

**Основные результаты, полученные в 2020 г. в ходе исполнения
второго 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, занимающихся 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 2020 г. решение поставленных в проекте задач проводилось на основе анализа архивных данных за 2007-2013 гг., а также оперативных данных за 2020 г. (далее исследуемый период).

В 2020 г. были получены следующие основные результаты.

I. Систематизированные результаты анализа данных оперативного многосенсорного спутникового мониторинга Каспийского моря (за 2020 г.) и анализа многолетних рядов спутниковых данных за 2007-2013 гг.

1. Проанализированы, отобраны и интегрированы в систему STS радиолокационные данные SAR ERS-2; ASAR Envisat из архивов Европейского космического агентства, полученные над акваторией Каспийского моря в 2007-2013 гг.
2. Все имеющие в STS архивные данные многолетних спутниковых наблюдений за период 2007-2013 гг. проанализированы, систематизированы и аннотированы.
3. Проанализированы, систематизированы и аннотированы данные оперативного многосенсорного мониторинга за 2020 г.
4. Все полученные результаты внесены в ИС STS, которая является составной частью ОИ ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

II. Проведено картографирование различных типов нефтяных загрязнений поверхности Каспийского моря, выявленных по спутниковым данным за 2007-2013 гг. и за 2020 г

При детектировании нефтяных загрязнений морской поверхности Каспийского моря и их картографировании особое внимание уделялось «горячим точкам», т.е. районам наиболее интенсивного загрязнения вблизи источников загрязнения морской поверхности Каспийского моря, выявленных нами на основе данных спутникового дистанционного зондирования. (*Mityagina M.I., O. Yu. Lavrova. Oil pollution hotspots on the Caspian Sea surface identified using satellite remote sensing // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2020, edited by Charles R. Bostater, Xavier Neyt, Françoise Viallefont-Robinet, Proc. of SPIE Vol. 11529, 115290L. doi: 10.1117/12.2573501.*)

В ходе работы по проекту мы обозначили основные типы нефтяного загрязнения, характерные для различных частей Каспийского моря, и выявили основные закономерности его поверхностного загрязнения нефтяными пленками (См. рис. 1). Установлено, что характер поверхностного нефтяного загрязнения Каспийского моря, выявленный в ходе спутникового мониторинга, определяется особыми природными свойствами Каспийского моря, а именно наличием на его дне крупных месторождений нефти и газа. Также были определены районы наиболее интенсивного загрязнения морской поверхности, выявлены источники загрязнения и на основе спутниковых данных составлены подробные карты нефтяного загрязнения морской поверхности в этих районах.



Рисунок 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 – кластер грязевых вулканов на морском дне Южно-Каспийской впадины; 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 - основные судоходные трассы, обозначенные зелеными линиями

1. **Район нефтедобычи «Нефтяные Камни»** в Среднем Каспии в районе Апшеронского и Бакинского архипелагов (цифра 1 на рис. 1, рис.2). 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.

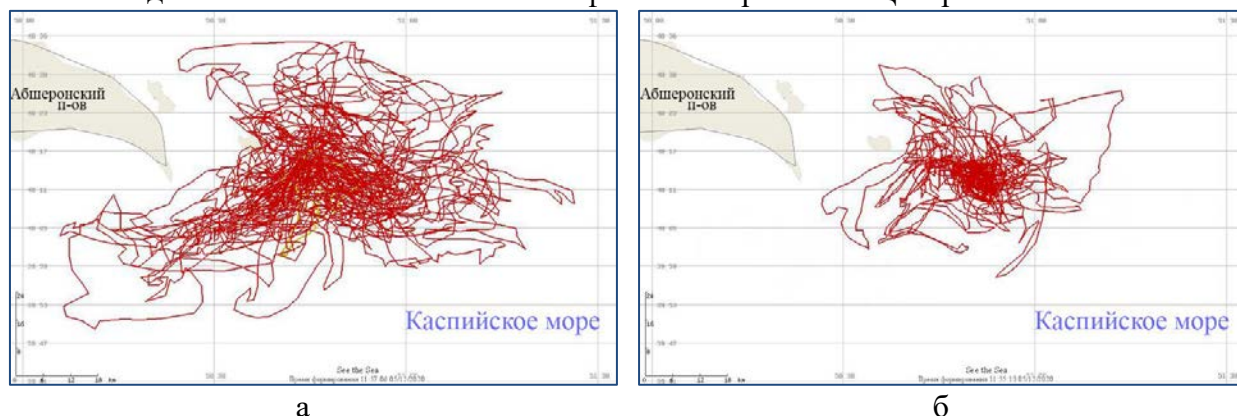


Рисунок 2 - Сводная карта нефтяных загрязнений поверхности Каспийского моря вблизи района нефтедобычи Нефтяные Камни, обнаруженных в результате анализа спутниковых данных за 2007-2013 гг. (а) и 2020 г. (б)

