

**Основные результаты, полученные в 2019 г. в ходе исполнения
первого этапа работ по проекту 19-77-20060
«Оценка изменчивости экологического состояния Каспийского моря
в текущем столетии по данным спутникового дистанционного
зондирования»**

Задачей проекта является оценка изменения экологического состояния Каспийского моря на протяжении текущего столетия под воздействием природных и антропогенных факторов. Для решения этой задачи требуется детальный анализ больших массивов данных спутникового зондирования Каспийского моря за период с 1999 по 2022 г. совместно с многолетними гидрометеорологическими данными и доступными данными измерений *in situ*. Решение поставленной в проекте задачи стало возможным исключительно благодаря созданию в ИКИ РАН информационного сервиса «See the Sea» (ИС STS), который является составной частью ОИ ЦКП «ИКИ-Мониторинг». STS предоставляет исследователям, занимающимся изучением морей и океанов, совершенно новые инструменты для работы с данными дистанционных наблюдений, обеспечивая возможность комплексного анализа данных, различных по своей физической природе, пространственному разрешению, размерности и времени получения.

В 2019 г. решение поставленных в проекте задач проводилось на основе анализа архивных данных за 1999-2006 гг., а также оперативных данных за 2019 г. (далее исследуемый период).

В 2019 г. были получены следующие основные результаты.

I. Систематизированные результаты анализа данных оперативного многосенсорного спутникового мониторинга Каспийского моря (за 2019 г.) и анализа многолетних рядов спутниковых данных за 1999-2006 гг.

1. Проанализированы, отобраны и интегрированы в систему STS радиолокационные данные SAR ERS-1, -2; ASAR Envisat из архивов Европейского космического агентства, полученные над акваторией Каспийского моря в 1999-2006 гг.
2. Все имеющиеся в STS архивные данные многолетних спутниковых наблюдений за период 1999-2006 гг. проанализированы, систематизированы и аннотированы.
3. Проанализированы, систематизированы и аннотированы данные оперативного многосенсорного мониторинга за 2019 г.
4. Все полученные результаты внесены в ИС STS, которая является составной частью ОИ ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Основные источники спутниковой информации, используемые для решения задач проекта, представлены на рисунке 1.1.

Всего за исследуемый период:

Проанализирован обширный массив спутниковых данных, полученных за период **1999-2006 гг.** над акваторией Каспийского моря следующими сенсорами:

Данные спутниковой радиолокации:

- SAR ERS-1, -2 IMP (пиксельное разрешение 12.5 м);

- ASAR Envisat IMP (пиксельное разрешение 12.5 м);
- ASAR Envisat WSM, IMM (пиксельное разрешение 75 м).

Общее количество проанализированных радиолокационных данных – 1055 сцен.

Данные оптического диапазона (для облачного покрытия <50%):

- TM Landsat-4;-5 за 1999-2000 гг., 2006 г.
- ETM+ Landsat-7 за 1999-2006 гг.
- MODIS Terra за 2000-2006 гг.
- MODIS Aqua за 2002-2006 гг.

Общее количество проанализированных данных (не считая данных MODIS) – 2720 сцен.

За 2019 г.:

- SAR-C Sentinel-1A; -1B (пиксельное разрешение 10 м).

Общее количество проанализированных данных – 2520 сцен.

- OLI Landsat-8
- MSI Sentinel -2A; -2B
- MODIS Terra/Aqua

Общее количество проанализированных данных (не считая данных MODIS) – 1491 сцена.

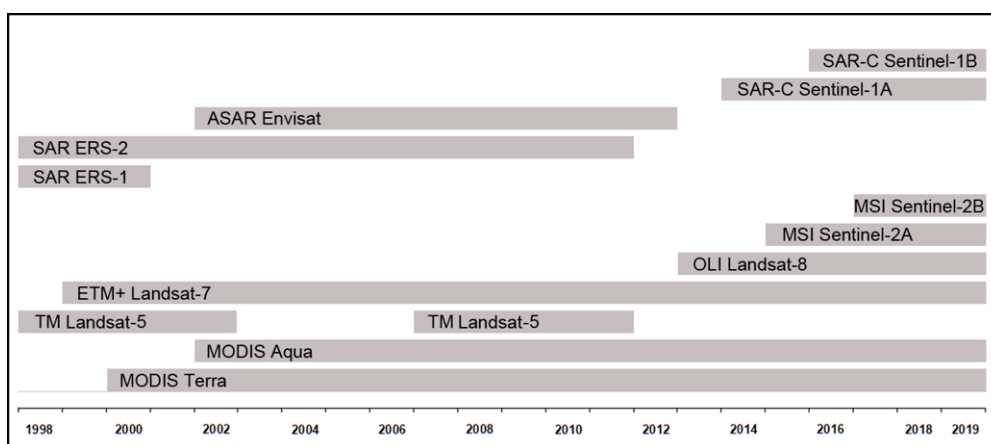


Рисунок 1.1 – Данные основных спутниковых сенсоров, используемые в работе по проекту

II. Определены основные параметры нефтяного загрязнения морской поверхности на основе анализа многолетних рядов спутниковых данных за 1999-2006 гг. и оперативного многосенсорного спутникового мониторинга Каспийского моря (за 2019 г.). Получены карты-схемы различных типов нефтяных загрязнений.

Карты различных типов нефтяных загрязнений морской поверхности, выявленных по спутниковым данным за 1999-2006 гг. и за 2019 г.

Проведено картографирование различных типов нефтяных загрязнений поверхности Каспийского моря, выявленных по спутниковым данным за 1999-2006 гг. и за 2019 г. Подробно результаты представлены в статье *Mityagina Marina I., Lavrova Olga Yu., Kostianoy Andrey G. Main pattern of the Caspian Sea surface oil pollution revealed by satellite data // Ecologica Montenegrina. 2019. Vol. 25. P. 91-105. www.biotaxa.org/em.*

Составлена обобщенная карта-схема нефтяного загрязнения Каспийского моря, выявленного в результате анализа данных спутниковой радиолокации за 1999-2006 гг. и данных многосенсорного спутникового мониторинга за 2019 г., представленная на рисунке 2.1, и подробные карты, позволяющие оценить степень вероятности загрязнения различных участков морской поверхности вблизи источников загрязнения, представленные на рисунках 2.2 и 2.3.

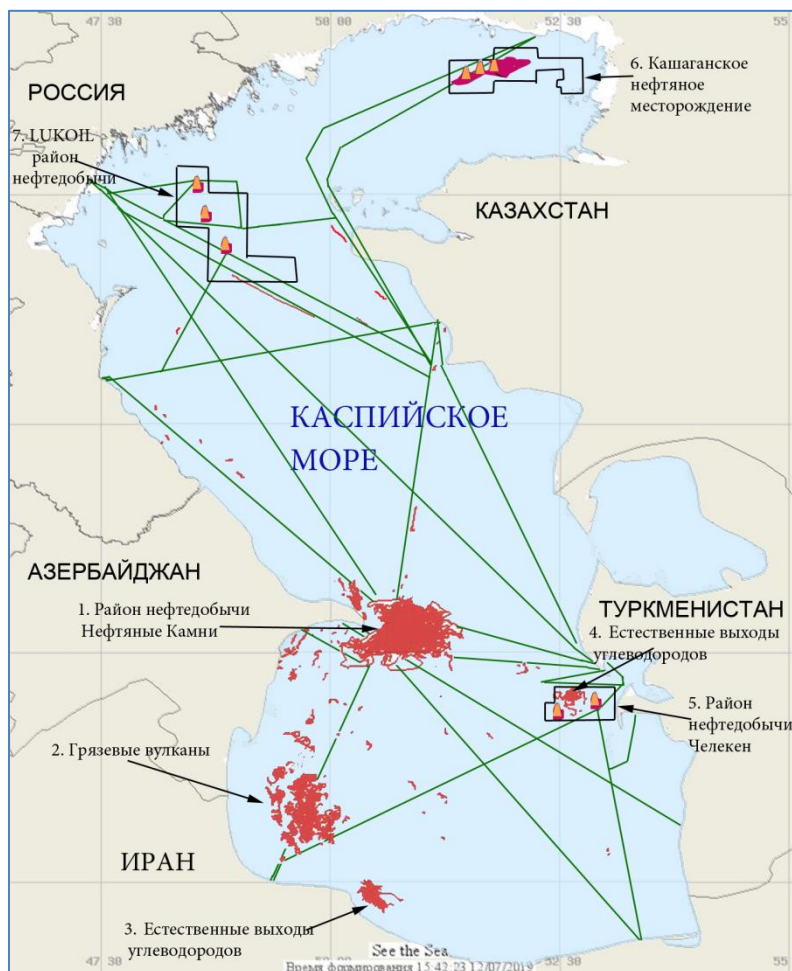


Рисунок 2.1 – Районы наиболее интенсивного загрязнения и источники загрязнения морской поверхности Каспийского моря, выявленные на основе данных спутникового дистанционного зондирования:

1 – район нефтедобычи Нефтяные Камни; 2 - грязевые вулканы; 3 – естественные выходы углеводородов с морского дна в районе мыса Сефид Руд; 4 - естественные выходы углеводородов с морского дна к западу от полуострова Челекен; 5 - морские нефтедобывающие платформы на Челекенском месторождении; 6- Кашаганское нефтяное месторождение; 7 – район нефтедобычи ЛУКОЙЛ. Основные судоходные трассы обозначены зелеными линиями

Установлено, что восстановленная на основе спутниковых данных картина поверхностных загрязнений Каспийского моря нефтесодержащими пленками во многом предопределена наличием больших запасов нефти и газа на дне Каспийского моря. Определены районы наиболее интенсивного нефтяного загрязнения морской поверхности и выявлены источники загрязнения.

1. **Район нефтедобычи «Нефтяные Камни»** в Среднем Каспии (см. рисунок 2.2) в районе Апшеронского и Бакинского архипелагов. Основным источником загрязнения здесь являются разведка и эксплуатация нефтяных месторождений, а также просачивание из естественных и искусственных грифонов на морском дне. Необходимо отметить, что

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. На сегодняшний день искусственные грифоны остаются одним из главных источников нефтяного загрязнения Центрального Каспия.

