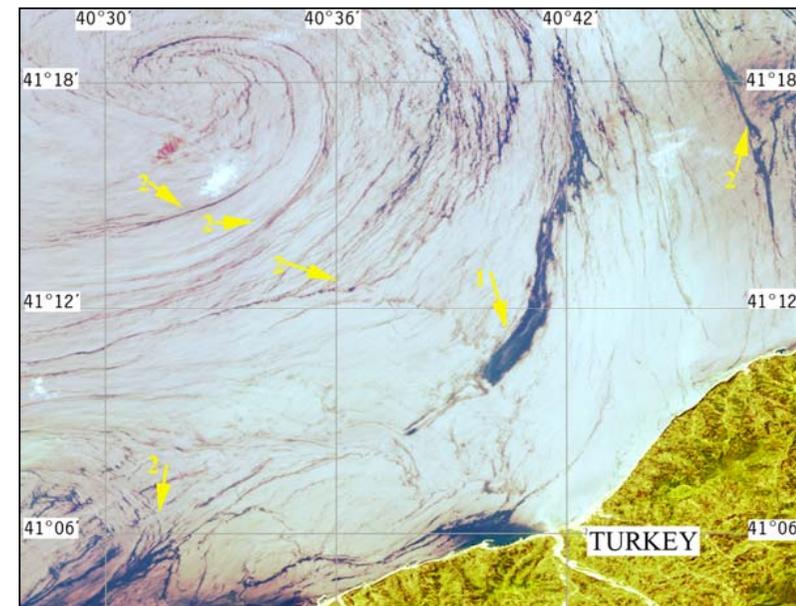
е

- а) январь–февраль;
- б) март–апрель;
- в) май–июнь;
- г) июль–август;
- д) сентябрь–октябрь;
- е) ноябрь 2017–январь 2018

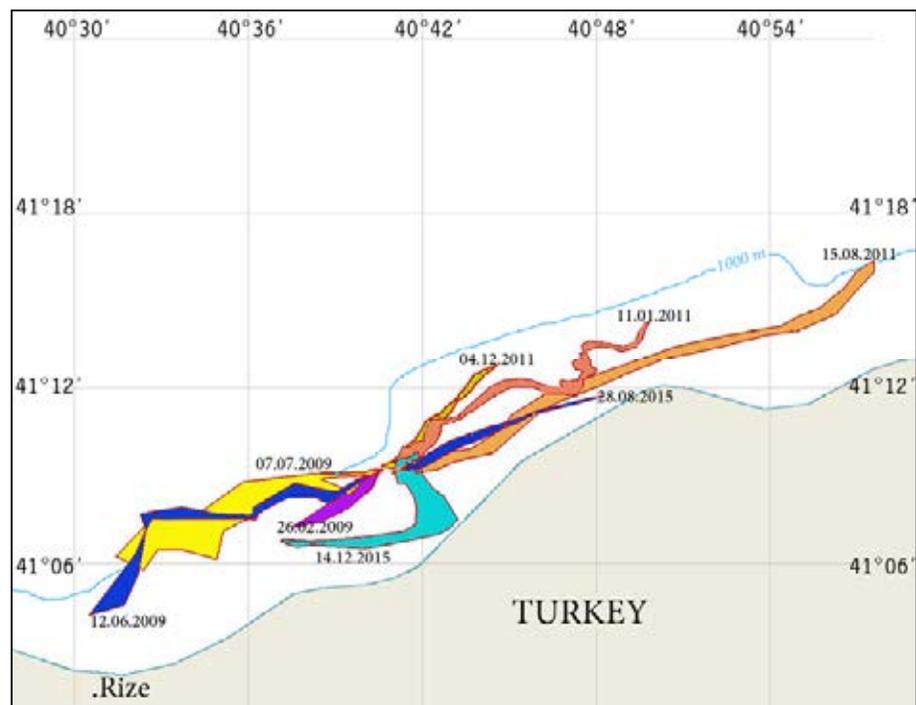
В первой половине 2017 года доминирующее направление распространения загрязнений медленно менялось с северного на юго-восточное, разворачиваясь по часовой стрелке, в течение следующих четырех месяцев выявлялись колебания и поворот против часовой стрелки к востоку, а затем наблюдался поворот по часовой стрелке к югу



Examples of natural oil slicks in satellite radar images of the southeast Black Sea: a) Sentinel-1A SAR, 24.06.2015, 15:10 UTC; b) Sentinel-1A SAR, 01.03.2015, 15:18 UTC; c) Sentinel-1A SAR, 19.02.2016, 15:10 UTC; d) Sentinel-1A SAR, 14.12.2015, 15:18 UTC. Asterisks mark the oil slicks origin location.

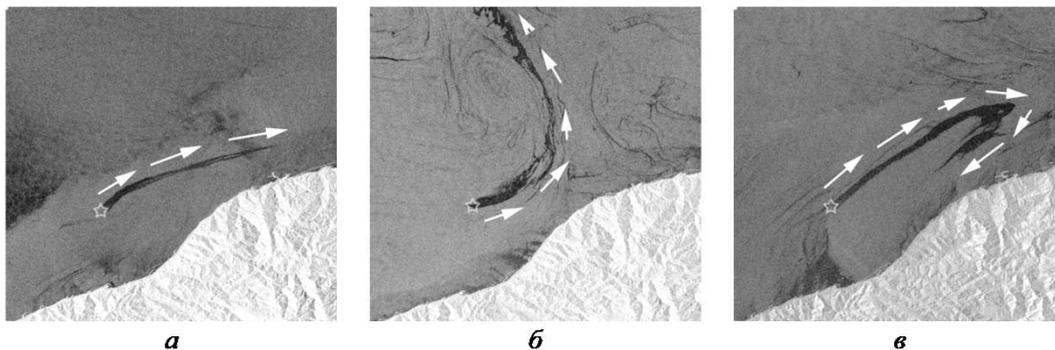


A part of a Landsat-8 OLI image (composite of 4, 3 and 2 spectral channels) of 29 May 2014, 08:01 UTC.
 1—surface slicks from the seafloor seepages;
 2—biogenic films



The site of seep source was documented as the persistent location of origins of 230 oil slicks detected in satellite images taken over the region of interest in years 2010-2017. Our results indicate that the point with coordinates 40°41' E, 41°09' E appeared a “source” of the natural oil slicks origin. This point can be recognized as a point of location of an offshore seep at the seafloor at a depth about of 1000 m.

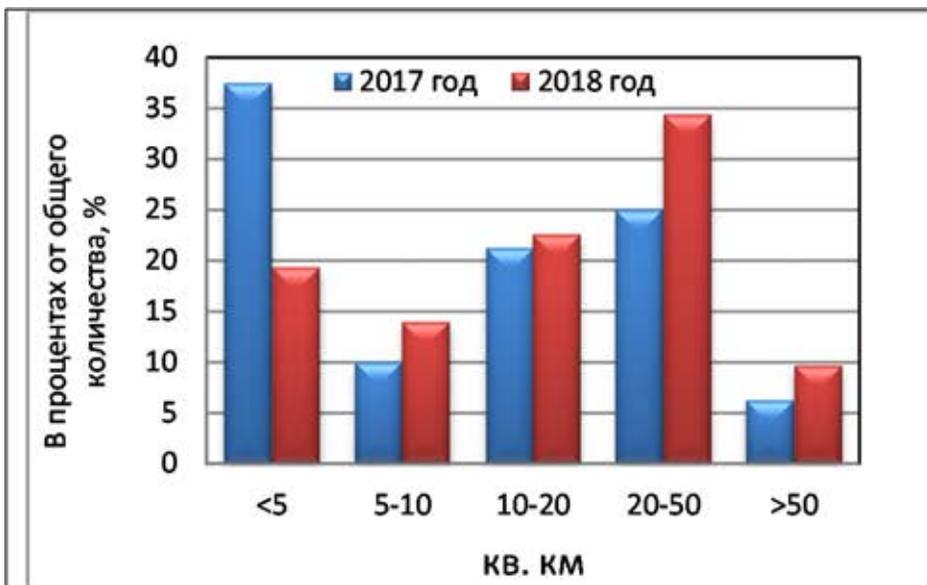
Распространение нефтяных пленок в районе турецкого шельфа под действием мелкомасштабных вихревых движений



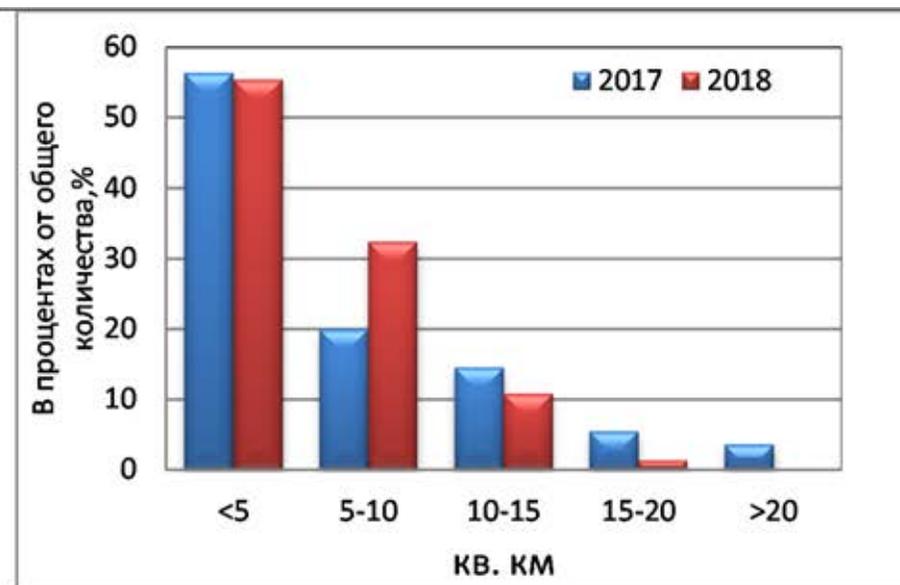
Фрагменты РСА-изображений морской поверхности юго-восточной части Черного моря в районе турецкого шельфа вблизи г. Ризе, выявляющие траектории распространения нефтяных пленок, обусловленных естественными выходами нефти с морского дна:

- а) SAR Sentinel 1B. 26.06.2018, 15:09 GMT. Вдольбереговой перенос загрязнений;
- б) SAR Sentinel 1A. 16.11.2017, 15:10 GMT. Перенос в сторону открытого моря;
- в) SAR Sentinel 1A. 30.08.2018, 03:25 GMT. Возможный вынос загрязнений на берег

- ✓ В 10-12 процентах случаев нефтяная пленка после выхода на поверхность оказывается вовлеченной в мелкомасштабные вихревые движения, которые зачастую радикальным образом меняют ожидаемую (расчетную) траекторию распространения слика.
- ✓ Точка всплытия естественных нефтепроявлений на поверхность в этом районе находится на расстоянии около 5 км от берега, и преобладает вдольбереговое направление переноса загрязнений.
- ✓ В зависимости от размеров, знака завихренности и траектории движения вихря, вовлеченность слика в вихревые движения может иметь как положительный эффект, способствуя кросс-шельфовому переносу загрязнений и очищению прибрежной зоны, так и отрицательный, способствуя выносу нефтяного загрязнения на берег

