

# Пространственная и временная изменчивость траекторий естественных нефтепроявлений на морской поверхности Южного Каспия, выявленная по спутниковым данным

М. И. Митягина, О. Ю. Лаврова

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

*E-mail: mityag@iki.rssi.ru*

Нефтяное загрязнение является основной экологической проблемой Каспийского моря, и существенный вклад в общее нефтяное загрязнение вносят выходы естественных нефтеуглеводородов с морского дна (нефтяные сипы). В статье рассмотрены пространственная и временная изменчивость траекторий распространения плёнок естественных нефтепроявлений (ЕНП) на морской поверхности Южного Каспия. Исследование базируется на анализе долговременных рядов данных спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой и спутниковых многоспектральных сенсоров оптического диапазона, полученных за пятилетний период наблюдений с 2017 по 2021 г. в двух тестовых районах, где на основе спутниковых данных были идентифицированы донные сипы. Это участки акватории Каспийского моря вблизи юго-западного побережья к востоку от м. Сефид Руд (провинция Гилан, Иран) и к западу от п-ова Челекен, административно принадлежавшего Туркменистану. К числу наших основных результатов следует отнести обнаружение на основе информации, полученной со спутников, значительной сезонной изменчивости в направлениях распространения ЕНП в обоих тестовых районах под влиянием локальных ветров и поверхностных течений, преобладающих в различные сезоны. Рассмотрены различные типы траекторий распространений ЕНП и сделаны предположения о механизмах их формирования. Отмечено влияние вихревой динамики на распространение ЕНП и её вклад в кросшельфовый перенос нефтяного загрязнения.

**Ключевые слова:** спутниковое дистанционное зондирование, морская поверхность, нефтяное загрязнение, естественные выходы нефтеуглеводородов с морского дна, Каспийское море

Одобрена к печати: 22.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-263-277

## Введение

Общая картина нефтяного загрязнения поверхности Каспийского моря во многом предопределена его природными особенностями, главной из которых представляется наличие больших запасов нефти и газа на дне. Существенный вклад в общее нефтяное загрязнение вносят естественные выходы углеводородов с морского дна, которые проявляются в виде нефтяных сипов (факелы углеводородов при просачивании нефти на дне). На морской поверхности над расположенным на дне нефтяным сипом регулярно появляется определённое количество нефти, которая формирует на ней тонкую плёнку. Дальнейший дрейф и растекание этой плёнки определяются совместным воздействием ветра и поверхностных течений. Нефтяные сипы такого рода выделяют нефть из недр на поверхность в течение длительных промежутков геологического времени и географически широко распространены. Эти процессы выявляются и наблюдаются с применением методов спутникового дистанционного зондирования в различных регионах земного шара (Fingas, Brown, 2014; Jatiault et al., 2017; Leifer, 2019; Logan et al., 2008; MacDonald et al., 2015; Mitra et al., 2013; Najoui et al., 2022; Nunziata et al., 2018). Достаточно много исследований естественных нефтепроявлений (ЕНП) на морской поверхности проведено над материковым склоном в юго-восточной части Чёрного моря (Евтушенко, Иванов, 2012; Лаврова, Митягина, 2012; Körber et al., 2014; Lavrova, Mityagina, 2020; Wagner-Friedrichs, 2007).

Опубликованы также результаты исследований, базирующихся на спутниковых наблюдениях за нефтяным загрязнением поверхности Каспийского моря, которые посвящены главным образом наблюдениям района нефтедобычи Нефтяные Камни, находящегося на границе

Среднего и Южного Каспия (Иванов и др., 2011; Митягина и др., 2015; Bayramov et al., 2018), а также западного склона Южно-Каспийской впадины, где сосредоточено большое количество грязевых вулканов (Иванов и др., 2007; Матросова и др., 2022; Митягина, Лаврова, 2012).

Результаты, полученные нами в ходе ранее проведённых исследований и основанные на анализе и обобщении спутниковых данных, представлены в ряде публикаций (Лаврова и др., 2016, 2022; Митягина, Лаврова, 2020; Mityagina, Lavrova, 2016, 2020, 2022; Mityagina et al., 2019). В частности, в ходе предыдущего исследования на основе спутниковых изображений нами были идентифицированы источники просачивания углеводородов с морского дна вблизи юго-западного побережья Каспия в провинции Гилан (Иран) к востоку от м. Сефид Руд и вблизи восточного побережья к западу от п-ова Челекен, административно принадлежащего Туркменистану, и уточнены их координаты. Отметим, что естественные выходы углеводородов в районе Челекенского п-ова ранее не были отмечены в научных публикациях, базирующихся на спутниковых данных, и впервые выявлены на спутниковых снимках и описаны нами. Было также показано, что основной вклад в интегральное нефтяное загрязнение вносит непрерывное загрязнение морской поверхности Каспия нефтяными плёнками в районе нефтедобычи Нефтяные Камни (60–65 %), а также грязево-вулканическая активность на морском дне в районе Южно-Каспийской впадины (18–23 %).

Естественные нефтепроявления углеводородов с морского дна на иранском и туркменском шельфах вносят несколько меньший вклад в общую картину загрязнения — 7–10 % и 8–11 % соответственно, но и этот вклад достаточно значителен. Кроме того, они выступают постоянно действующими источниками естественного загрязнения прилежащих к ним акваторий.

Далее мы в этой статье:

- сосредоточимся на использовании данных спутникового дистанционного зондирования — как радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), так и мультиспектральных сенсоров оптического диапазона — для обнаружения ЕНП на морской поверхности в двух районах просачивания углеводородов с морского дна Южного Каспия, а также для восстановления и дальнейшего анализа их пространственно-временных характеристик;
- определим по спутниковым данным характерные типы траекторий распространений ЕНП на морской поверхности для двух районов интереса и уделим особое внимание эллиптическим траекториям распространения ЕНП, выявляемых на спутниковых изображениях морской поверхности вблизи м. Сефид Руд в летний период, а также сформулируем гипотезы возможных причин формирования траекторий подобного типа;
- рассмотрим сезонную и годовую изменчивость выявляемости ЕНП в спутниковых данных для двух районов интереса и покажем наличие различных доминирующих направлений их распространения в разные сезоны;
- оценим влияние вихревой динамики морских вод на распространение ЕНП.

## Районы интереса

Основные районы интереса: часть Каспийского моря вблизи юго-западного побережья к востоку от м. Сефид Руд (провинция Гилан, Иран) — цифра 1 на *рис. 1* (см. с. 265) и часть Каспийского моря к западу от п-ова Челекен, которая административно принадлежит Туркменистану, — цифра 2 на *рис. 1*. Вблизи м. Сефид Руд на западной границе Южно-Каспийской впадины на глубине около 800 м естественные нефтеуглеводороды просачиваются на поверхность из двух близкорасположенных сипов с координатами 37° 23,4' с. ш., 50° 24,4' в. д. и 37° 20,4' с. ш., 50° 28,9' в. д. Сип вблизи п-ова Челекен имеет координаты 39° 32,9' с. ш., 52° 36,2' в. д. и расположен на континентальном шельфе на глубине менее 50 м.