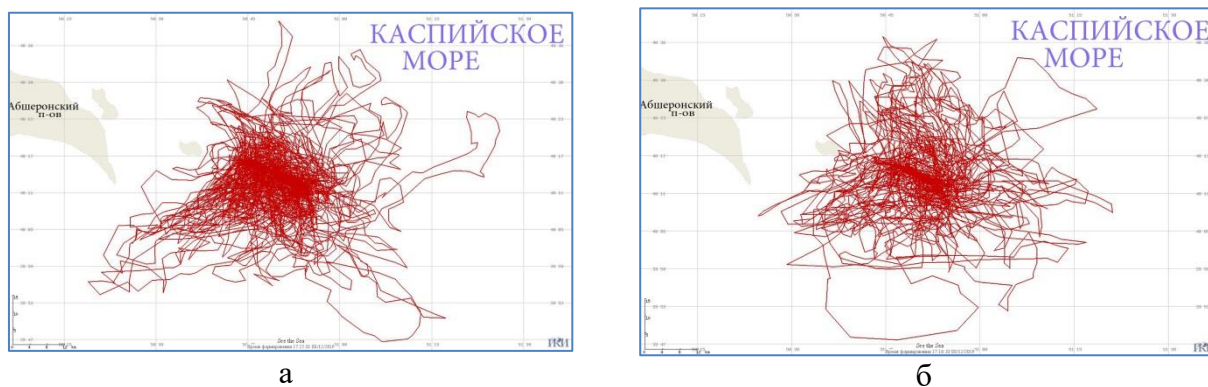


Рисунок 2.2 – Сводная карта нефтяных загрязнений поверхности Каспийского моря вблизи района нефтедобычи Нефтяные Камни, обнаруженных в результате анализа спутниковых данных за 1999–2006 гг. (а) и 2019 г. (б)

2. Часть акватории Каспийского моря к западу от полуострова Челекен, административно принадлежащая Туркменистану, и часть акватории Каспийского моря у юго-западного побережья в провинции Гилян (Иран) к востоку от мыса Сефид Руд.

Использование инструментария и картографического интерфейса сервиса STS позволило на основе спутниковых изображений идентифицировать источники просачивания углеводородов с морского дна в этих районах и уточнить их координаты, соответствующие повторяющейся точке всплытия детектированных нефтепроявлений (см. рисунок 2.3).

Особо следует подчеркнуть, что естественные выходы углеводородов в районе Челекенского полуострова ранее не были отмечены в научных публикациях и впервые выявлены и описаны нами в ходе исполнения данного проекта. Этот естественный выход углеводородов расположен вблизи участка нефтедобычи, что может подтверждать факт существования связи между наблюдаемыми в данных дистанционного зондирования естественными нефтепроявлениями и нефтеносными структурами в толще недр на дне моря. По спутниковым данным за 1996-2006 гг и 2019 г. идентифицированы 117 нефтепроявлений вблизи точки выхода на шельфе Туркменистана. Повторяющаяся точка всплытия, определяет местоположение источника углеводородов со дна, имеющего координаты 52°36.2' в.д., 39°32.9' с.ш. и находящегося на глубине 1000 м.

На иранском шельфе две близкорасположенные точки выхода нефтеуглеводородов на морском дне с координатами 50°24.4' в.д., 37°23.4' с.ш. и 50°28.9' в.д., 37°20.4' с.ш.

идентифицированы как постоянные точки всплытия 66 и 46 нефтяных slickов соответственно.

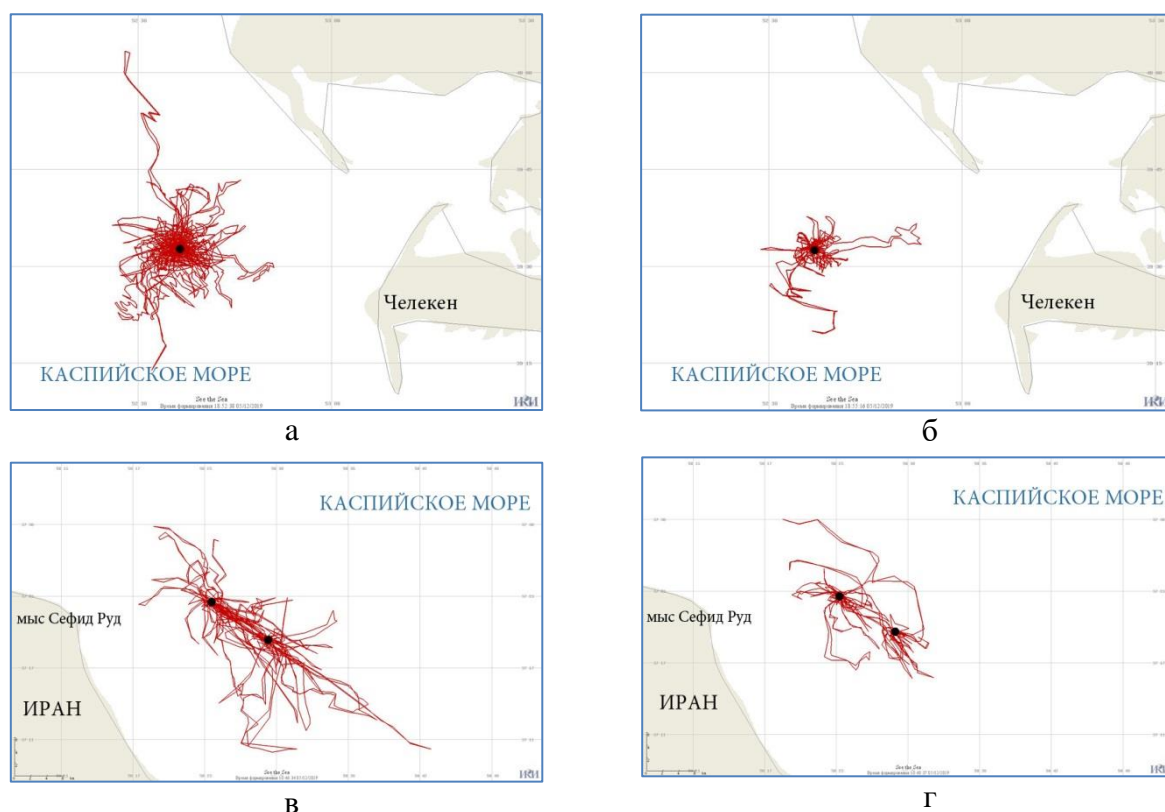


Рисунок 2.3 – Сводная карта естественных нефтепроявлений на поверхности Каспийского моря выявленных вблизи полуострова Челекен и вблизи мыса Сефид Руд по спутниковым данным за 1999-2006 гг. (а, в) и за 2019 г. (б, г) соответственно

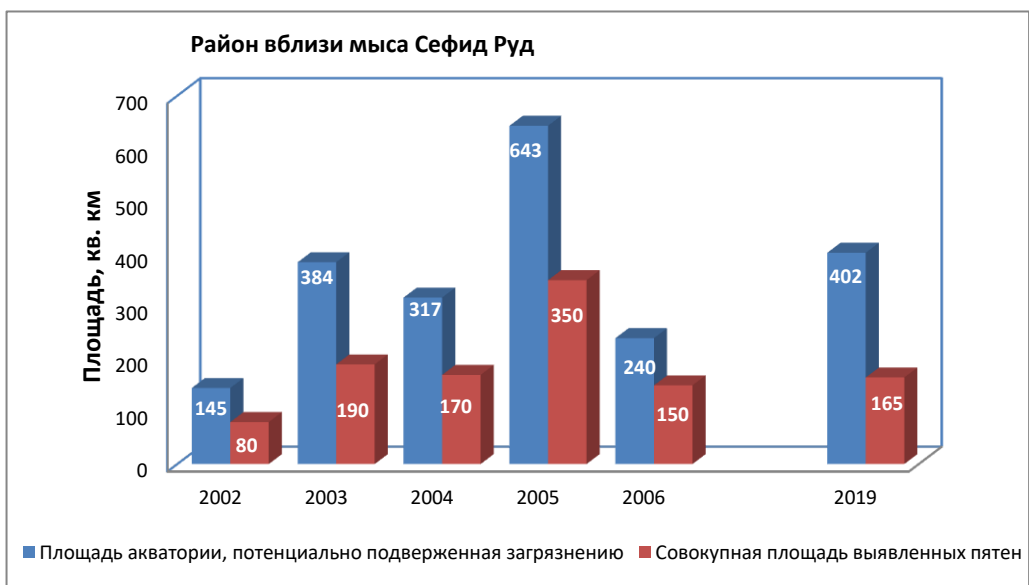
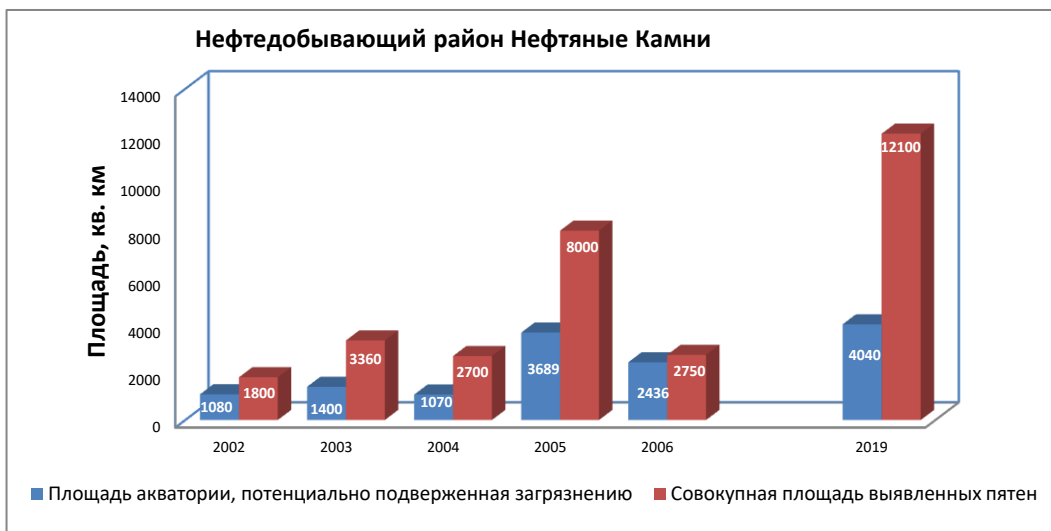
3. **Западный склон Южно-Каспийской впадины.** В результате анализа спутниковых данных, полученных в районе Южно-Каспийской впадины, выявлены и нанесены на карту (см. рисунок 2.1) многочисленные поверхностные нефтепроявления, обусловленные грязевым вулканизмом на морском дне.

4. Анализ спутниковых данных показал, что **нефтедержащие плёночные загрязнения, обусловленные сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты** (промывочные, балластные, а также льяльные воды из помещений грузовых насосов), концентрируются вдоль основных судоходных трасс. Сбросы с судов сосредоточены на основных маршрутах транспортировки нефти в Каспийском море в направлениях Актау-Махачкала, Актау-Баку, Актау-Туркменбаши и Актау-Нека.

Определены характеристики межгодовой, сезонной и пространственной изменчивости нефтяного загрязнения морской поверхности в 1999-2006 гг. и в 2019 г.

Определена изменчивость совокупных площадей нефтяного загрязнения морской поверхности, выявленных за год по спутниковым данным в различных районах (представлена на рисунке 2.4). В 2005 г. наблюдался всплеск суммарной площади и частоты проявления в спутниковых данных нефтяного загрязнения в Среднем Каспии (район нефтедобычи Нефтяные Камни и район п-ва Челекен), за которым последовало уменьшение количества нефтяных пятен и их суммарной площади.