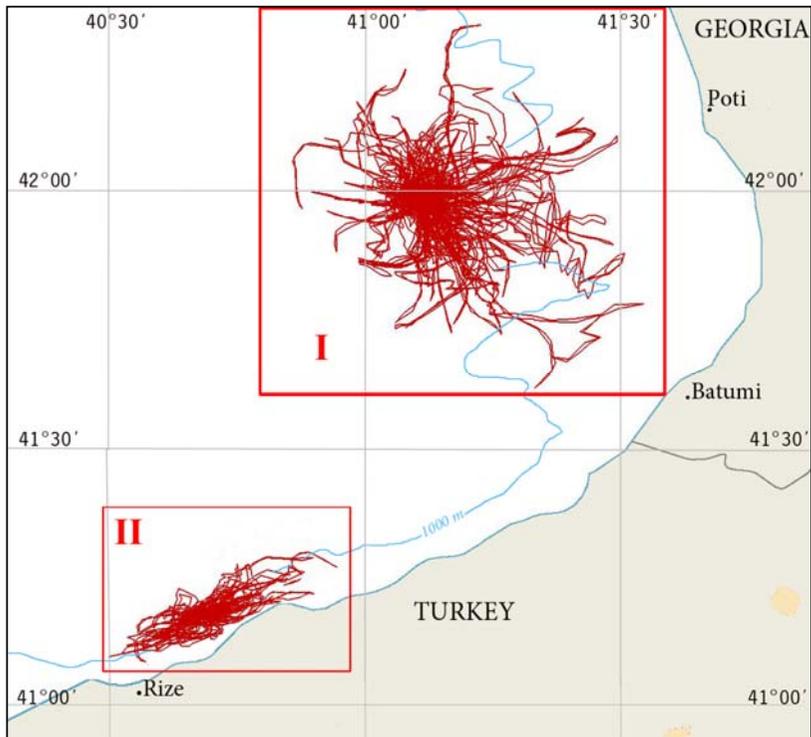


а



б

Изменчивость индивидуальных размеров нефтесодержащих пятен природного происхождения, выявленных по спутниковым данным на морской поверхности в районе грузинского шельфа Черного моря (а) и турецкого шельфа Черного моря (б)

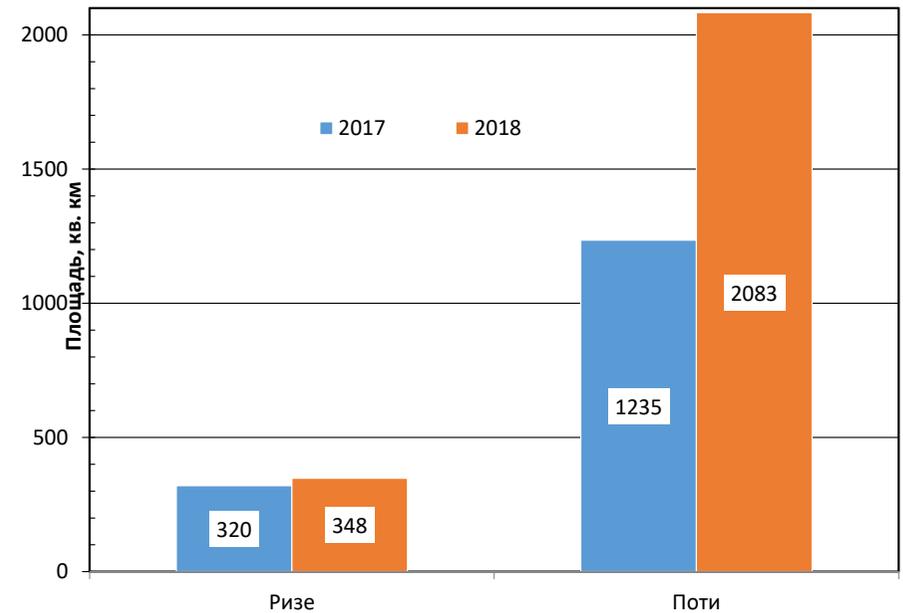


Обобщенная схема нефтяного загрязнения морской поверхности за 2010-2016 гг. над районом естественных выходов углеводородов со дна в юго-восточной части Черного моря

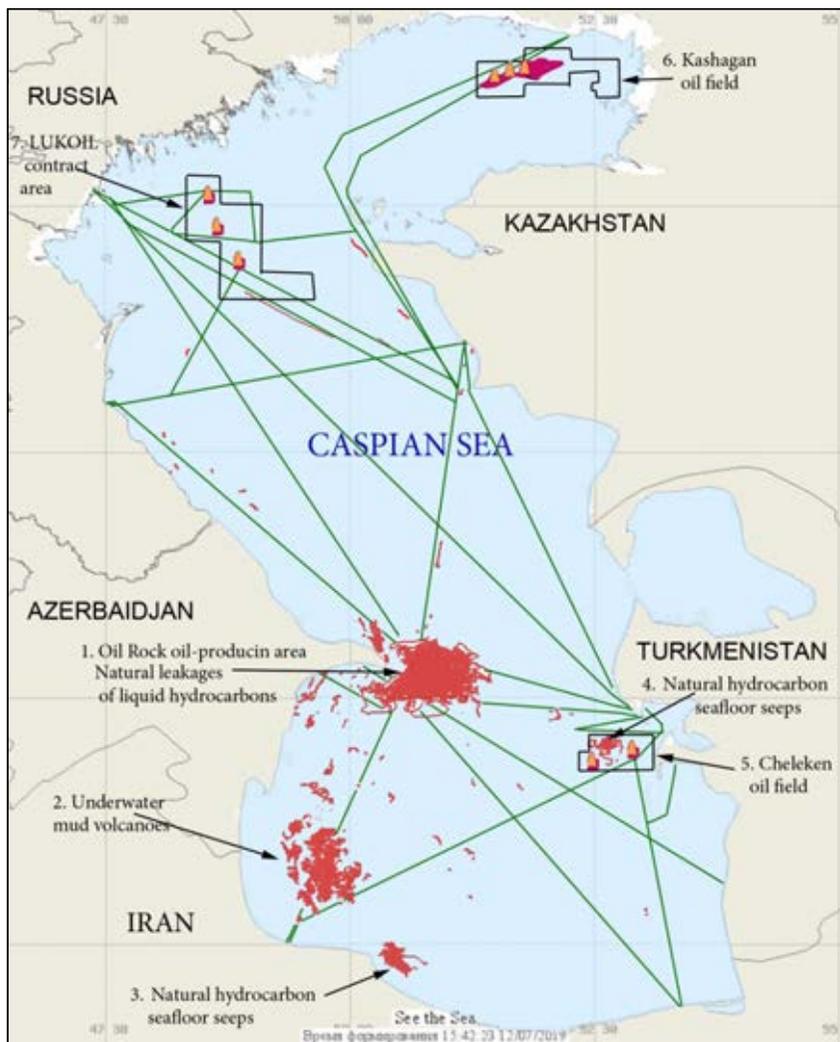
The map can be used to estimate the sea surface oil pollution probability in the region under study. High risk of the sea surface oil pollution is attributed to areas of 859 km² and 360 km² respectively.

The highly unstable system of sea currents governs the oily films drift in area I. A cross-shelf transport of pollutants can occur here with high degree of probability

Prevailing currents and winds determine the mainly alongshore drift of oily films in area II..



Совокупные площади загрязнения морской поверхности юго-восточной части Черного моря в результате естественных нефтепроявлений, выявленные за год по спутниковым данным



Main pattern and sources of sea surface oil pollution of the Caspian sea, revealed on the basis of satellite remote sensing data:

- 1 – Oil Rocks oil-producing area;
 - 2 – Seabed mud volcanoes;
 - 3 - Natural hydrocarbon seafloor seeps off the Sefid Rud Cape;
 - 4 - Natural hydrocarbon seafloor seeps westward of Cheleken Peninsula;
 - 5- offshore oil-producing platforms in the Cheleken oil field;
 - 6- Kashagan oil field;
 - 7 – LUKOIL oil-producing area;
- Main shipping routes depicted by green lines.

Main shipping routes depicted by green lines

РАЙОН НЕФТЕДОБЫЧИ НЕФТЯНЫЕ КАМНИ

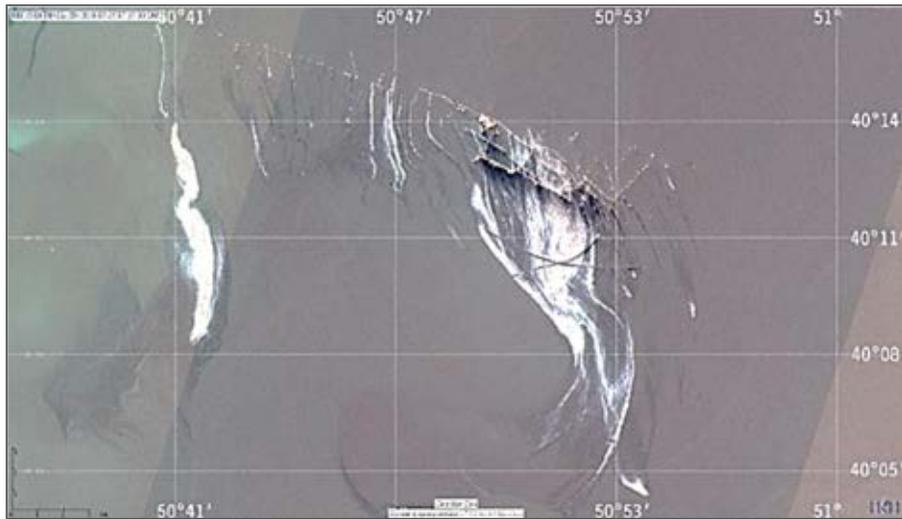
➤ Морское месторождение Нефтяные Камни, расположено в акватории Каспийского моря, 42 км к юго-востоку от Апшеронского полуострова, 100 км от Баку

➤ Разработка этого месторождения началась в 1949 году. Для того, чтобы создать основания буровых платформ, было затоплено семь списанных кораблей, в том числе и первый в мире самоходный металлический нефтеналивной танкер, построенный в 1877—78 годах по заказу «Товарищества братьев Нобель» для доставки керосина наливом из Баку в Царицын (ныне Волгоград) и Астрахань.

➤ Сейчас Нефтяные Камни — это более двухсот стационарных платформ, связанных между собой эстакадами общей протяжённостью 350 километров.



РАЙОН НЕФТЕДОБЫЧИ НЕФТЯНЫЕ КАМНИ



A subset of a true-colour MSI Sentinel-2B image (composite of 4, 3 and 2 spectral channels) acquired on 15 April 2020 at 07:37 over Oil Rocks oil-producing site

В области солнечного блика, нефтесодержащие плёнки имеют повышенную яркость и проявляются как светлые структуры, окружённые тёмным ореолом

➤ Непрерывное загрязнение морской поверхности нефтью в районе Нефтяных Камней обусловлено в основном не утечками в процессе нефтедобычи или устаревшим оборудованием, а поступлением нефти из естественных и искусственных грифонов (выход нефти на поверхность моря).