2. Часть акватории Каспийского моря к западу от полуострова Челекен, административно принадлежащая Туркменистану (цифра 2 на рис. 1, рис. 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 (*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). 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. Повторяющаяся точка всплытия, определяет местоположение источника углеводородов на морском дне, имеющего координаты $52^{\circ}36.2'$ в.д., $39^{\circ}32.9'$ с.ш. и находящегося на глубине 1000 м.

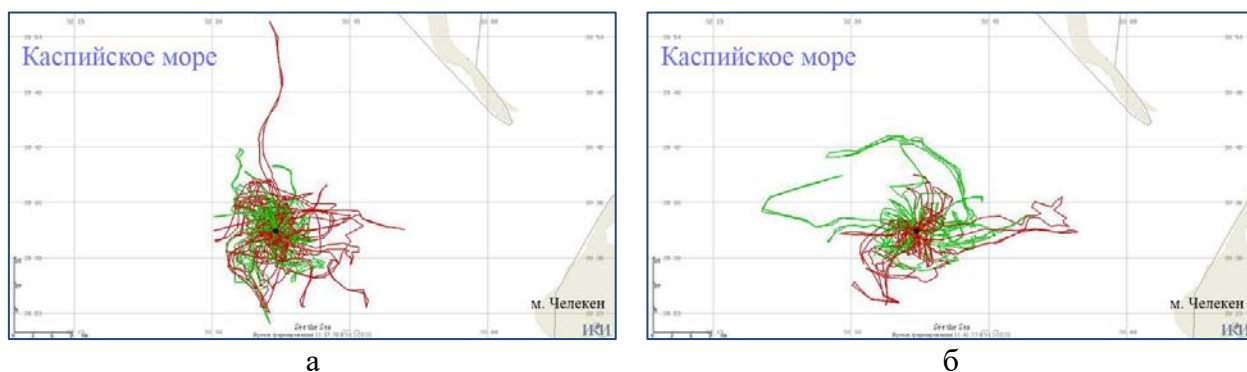


Рисунок 3 - Сводная карта естественных нефтепроявлений на поверхности Каспийского моря выявленных вблизи полуострова Челекен по спутниковым данным за 2007-2013 гг.(а) и за 2020 г. (б)

3. Часть акватории Каспийского моря у юго-западного побережья в провинции Гилян (Иран) к востоку от мыса Сефид Руд (цифра 3 на рис. 1, рис. 4).

Использование инструментария и картографического интерфейса сервиса STS позволило на основе спутниковых изображений идентифицировать источники просачивания углеводородов с морского дна в этом районе и уточнить их координаты, соответствующие повторяющейся точке всплытия детектированных нефтепроявлений. На иранском шельфе две близкорасположенные точки выхода нефтеуглеводородов на морском дне с

координатами $50^{\circ}24.4'$ в.д., $37^{\circ}23.4'$ с.ш. и $50^{\circ}28.9'$ в.д., $37^{\circ}20.4'$ с.ш. идентифицированы как постоянные точки всплытия нефтяных slickов.