Выявлена изменчивость площади акватории, потенциально подверженной загрязнению нефтяными плёнками в различных районах (представлена на рисунке 2.4). Установлено, что естественные нефтепроявления после выхода на поверхность под влиянием ветра и течений, как правило, формируют тонкие изогнутые полосы и могут распространяться на большие расстояния вплоть до 35 км в районе м. Сефид Руд и до 50 км в районе п-ва Челекен (см. рисунок 2.3), что существенно увеличивает площадь акватории, потенциально подверженной нефтяному загрязнению.



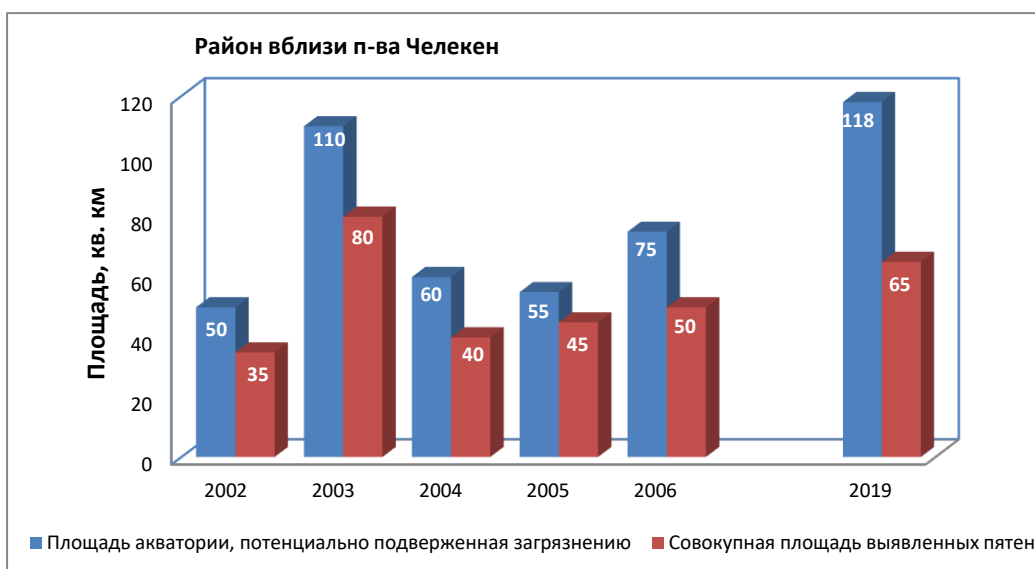


Рисунок 2. 4 – Межгодовая изменчивость совокупной площади нефтяного загрязнения, выявленной по спутниковым данным, и площади акватории вблизи источника загрязнения, потенциально подверженной загрязнению, для различных районов Каспийского моря

Определена сезонная изменчивость количества нефтяных пятен, выявленных на спутниковых изображениях, и их средней площади. Показано, что эта изменчивость отражает изменчивость гидрометеорологических условий на момент проведения съемок. На рисунке 2.5, в частности, представлена сезонная изменчивость средней площади естественных нефтепроявлений вблизи п-ва Челекен, выявленных на спутниковых изображениях в 2019 г.

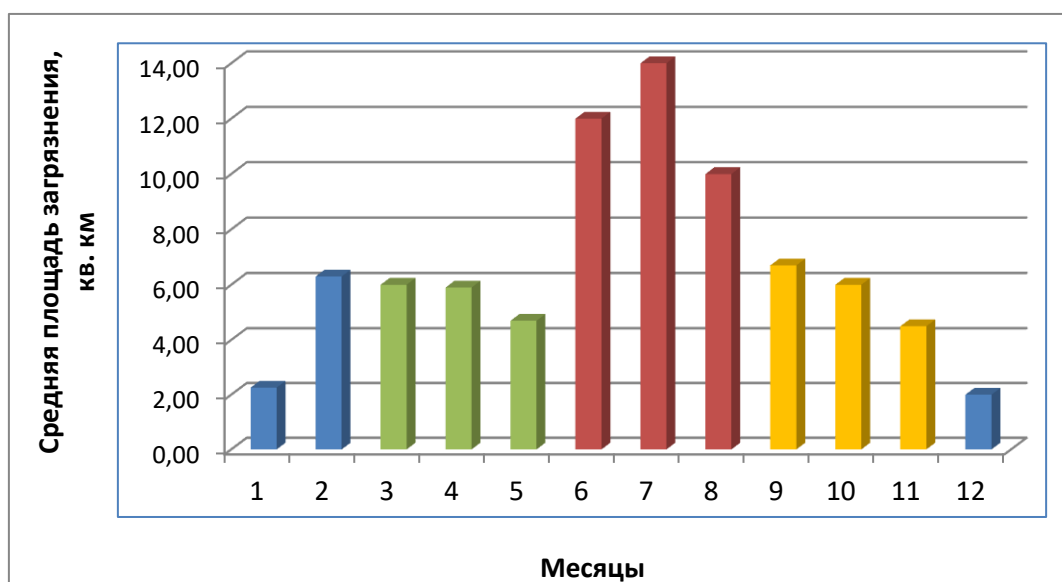


Рисунок 2.5 – Сезонная изменчивость среднего размера нефтяных пятен, обнаруженных в 2019 г. на спутниковых снимках в районе п-ва Челекен

Подтверждено, что площадь нефтяного загрязнения, определяемая исключительно по радиолокационным данным может оказаться завышенной, если данные получены при слабых ветрах или в штилевых условиях, и заниженной, если данные получены в присутствии сильного ветра и значительных возмущений в приводном слое атмосферы.

Выявлено, что несанкционированные нефтесодержащие сбросы с судов в 1999-2006 гг. выявлялись чаще, но имели меньшие размеры, чем в 2019 г. В последние годы интенсивность судоходства в Каспийском море резко возросла. Это связано как с быстрым освоением нефтяных месторождений, так и с тем, что Каспийское море стало частью транспортного коридора юг-север (через него проходит морская часть маршрута из Южной Азии через Иран в порт Астрахань). В настоящее время танкеры в Каспийском море ежегодно транспортируют более 15 миллионов тонн нефти в год, совершая при этом более 3000 рейсов. В частности, в 2019 г. в северной части моря на трассе был выявлен судовой сброс длиной 89 км, являющийся самым большим сбросом, выявленным на поверхности Каспийского моря за все годы спутниковых наблюдений.

Получены интегральные оценки нефтяного загрязнения морской поверхности в 1999-2006 гг. и в 2019 г.

Получены интегральные оценки нефтяного загрязнения морской поверхности, выявленного по спутниковым данным в районах интенсивного загрязнения. Ежегодная интегральная площадь нефтепроявлений, выявленных по спутниковым данным, варьирует в пределах 2725 - 12104 кв. км. в районе нефтедобычи Нефтяные Камни, в пределах 40 - 90 кв. км. на иранском шельфе вблизи мыса Сефид Руд и в пределах 150 - 350 кв. км. на туркменском шельфе вблизи полуострова Челекен.

Площадь акватории, потенциально подверженной загрязнению плёнками естественных нефтепроявлений варьирует в пределах 1070-4040 кв. км. в районе нефтедобычи Нефтяные Камни, в пределах 55-120 кв. км. на иранском шельфе вблизи мыса Сефид Руд и в пределах 240-400 кв. км. на туркменском шельфе вблизи полуострова Челекен.

Оценка относительного вклада каждого типа загрязнений в интегральное нефтяное загрязнение поверхности Каспийского моря в 1999-2006 гг. и в 2019 г.

Показано, что основной вклад в интегральное нефтяное загрязнение поверхности Каспийского моря вносит непрерывное загрязнение морской поверхности нефтью в районе Нефтяных Камней, а также грязевулканическая активность на морском дне в районе Южно-Каспийской впадины. Естественные нефтепроявления углеводородов с морского дна вносят существенно меньший вклад. Показано, что несанкционированные сбросы нефтесодержащих пленок с судов не являются основным источником плёночных загрязнений морской поверхности, однако их объёмы с каждым годом увеличиваются.

Характеристики частоты и интенсивности проявлений грязевого вулканизма и естественного просачивания углеводородов с морского дна на поверхность моря с сейсмологическими данными для каспийского региона в 1999-2006 гг. и в 2019 г.

В результате анализа спутниковых данных, полученных в районе Южно-Каспийской впадины, выявлены многочисленные поверхностные нефтепроявления, обусловленные грязевым вулканизмом (см. рисунок 2.6). Суммарные площади нефтепроявлений, обусловленных грязевулканической активностью, идентифицируемых на одном спутниковом изображении, варьируют от нескольких десятков до полутора сотен кв. км. Интегральная площадь загрязнения нефтяного загрязнения морской поверхности в результате подводного грязевого вулканизма в юго-западной части Каспийского моря за год может достигать тысячи кв. км. Частота возникновения нефтепроявлений

определяется сейсмологической обстановкой в Южном Каспии и прилегающих к нему районах. Нами подобраны опубликованные свидетельства того, что грязевая вулканическая активность в Южном Каспийском бассейне связана с сейсмической и солнечной активностью и, возможно, даже с фазами Луны. Установлено немало фактов, когда извержения грязевых вулканов обуславливаются землетрясениями, эпицентры которых находятся на разных расстояниях от вулканов, и влияние сейсмической активности проявляется с некоторым опозданием, способствуя пробуждению вулкана не в тот же день, а через несколько дней и даже недель в зависимости от дальности расстояния между вулканом и эпицентром землетрясения, магнитуды последнего и глубины его очага. На первом этапе исполнения проекта нами подобраны карты землетрясений для каспийского региона за 2019 и 1999-2006 гг., полученные из различных источников. Рассматривалась зависимость частоты проявлений грифонов в радиолокационных данных от количества и магнитуды землетрясений в Южном Каспии и прилегающих к нему районах.