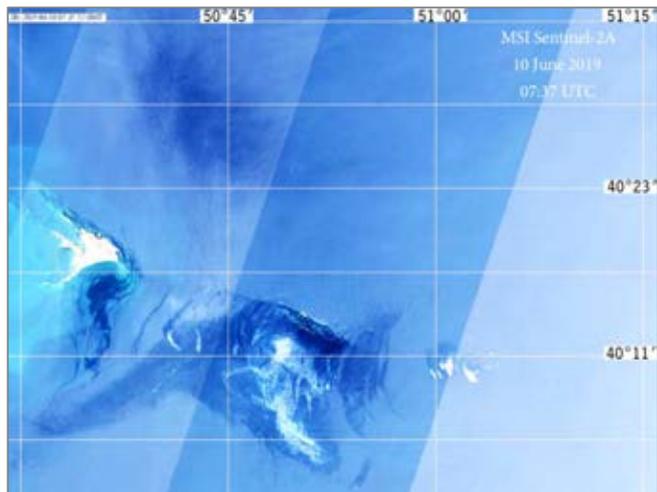
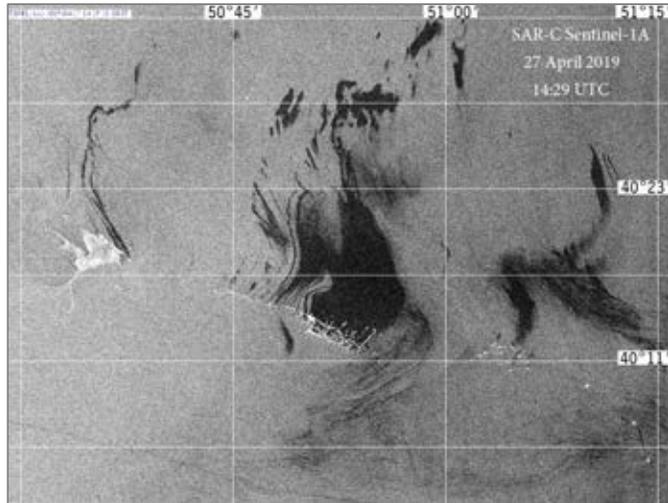
➤ Естественные выходы нефти на поверхность моря в этом районе были известны задолго до начала нефтедобычи. Нефть просачивалась по трещинам из выступающей над поверхностью моря каменной гряды Чёрные камни, которая позже получила новое название — Нефтяные камни.

➤ Образование искусственных грифонов является характерной особенностью процесса морской разведки и нефтедобычи.

➤ За время разбуривания месторождения "Нефтяные камни" до 1958 г. грифонообразование имело место в 37 скважинах. При этом грифоны некоторых скважин действовали от нескольких дней до 2 лет, а количество выбрасываемой нефти во время действия грифона колебалось от 100 до 500 т в сутки.

➤ И сегодня искусственные грифоны остаются одним из источников нефтяного загрязнения Центрального Каспия.

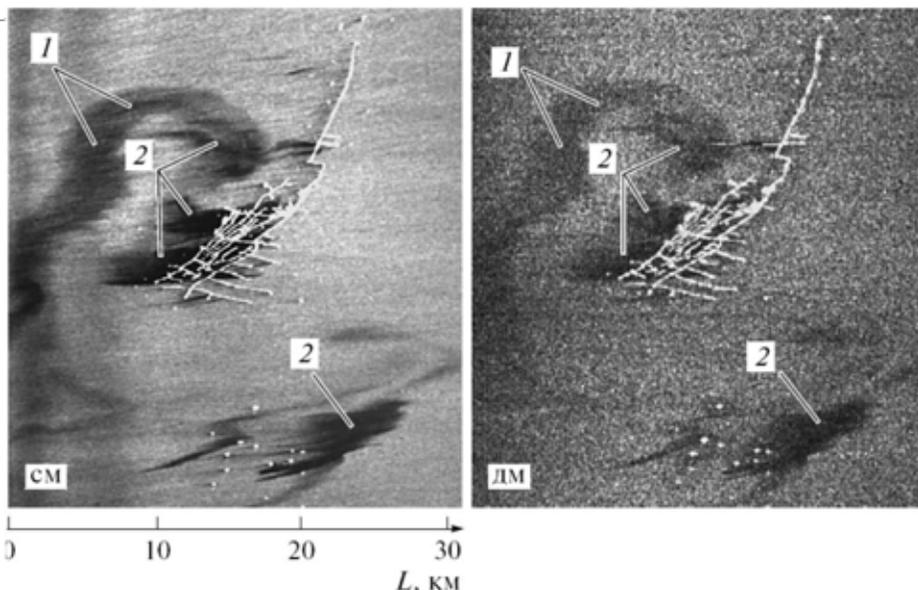
РАЙОН НЕФТЕДОБЫЧИ НЕФТЯНЫЕ КАМНИ



➤ Практически на всех спутниковых изображениях района нефтедобычи идентифицируются нефтяные пятна, причем следы нефти выявляются зачастую на площади более 800 км² вокруг морских буровых платформ.

➤ Размер и направление распространения пятна зависят в основном от метеоусловий.

➤ Район месторождения «Нефтяные Камни» может выступать в роли своеобразной естественной лаборатории, где можно исследовать: влияние ветра и течений на распространение нефтяного пятна, а также зависимость формирования радиолокационных образов нефтяных загрязнений от условий наблюдения.



Синхронное двухчастотное радиолокационное (СМ_ и ДМ_диапазонов) изображение района добычи нефти “Нефтяные Камни” в Каспийском море, полученное с помощью МРЛК “МАРС” 19.07.90. (Согласно [Боев и др., 2008])

Теоретические радиолокационные контрасты рассчитывались в рамках теории взаимодействия поверхностных волн с пленкой конечной толщины [Боев, Ясницкая, 2002; Боев, Ясницкая, 2003]. В уравнениях, используемых авторами, содержится пять параметров, характеризующих пленку: активность, толщина, поверхностное натяжение, вязкость нефти и ее плотность

Методика должна опираться на сравнение теоретических результатов и экспериментальных контрастов загрязненной морской поверхности, полученных по результатам синхронных измерений на различных двух длинах волн.

Результаты натурных многочастотных измерений, представленные в статье, представляют несомненный интерес, однако теоретические выводы представляются спорными. Следует отметить, что радиолокационный контраст в общем случае является функцией не только параметров пленки, но также скорости ветра, состояния поверхности моря и ряда др. параметров окружающей среды. Пренебрежение последними факторами может привести к ошибкам в расчетах. Возможно, благодаря этому, оценки толщин нефти приведенные в публикации, выглядят существенно завышенными

1989– 1991 гг.

Авиационный многочастотный радиолокационный комплекс “МАРС” [Калмыков и др., 1998], установленного на борту самолета-лаборатории ИЛ-18.

Съемки проводились одновременно тремя локаторами Ка-SLAR, X-SLAR и L-SAR с высоты 7200 м.

Тип радиолокатора	Длина волны, см	Средняя излучаемая мощность, Вт	Поляризация	Ширина полосы обзора, км	Пространственное разрешение, м	Вид обработки данных
РБО	0,8	4,5	VV, HH	15	30...50	бортовая
РБО	3,2	8,3	VV	45	20...50	бортовая
РСА	23	11,2	VV, HH VH, HV	30	2,5...25 25 ... 50	на земле бортовая

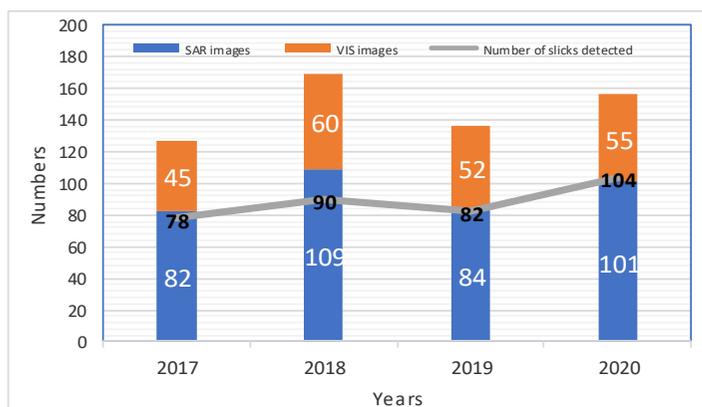
Степень загрязнения морской поверхности оценивалась по величине логарифмического радиолокационного контраста $DE(k_E)$:

$$D_E(k_E) = 10 \lg \left\{ \frac{\overline{P_r} - \overline{P_N}}{\overline{P_s} - \overline{P_N}} \right\} \text{ [дБ]},$$

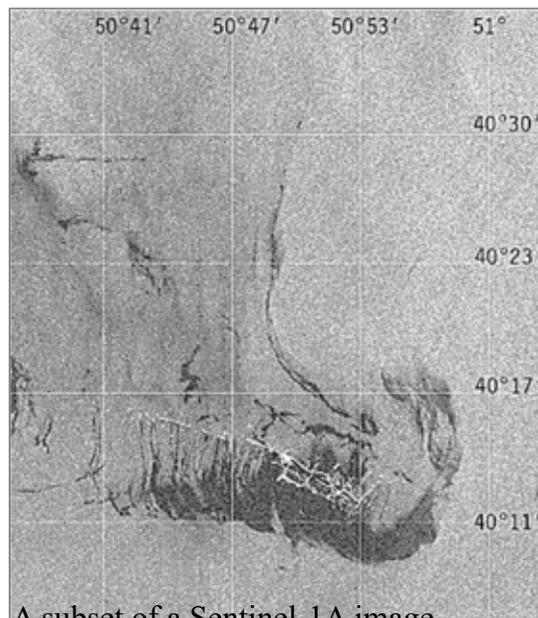
где P_r , P_s – средние мощности сигналов, принятых, соответственно, от загрязненного и чистого участков морской поверхности, P_N – средняя мощность собственных шумов приемника на выходе блока обработки сигналов

Sensors	Resolution (m)	Band	Wavelength	Count of used images
SAR-C Sentinel 1A, 1B	5x20	C	5.6 cm	376
OLI/TIRS Landsat-8	30	B2 – Blue B3 – Green B4 – Red	B2 (0.452–0.512 μm) B3 (0.533–0.590 μm) B4 (0.636–0.673 μm)	50
MSI Sentinel-2A, 2B	10	B2 – Blue B3 – Green B4 – Red	B2 (0.456–0.523 μm) B3 (0.542–0.577 μm) B4 (0.650–0.680 μm)	162

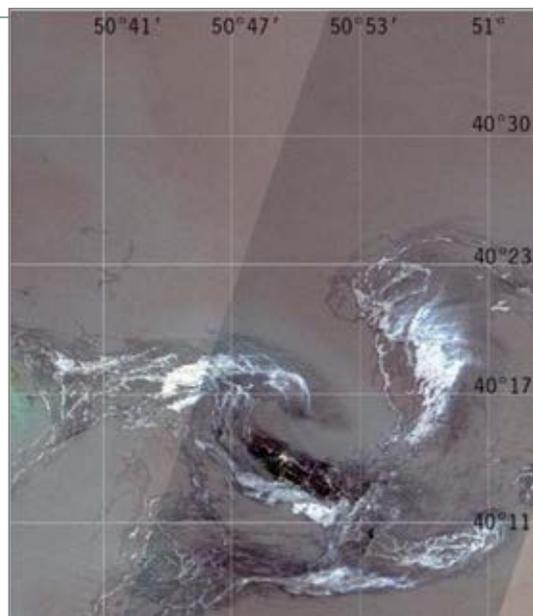
All in all, we examined, for this study, 588 satellite images of the Caspian Sea obtained over the oil-producing site Oil Rocks



Inter-annual distribution of data analyzed and natural oil slicks detected in them for the Oil Rocks region



A subset of a Sentinel-1A image acquired on 2 February 2019



A subset of a true-colour MSI Sentinel-2B image (composite of 4, 3 and 2 spectral channels) acquired on 4 July 2020 in the sunglint zone



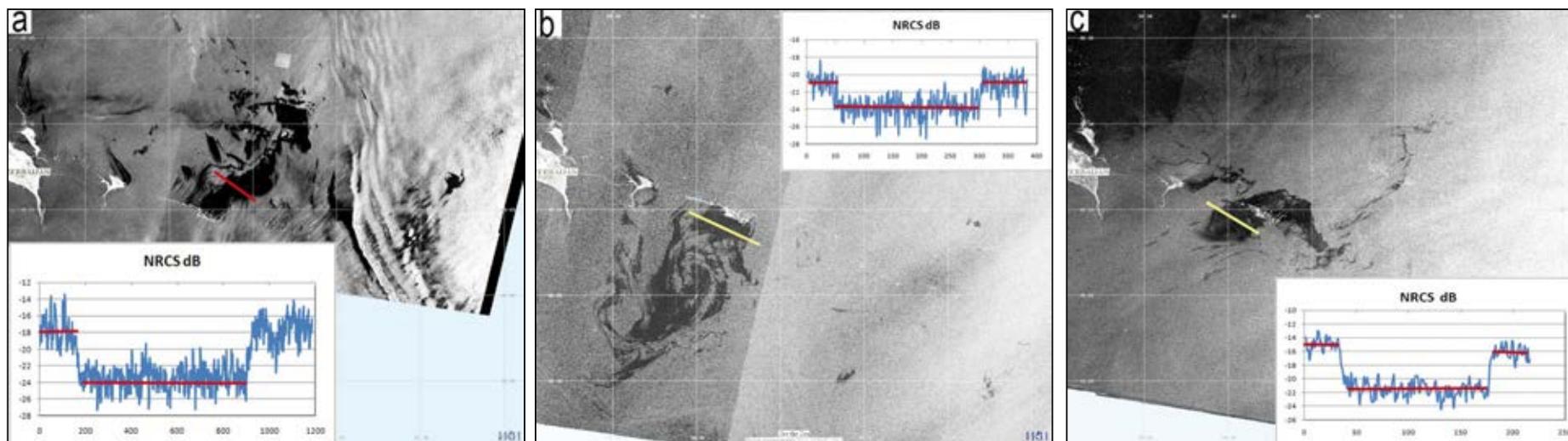
A subset of a true-colour MSI Sentinel-2B image (composite of 4, 3 and 2 spectral channels) acquired on 15 April 2020 outside the sunglint zone.