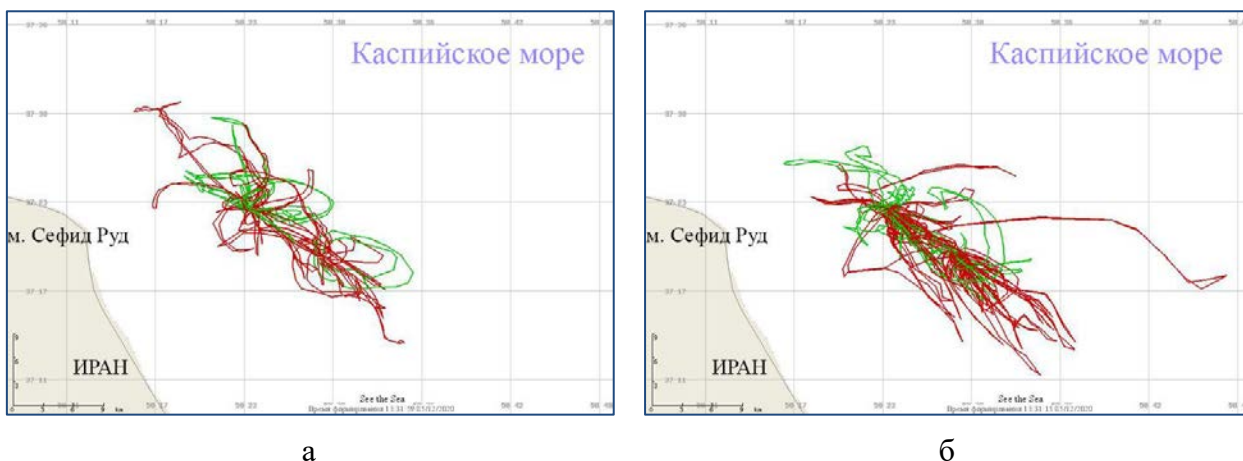


Рисунок 4 - Сводная карта естественных нефтепроявлений на поверхности Каспийского моря выявленных вблизи мыса Сефид Руд по спутниковым данным за 2007-2013 гг. (а) и за 2020 г. (б)

4. **Западный склон Южно-Каспийской впадины (цифра 4 на рис. 1, рис. 5).** В результате анализа спутниковых данных, полученных в районе Южно-Каспийской впадины, выявлены и нанесены на карту многочисленные поверхностные нефтепроявления, обусловленные грязевым вулканизмом на морском дне.

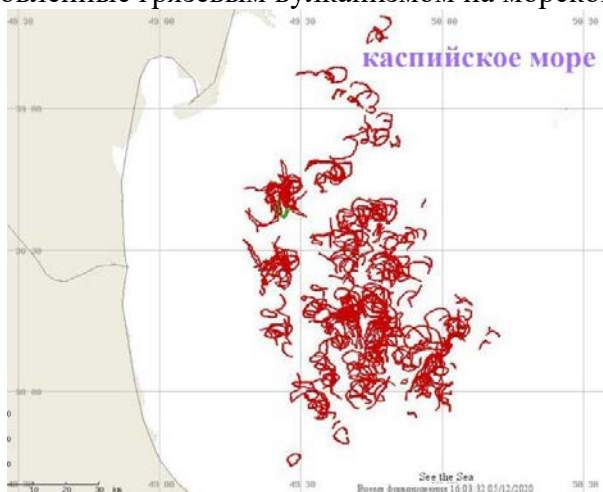
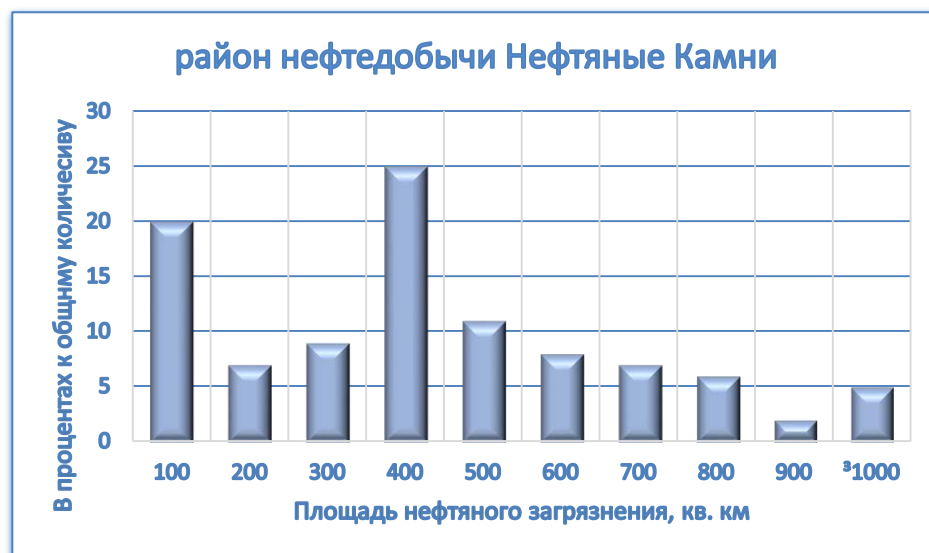


Рисунок 5 - Сводная карта поверхностных проявлений грязевовулканической активности на морском дне, выявленных в районе Южно-Каспийской впадины по спутниковым данным за 2007-2013 гг. и 2020 г.