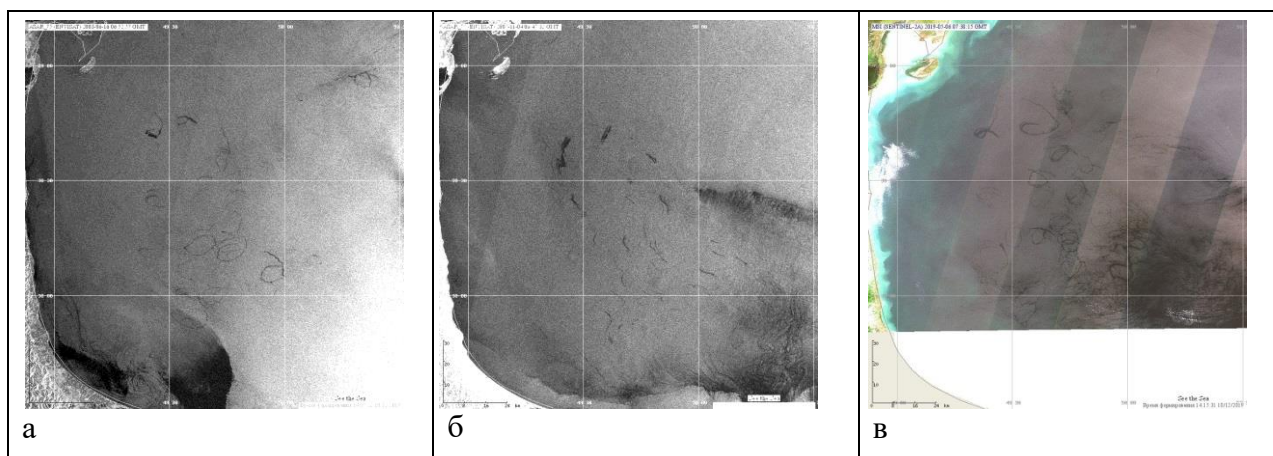


Рисунок 2.6 – Грязевулканические проявления в Южном Каспии на спутниковых изображениях: а) ASAR Envisat. 16.06.2003. 08:52 UTC; б) ASAR Envisat. 04.11.2005.06:47 UTC; в) MSI Sentinel-2A. 06.05.2019. 07:38 UTC

III. Карты районов регулярного интенсивного цветения фитопланктона в 1999-2006 гг. и 2019 г.

На основе комплексного анализа оптических и радиолокационных изображений, а также информации о концентрации хлорофилла в ИС STS построены карты районов регулярного интенсивного цветения фитопланктона в Среднем и Южном Каспии. В Северном Каспии регулярное цветение фитопланктона наблюдается практически на всей акватории. Эти карты представляют собой набор полигонов, которые строились по каждому месяцу исследуемого года с использованием инструментария, интегрированного в STS (рисунок 3.1).



1999 г.



2000 г.



2001 г.



2002 г.



2003 г.



2004 г.



2005 г.



2006 г.



Рисунок 3.1 – Карты районов проявлений на спутниковых изображениях регулярного цветения фитопланктона в Среднем и Южном Каспии в 1999 – 2006 и 2019 гг., построенные в ИС STS. Выделение полигонов проводилось по каждому месяцу текущего года.

2019 г.

В исследуемый период районами регулярных проявлений интенсивного цветения фитопланктона являлись западное побережье Среднего и Южного Каспия, южное и восточное побережье Южного Каспия и практически вся акватория Северного Каспия. Цветению фитопланктона наиболее подвержены акватории, находящиеся в приустьевых зонах рек, впадающих в Каспийское море. Такими районами являлись:

- Северный Каспий, в первую очередь в районе дельты Волги и вдоль западного побережья Северного Каспия, куда распространяются воды р. Волга;
- западное побережье Среднего Каспия в приустьевых зонах р. Терек и Самур;
- акватория вокруг Апшеронского полуострова;
- западное побережье Южного Каспия, а также район активности грязевых вулканов;
- южный берег Каспийского моря, в первую очередь в районе дельты р. Сефидруд.

Области интенсивного цветения фитопланктона отсутствуют вдоль восточного берега Среднего Каспия.

IV. Характеристики межгодовой, сезонной и пространственной изменчивости цветения фитопланктона в 1999-2006 гг. и в 2019 г.

- Анализ данных спутникового зондирования, полученных в исследуемый период, и построенных месячных карт для каждого года, показал, что:
- цветение в Северном Каспии наблюдается каждый год, начиная сразу после схождения ледяного покрова;
- в Южном Каспии вдоль западного и южного побережья цветение фитопланктона наблюдается во все сезоны, пик приходится на июнь – октябрь;
- в Среднем Каспии интенсивное цветение наблюдалось с августа по октябрь;
- вокруг Апшеронского полуострова – с апреля по октябрь. В 2019 г. карты концентрации хлорофилла-а, построенные по данным MODIS, свидетельствовали об интенсивном цветении вокруг Апшеронского полуострова и всей западной половины Среднего Каспия даже до середины ноября.

В среднем, площадь районов с интенсивным цветением фитопланктона в исследуемый период оставалась постоянной, за исключением аномального цветения в Южном Каспии в 2001 и 2005 гг. (рисунок 4.1). Наименьшие площади цветения фитопланктона, выявленные по спутниковым данным, наблюдались в 2003 и 2006 гг.



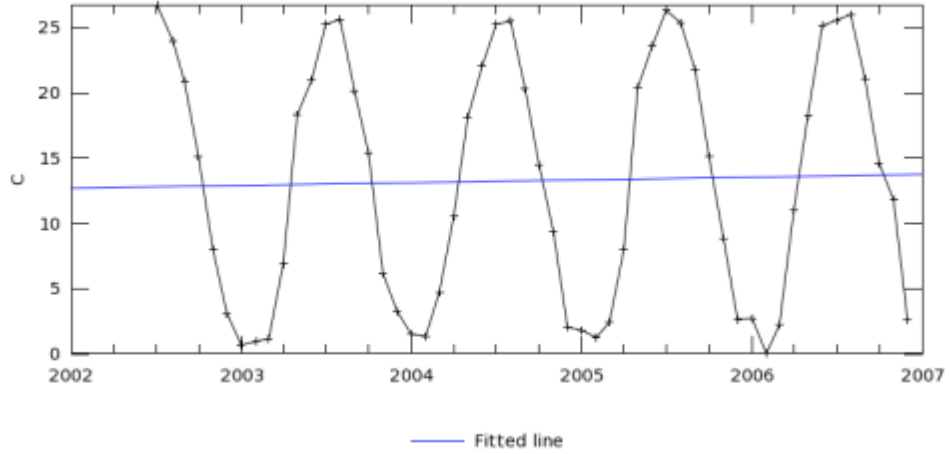
Рисунок 4.1 – Площадь поверхностных проявлений аномального цветения фитопланктона в Южном Каспии на цветосинтезированном изображении MODIS Aqua от 01 сентября 2005 г.

Результаты по данному направлению были представлены в докладе: Князев Н.А. Мониторинг аномального цветения водорослей в южной части Каспийского моря по данным спутникового дистанционного зондирования (1999–2006 гг.) // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11–15 ноября, 2019, ИКИ РАН, Москва. 2019. С. 277. DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.

V. Характеристики межгодовой изменчивости и трендов основных гидрометеорологических параметров Каспийского моря: температура поверхности моря, температура воздуха, атмосферные осадки, облачность, уровень моря, поле ветра за 1999-2006 гг.

Временная последовательность среднемесячных значений температуры поверхности моря ТПМ (рисунки 5.1 а–в), позволила оценить линейные тренды температуры трех районов Каспийского моря за выбранный короткий период времени 2002 - 2006 гг.: $0,25^{\circ}\text{C}/\text{год}$ для Северного Каспия; $0,18^{\circ}\text{C}/\text{год}$ для Среднего Каспия; $0,16^{\circ}\text{C}/\text{год}$ для Южного Каспия. Тренды положительные, что свидетельствует о потеплении всех районов Каспия в данный период. Тренд ТПМ, средней для всего Каспия (включая КБГ), оказался равным $0,18^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Заметим, что приведенные оценки линейных трендов ТПМ существенно превышают известные значения, полученные по спутниковым данным для более длительных интервалов времени. Высокие значения тренда ТПМ для столь короткого 4,5-летнего периода обусловлены тем фактом, что начало рассматриваемого временного интервала соответствует наиболее холодной зиме 2002/2003 гг. и холодному лету 2003 г. Сделаны оценки среднегодовой ТПМ всего Каспия: самая низкая среднегодовая ТПМ была в 2003 г. ($15,57^{\circ}\text{C}$), самая высокая – в 2006 г. ($16,7^{\circ}\text{C}$).

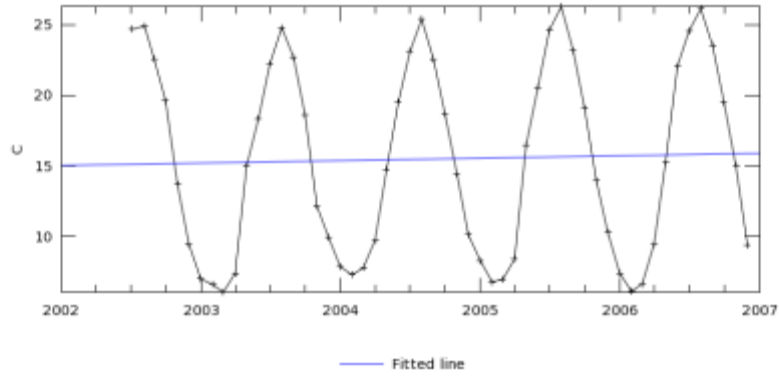
Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Night) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST v2014] C over 2002-07-04 00:00:15Z - 2006-12-31 14:50:06Z, Region 47E, 44.5N, 53E, 47N



- The user-selected region was defined by 47E, 44.5N, 53E, 47N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 47.0208E, 44.5208N, 52.9792E, 46.9792N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetting granules that went into making this visualization result.

(a)

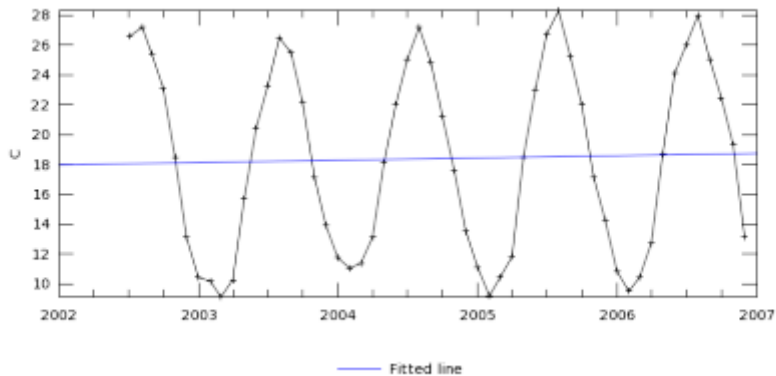
Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Night) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST v2014] C over 2002-07-04 00:00:15Z - 2006-12-31 14:50:06Z, Region 47E, 40.5N, 53E, 44.5N



- The user-selected region was defined by 47E, 40.5N, 53E, 44.5N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 47.0208E, 40.5208N, 52.9792E, 44.4792N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetting granules that went into making this visualization result.

(b)

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Night) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_SST v2014] C over 2002-07-04 00:00:15Z - 2006-12-31 14:50:06Z, Region 49E, 36N, 54E, 40.5N



- The user-selected region was defined by 49E, 36N, 54E, 40.5N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 49.0208E, 36.0208N, 53.9792E, 40.4792N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetting granules that went into making this visualization result.

(v)

Рисунок 5.1 – Временная последовательность значений ТПМ, средней для Северного (а), Среднего (б), Южного (в) Каспия, в период с 04.07.2002 по 31.12.2006 гг. Синяя линия – линия тренда

Наиболее низкие зимние и самые высокие летние среднемесячные температуры в Среднем и Южном Каспии наблюдаются в три месяца гидрологической зимы и гидрологического лета соответственно, причем самые холодные зимние месяцы в основном – февраль и март, самый теплый летний – август. В Северном Каспии – декабрь иногда оказывается холоднее марта (зима 2003/2004 гг.) или почти таким же, как март (температурный минимум – в основном в феврале). Три самых теплых месяца в Северном Каспии – с июня по август, максимум чаще в августе. Таким образом, зимний и летний гидрологические сезоны в Северном Каспии сдвинуты относительно таковых в Среднем и Южном Каспии примерно на месяц в сторону более раннего наступления.