Examples of different types of oil slicks manifestations in VIS images.

In the VIS image obtained in the sunglint area, oil films have increased brightness and appear as bright structures surrounded by a dark halo; the polluted area is about 520 km² in this case.

In the VIS image taken outside the sunglint zone, oil films are seen as dark patches like in the SAR image. At the same time, central parts of some slicks appear as brighter areas, which indicates an increase in the reflection coefficient of the water-film system. Hence we observe "thick" films there

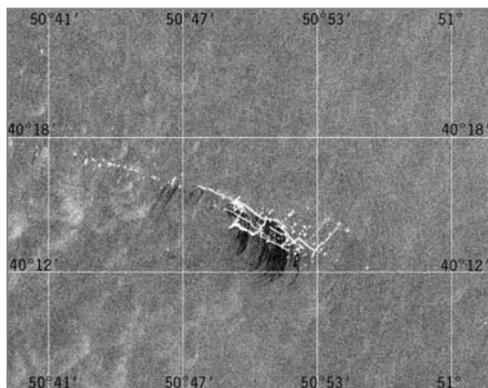
Characteristic examples of oil slicks seen in radar images taken over the Oil Rocks platform under moderate winds



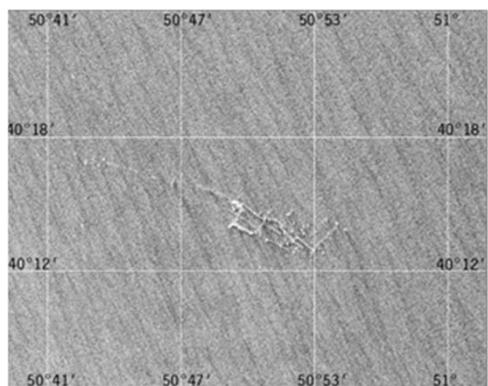
- A part of a VV-polarized Sentinel-1 SAR image acquired at 02:43 UTC on 29.05.2015 showing oil patches near the oil-drilling platform. Total area of the oil slick – 375 sq.km;
- a part of an HH-polarized Envisat ASAR image acquired at 06:39 UTC on 13.07.2010 showing oil patches near the oil-drilling platform. Total area of the oil slick – 515 sq.km.
- a part of an HH-polarized Envisat ASAR image acquired at 06:45 UTC on 07.05.2010 showing oil patches near the oil-drilling platform. Total area of the oil slick – 290 sq.km.

The reduction in the Normalised Radar Cross Section (NRCS) within a slick can reach 2 - 11 dB depending on film thickness, oil content and wind speed as well as on the type of sensor and polarisation.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ОБРАЗЫ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРИ СИЛЬНОМ ВЕТРЕ / АКТИВНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССАХ В ПРИВОДНОМ СЛОЕ



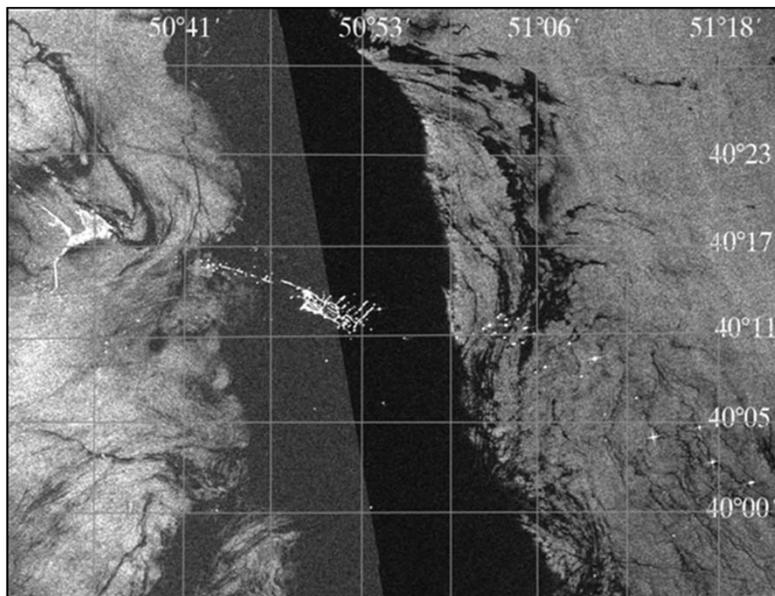
A subset of Sentinel-1A SAR image acquired at 02:44 UTC on 08.04.2020 showing the sea surface near the oil-drilling platform. A relatively small area of 12 sq. km covered by oily films can be identified near the oil-drilling platform



A subset of Sentinel-1A SAR image acquired at 14:29 UTC on 16.03.2020 over the oil-producing area Oil Rocks

- Сильный приповерхностный ветер (более 9-10 м/с) в сочетании с развитым поверхностным волнением препятствует развитию обширного слика, т.к. при больших скоростях ветра поверхностные пленки, как нефтяные, так и биогенные, начинают разрушаться под воздействием ветра и волнения и не всегда могут быть идентифицированы на спутниковых РЛИ.
- Вариации поля приповерхностного ветра, обусловленные конвективными движениями в приводном слое атмосферы, приводят к появлению на РЛИ ячеистых структур.
- В результате совокупного влияния описанных выше факторов нефтяное загрязнение слабо проявляется на спутниковом РЛИ — различим только очень небольшой участок пониженного рассеяния в непосредственной близости от платформы.
- Вариации интенсивности обратнорассеянного сигнала, связанные с присутствием нефтяной плёнки на морской поверхности в этом случае невелики и составляют примерно 1,5-2 дБ

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ОБРАЗЫ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРИ СЛАБЫХ ВЕТРАХ



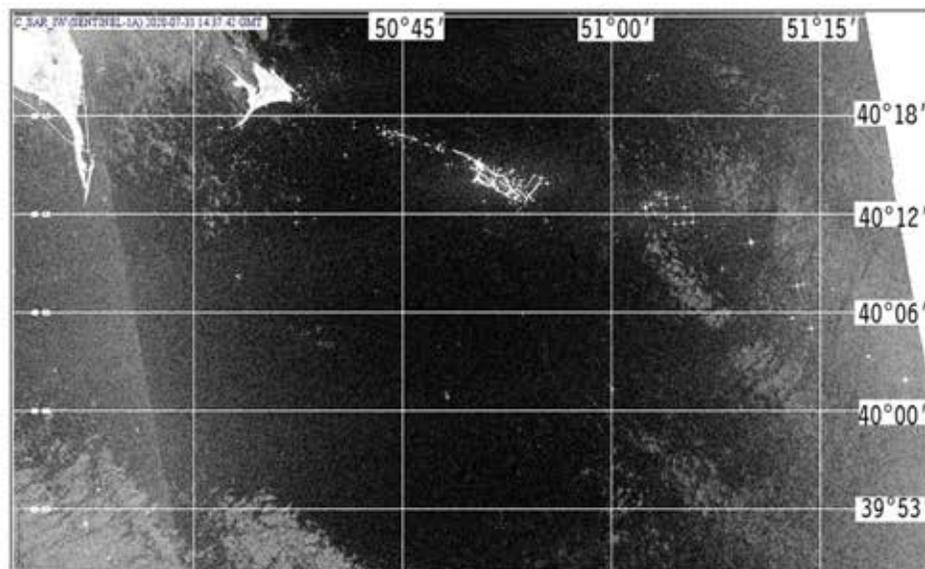
Фрагмент РЛИ ASAR Envisat от 4 июня 2015, 02:43 UTC, полученного над районом нефтедобычи Нефтяные Камни в условиях слабого приповерхностного ветра

Выявить на этом РЛИ нефтяное загрязнение вокруг платформ, а тем более, установить его площадь, не представляется возможным.

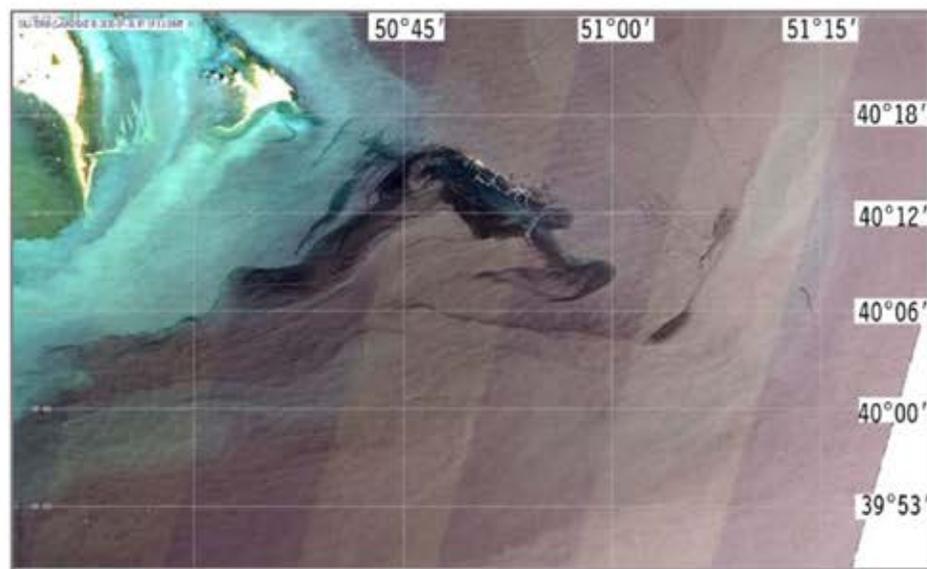
На РЛИ, полученных в условиях слабого приповерхностного ветра, выявляются обширные тёмные области пониженного рассеяния.

При слабом ветре или его отсутствии гравитационно-капиллярная компонента поля поверхностного волнения, ответственная за Бреговское резонансное рассеяние, может не успеть развиться, что приводит к значительному ослаблению интенсивности обратно-рассеянного сигнала.