5. Анализ спутниковых данных показал, что нефтесодержащие 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.

III. Определены характеристики межгодовой, сезонной и пространственной изменчивости нефтяного загрязнения морской поверхности в 2007-2013 гг. и в 2020 г.

Рассчитаны распределения площадей индивидуальных нефтяных загрязнений морской поверхности в различных тестовых районах. Следует отметить также, что представленные оценки базируются исключительно на спутниковых данных и могут в ту или другую сторону отличаться от измерений, проведённых *in situ*.



а



б



в

Рисунок 6 - Распределение индивидуальных площадей нефтяных загрязнений поверхности Каспийского моря: а) в районе нефтедобычи Нефтяные Камни; б) в районе мыса Сефид Руд; в) в районе полуострова Челекен

В районе нефтедобычи Нефтяные Камни наиболее часто наблюдается загрязнение площадью порядка 400 км², однако в отдельных случаях их площади могут превышать 1000 км² (Рис. 6а.)

Индивидуальные размеры естественных нефтепроявлений, обусловленных выходами сырой нефти с морского дна, выявленных в разные годы, по спутниковым данным,

менялись в пределах от 0,01 до 45 км² для района мыса Сефид Руд (Рис. 6б) и от 0,01 до 75 км² для района п-ва Челекен (Рис. 6в).

Более 75 % естественных нефтяных проявлений на морской поверхности, детектированных в районе мыса Сефид Руд, имеют площадь менее 5 км² квадратных километров. Причем в 40% случаев площади обнаруживаемых пятен не превышают 1 км².

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

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

Выявлена изменчивость площади акватории, потенциально подверженной загрязнению нефтяными плёнками в различных районах (представлена на рис. 7).