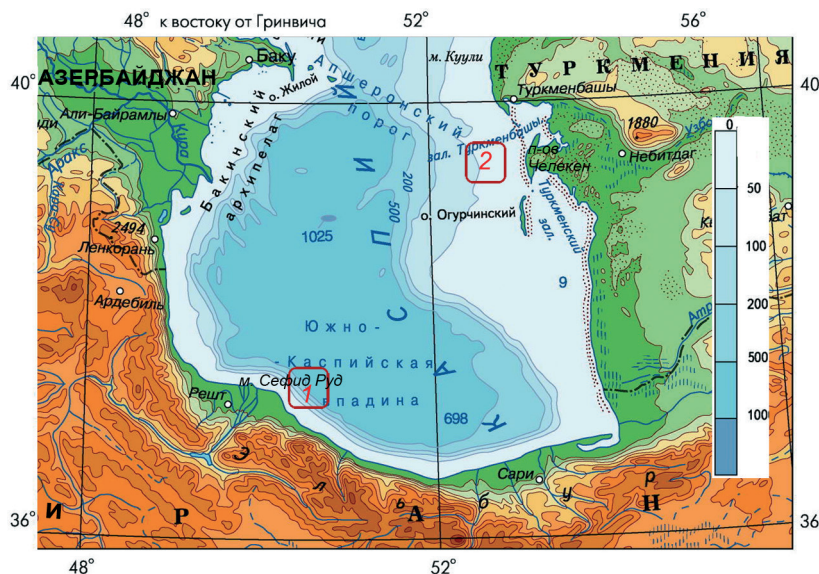


Рис. 1. Основные районы интереса

### Используемые данные

Экспериментальной основой исследования послужил массив спутниковых данных, накопленных за пятилетний период с января 2017 г. по декабрь 2021 г. Он включает в себя как данные, полученные радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА) C-SAR (англ. C-band Synthetic Aperture Radar) ИСЗ (искусственный спутник Земли) Sentinel-1A, -1B, так и данные, полученные в видимом диапазоне при помощи многоспектральных сенсоров MSI (англ. Multispectral Instrument) ИСЗ Sentinel-2A, -2B и сканирующего радиометра OLI/TIRS (англ. Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) ИСЗ Landsat-8 (Лаврова и др., 2016) при облачном покрытии, не превосходящем 10 %. Всего было проанализировано 661 спутниковое изображение поверхности Каспийского моря, полученное над иранским шельфом в районе м. Сефид Руд, и 690 спутниковых изображений морской поверхности, полученных в районе п-ова Челекен. На рис. 2 представлены диаграммы, показывающие распределение по годам количества проанализированных РЛИ (синие столбцы) и изображений сенсоров оптического диапазона (оранжевые столбцы), а также количества всех обнаруженных на них естественных нефтепроявлений (серые линии).

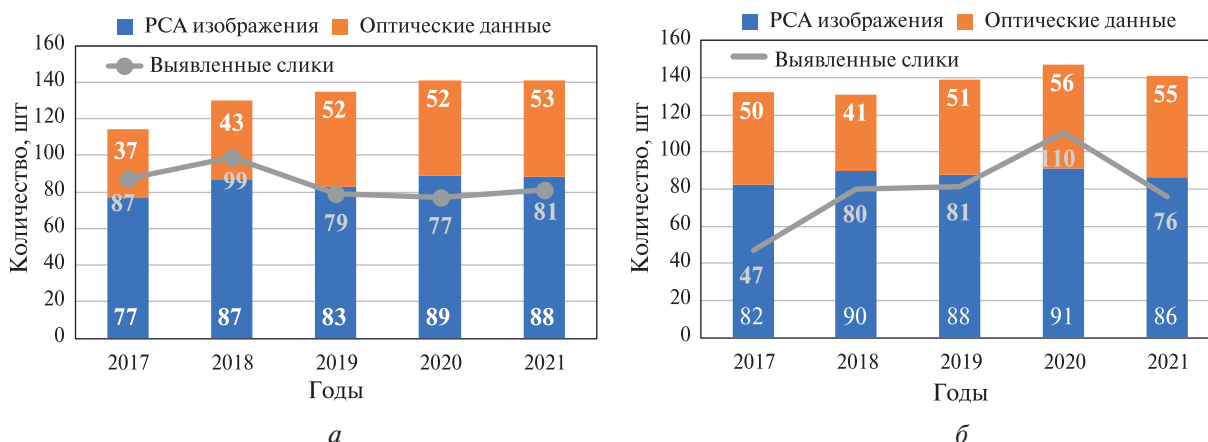
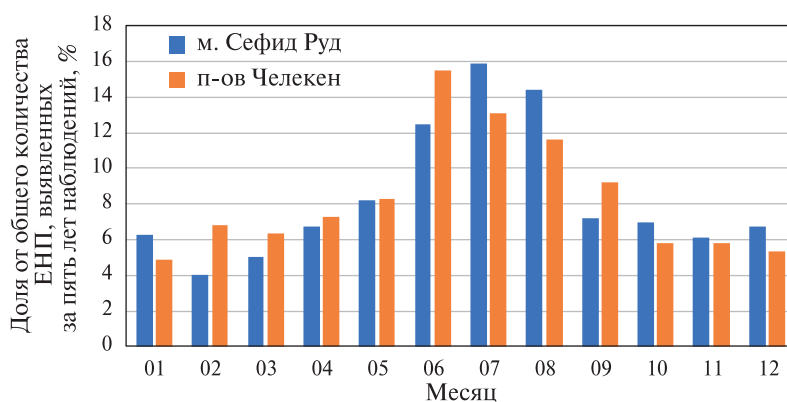


Рис. 2. Межгодовое распределение проанализированных спутниковых изображений и выявленных на них ЕНП для районов: а — м. Сефид Руд; б — п-ова Челекен (переработано на основе (Лаврова и др., 2022))

Для анализа спутниковых данных и построения карт нефтяного загрязнения морской поверхности применялся инструментальный и картографический интерфейс спутникового информационного сервиса See the Sea (STS), разработанного в Институте космических исследований РАН (Лаврова и др., 2019). С использованием подсистемы создания и ведения описаний явлений спутникового сервиса STS формировался массив описаний, выявленных на спутниковых изображениях ЕНП, содержащий их пространственные контуры и количественные характеристики. На *рис. 3* показана доля (в процентах) ЕНП, обнаруженных в каждый конкретный месяц на спутниковых изображениях (как РСА, так и многоспектральных сенсоров) двух районов интереса за пятилетний период наблюдений, от общего количества ЕНП, выявленных за пятилетний период. Видно, что более 40 % всех ЕНП, выявленных по спутниковым данным, приходится на три летних месяца. Причины сезонной изменчивости частоты уверенного детектирования ЕНП на спутниковых изображениях различных сенсоров, хорошо заметной на *рис. 3*, рассмотрены нами ранее в работах (Лаврова и др., 2022; Mityagina, Lavrova, 2022).



*Рис. 3.* Ежемесячное распределение количества ЕНП, обнаруженных в спутниковых данных (как РСА, так и многоспектральных сенсоров) за пятилетний период наблюдений в районах интереса: м. Сефид Руд (синие столбцы) и п-ова Челекен (оранжевые столбцы)

С помощью интегрированного в систему STS картографического интерфейса построены карты траекторий распространения ЕНП после их выхода на морскую поверхность. Эти карты использовались для выявления изменчивости траекторий ЕНП на морской поверхности на различных временных интервалах и различных пространственных масштабах.

## Результаты

### Район м. Сефид Руд

Карта, представленная на *рис. 4а* (см. с. 267), содержит схематические представления ЕНП, выявленных на спутниковых изображениях поверхности Каспийского моря в районе континентального склона вблизи иранского побережья за пятилетний период с 2017 по 2021 г. Пространственные размеры и конфигурация области акватории, потенциально подверженной нефтяному загрязнению, определяются действием ветров и течений, которые влияют на дрейф и эволюцию нефтяных плёнок. Хорошо видна выраженная пространственная асимметрия этой области. Легко заметить, что на большом временном интервале существует доминирующее направление распространения ЕНП. Этот факт наглядно отражена на *рис. 4б* диаграмма направлений распространения ЕНП, выявленных по спутниковым данным с 2017 по 2021 г. Из диаграммы видно, что в 60 % случаев ЕНП после выхода на поверхность распространялись в юго-восточном направлении (112–157°).