На РЛИ, полученных в условиях слабого приповерхностного ветра, присутствует много областей пониженного рассеяния, не связанных с наличием на морской поверхности нефтяной пленки, что значительно повышает вероятность «ложной тревоги» при мониторинге нефтяных загрязнений, а также приводит к завышению их площади



a

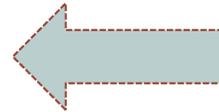


b

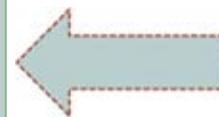
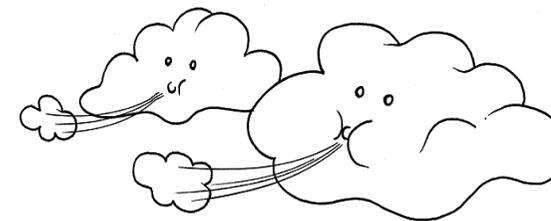
An example of a combined analysis of SAR and VIS data.

- a) A subset of a Sentinel-1 SAR image acquired at 14:37 UTC on 31.07.2020 under low wind conditions;
- b) a subset of a Landsat-8 OLI-TIRS-derived true-colour image obtained over the same area close in time (at 07:19 UTC on 31.07.2020)

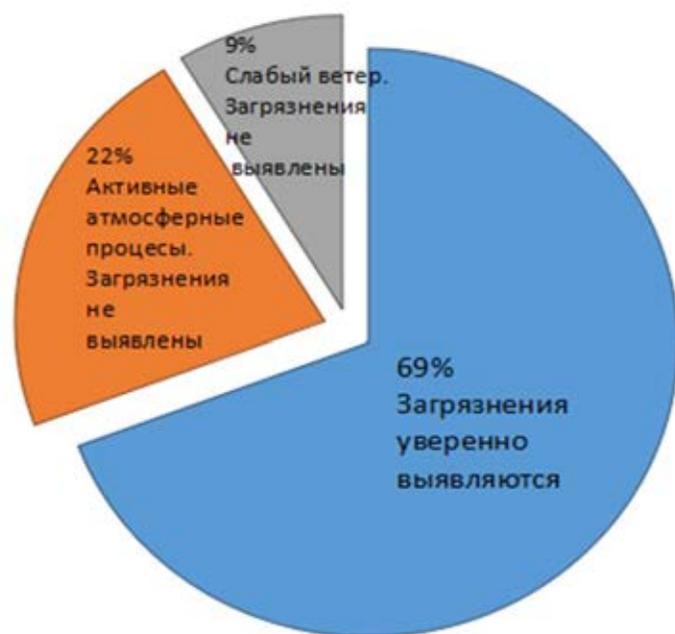
Площадь нефтяного загрязнения, определяемая исключительно по радиолокационным данным может оказаться **ЗАВЫШЕННОЙ**, если данные получены при слабых ветрах или в штилевых условиях



Площадь нефтяного загрязнения, определяемая исключительно по радиолокационным данным может оказаться **ЗАНИЖЕННОЙ**, если данные получены в присутствии значительных возмущений в приземном слое атмосферы



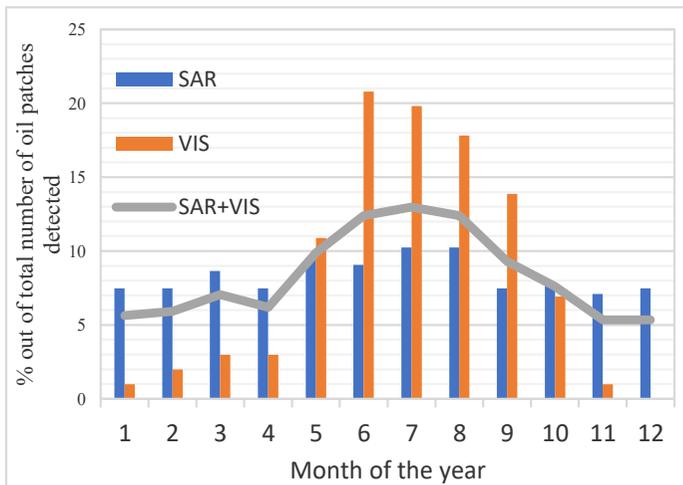
ЗАВИСИМОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБРАЗОВ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОТ УСЛОВИЙ НАБЛЮДЕНИЯ



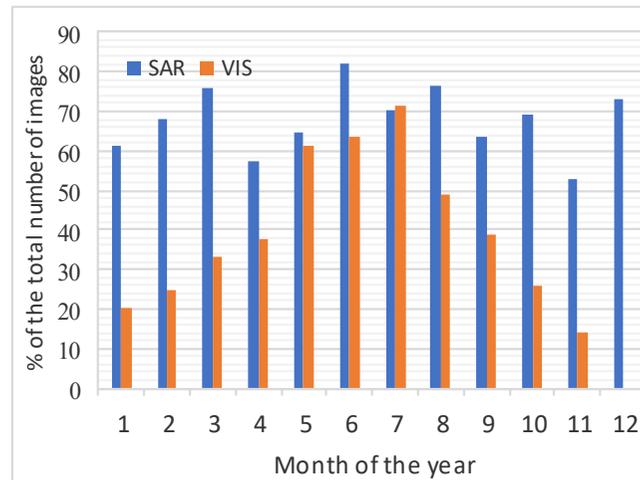
69% случаев - нефтяное загрязнение с уверенностью выявляется.

22% случаев - нефтяные загрязнения не выявлены, потому что их проявления маскировались радиолокационными образами активных атмосферных процессов либо потому, что съемки проводились в условиях сильного приповерхностного ветра.

9% случаев - на момент съемки в районе интереса наблюдался слабый приповерхностный ветер или условия, близкие к штилевым. На РЛИ присутствует обширная область пониженного рассеяния и уверенно выделить нефтяное загрязнение не удаётся.



a



b

Сезонная изменчивость количества нефтепроявлений, выявленных на морской поверхности в районе Нефтяные Камни (NOS frequency)

Сезонная изменчивость частоты выявления нефтепроявлений на морской поверхности в спутниковых данных (detectability rate)

The most pronounced is the seasonal variability in NOS frequency in VIS images. The majority of NOS— about 70% — were identified in VIS images of the Oil Rocks oil-producing area during the warm season, from May to September. No one issue of natural oil showings on the sea surface was detected in VIS imagery in December over the whole study period. Depending on the season, the frequency of identifying oil patches in VIS images changes more than three times - from 20% in January to 63% in July

As the two main reasons for this variability, we can point out

- (i) a cloud cover masking the oil patches signatures in the cold season
- (ii) the presence of a sun glint area significantly improving conditions for detecting oil slicks in the warm season

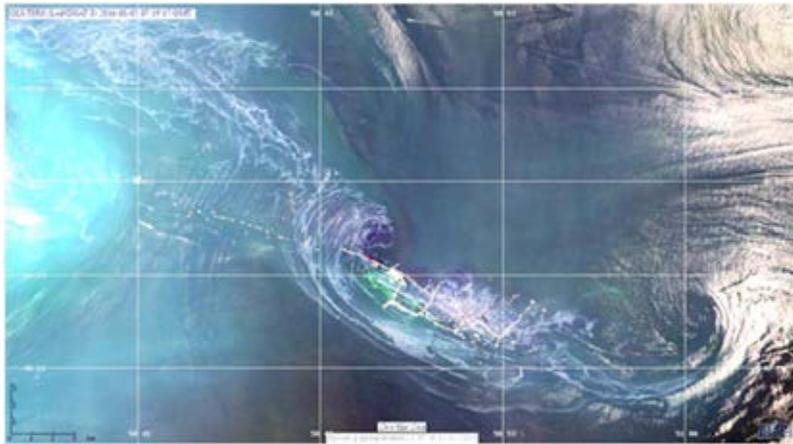
The seasonal variability in the detection rate of oil patches at the sea surface in the SAR images is almost non-existent. This fact can be explained by different mechanisms of oil slicks manifestation in SAR images. SAR can detect oil slicks through clouds and is insusceptible to solar light conditions. However, the detectability of oil slicks in SAR images depends mainly on the hydrometeorological conditions at the time of the survey. The detectability rate of oil slicks in SAR data varies from 53% in November to 82 % in June; its mean annual value reaches 68%, which coincides with the results we reported early.



Распределение индивидуальных площадей нефтяных загрязнений поверхности Каспийского моря в районе нефтедобычи Нефтяные Камни

Представленные оценки базируются исключительно на спутниковых данных и могут в ту или другую сторону отличаться от измерений, проведённых *in situ*.

ВЛИЯНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ВЕТРА И ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ



OLI-TIRS IC3 Landsat-8, 5.08.2016, 07:19 UTC

Вовлеченные в вихревые движения пленки распространяются в северо-западном направлении на расстояние до 20 км и в юго-восточном направлении на расстояние до 10 км. Площадь загрязнения 200 кв. км.

Факторы, оказывающие наибольшее влияние на размер, форму и направление распространения нефтяного загрязнения в окрестности нефтедобывающей платформы:

- приповерхностный ветер;
- поверхностные течения.

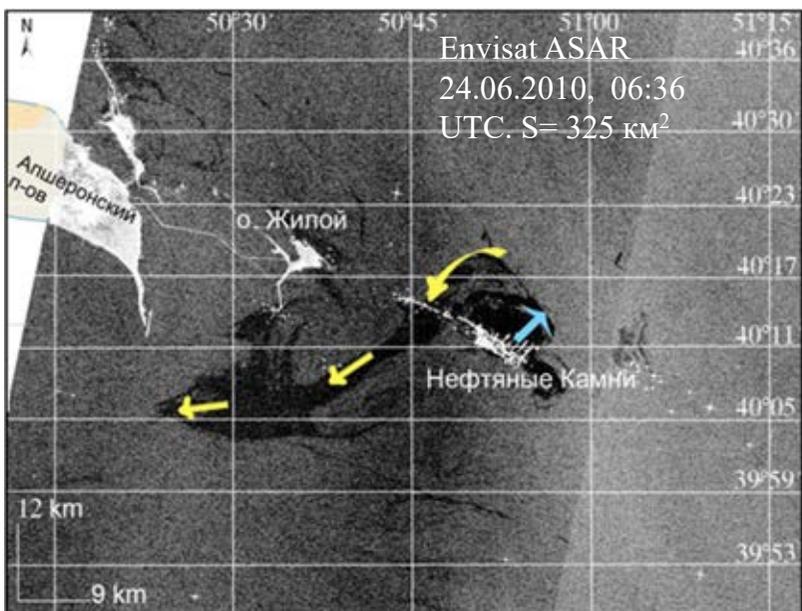
Район Апшеронского полуострова – это самый бурный район на всей акватории Каспийского моря.

Орографический и мысовой эффекты создают благоприятные условия для развития ветра, наблюдаются частые штормовые ветры.

Система поверхностных течений является сложной и отличается неустойчивостью.