Пространственно-временная изменчивость ТПМ. Изменчивость ТПМ по акватории Каспия зависит от широты места, донной топографии, сезона и особенностей крупномасштабной и мезомасштабной циркуляции. В общем, ТПМ увеличивается в направлении с севера на юг, однако, весенние ТПМ мелководного Северного Каспия выше, чем Среднего, а летние значения температуры этих районов примерно равны. Медленнее прогревается и медленнее остывает относительно глубокая (больше 5 м) Уральская Бороздина в восточной части Северного Каспия в марте и апреле. Минимум температуры в июне прослеживается также над Дербентской впадиной.

Пространственно-временная изменчивость температуры воздуха. Самые высокие температуры воздуха наблюдаются в регионе Южного Каспия, особенно в его юго-восточной части на границе между Ираном и Туркменистаном (рисунок 5.2). Межгодовая изменчивость температуры воздуха за 1999-2006 гг. показала небольшой рост с аномально теплым летом в 1999 и 2006 гг., и аномально холодными зимами 2002/2003 и 2005/2006 гг., когда средняя по региону среднемесячная температура опускалась ниже 0°C (рис. 5.3).

Пространственно-временная изменчивость атмосферных осадков в регионе Каспийского моря. Наибольшие атмосферные осадки наблюдаются в горах Кавказа и Ирана. Межгодовая изменчивость показала увеличение интенсивности осадков за исследуемый период примерно на 50%.

Time Averaged Map of 2-meter air temperature monthly 0.5 x 0.625 deg. [MERRA-2 Model M2IMNXASM v5.12.4] C over 1999-Jan - 2006-Dec, Region 48E, 36N, 55E, 47N

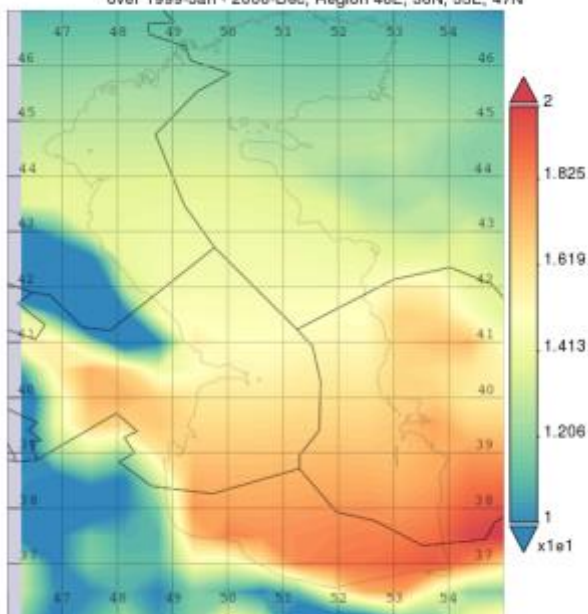
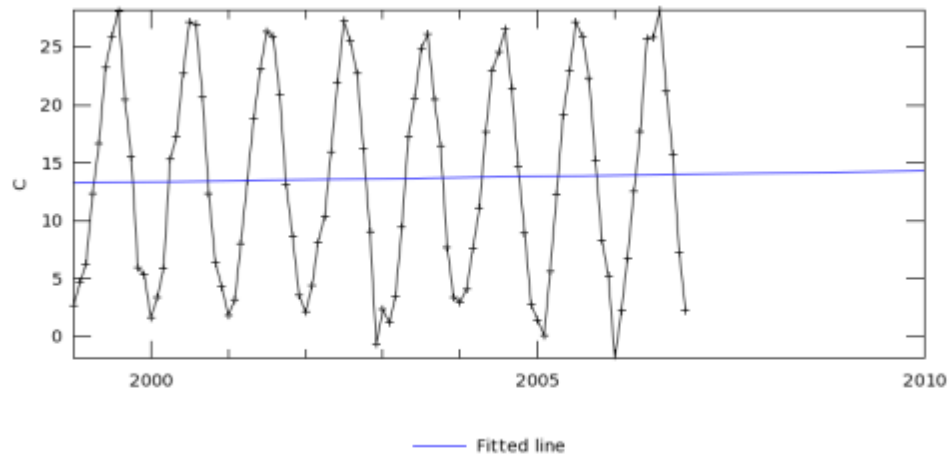


Рисунок 5.2 – Пространственная изменчивость температуры воздуха над регионом Каспийского моря (средняя величина за 1999-2006 гг.)

Time Series, Area-Averaged of 2-meter air temperature monthly 0.5 x 0.625 deg. [MERRA-2 Model M2IMNXASM v5.12.4] C over 1999-Jan - 2006-Dec, Region 46E, 38N, 55E, 47N



The user-selected region was defined by 46E, 38N, 55E, 47N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 46.25E, 38N, 55E, 47N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.

Рисунок 5.3 – Межгодовая и сезонная изменчивость температуры воздуха над регионом Каспийского моря за 1999-2006 гг. Синяя линия – линия тренда

Пространственно-временная изменчивость облачности. В среднем, наименьшая облачность наблюдалась в юго-восточной части моря, а наибольшая – вдоль побережья Дагестана. Межгодовая изменчивость показала тенденцию к снижению облачности в регионе, которая меняется от 20-30% летом до 75-85% зимой.

Межгодовая и сезонная изменчивость уровня Каспийского моря. Согласно информации, полученной из он-лайн базы данных DAHITI (Database for Hydrological Time Series of Inland Waters), уровень Каспийского моря уменьшался с конца 1995 г. до зимы 2001/2002 гг., затем снова возрастал до лета 2005 г. и падал до зимы 2015/2016 со средней скоростью $-10,3$ см/год (рисунок 5.4). Размах сезонных изменений уровня моря составляет 30–40 см. В 2019 г. наблюдалось падение уровня моря.

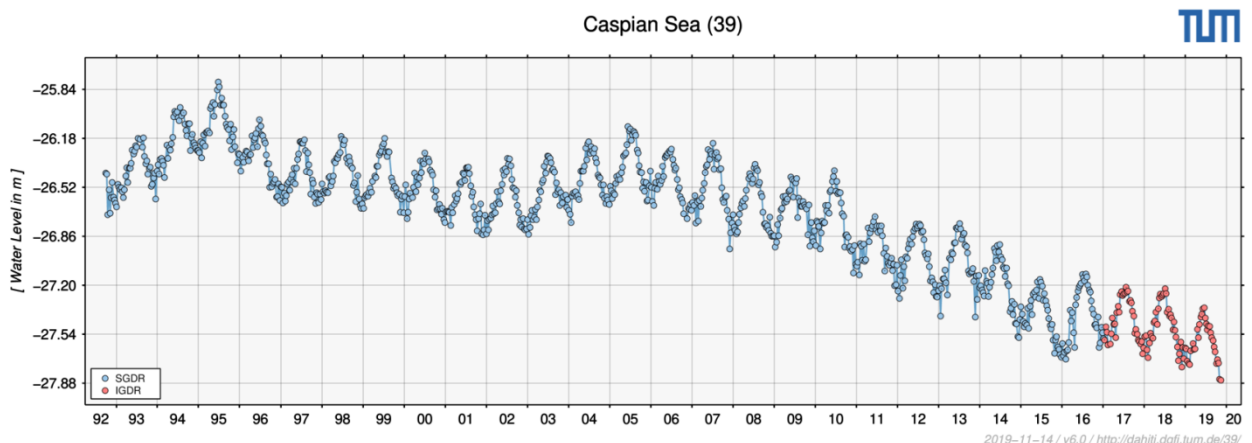


Рисунок 5.4 – Межгодовая и сезонная изменчивость уровня Каспийского моря (DAHITI, http://dahiti.dgfi.tum.de/en/39/water_level/) с 28 сентября 1992 по 25 ноября 2019 г. Красным цветом выделены данные, полученные в близком к реальному времени (IGDR — Interim Geophysical Data Record)

Пространственно-временная изменчивость скорости ветра. Наибольшая скорость ветра наблюдалась к северу от Апшеронского полуострова, а наименьшая – вдоль

побережья Ирана (рисунок 5.5). Межгодовая изменчивость показала уменьшение средней скорости ветра на 0,1 м/с, при этом средняя скорость ветра в 1999-2006 гг. менялась от 5 до 7 м/с.

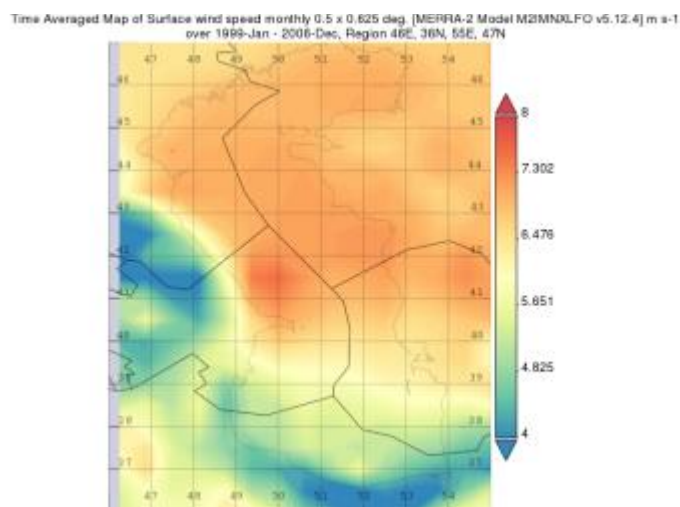


Рисунок 5.5 – Пространственная изменчивость скорости ветра в регионе Каспийского моря (средняя величина за 1999-2006 гг.)

Пространственно-временная изменчивость влажности в регионе Каспийского моря.

Наибольшая влажность наблюдалась в Южном Каспии, а наименьшая – в пустынях к востоку от Каспийского моря (рисунок 5.6). В среднем влажность над акваторией Каспийского моря значительно больше, чем над окружающей сушей. Межгодовая изменчивость показала небольшое увеличение средней удельной влажности с 0,0065 до 0,0075 кг/кг, при этом удельная влажность в 1999-2006 гг. менялась от 0,002 до 0,012 кг/кг. Наименьшие значения удельной влажности наблюдаются зимой, а наибольшие – летом.