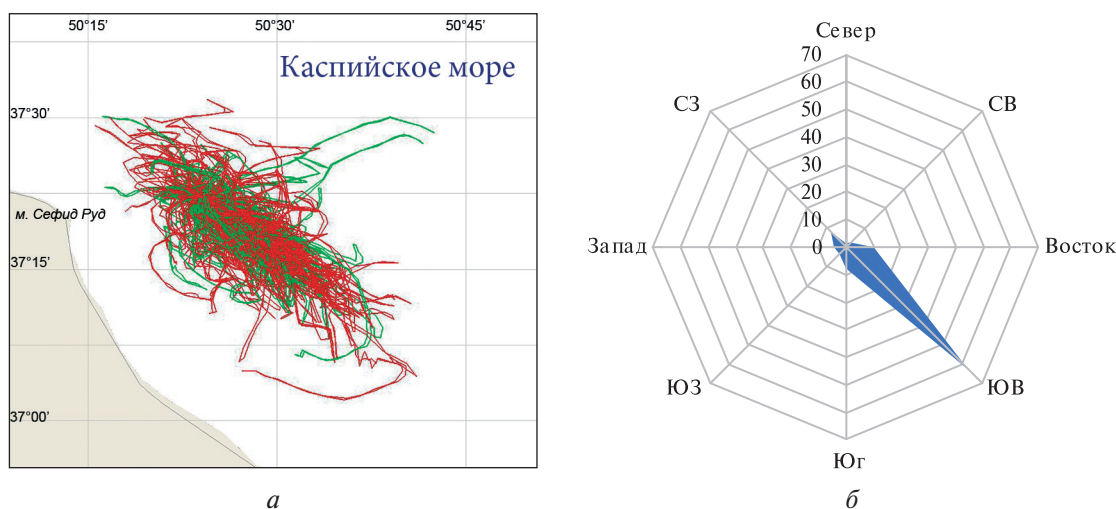


Рис. 4. Сводная карта ЕНП на поверхности Каспийского моря, выявленных по спутниковым данным за 2017–2021 гг. вблизи м. Сефид Руд (а). Диаграмма распределения направлений дрейфа плёнок ЕНП на морской поверхности по результатам спутниковых наблюдений за 2017–2021 гг. (б)

На основе анализа спутниковых данных мы выявили, что во все годы наблюдения присутствует сезонная изменчивость в направлениях распространения плёнок ЕНП. Наличие сезонной изменчивости в направлениях траекторий распространения плёнок ЕНП в этом районе наглядно отражают диаграммы, построенные по данным за январь и декабрь, накопленным за весь период 2017–2021 гг., и по данным за май, накопленным за тот же период времени (рис. 5). При построении всех диаграмм за направление распространения принималось направление луча, соединяющего точку всплытия нефти на поверхность моря и конечную точку слика, выявленного на спутниковом изображении. Более 80 % ЕНП, выявленных в декабре – январе за пять лет наблюдений, распространялись в юго-восточном направлении. Отметим, что все ЕНП, выявленные за пятилетний период наблюдений в январе, распространялись в этом направлении.

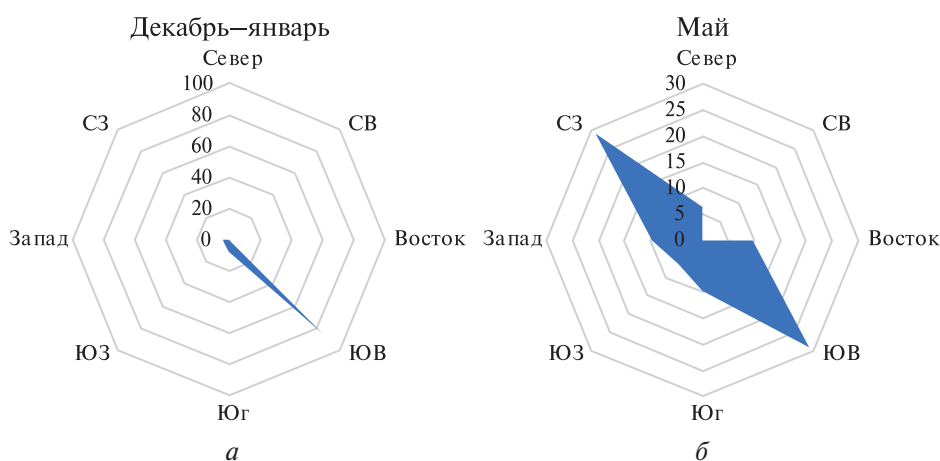
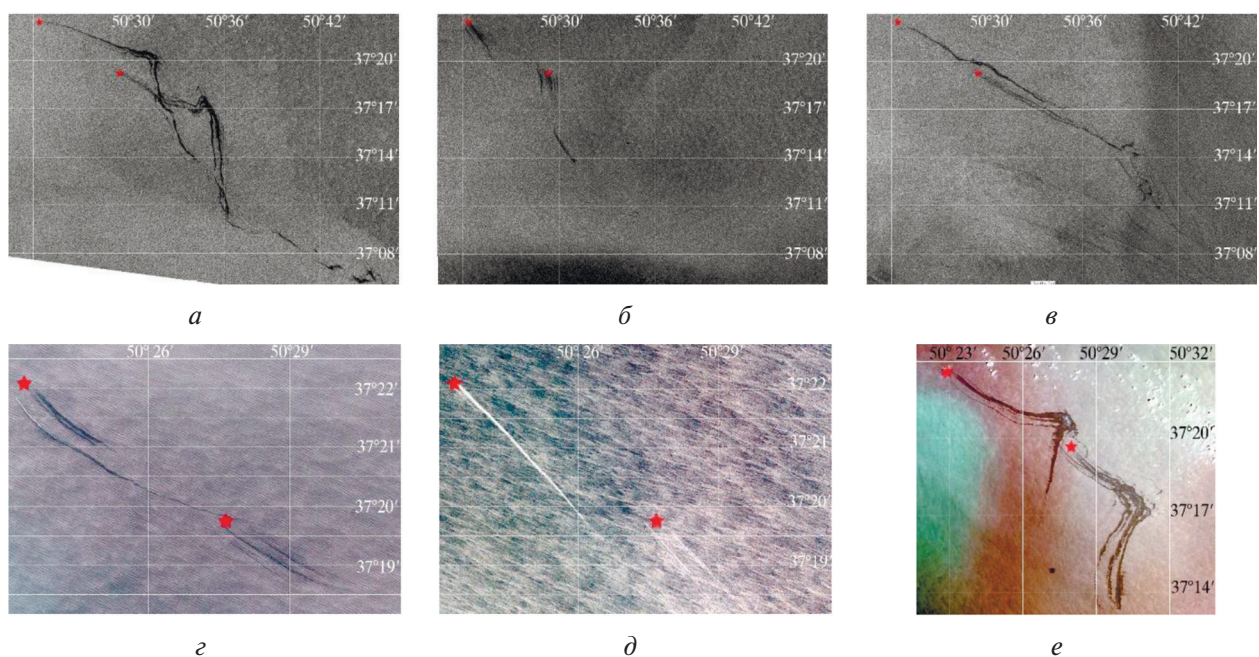


Рис. 5. Диаграммы распределения направлений дрейфа ЕНП на морской поверхности по результатам спутниковых наблюдений в различные месяцы 2017–2021 гг.: а — декабрь – январь; б — май

Траектории распространения ЕНП, выявленных за тот же период наблюдений в мае, отличаются большим разнообразием. Наиболее характерные примеры проявлений ЕНП на морской поверхности, типичных для континентального склона у побережья Ирана, на

изображениях спутниковых РСА и сенсоров оптического диапазона приведены на *рис. 6*. Наличие на морской поверхности нефтяной плёнки вызывает затухание резонансной гравитационно-капиллярной составляющей поверхностных волн. В этом случае на поверхности моря появляются гладкие участки, слики, которые образуют тёмные области уменьшенного обратного рассеяния сигнала на радиолокационном изображении (Brekke, Solberg, 2005; Torouzelis, 2008). ЕНП отчётливо выделяются и на изображениях, цветосинтезированных по данным сенсоров оптического диапазона, особенно полученных в области солнечного блика, как характерные радужные структуры повышенной яркости, окружённые тёмным ореолом (Jackson, Alpers, 2010).