Наблюдаются высокие скорости поверхностных течений, между о. Жилой и Нефтяными Камнями, например, скорость поверхностных течений иногда достигает 100 м/сек и более

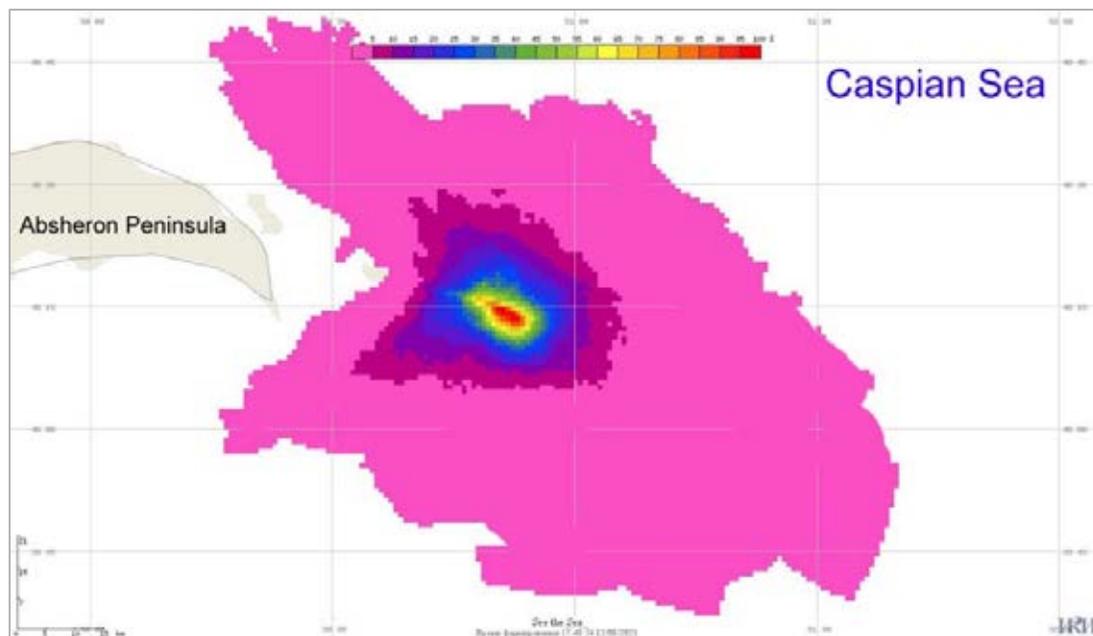
ВЛИЯНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ВЕТРА И ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ



После всплытия на поверхность нефтяное загрязнение распространялось в северо-восточном направлении (голубая стрелочка на рисунке). На расстоянии 6,5 км от выхода на поверхность нефтяное загрязнение оказалось захваченным поверхностным течением, обусловленным развивающимся вихревым диполем, повернуло на северо-запад, а затем, увлечённое сопутствующим вихревому диполю течением, продолжило распространяться на юго-запад, т.е. против ветра, на расстояние до 40 км от начальной точки.

Два этапа распространения нефтяного загрязнения:

- I. Нефтяные плёнки перемещаются и растекаются под действием локального ветра до тех пор, пока не оказываются захваченными поверхностными течениями
- II. Нефтяное загрязнение может оказаться захваченным поверхностными течениями, и распространяться этими течениями на достаточно большие расстояния или же оказаться вовлечённым в вихревые движения. Нефтяное загрязнение, захваченное поверхностными течениями, может распространяться на значительные расстояния, вплоть до 70 км, в направлениях, не совпадающих с направлением приповерхностного ветра.



The probability of the pollution by crude oil of the sea surface near the Oil Rocks oil-producing site calculated based on satellite data

The total aquatic area potentially subject to contamination by crude oil films is about 9000 sq. km. This area is shaped under the winds and currents that affected the oil films drift and evolution. A pronounced spatial asymmetry of this area can be easily seen.

The part of the sea surface with the nonzero probability of crude oil pollution stretched for 170 km in the direction of the northwest–southeast and about 100 km in the northeast –southwest direction.

About 800 sq. km of the sea surface has a 10% or greater chance of contamination by crude oil.

Approximately 100 sq. km of the sea surface near the drilling site has a very high risk of pollution

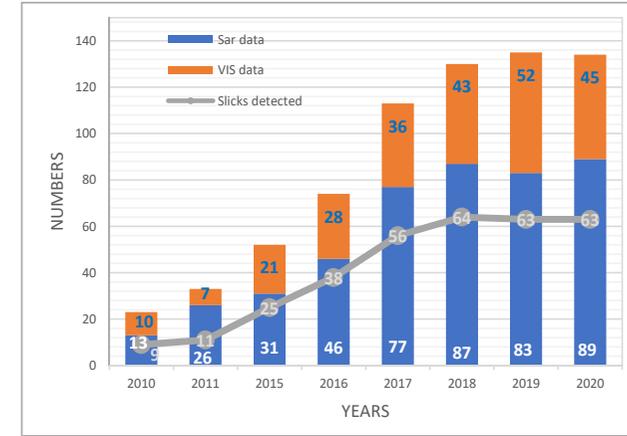


This study examined all Envisat ASAR images of the Caspian Sea obtained over the two regions of interest from January 2010 to January 2012 and Sentinel-1 SAR images taken from January 2015 to December 2020.

Also, visible (VIS) data with less than 10% cloud cover for these periods were analyzed

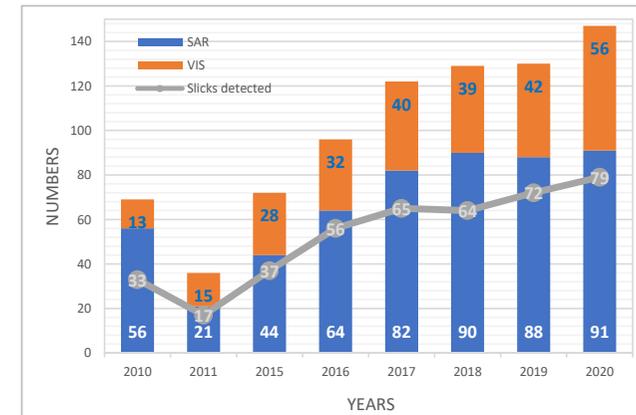
Analyzed satellite data for the region of Cape Sefid Rud

Sensor	Period	Number of images
ASAR Envisat	January 2010 - January 2011	39
SAR-C Sentinel 1A, 1B	January 2015 - December 2020	413
TM Landsat 5	January 2010 - August 2011	17
MSI Sentinel-2A, 2B	January 2015 - December 2020	154
OLI Landsat-8	January 2015 - December 2020	71



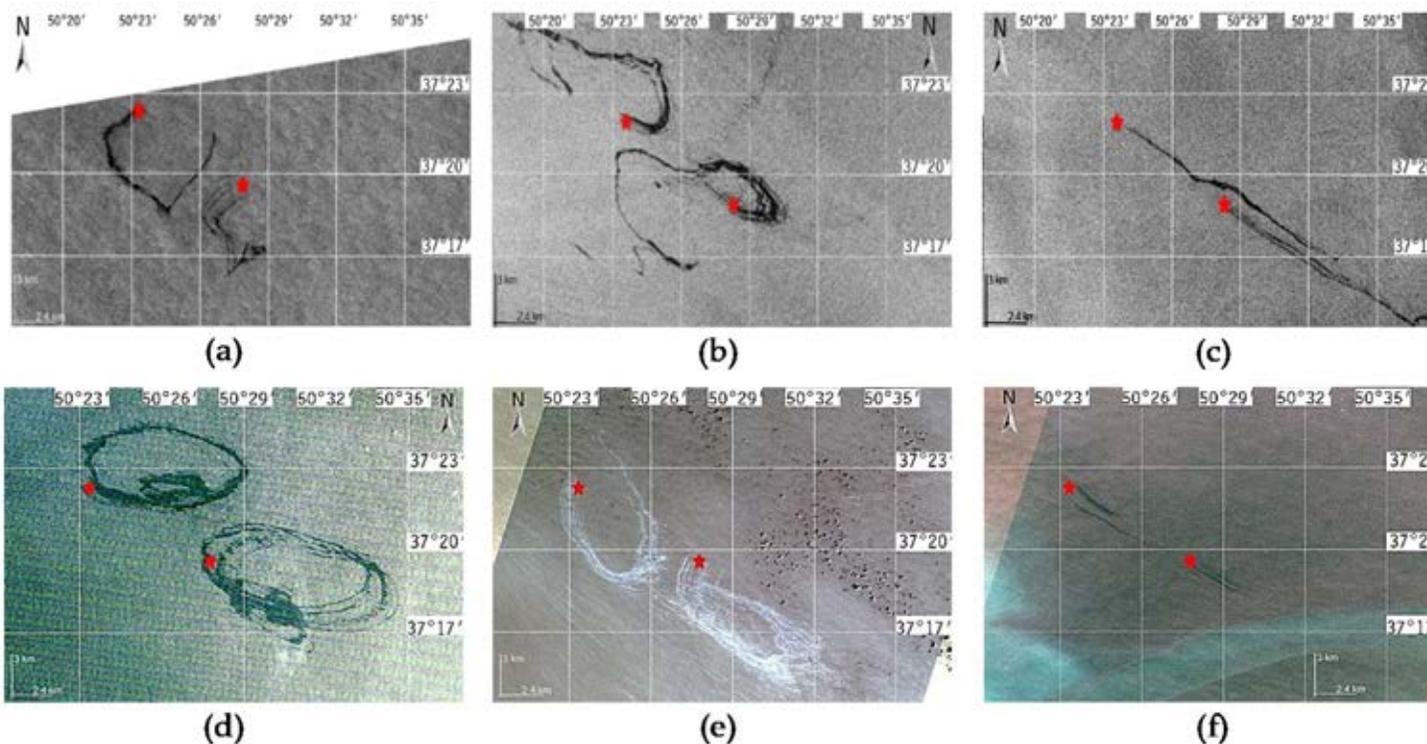
Analyzed satellite data for the region of Cheleken Peninsula

Sensor	Period	Number of images
ASAR Envisat	January 2010 – March 2012	77
SAR-C Sentinel 1A, 1B	January 2015 - December 2020	459
TM Landsat 5	January 2010 - August 2011	28
MSI Sentinel-2A, 2B	January 2015 - December 2020	129
OLI Landsat-8	January 2015 - December 2020	108



All in all, we examined 702 satellite images of the Caspian Sea obtained over the Iranian waters and 801 satellite images over the Turkmen waters.

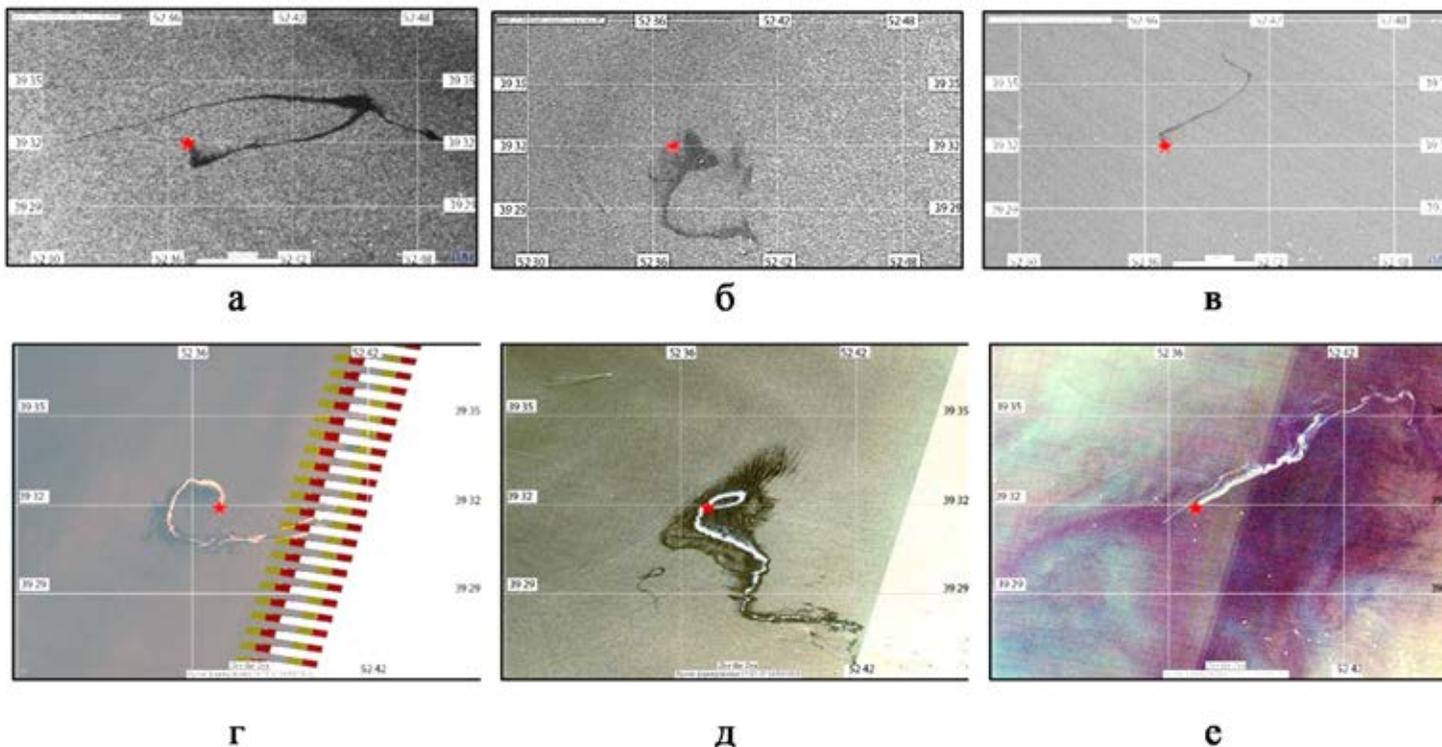
Часть акватории Каспийского моря у юго-западного побережья в провинции Гилан (Иран) к востоку от мыса Сефид Руд