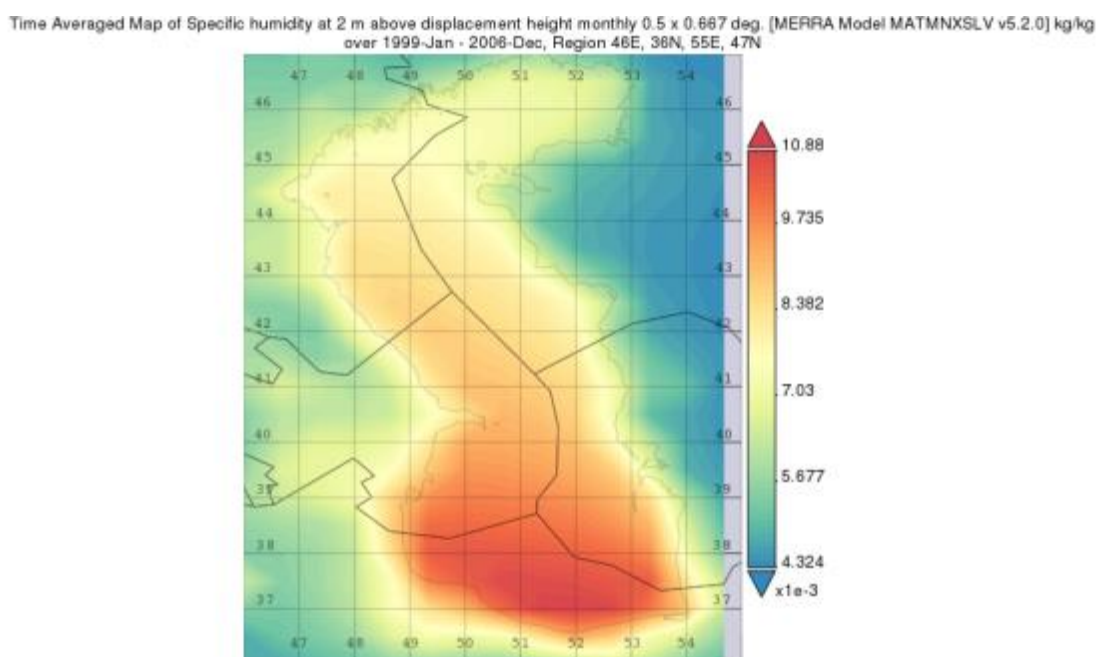


Рисунок 5.6 – Пространственная изменчивость влажности в регионе Каспийского моря (средняя величина за 1999-2006 гг.)

VI Получены основные характеристики ледяного покрова в Северном Каспии, построены карты-схемы ледяного покрова в Каспийском море за 1999-2006 гг., и в 2019 г.

На основе анализа ледового режима в Северном Каспии, выполненного с помощью спутниковых радиолокационных и оптических данных, а также метеоданных за период с 1998 по 2019 годы, были определены:

- **индекс суровости зим**, который определялся по сумме градусо-дней отрицательных температур воздуха. Очень суровая зима была в 2011/2012 г.; суровые зимы - 2005/2006, 2007/2008, 2016/2017; мягких и умеренных зим по 8. Очень мягких зим не было (рисунок 6.1а).
- **продолжительность ледяного покрова**. Максимальная продолжительность - 146 дней в очень суровую зиму 2011/2012; минимальная продолжительность - 86 дней в мягкую зиму 2015/2016; средняя продолжительность ледяного покрова - 115 дней (рисунок 6.1б);
- **максимальная площадь ледяного покрова**. Наибольшая площадь ледяного покрова наблюдалась в зимний период 2011/2012 г., когда она составила более 90 тыс. кв. км. Причем в данный зимний период ледяной покров наблюдался не только в Северном Каспии, но и вдоль западного побережья моря вплоть до Апшеронского полуострова и в заливах Туркменбаши и Южный Челекен. Минимальная площадь ледяного покрова составила 44 тыс. кв. км в зимний период 1999/2000 г. (рисунок 6.1в).

Карта-схема границ ледяного покрова в Северном Каспии за 1999-2006гг. и 2019 г. представлена на рисунке 6.2.

Тематический анализ спутниковых данных, направленный на определение характеристик ледяного покрова в Северном Каспии, проводился в среде STS, в которой с помощью специально разработанных инструментов сохранялись данные о ледяном покрове, в частности границы областей, занятых льдом. Для получения достоверной информации о проявлениях ледяного покрова на спутниковых изображениях оптического диапазона в STS предусмотрены «продукты», сформированные с помощью комбинаций различных каналов, наиболее подходящие для различения облачности, льда и суши. Так, например, для данных MSI Sentinel-2 это комбинация: Red — 12-й канал (2100–2280 нм), Green — 8-й канал (785–900 нм), Blue — 4-й канал (650–680 нм). Для Landsat-8 это соответственно Red – 7 канал (2100–2300 нм), Green – 5 канал (845 – 885 нм), Blue - 4 канал (630 – 680 нм) (рисунок 6.3). Для четкого выделения ледяного покрова на радиолокационных изображениях в ИС STS предусмотрены «продукты» на основе различных комбинаций РЛИ, полученных на разных поляризациях.

Учитывая, что, как правило, ледяной покров в Северном Каспии не является сплошным, т.е. всегда присутствуют области свободной ото льда морской поверхности, трещины, полыньи, а также мелкие острова, для определения площади, занятой непосредственно льдом использовались результаты применения классификации, которая позволяет прямо online формировать карты на основе спутниковых данных; результаты классификации доступны непосредственно в окне браузера, а, главное, результаты классификации позволяют определить общую площадь именно ледяного покрова (рисунок 6.4).

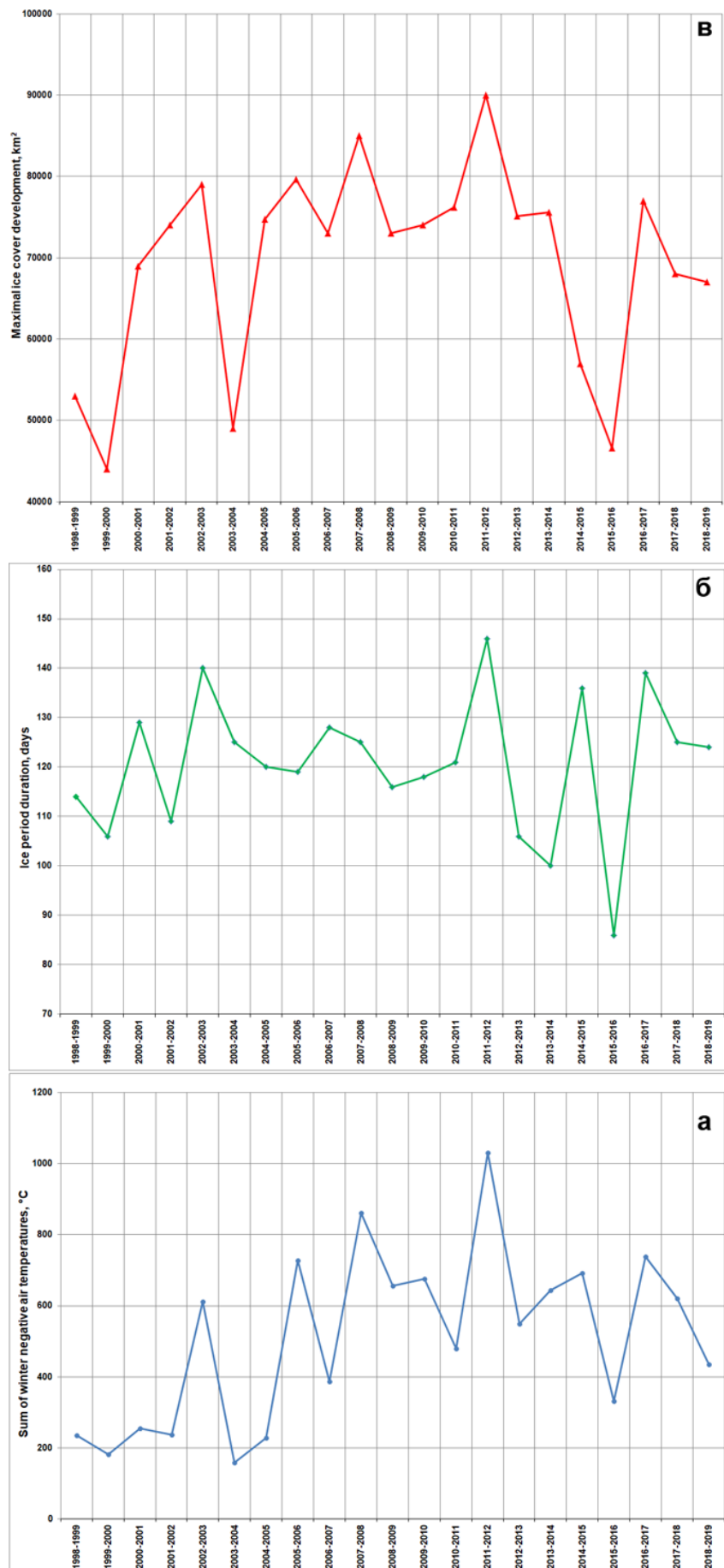


Рисунок 6.1 – Сумма градусо-дней отрицательных температур воздуха (а); продолжительность ледяного покрова (б); максимальная площадь ледяного покрова (в)

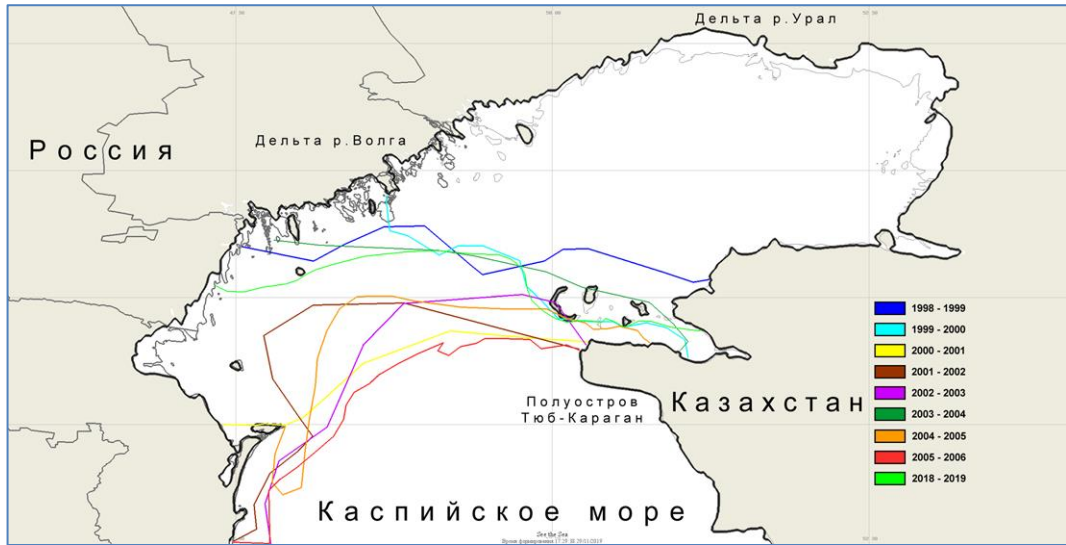


Рисунок 6.2 – Карта-схема границ максимального ледяного покрова в Северном Каспии за каждый год для исследуемого периода