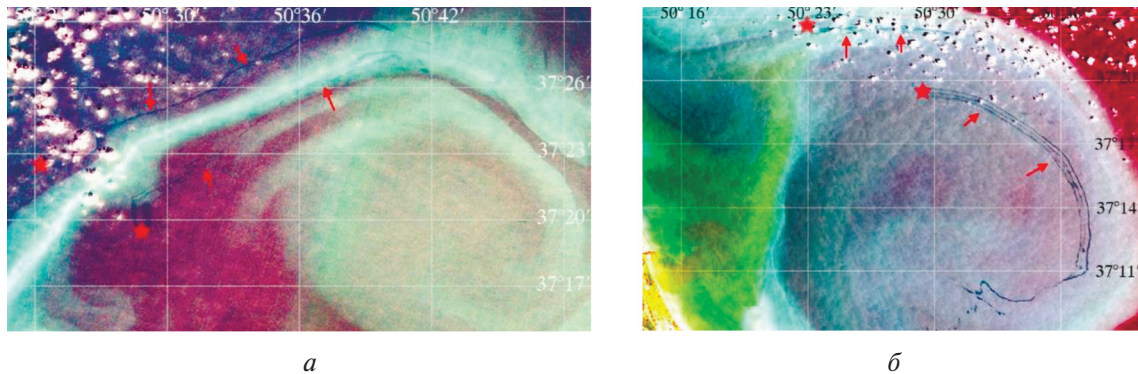
*Рис. 6.* Примеры проявлений траекторий распространения ЕНП на морской поверхности в спутниковых данных, полученных над выходами нефтеуглеводородов с морского дна в районе м. Сефид Руд: *а* — SAR-C Sentinel-1A от 31.07.2018, 02:36 GMT; *б* — SAR-C Sentinel-1A от 16.09.2018., 14:36 GMT; *в* — SAR-C Sentinel-1A от 09.12.2018, 14:36 GMT; *г* — MSI Sentinel-2A от 03.09.2018, 07:38 GMT; *д* — MSI Sentinel-2A от 25.06.2019, 07:38 GMT; *е* — OLI Landsat-8 от 25.06.2021, 07:13 GMT. Красными звёздочками отмечено положение точек всплытия ЕНП на поверхность моря

Нефтепроявления привязаны к двум близко расположенным точкам просачивания — сипам — на морском дне. Большинство траекторий имеют вид протяжённых (иногда искривлённых или изломанных) сликовых полос. Около каждой из двух точек всплытия могут наблюдаться две или более чёткие сликовые полосы, факт наличия которых объясняется тем, что нефть доставляется на морскую поверхность газовыми пузырьками в результате одновременной активности нескольких газовых факелов. Резкие изломы в траекториях распространения ЕНП, показанных на *рис. ба* и *е*, обусловлены резкой сменой направления приповерхностного ветра.

Траектории, подобные представленным на *рис. 6*, соответствуют распространению ЕНП в юго-восточном направлении. Это объясняется тем, что в рассматриваемом районе значения скорости поверхностных течений довольно разбросаны, направление же течений носит в основном юго-восточный характер (120–180°). Этому же направлению соответствует и максимальная скорость течений (Мамедов, 2007). Плёнки ЕНП, попавшие на морскую поверхность из сипа на дне, переносятся существующими здесь осреднёнными полями течений, осуществляющими адвективный перенос. Характерная длина траекторий плёнок ЕНП в юго-восточном направлении составляет 6–10 км.



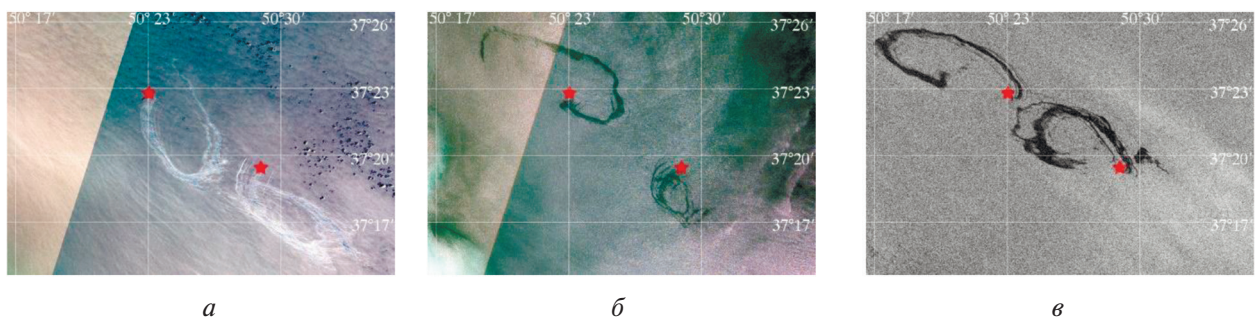
В периоды ослабления течений и при умеренных ветрах влияние мезо- и субмезомасштабных процессов на траекторию распространения ЕНП усиливается и становится перво-степенным фактором. Эта ситуация отличается от воздействия существенно более крупномасштабных и поэтому более однородных полей ветра и генеральных течений. Траектории дрейфа плёнок ЕНП становятся гораздо более сложными, если по мере своего распространения они вовлекаются в вихревые движения, обусловленные присутствием в районе интереса вихрей разных знаков или вихревых диполей, и распространяются этими течениями на достаточно большие расстояния. Длина траектории ЕНП, вовлечённых в вихревое движение, может достигать 40–45 км. Фрагменты спутниковых изображений, отображающих распространение ЕНП, вовлечённых в вихревое движение в районе м. Сефид Руд, приведены на *рис. 7*.



*Рис. 7.* Фрагменты спутниковых изображений, отображающих вовлечённость плёнок ЕНП в вихревые движения: *а* — MSI Sentinel-2A от 25.09.2018, 07:25 GMT; *б* — OLI Landsat-8 от 06.07.2019, 07:13 GMT. Красными звёздочками отмечено положение точек всплытия ЕНП на поверхность моря. Красные стрелочки указывают траектории ЕНП

Нами установлено, что в 10–12 % случаев ЕНП после выхода на поверхность вовлечены в вихревое движение, которое зачастую радикальным образом меняет ожидаемые (расчётные) траектории их распространения. Нефтяные плёнки, захваченные поверхностными течениями, порождёнными развивающимся вихрем, могут распространяться на значительные расстояния в направлении, не совпадающем с направлением приповерхностного ветра. В зависимости от размеров, знака завихренности и траектории движения вихря вовлечённость ЕНП в вихревое движение может иметь как положительный эффект, способствуя кроссшельфовому переносу загрязнений и очищению прибрежной зоны, так и отрицательный, способствуя переносу нефтяного загрязнения ближе к берегу.

На *рис. 8* приведены выявленные на спутниковых изображениях траектории распространения ЕНП, специфическая форма которых требует отдельного рассмотрения.



*Рис. 8.* Фрагменты спутниковых изображений, отображающих эллиптические траектории распространения ЕНП на морской поверхности: *а* — MSI Sentinel-2A от 30.06.2018, 07:38 GMT; *б* — MSI Sentinel-2A от 06.05.2019, 07:38 GMT; *в* — SAR-C Sentinel-1A от 21.09.2021, 14:36 GMT. Красными звёздочками отмечено положение точек всплытия ЕНП на поверхность моря

На спутниковых изображениях, приведённых на *рис. 8*, отчётливо выделяются структуры в виде эллипсов (открытых или замкнутых). Подобные эллиптические траектории детектировались нами на спутниковых изображениях морской поверхности в районе м. Сефид Руд в течение всего пятилетнего периода наблюдений в тёплое время года — с последних чисел апреля до конца августа, при этом количество выявленных структур этого типа существенно варьировало от года к году, так же как и временные интервалы их появления. Длина больших осей эллипсов изменялась в интервале от 3 до 10 км.

Объяснение формирования подобных траекторий с точки зрения гидрофизических процессов требует отдельного исследования и выходит за рамки настоящей статьи. Однако мы можем предположить, что такая форма траекторий распространения ЕНП становится следствием воздействия инерционных колебаний, которые существуют за счёт действия сил инерции после прекращения действия основной силы, вызывающей движение вод, и характерны именно для естественного просачивания с морского дна, когда нефть медленно вытекает в течение некоторого времени из фиксированной точки на дне моря. После ослабления внешнего воздействия эти колебания устанавливаются, и для их поддержания внешнее воздействие уже не требуется. Разработке методики выявления инерционных колебаний водных слоёв на спутниковых изображениях морской поверхности посвящена работа (Лаврова, Сабинин, 2016). Процесс формирования круговых и эллиптических траекторий ЕНП под воздействием квазиинерционных колебаний подробно рассмотрен для акватории Мексиканского зал. в работе (Li et al., 2013). Колебания такого рода могут возбудиться под влиянием внешнего воздействия, чаще всего ветрового импульса. В работе (Бондур и др., 2013) показано, что как форма, так и период этих колебаний могут испытывать значительные изменения вблизи крутых склонов и под влиянием сильных и неоднородных в пространстве течений. Возникновение круговых и эллиптических траекторий именно в тёплое время года может быть связано с формированием сезонного термоклина, способствующего интенсификации подобных колебаний (Shrira, Forget, 2015).