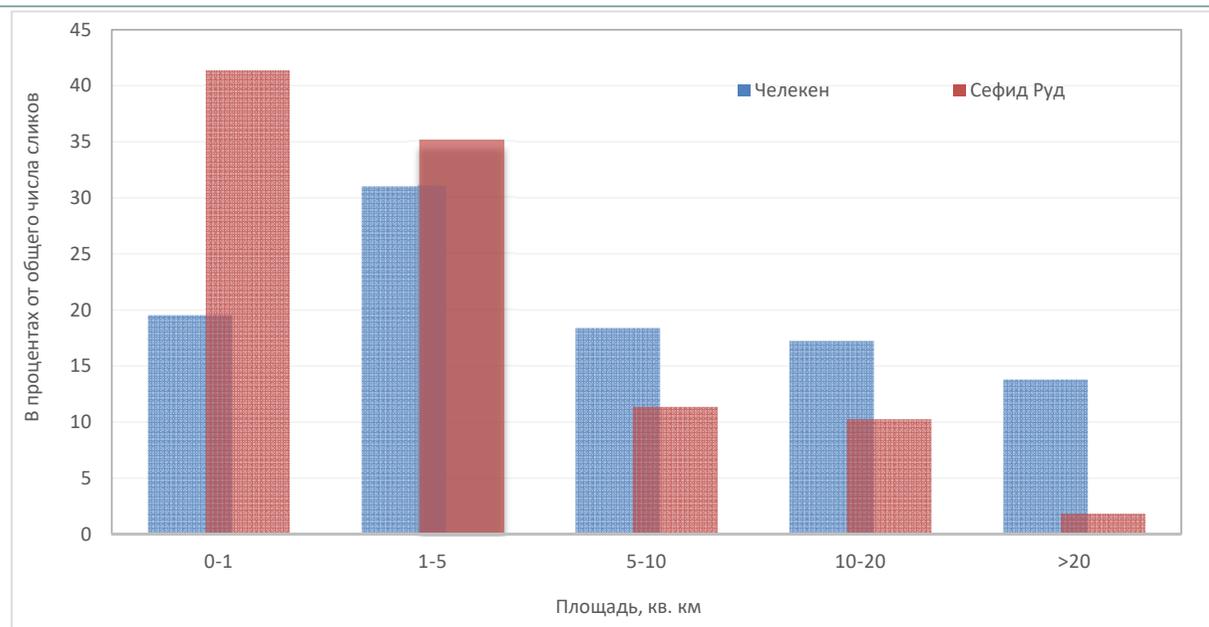
На иранском шельфе две близкорасположенные точки выхода нефтеуглеводородов на морском дне с координатами $50^{\circ}24.4'$ в.д., $37^{\circ}23.4'$ с.ш. и $50^{\circ}28.9'$ в.д., $37^{\circ}20.4'$ с.ш. идентифицированы как постоянные точки всплытия нефтяных slickов.

- (a) Sentinel-1A SAR-C of February 16, 2015, 14:36 UTC;
- (b) Sentinel-1A SAR-C of June 25, 2018, 02:36 UTC;
- (c) Sentinel-1A SAR-C of December 09, 2018, 14:36 UTC;
- (d) Landsat-5 TM (color composites of bands 3, 2 and 1) of June 11, 2010, 07:04 UTC;
- (e) Sentinel-2A MSI (color composites of bands 4, 3 and 2) of June 30, 2018, 07:38 UTC;
- (f) Sentinel-2A MSI (color composites of bands 4, 3 and 2) of September 03, 2019, 07:38 UTC.

Примеры проявлений сликовых структур в спутниковых данных, полученных над выходом нефтеуглеводородов с морского дна в районе туркменского шельфа в районе п-ва Челекен



- а) ASAR *Envisat* от 7 сентября 2007, 18:13 GMT ,
б) ASAR *Envisat* от 27 июня 2010 2007, 06:42 GMT ,
в) SAR-C *Sentinel-1A* от 10 марта 2020, 02:36 GMT ,
г) TM *Landsat 5* от 19 июня 2007, 07:07 GMT ,
д) MSI *Sentinel-2A* от 18 мая 2018, 07:28 GMT
е) OLI *Landsat 8* от 17 сентября 2019, 07:07 GMT



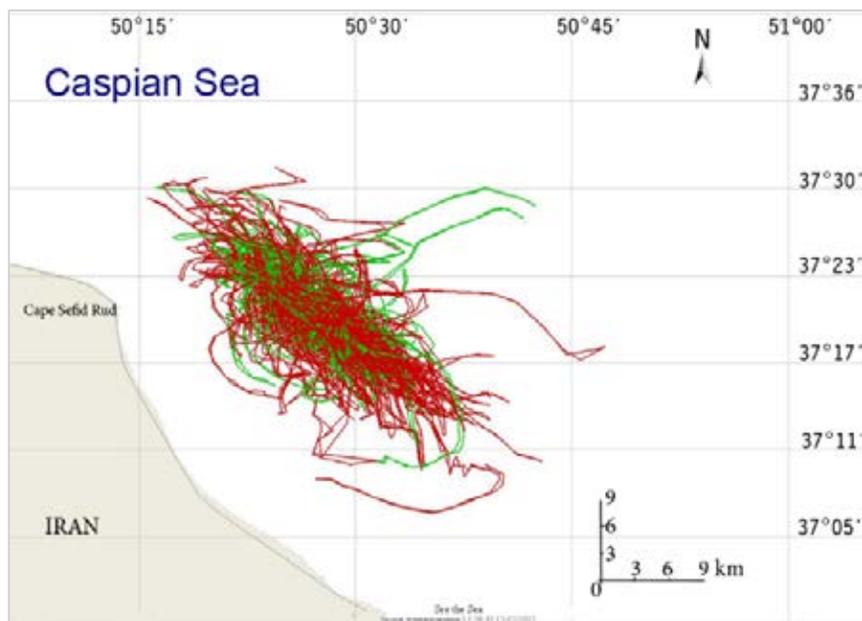
Распределение индивидуальных площадей нефтяных загрязнений поверхности Каспийского моря в районе мыса Сефид Руд и в районе полуострова Челекен

Индивидуальные размеры естественных нефтепроявлений, обусловленных выходами сырой нефти с морского дна, выявленных в разные годы на спутниковых изображениях, менялись в пределах от 0,01 до 45 км² для района мыса Сефид Руд и от 0,01 до 83 км² для района п-ва Челеке).

Мы можем констатировать, что объемы поступления сырой нефти с морского дна на поверхность в туркменских водах районе п-ва Челекен выше, чем на иранском шельфе вблизи мыса Сефид Руд.

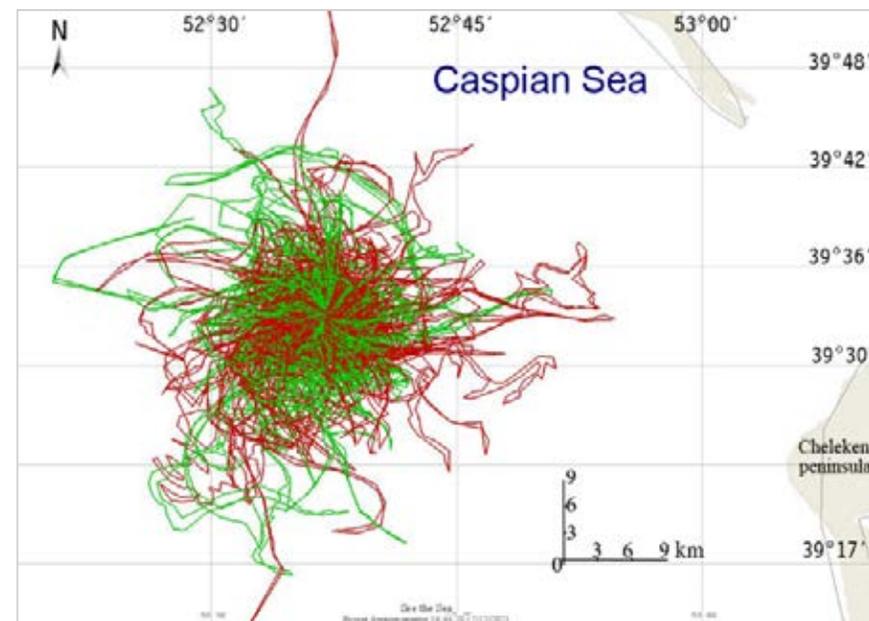
В 40% случаев площади снимков, обнаруживаемых вблизи мыса Сефид Руд, не превышают 1 км², площади еще 35 % снимков варьируются в пределах 1 – 5 кв. км.

В то же время в районе п-ва Челекен площади более, чем половины естественных нефтепроявлений на поверхности моря превышают 5 квадратных километров, а более чем в 25% случаев площади обнаруженных пятен превышают 10 км².



In the case of the Iranian shelf, two hydrocarbon seeps located close to each other on the sea bottom are documented as persistent "sources" of 157 and 172 NOS with coordinates 50°24.4' E, 37°23.4' N, and 50°28.9' E, 37°20.4' N, respectively.

After reaching the surface, NOS form, as a rule, thin curved stripes and can spread over long distances - up to 35 km in the Cape Sefid Rud region and up to 50 km in the Cheleken Peninsula region. This significantly increases the sea surface area potentially prone to oil pollution, despite the relatively small area of each individual slick. As a result, more than 1200 km² of the sea surface in the Cape Sefid Rud region and more than 1500 km² in the Cheleken Peninsula region are potentially exposed to oil pollution. A high risk of sea surface oil pollution from natural seabed seeps is attributed to areas of 100 km² and 200 km² correspondingly.

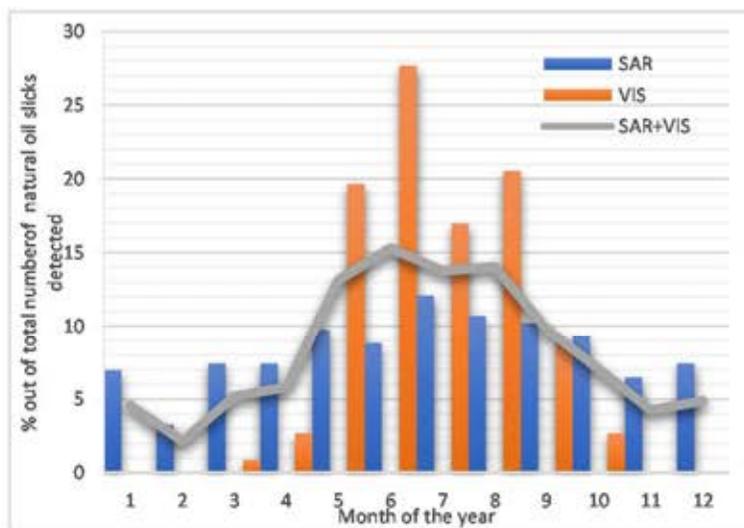


The seabed seep near the Cheleken Peninsula is documented as a persistent origin of 423 NOS detected in the satellite images.