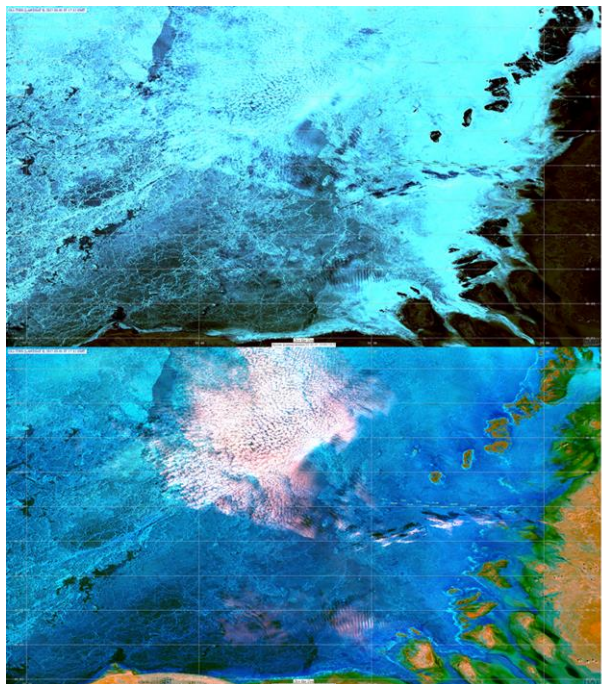


Рисунок 6.3 – Пример использования специальных возможностей, предусмотренных в информационной системе STS, для различения проявлений льда, облачности и суши на оптических изображениях. Фрагмент изображения, полученного с помощью OLI Landsat-8 01 марта 2017 г. над акваторией Северного Каспия. а: стандартное цветосинтезированное изображение «в естественных цветах»: 4 - 3 - 2 каналы; б: 7 - 5 - 4 каналы

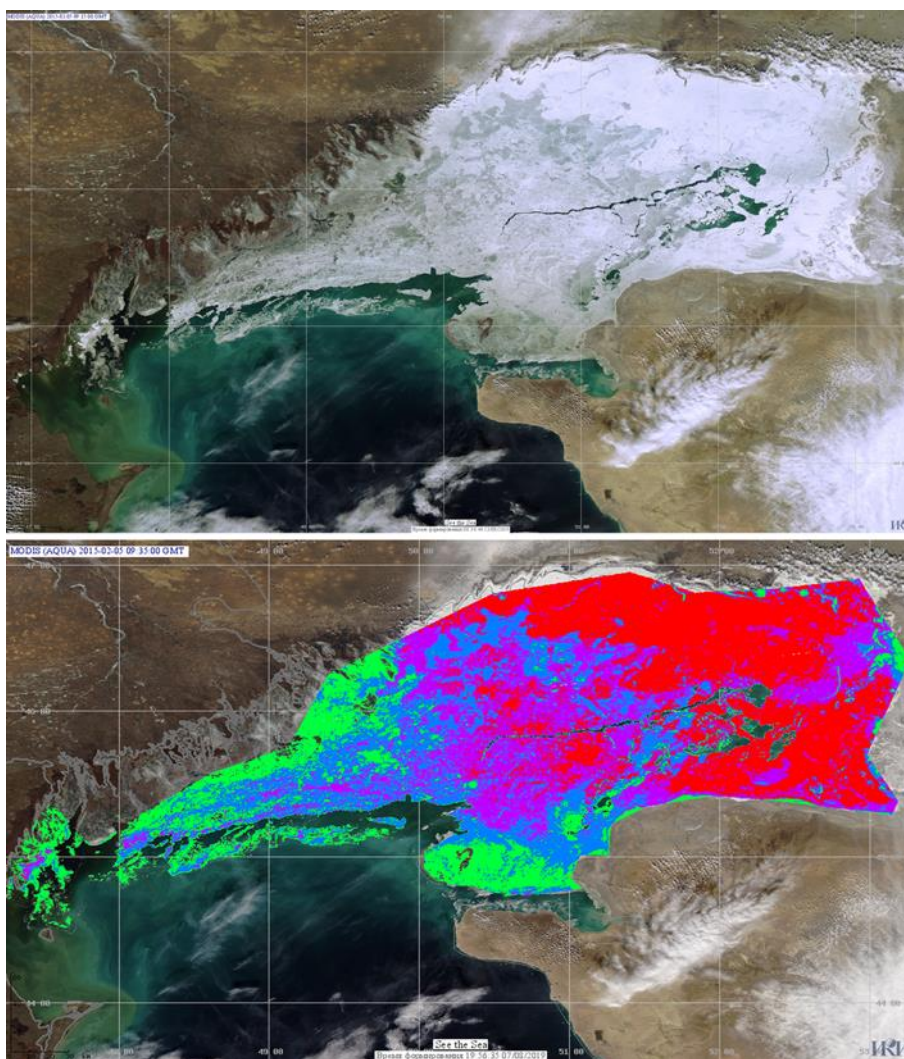


Рисунок 6.4 – Пример результата применения «классификации без обучения» (внизу) для MODIS Aqua изображения от 05.02.2015 (вверху)

Результаты по исследованию ледяного покрова в Северном Каспии, проведенные в рамках исполнения проекта, опубликованы в статье Lavrova O.Yu., Kostianoy A.G., Mityagina M.I., Strochkov A.Ya., Bocharova T.Yu. Remote sensing of sea ice in the Caspian Sea // *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*. 2019. V. 11150. 111500Q. DOI: 10.1117/12.2532136.

VII Построены карты-схемы выявленных по спутниковым радиолокационным и оптическим данным за 1999-2006 гг. и 2019 г. элементов циркуляции вод Каспийского моря: вихревых структур, внутренних волн, сгонно-нагонных явлений, оказывающих влияние на перенос загрязнений. Начато накопление статистики о пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости гидродинамических процессов.

Вихревые структуры. Проанализирован большой массив спутниковых данных, полученных за период 1999-2006 гг. и 2019г. с целью выявления поверхностных проявлений вихревых структур. Только для Южного Каспия было проанализировано 2623 сцены высокого разрешения в оптическом диапазоне. На основе проведенного анализа получено:

- среди безоблачных сцен в среднем на 20-30% сценах встречаются вихревые структуры (рисунок 7.1 – пример для Южного Каспия);
- вихревые структуры в основном встречались в шельфовой зоне Каспийского моря;
- более интенсивное вихреобразование наблюдается в Южном Каспии. Основные причины их образования: поступление речного стока, сложная донная и береговая топография, завихренность ветрового поля, сдвиговая неустойчивость на периферии основных элементов циркуляции;
- отмечается преобладание субмезомасштабных циклонов и антициклонов;
- в летний период количество поверхностных проявлений вихревых структур больше, чем в зимний, поскольку имеется большое количество пассивных трассеров, визуализирующих вихревые структуры.

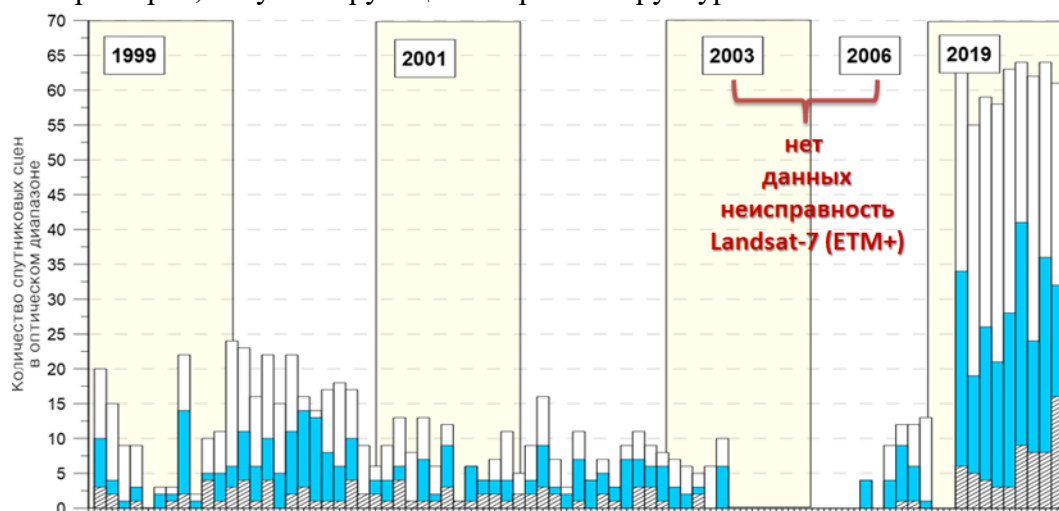


Рисунок 7.1 – Гистограмма распределения сцен, полученных в оптическом диапазоне, по всем годам для Южного Каспия. Белый цвет отражает % облачных сцен, синий - безоблачных, заштрихованные области – количество сцен на которых были обнаружены вихревые структуры

Для каждой части Каспийского моря были выделены основные районы вихреобразования. Составлена карта-схема проявлений вихревых структур (рисунок 7.2). Можно выделить 6 основных районов регулярного проявления вихревых структур на спутниковых изображениях.

1. В юго-восточной части Южного Каспия круглогодично отмечается образование вихревых структур на границе шельфа и материкового склона. Они хорошо видны на оптических изображениях за счет поступления в море вод из залива "Gorgan Gulf", а так же чуть севернее на территории Туркменистана идет поступление мутных вод из множества искусственно сделанных каналов от сельскохозяйственных орошаемых угодий.
2. Ко второму по значимости району относится южное побережье Каспийского моря. Здесь со стороны побережья Ирана идет обильное поступление речных вод из р. Чалус, р. Машалак, р. Коркруд, р. Сардобрад. На периферии плюмов этих рек в процессе смешения речной и морской воды достаточно часто образуются вихревые структуры.
3. К третьему району можно отнести район Кызылагджского заповедника - в прибрежной зоне фиксируется периодическое образование вихревых структур, что вероятно, связано так же с поступлением пресного стока и сложной береговой топографией.

4. В Среднем Каспии наблюдается яркая асимметрия - вихревые структуры преимущественно образуются только вдоль западного побережья. Трассерами так же является речной сток.

5. Наблюдается периодическое вихреобразование в районе острова Чечень, Астраханского государственного природного заказника и на траверзе устья реки Терек. Южнее вдоль западного побережья идет поступление более мутных вод из водохранилища Бешеное и рек Сулак и Самур. Северная часть Каспийского моря самая мелководная из всех областей. В зимний период она практически полностью скована льдом. Здесь впадает одна из самых крупных рек - Волга, которая несёт 80 % речного стока всего Каспийского моря. Межгодовой мониторинг показал, что вихревые структуры в основном образуются в юго-западной части Северного Каспия. Это происходит с увеличением глубин от 3-4 метров, а так же в этом месте морское дно изрезано подводными банками - банка Тюленья, Тбилиси, Большая Жемчужная, Бахтемирская и многие другие.

6. Редкие случаи образования вихревых структур были обнаружены в Мангышлакском заливе, напротив мыса Тюб-Караган и мыса Урдюк.