### **Район п-ова Челекен**

Примеры отображения на морской поверхности ЕНП, типичных для континентального шельфа около побережья Туркменистана, на изображениях, полученных при помощи спутниковых РСА и сенсоров оптического диапазона, приведены на *рис. 9* (см. 271).

При слабом ветре и в отсутствие дрейфовых течений всплывшая на поверхность нефть равномерно растекается во все стороны, принимая форму округлого пятна (см. *рис. 9а*). Под воздействием постепенно меняющегося направления ветра могут формироваться траектории в форме пологих кривых (см. *рис. 9б*). Для района вблизи п-ова Челекен характерны петлеобразные траектории распространения ЕНП, которые могут возникать при невысоких скоростях течения, формирующегося на фоне частых изменений направления умеренного ветра (см. *рис. 9в, г, е*).

Так же как и для района вблизи м. Сефид Руд, ЕНП в районе Туркменского шельфа достаточно часто оказываются вовлечены в вихревые движения, и в этом случае длина траекторий их распространения может достигать 40 км.

Приведённые на *рис. 9* примеры нефтяных сликов и представленная на *рис. 10а* (см. с. 272) карта, содержащая схематическое представление ЕНП на поверхности Каспийского моря вблизи п-ова Челекен, выявленных на спутниковых изображениях за пятилетний период с 2017 по 2021 г., демонстрируют высокую вариабельность направления дрейфа и растекания плёнок ЕНП в этом районе. Однако представленная на *рис. 10б* диаграмма проявляет неравнозначность различных направлений. В частности, 37 % ЕНП, выявленных за 5 лет, распространялись на юг, что в три раза превосходит частоту их распространения на север (12 %).



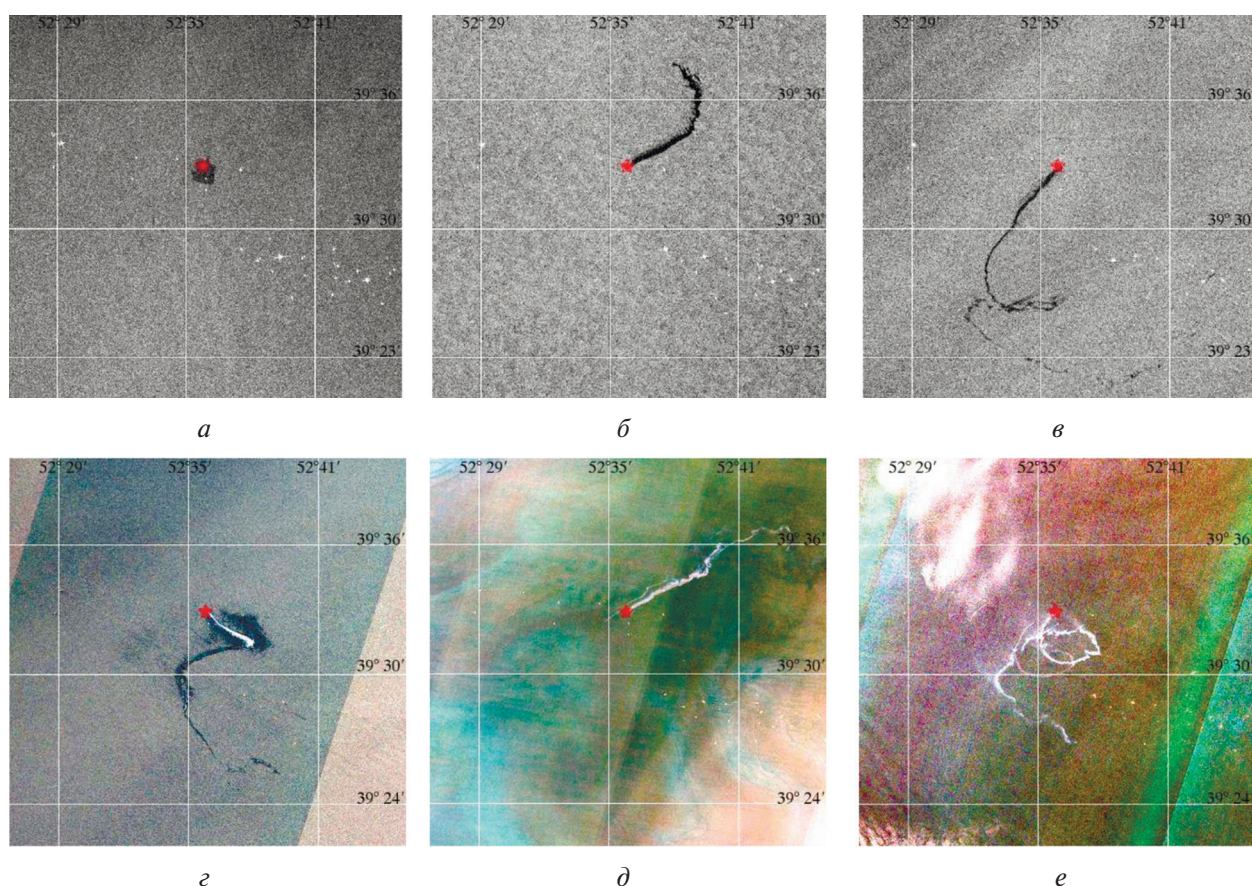


Рис. 9. Примеры проявлений траекторий распространения ЕНП на морской поверхности в спутниковых данных, полученных над выходами нефтеуглеводородов с морского дна в районе п-ова Челекен: *a* — SAR-C Sentinel-1A от 13.08.2021, 14:29 GMT; *б* — SAR-C Sentinel-1A от 14.08.2019, 14:29 GMT; *в* — SAR-C Sentinel-1A от 08.06.2019, 02:36 GMT; *г* — MSI Sentinel-2A от 13.05.2019, 07:28 GMT; *д* — OLI Landsat-8 от 17.09.2019, 07:35 GMT; *е* — MSI Sentinel-2A от 21.07.2020, 07:27 GMT. Красными звёздочками отмечено положение точек всплытия ЕНП на поверхность моря

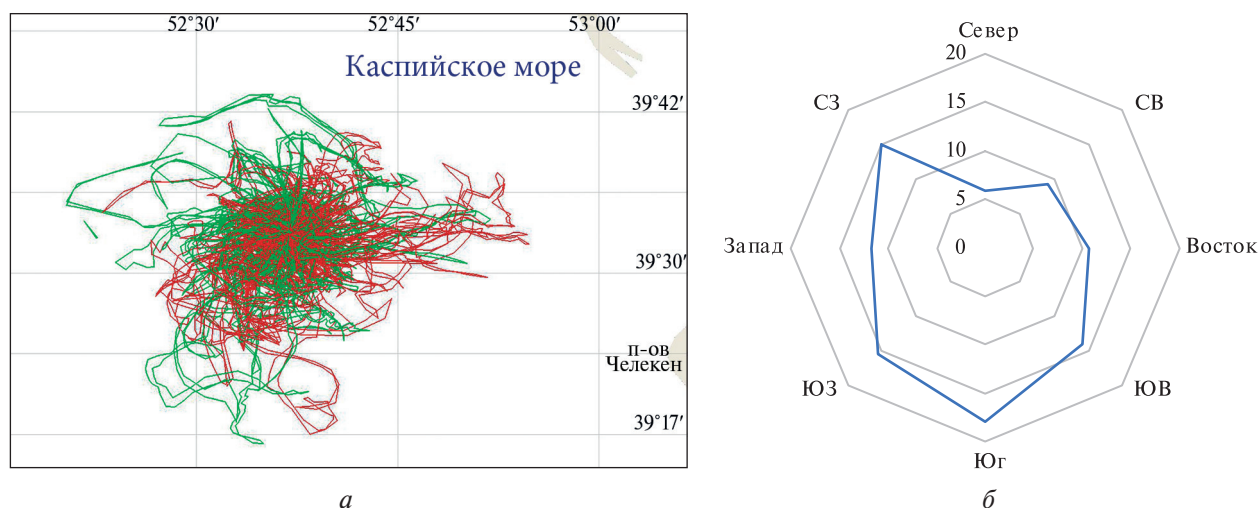


Рис. 10. Сводная карта ЕНП на поверхности Каспийского моря, выявленных по спутниковым данным за 2017–2021 гг. вблизи п-ова Челекен (*a*). Диаграмма распределения направлений дрейфа плёнок ЕНП на морской поверхности по результатам спутниковых наблюдений за 2017–2021 гг. (*б*)

Анализ многолетних рядов спутниковых данных позволил нам выявить также наличие выраженной сезонной изменчивости распространения ЕНП в районе туркменского шельфа. Сезонную изменчивость распространения ЕНП на морской поверхности Каспийского моря наглядно отражают представленные на рис. 11 диаграммы направлений, построенные за пятилетний период наблюдений для различных сезонов. В холодный сезон с декабря по март направление траекторий ЕНП достаточно вариативно, однако преобладают юго-западное и западное направления. С апреля по май доминирующим становится южное направление, затем доминирующее направление медленно меняется, совершая поворот против часовой стрелки, переходя с южного на северо-восточное и затем на северо-западное.