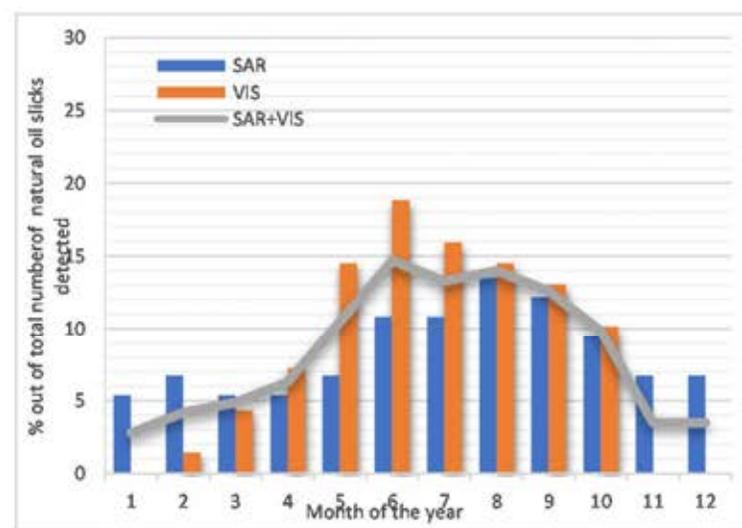
Their "source" point coordinates determined as 52° 36.2' E, 39° 32.9' N evidently indicate the seabed hydrocarbon seep location.

The seep is situated on the continental shelf at a depth of approximately 25 m and at a distance of 44 km from the western end of Cheleken Peninsula.

Сезонная изменчивость количества естественных нефтяных проявлений на поверхности моря выявляемых на спутниковых изображениях



(a)



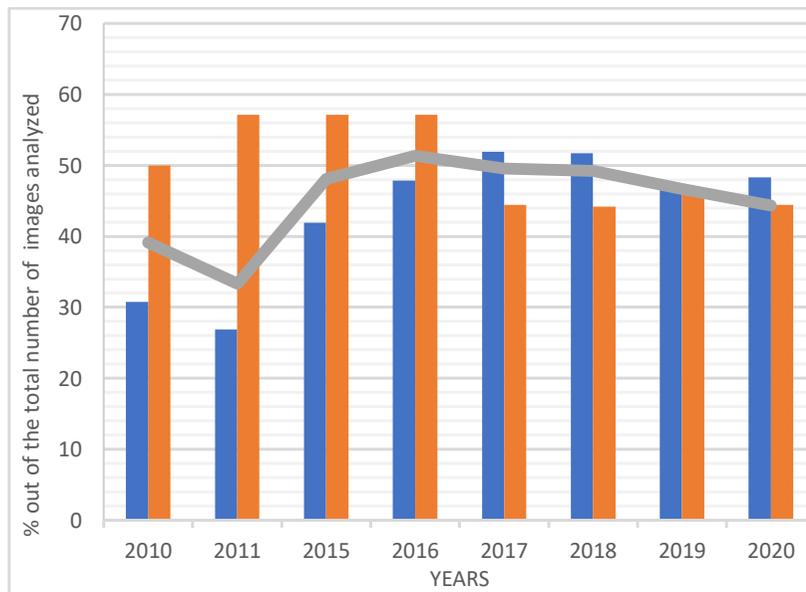
(b)

Сезонная изменчивость количества нефтепроявлений на морской поверхности в районе а) м. Сефид Руд; б) п-ва Челекен;

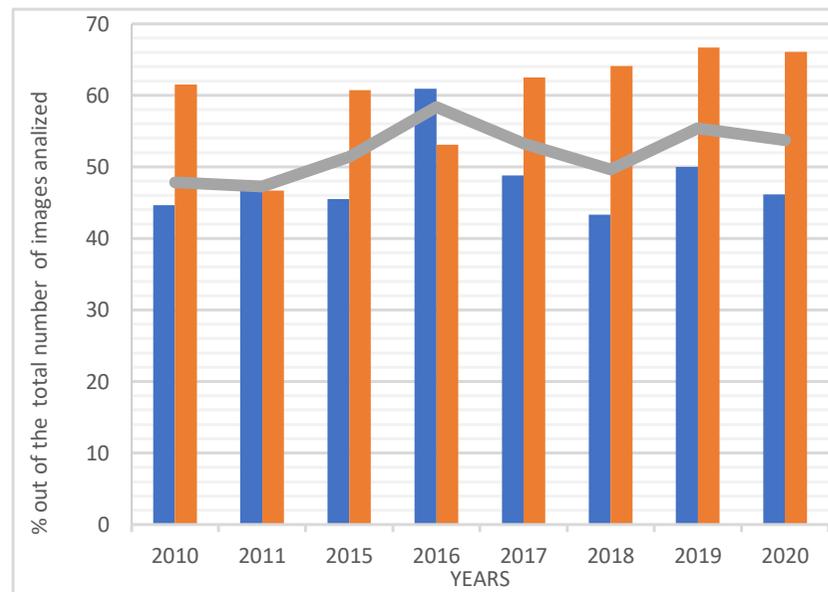
Подавляющее большинство природных пятен были идентифицированы на изображениях видимого диапазона в теплое время года – в районе мыса Сефид Руд около 85 процентов всех нефтепроявлений выявлено в период с мая по август.

Аналогичные результаты мы получили для района полуострова Челекен. Однако здесь сезонное распределение более плавное.

Сезонная изменчивость в частоте обнаружения естественных нефтяных проявлений на изображениях РСА также существует, но существенно менее выражена и определяется в основном гидрометеорологическими условиями на момент съемки.



(a)



(b)

Inter-annual variability of NOS detectability near:

(a) the Cape Sefid Rud;

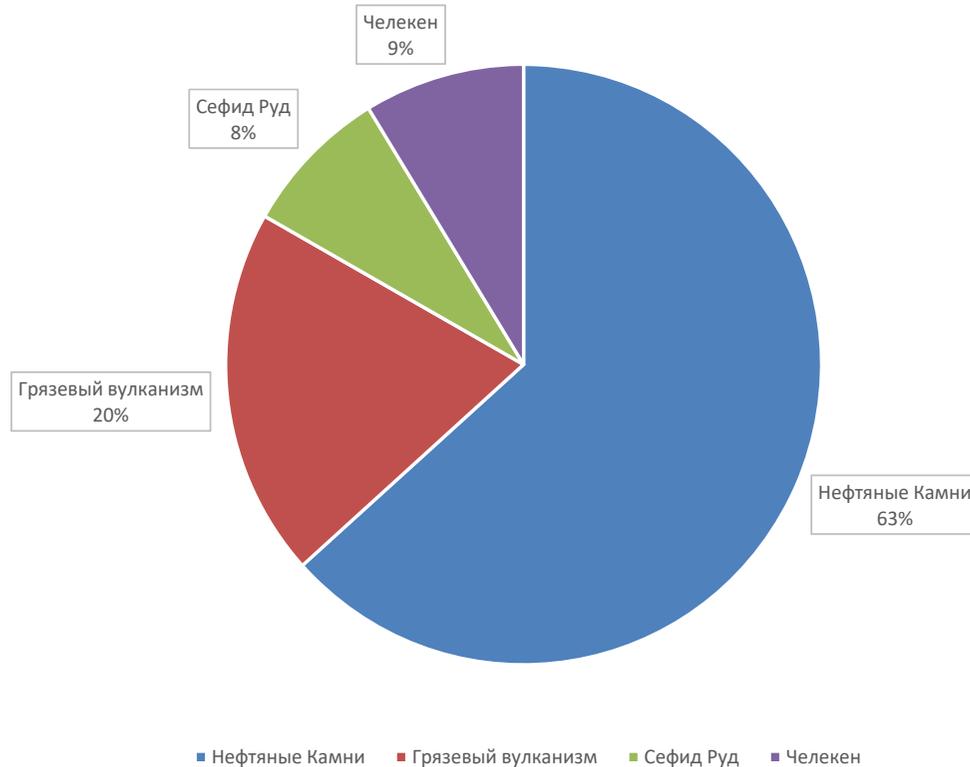
(b) the Cheleken Peninsula. SAR - blue bars, VIS - orange bars.

Grey lines show the overall percentage of SAR and VIS images bearing distinct NOS signatures

We found that during the whole study period, NOS detectability in satellite images (both SAR and VIS) of the Cape Sefid Rud region varied within 33%–50%.

NOS structures were identified in 47% - 60% of images taken in the Cheleken Peninsula region in the same period

Относительные вклады загрязнений различных типов



Относительные вклады различных типов загрязнений, выявленных по спутниковым данным, в интегральное нефтяное загрязнение поверхности Каспийского моря

1. Mityagina, Marina & Lavrova, Olga. (2015). Multi-Sensor Satellite Survey of the Surface Oil Pollution in the Caspian Sea. 10.1117/12.2194511.
2. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu. Multi-sensor satellite survey of natural oil slicks in the southeastern Black Sea // Proc. SPIE 10422, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2017. 1042215. doi: 10.1117/12.2278025.
3. Black Sea, their drift and fate as observed via remote sensing // Proc. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517607
4. Mityagina M.I. Assessment of surface oil pollution risks of the southeastern Black Sea based on long-term satellite data // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2019. V. 11150. 111501C. DOI: 10.1117/12.2532867
5. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu. Oil pollution hotspots on the Caspian Sea surface identified using satellite remote sensing // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE. V. 11529 / eds. C.R. Bostater, X. Neyt, F. ViallefontRobinet. 2020. 115290L. doi: 10.1117/12.2573501.

1. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. ISBN 978-5-9903101-1-7 М.: ИКИ РАН, 2011. 472 стр.
2. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий.— М.: ИКИ РАН, 2016.— 334 с
3. Lavrova O.Y., Mityagina M.I. Natural Oil Slicks in the Southeastern Black Sea. In: The Handbook of Environmental Chemistry. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/698_2020_475; First Online 29 June 2020; Publisher Name Springer, Berlin, Heidelberg
4. Mityagina M., Lavrova O. Satellite Survey of Inner Seas: Oil Pollution in the Black and Caspian Seas // Remote Sensing. 2016. V. 8. Iss. 10. P. 875. 24 p. doi:10.3390/rs8100875.
5. Mityagina, M.; Lavrova, O. Satellite Survey of Offshore Oil Seep Sites in the Caspian Sea. *Remote Sens.* **2022**, V.14 (3), 525. <https://doi.org/10.3390/rs14030525>

1. Лаврова О. Ю., М. И. Митягина. Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря. Исследование Земли из космоса. 2012. № 3. С. 48-65.
2. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Многолетний комплексный спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений поверхности Балтийского и Каспийского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т 9. № 5. С. 269-288.
3. Митягина М. И., Лаврова О. Ю. Оценка рисков загрязнения поверхности юго-восточной части Чёрного моря, обусловленного естественными выходами нефти с морского дна // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. т. 17. No 3. с. 211–220. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-211-220
4. Митягина М. И., Лаврова О. Ю. Выход естественных углеводородов со дна Каспийского моря в районе туркменского шельфа, выявленный по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 1 //7. No 2. С. 292–298. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-292-298

Спасибо за внимание