Вихревые структуры наблюдались на радиолокационных изображениях и в глубоководных частях Среднего и Южного Каспия. Пассивными трассерами в этом случае в основном являются пленки поверхностно-активных веществ.

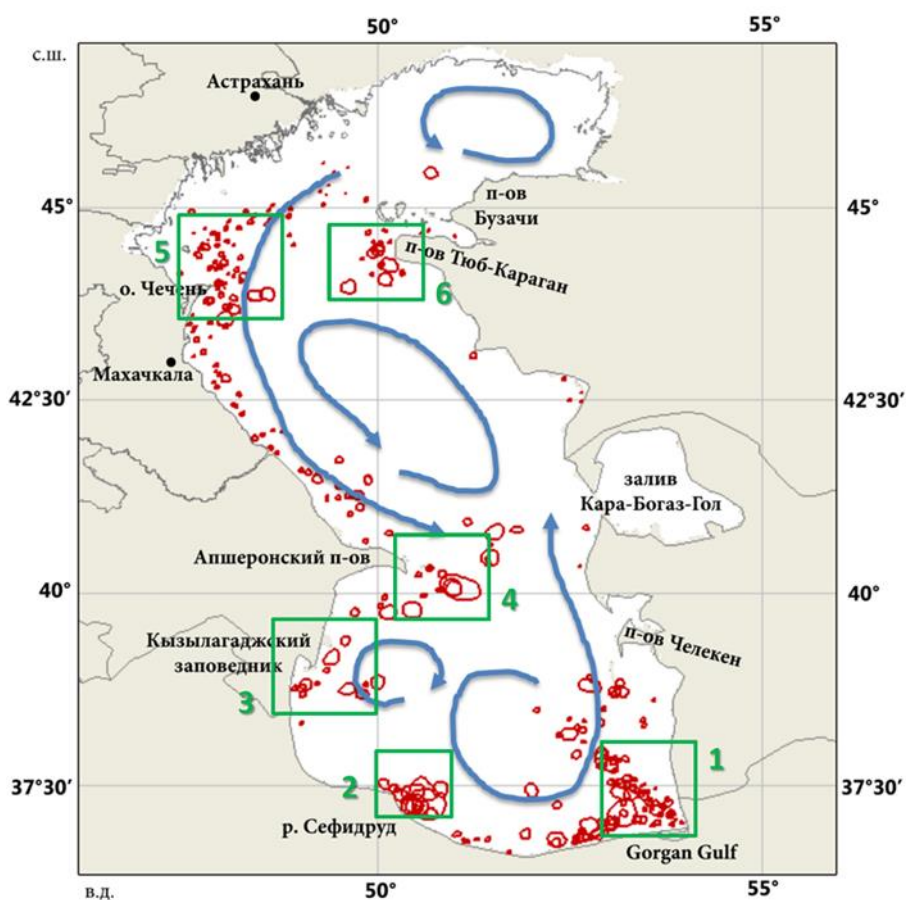


Рисунок 7.2 – Сводная карта поверхностных проявлений вихревых структур в акватории Каспийского моря, составленная на основе спутниковых данных за 1999-2006 гг. и 2019 г.

Результаты по данному направлению были представлены в докладе: Назирова К.Р. Выявление вихревых структур в Каспийском море по спутниковым радиолокационным и оптическим данным за 1999-2006 гг. и 2019 г. // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11–15 ноября. 2019, ИКИ РАН, Москва. 2019. С. 309. DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a

Внутренние волны. Проведено исследование сезонной, пространственной и межгодовой изменчивости проявлений внутренних волн в Каспийском море в 1999-2006 и 2019 гг. Выявлено, что поверхностные проявления внутренних волн наблюдались в период с начала мая до середины сентября. В отдельные годы, в зависимости от гидрометеорологических условий – прогрева воды, ветровой ситуации и пр. внутренние волны не имели поверхностных проявлений в мае или сентябре. Поверхностные проявления внутренних волн регулярно наблюдались в восточной части Среднего Каспия и северо-восточной части Южного Каспия. В Северном Каспии вследствие его мелководности и отсутствия выраженной стратификации, внутренние волны не образуются, либо не имеют поверхностных проявлений на спутниковых изображениях. В западной части Каспийского моря внутренние волны наблюдались редко и, как правило, в начале летнего сезона. Судя по поверхностным проявлениям, цуги внутренних волн распространяются к берегу, и места их генерации были расположены преимущественно над глубинами 50 – 200 м. Длина ведущей волны в цуге может достигать 1,5 км, а протяженность фронтов до 30 км. Такие параметры внутренних волн схожи с параметрами внутренних волн в атмосфере, что создает определенные трудности их различения на спутниковых изображениях.

Проследить и оценить межгодовую изменчивость для 1999-2002 гг. сложно, поскольку для этих годов в наличии имелись радиолокационные данные только SAR ERS-1, -2, полученные в узкой полосе обзора и только в отдельные периоды времени. По имеющимся данным за весь исследуемый период можно сделать вывод, что в разные годы даты первых проявлений внутренних волн существенно разнятся. Например, в 1999 и 2000 гг. внутренние волны впервые наблюдались в июле. А в 2004 г. внутренние волны наблюдались до середины сентября.

Карта-схема районов проявлений внутренних волн в 1999-2006 и 2019 гг. представлена рисунке 7.3.

Результаты по данному направлению были представлены в докладе: Лаврова О.Ю. Выявление пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости поверхностных проявлений внутренних волн в Каспийском море (1999–2006, 2019 гг.) // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11–15 ноября. 2019, ИКИ РАН, Москва. 2019. С. 287. DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a

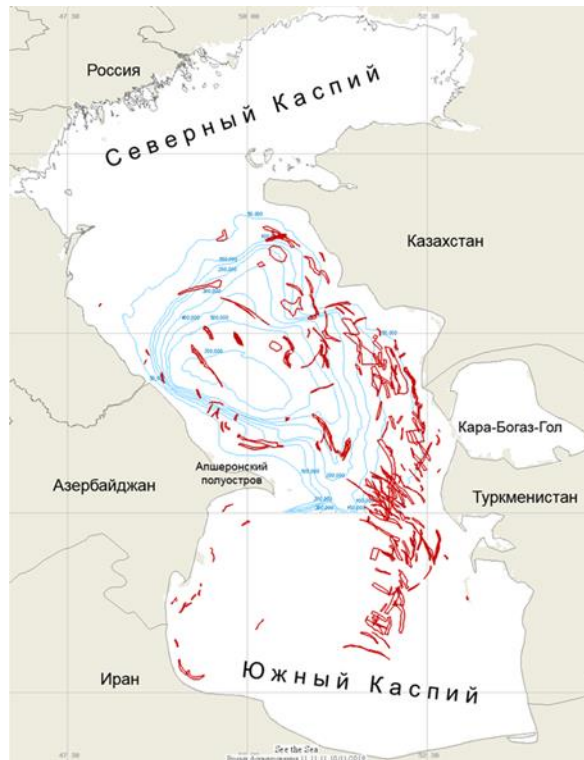


Рисунок 7.3 – Сводная карта поверхностных проявлений цугов внутренних волн в акватории Каспийского моря, составленная на основе спутниковых данных за 1999-2006 гг. и 2019 г.

Сгонно-нагонные явления. Разработана методика выявления сгонно-нагонных явлений на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения. Методика опробована для северо-восточной части Северного Каспия (рисунок 7.4). Выявлено, что интенсивные сгонные процессы возникают при сильных ветрах северного или северо-восточного направления, дующих не менее 5 дней. В среднем, в исследуемый период, такая ситуация наблюдается 3-4 раза в год. Нагоны, соответственно наблюдаются при сильных ветрах южного или юго-западного направления.

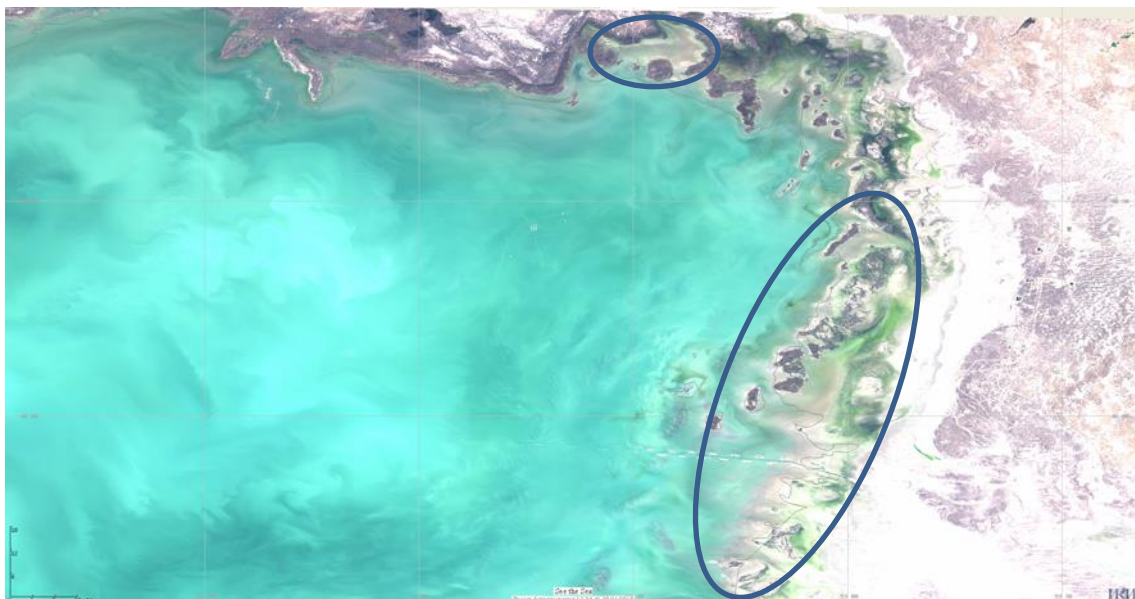


Рисунок 7.4 – Пример проявлений сгонных явлений (отмечены овалами) на изображении MSI Sentinel-2A, полученном 11 апреля 2019 г. над акваторией Северного Каспия

VIII. Разработаны новые инструменты информационной системы «See the Sea»:

- программное обеспечение для автоматического приема данных SST на основе измерений приборов MODIS и VIIRS;
- инструмент расчета данных SST на основе измерений прибора TIRS Landsat-8 в режиме реального времени по запросу пользователя;
- инструмент визуализации данных SST с возможностью динамического выбора диапазонов температуры;
- новые методы классификации, включая метод опорных векторов, дискриминантный анализ, метод случайных лесов и другие в составе инструмента классификации и кластеризации данных;
- интерактивный инструмент сегментации данных из архива ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Результаты работ по проекту представлены в 3 публикациях, индексируемых в базах данных SCOPUS, Web of Science и РИНЦ. Было сделано 6 докладов на одной международной конференции и одной Всероссийской конференции с международным участием.

С материалами, посвященными данному проекту, можно ознакомиться на сайте http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_proj/proj_20060.htm.