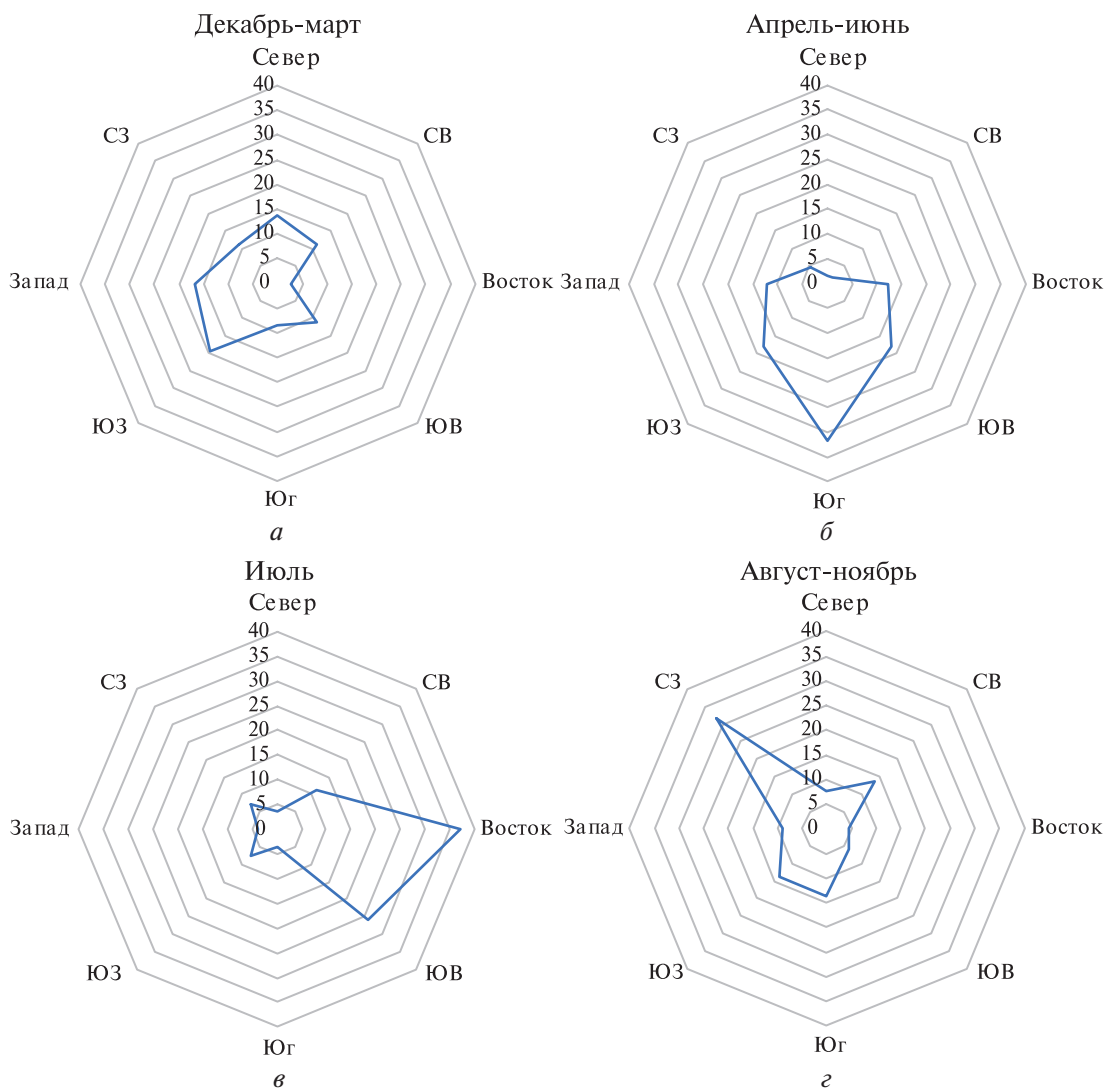


Рис. 11. Диаграммы распределения направлений дрейфа плёнок ЕНП на морской поверхности по результатам спутниковых наблюдений в различные месяцы за пятилетний период наблюдений: а — декабрь — март; б — апрель — июнь; в — июль; г — август — ноябрь

### Заключение

Были проанализированы долговременные ряды спутниковых изображений морской поверхности двух районов Южного Каспия, содержащих ЕНП на морской поверхности над донными сипами.

Определены характерные типы траекторий распространений ЕНП на морской поверхности для двух районов интереса.

Отдельное внимание уделено эллиптическим траекториям распространения ЕНП, которые детектируются на спутниковых изображениях морской поверхности вблизи м. Сефид Руд в летний период, и выдвинуты гипотезы возможных причин формирования траекторий подобного типа.

Показано, что в 10–12 % случаев ЕНП после выхода на поверхность оказываются вовлечёнными в вихревые движения и могут распространяться на большие расстояния, способствуя кросшельфовому переносу нефтяного загрязнения. При этом в районе вблизи иранского побережья вероятность переноса ЕНП вихрями выше в сторону глубоководной части, чем в сторону береговой черты. В районе туркменского побережья вероятности переноса плёнок ЕНП, вовлечённых в вихревые движения, в сторону побережья и в сторону глубоководной части примерно одинаковы.

На основании анализа спутниковых данных установлено наличие сезонной изменчивости распространения траекторий ЕНП и выявлены доминирующие направления распространения в различные сезоны. Выявленная сезонная изменчивость должна учитываться при оценке рисков нефтяного загрязнения морской поверхности и побережья.

Отсутствие или недостаток полевых измерений отмечается пробелом в восстановлении полной картины течений Каспийского моря многими авторами (см., например, Кныш и др., 2008; Bohluly et al., 2017). Возможностей для валидации смоделированных полей течений по данным наблюдений, особенно в районах континентального шельфа, немного. Долговременные спутниковые наблюдения траекторий распространений ЕНП предоставляют новую информацию о полях течений и до какой-то степени могут восполнить этот пробел.

Представленные в статье результаты призваны дополнить и расширить существующие на данный момент представления об общей картине нефтяного загрязнения поверхности Каспийского моря и являются ещё одним свидетельством необходимости проведения непрерывного спутникового мониторинга районов поступления естественных нефтеуглеводородов с морского дна. Возможности подобного мониторинга на сегодняшний день обеспечены современными системами и технологиями (Лаврова и др., 2022).

Работа выполнена в рамках темы «Мониторинг» госзадания Института космических исследований РАН, госрегистрация № 122042500031-8. Обработка и анализ спутниковых данных проводились с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» с помощью инструментария информационной системы See the Sea.

## Литература

1. *Бондур В. Г., Сабинин К. Д., Гребенюк Ю. В.* Аномальная изменчивость инерционных колебаний океанских вод на Гавайском шельфе // Докл. Акад. наук. 2013. Т. 450. № 1. С. 100–104. DOI: 10.7868/S0869565213130173.
2. *Евтушенко Н. В., Иванов А. Ю.* Нефтепроявления в юго-восточной части Черного моря по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 3. С. 24–30. DOI: 10.31857/S0205961420050061.
3. *Иванов А. Ю., Голубов Б. Н., Затягалова В. В.* О нефтегазоносности и разгрузке подземных флюидов в южной части Каспийского моря по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 62–81.
4. *Иванов А. Ю., Достовалов М. Ю., Синева А. А.* Определение параметров нефтяных загрязнений по данным космической поляризационной радиолокационной съёмки в районе нефтепромыслов «Нефтяные камни» в Каспийском море // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 31–44.
5. *Кныш В. В., Ибраев Р. А., Кортаев Г. К., Инюшина Н. В.* Сезонная изменчивость климатических течений Каспийского моря, восстановленная ассимиляцией климатической температуры и солёности в модели циркуляции вод // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 2. С. 251–265.
6. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И.* Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 3. С. 48–65.
7. *Лаврова О. Ю., Сабинин К. Д.* Проявления инерционных колебаний на спутниковых изображениях морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 60–73. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-60-73.



8. 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.
9. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров И. А., Луян Е. А. Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 266–287. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
10. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы исследования изменчивости Каспийского моря. М.: ИКИ РАН, 2022. 250 с.
11. Мамедов Р. М. Гидрометеорологическая изменчивость и экогеографические проблемы Каспийского моря. Баку: «ЭЛМ», 2007. 433 с.
12. Матросова Е. Р., Ходаева В. Н., Иванов А. Ю. Определение характеристик естественных нефтепроявлений и их подводных источников по данным дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 2. С. 3–27. DOI: 10.31857/S0205961422020063.
13. 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.
14. 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. 17. № 2. С. 292–298. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-292-298.
15. Митягина М. И., Лаврова О. Ю., Бочарова Т. Ю. Спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 130–149.
16. Bayramov E., Knee K., Kada M., Buchroithner M. Using multiple satellite observations to quantitatively assess and model oil pollution and predict risks and consequences to the shoreline from oil platforms in the Caspian Sea // Human and Ecological Risk Assessment: Intern. J. 2018. V. 24. No. 6. P. 1501–1514. <https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1416454>.
17. Bohluly A., Esfahani F., Mamin M., Chegini F. Evaluation of wind induced currents modeling along the Southern Caspian Sea // Continental Shelf Research. 2018. V. 153. P. 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.12.008>.
18. Brekke C., Solberg A. Oil spill detection by satellite remote sensing // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 95. Iss. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.015>.
19. Fingas M., Brown C. Review of oil spill remote sensing // Marine Pollution Bull. 2014. V. 83. P. 9–23. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.059>.
20. Jackson C. R., Alper W. The role of the critical angle in brightness reversals on sunglint images of the sea surface // J. Geophysical Research. 2010. V. 115. Iss. C10. Article C09019. DOI: 10.1029/2009JC006037.
21. Jatiault R., Dhont D., Loncé L., Dubucq D. Monitoring of natural oil seepage in the Lower Congo Basin using SAR observations // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 191. P. 258–272. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.031>.
22. Körber J. H., Sahling H., Pape T. et al. Natural oil seepage at Kobuleti Ridge, eastern Black Sea // Marine and Petroleum Geology. 2014. V. 50. P. 68–82. <https://doi.org/10.1016/J.MARPETGEO.2013.11.007>.
23. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I. Natural Oil Slicks in the Southeastern Black Sea // The Handbook of Environmental Chemistry. Berlin; Heidelberg, Germany: Springer, 2020. DOI: 10.1007/698\_2020\_475.
24. Leifer I. A. Synthesis Review of Emissions and Fates for the Coal Oil Point Marine Hydrocarbon Seep Field and California Marine Seepage // Geofluids. 2019. V. 2019. Article 4724587. 48 p. DOI: 10.1155/2019/4724587.
25. Li X., Li C., Yang Z., Pichel W. SAR imaging of ocean surface oil seep trajectories induced by near inertial oscillation // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 130. P. 182–187. DOI: 10.1016/j.rse.2012.11.019.
26. Logan G., Jones A., Ryan G., Wettle M., Thankappan M., Grosjean E., Rolle N., Williams J. K. Review of Australian Offshore Natural Hydrocarbon Seepage Studies / Geoscience Australia Record. 2008. V. 17. 235 p.
27. MacDonald I. R., Garcia-Pineda O., Beet A. et al. Natural and unnatural oil slicks in the Gulf of Mexico // J. Geophysical Research: Oceans. 2015. V. 120. P. 8364–8380. DOI: 10.1002/2015JC011062.
28. Mitra D. S., Majumdar T. J., Ramakrishnan R. et al. Detection and monitoring of offshore oil seeps using ERS/Envisat SAR/ASAR data and seep-seismic studies in Krishna–Godavari offshore basin, India // Geocarto Intern. 2013. V. 28. P. 404–419. DOI: 10.1080/10106049.2012.715207.
29. Mityagina M., Lavrova O. Satellite Survey of Inner Seas: Oil Pollution in the Black and Caspian Seas // Remote Sensing. 2016. V. 8. P. 875–899. DOI: 10.3390/rs8100875.
30. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu. Oil pollution hotspots on the Caspian Sea surface identified using satellite remote sensing // Proc. SPIE. V. 11529. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2020. Article 1152900L. <https://doi.org/10.1117/12.2573501/>.

31. Mityagina M., Lavrova O. Satellite Survey of Offshore Oil Seep Sites in the Caspian Sea // Remote Sensing. 2022. V. 14. Iss. 3. Article 525. <https://doi.org/10.3390/rs14030525>.
32. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G. Main pattern of the Caspian Sea surface oil pollution revealed by satellite data // Ecologica Montenegrina. 2019. V. 25. P. 91–105. <https://doi.org/10.37828/em.2019.25.9>.
33. Najoui Z., Amoussou N., Riazanoff S. et al. Oil slicks in the Gulf of Guinea — 10 years of Envisat Advanced Synthetic Aperture Radar observations // Earth System Science Data. 2022. V. 14. P. 4569–4588. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4569-2022>.
34. Nunziata F., de Macedo C. R., Buono A. et al. On the analysis of a time series of X-band TerraSAR-X SAR imagery over oil seepages // Intern. J. Remote Sensing. 2018. V. 40. P. 3623–3646. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1547933>.
35. Shrira V., Forget P. On the Nature of Near-Inertial Oscillations in the Uppermost Part of the Ocean and a Possible Route toward HF Radar Probing of Stratification // J. Physical Oceanography. 2015. V. 45. No. 10. P. 2660–2678. DOI: <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0247.1>.
36. Topouzelis K. N. Oil spill detection by SAR images: dark formation detection, feature extraction and classification algorithms // Sensors. 2008. V. 8. No. 10. P. 6642–6659. <https://doi.org/10.3390/s8106642>.
37. Wagner-Friedrichs M. Seafloor Seepage in the Black Sea: Mud Volcanoes, Seeps and Diapiric Structures Imaged by Acoustic Methods: Ph.D. Thesis. Bremen, Germany, 2007. 166 p.

## Spatial and temporal variability of natural oil slick trajectories on the sea surface of the South Caspian Sea revealed by satellite data

M. I. Mityagina, O. Yu. Lavrova

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia  
E-mail: mityag@iki.rssi.ru

Oil pollution is the main environmental problem of the Caspian Sea, and a significant contribution to the total oil pollution is made by natural hydrocarbon showings at the seabed. In this paper, we discuss the spatial and temporal variability of the trajectories of natural oil slicks (NOS) after their emerging to the surface. The study is based on satellite synthetic aperture radar (SAR) data and data from multi-spectral satellite sensors in the optical range obtained over five years of the survey from 2017 to 2021 in two test areas in the southern part of the Caspian Sea. These areas are a water area near the southwest coast eastward of Cape Sefid Rud (Gilan Province, Iran) and a water area westward of the Cheleken Peninsula, which administratively belongs to Turkmenistan. Natural hydrocarbon seepages at the seabed were discovered in these regions through satellite data. Our main results include the discovery of significant seasonal variability in the NOS distribution directions in both test regions caused by the influence of local winds and surface currents that prevail in different seasons. Various types of NOS distribution trajectories were considered, and assumptions were made on the mechanisms of their formation. The impact of vortex dynamics on the spreading of the NOS and its contribution to the cross-shelf transport of oil pollution was noted.

**Keywords:** satellite remote sensing, sea surface, oil pollution, natural hydrocarbon emissions from the seabed, Caspian Sea

Accepted: 22.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-263-277

## References

1. Bondur V. G., Sabinin K. D., Grebenyuk Y. Y., Anomalous variation of the ocean's inertial oscillations at the Hawaii shelf, *Doklady Earth Sciences*, 2013, Vol. 450, No. 1, pp. 526–530 (in Russian), DOI: 10.7868/S0869565213130173.

2. Evtushenko N. V., Ivanov A. Yu., Oil Seeps in the Southeastern Black Sea Studied from Space Using SAR Images, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 3, pp. 24–30 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961420050061.
3. Ivanov A. Yu., Golubov B. N., Zatyagalova V. V., On Oil-Gas-Bearing and Unloading of Underground Fluids in the Southern Part of the Caspian Sea Using Synthetic Aperture Radar Images, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 2, pp. 62–81 (in Russian).
4. Ivanov A. Yu., Dostovalov M. Yu., Sineva A. A., Determination of Oil Spill Parameters Around the “Oil Stones” Production Site in the Caspian Sea Using Spaceborne Polarimetric SAR Images, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 5, pp. 31–44 (in Russian).
5. Knysh V. V., Ibrayev R. A., Korotaev G. K., Inyushina N. V., Seasonal Variability of Climatic Currents in the Caspian Sea Reconstructed by Assimilation of Climatic Temperature and Salinity into the Model of Water Circulation, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2008, Vol. 44, No. 2, pp. 236–249, DOI: 10.1134/S0001433808020114.
6. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Satellite Monitoring of Surface Film Pollution of the Black Sea, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 3, pp. 48–65 (in Russian).
7. Lavrova O. Yu., Sabinin K. D., Manifestations of inertial oscillations in satellite images of the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 60–73 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-60-73.
8. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk*, Moscow: IKI RAS, 2016, 334 p. (in Russian).
9. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A., Loupian E. A., Current capabilities and experience of using the sea information system for studying and monitoring phenomena and processes on the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 266–287 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
10. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Satellite methods in the study of the Caspian Sea variability*, Moscow: IKI RAS, 2022, 250 p. (in Russian).
11. Mammadov R. M., *Caspian Sea: Hydrometeorological variability and ecogeographical problems*, Baku: ELM, 2007, 436 p. (in Russian).
12. Matrosova E. R., Khodaeva V. N., Ivanov A. Yu., Determining the Characteristics of Natural Oil Seeps and Their Underwater Sources Based on Remote Sensing Data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, Vol. 58, No. 9, pp. 1008–1027, DOI: 10.1134/S0001433822090146.
13. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Long-term complex satellite monitoring of the surface oil pollution of the Baltic and Caspian seas, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 269–288 (in Russian).
14. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., A point of petroleum hydrocarbons emission from the seabed in the turkmenian shelf area of the Caspian Sea discovered via satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 292–298 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-292-298.
15. Mityagina M. I., Lavrova O. Yu., Bocharova T. Yu., Satellite monitoring of oil pollution of the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 130–149 (in Russian).
16. Bayramov E., Knee K., Kada M., Buchroithner M., Using multiple satellite observations to quantitatively assess and model oil pollution and predict risks and consequences to the shoreline from oil platforms in the Caspian Sea, *Human and Ecological Risk Assessment: An Intern. J.*, 2018, Vol. 24, No. 6, pp. 1501–1514, <https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1416454>.
17. Bohluly A., Esfahani F., Mamin M., Chegini F., Evaluation of wind induced currents modeling along the Southern Caspian Sea, *Continental Shelf Research*, 2018, Vol. 153, pp. 50–63, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.12.008>.
18. Brekke C., Solberg A., Oil spill detection by satellite remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 95, Issue 1, pp. 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.015>.
19. Fingas M., Brown C., Review of oil spill remote sensing, *Marine Pollution Bull.*, 2014, Vol. 83, pp. 9–23, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.059>.
20. Jackson C. R., Alpers W., The role of the critical angle in brightness reversals on sunglint images of the sea surface, *J. Geophysical Research*, 2010, Vol. 115, Issue C10, Article C09019, DOI: 10.1029/2009JC006037.
21. Jatiault R., Dhont D., Lonce L., Dubucq D., Monitoring of natural oil seepage in the Lower Congo Basin using SAR observations, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 191, No. 7, pp. 258–272, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.031>.
22. Körber J. H., Sahling H., Pape T. et al., Natural oil seepage at Kobuleti Ridge, eastern Black Sea, *Marine and Petroleum Geology*, 2014, Vol. 50, pp. 68–82, <https://doi.org/10.1016/J.MARPETGEO.2013.11.007>.
23. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Natural Oil Slicks in the Southeastern Black Sea, In: *The Handbook of Environmental Chemistry*, Berlin; Heidelberg, Germany: Springer, 2020, DOI: 10.1007/978\_2020\_475.



24. Leifer I.A., Synthesis Review of Emissions and Fates for the Coal Oil Point Marine Hydrocarbon Seep Field and California Marine Seepage, *Geofluids*, 2019, Vol. 2019, Article 4724587, 48 p., DOI: 10.1155/2019/4724587/.
25. Li X., Li C., Yang Z., Pichel W., SAR imaging of ocean surface oil seep trajectories induced by near inertial oscillation, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 130, pp. 182–187, DOI: 10.1016/j.rse.2012.11.019.
26. Logan G., Jones A., Ryan G., Wettle M., Thankappan M., Grosjean E., Rollet N., Williams J.K., *Review of Australian Offshore Natural Hydrocarbon Seepage Studies*, Geoscience Australia Record, 2008, Vol. 17, 235 p.
27. MacDonald I.R., Garcia-Pineda O., Beet A. et al., Natural and unnatural oil slicks in the Gulf of Mexico, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2015, Vol. 120, pp. 8364–8380, DOI: 10.1002/2015JC011062.
28. Mitra D.S., Majumdar T.J., Ramakrishnan R. et al., Detection and monitoring of offshore oil seeps using ERS/Envisat SAR/ASAR data and seep-seismic studies in Krishna–Godavari offshore basin, India, *Geocarto Intern.*, 2013, Vol. 28, pp. 404–419, DOI: 10.1080/10106049.2012.715207.
29. Mityagina M., Lavrova O., Satellite Survey of Inner Seas: Oil Pollution in the Black and Caspian Seas, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, pp. 875–899, <https://doi.org/10.3390/rs8100875>.
30. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu. Oil pollution hotspots on the Caspian Sea surface identified using satellite remote sensing, *Proc. SPIE. V. 11529, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2020, Article 1152900L, <https://doi.org/10.1117/12.2573501/>.
31. Mityagina M., Lavrova O., Satellite Survey of Offshore Oil Seep Sites in the Caspian Sea, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Issue 3, Article 525, <https://doi.org/10.3390/rs14030525>.
32. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu., Kostianoy A.G., Main pattern of the Caspian Sea surface oil pollution revealed by satellite data, *Ecologica Montenegrina*, 2019, Vol. 25, pp. 91–105, <https://doi.org/10.37828/em.2019.25.9>.
33. Najoui Z., Amoussou N., Riazanoff S. et al., Oil slicks in the Gulf of Guinea — 10 years of Envisat Advanced Synthetic Aperture Radar observations, *Earth System Science Data*, 2022, Vol. 14, pp. 4569–4588, <https://doi.org/10.5194/essd-14-4569-2022>.
34. Nunziata F., de Macedo C.R., Buono A. et al., On the analysis of a time series of X-band TerraSAR-X SAR imagery over oil seepages, *Intern. J. Remote Sensing*, 2018, Vol. 40, pp. 3623–3646, <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1547933>.
35. Shrira V., Forget P., On the Nature of Near-Inertial Oscillations in the Uppermost Part of the Ocean and a Possible Route toward HF Radar Probing of Stratification, *J. Physical Oceanography*, 2015, Vol. 45, No. 10, pp. 2660–2678, DOI: <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0247.1>.
36. Topouzelis K.N., Oil spill detection by SAR images: dark formation detection, feature extraction and classification algorithms, *Sensors*, 2008, Vol. 8, No. 10, pp. 6642–6659, <https://doi.org/10.3390/s8106642>.
37. Wagner-Friedrichs M., *Seafloor Seepage in the Black Sea: Mud Volcanoes, Seeps and Diapiric Structures Imaged by Acoustic Methods: Ph.D. Thesis*, Bremen, Germany, 2007, 166 p.