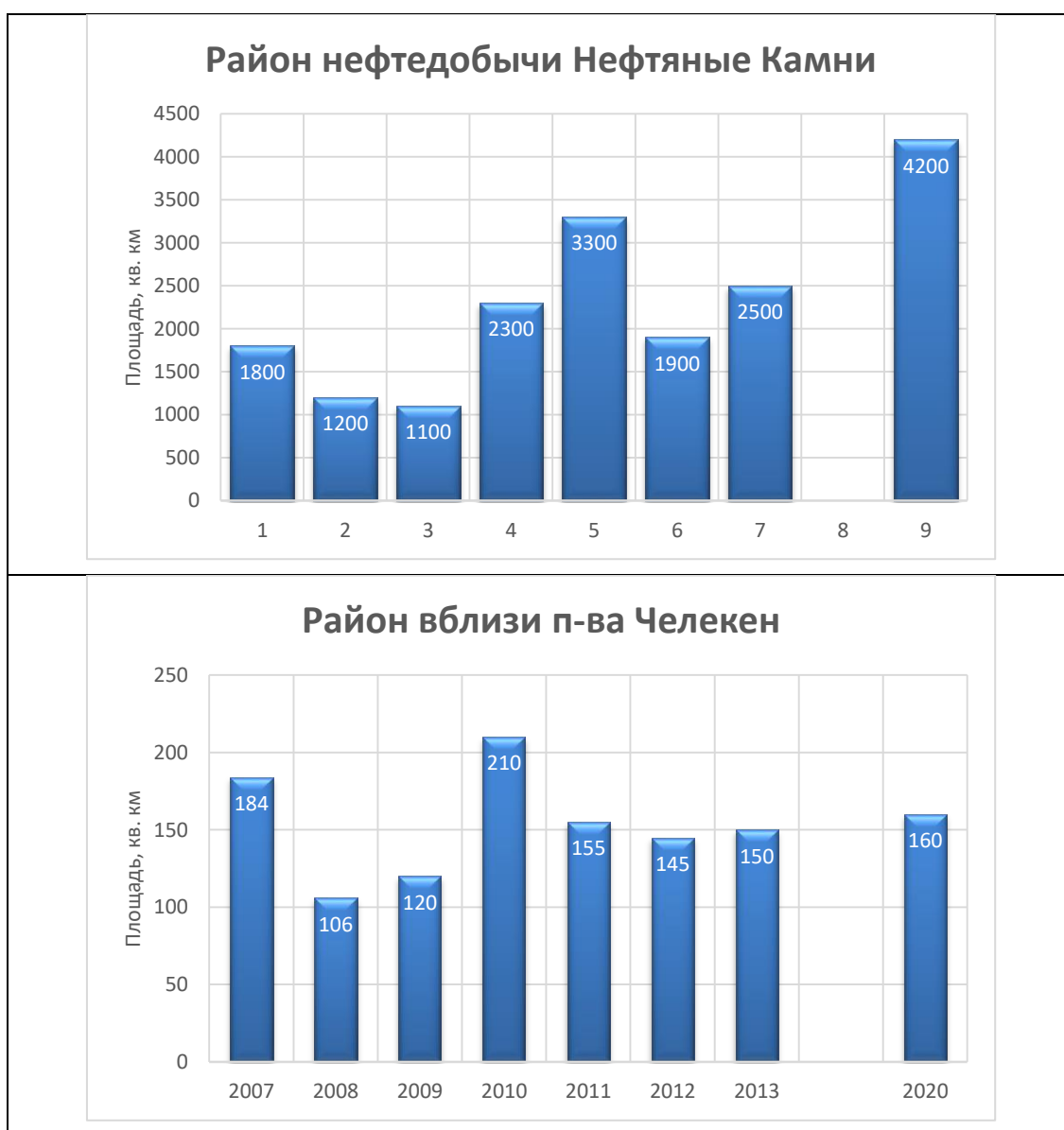




Рисунок 7 - Межгодовая изменчивость и площади акватории вблизи источника загрязнения, потенциально подверженной загрязнению, для различных районов Каспийского моря

Подтверждено наличие существенной сезонной изменчивости количества нефтяных пятен, выявляемых на спутниковых изображениях. На рис. 8 представлена гистограмма сезонной изменчивости количества естественных нефтепроявлений, выявленных вблизи точки выхода сырой нефти с морского дна в районе м. Сефид Руд в 2020 г.

Более половины всех нефтепроявлений было детектировано в течение четырех месяцев – с мая по август.

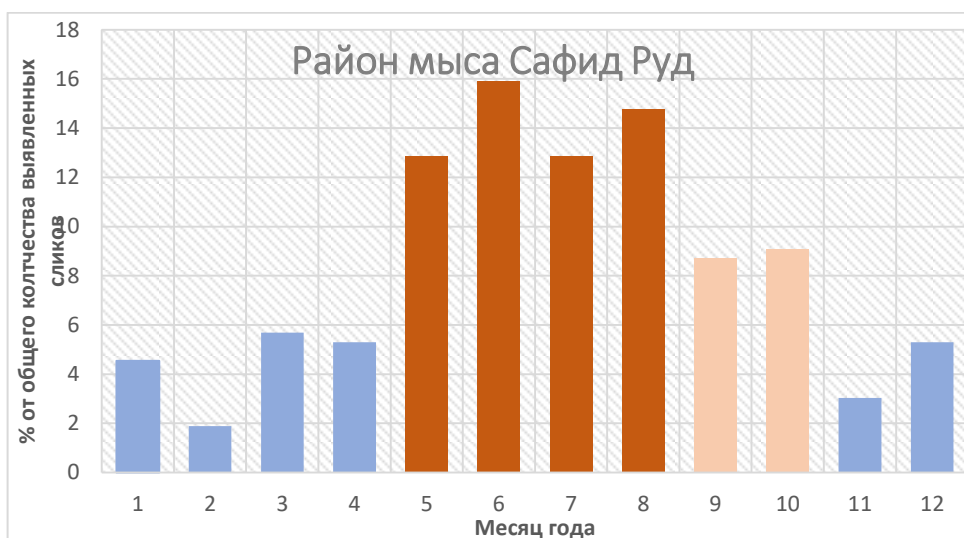


Рисунок 8 - Сезонная изменчивость частоты выявления нефтепроявлений, обусловленных выходом сырой нефти с морского дна в районе м. Сефид Руд

IV. Получены интегральные оценки нефтяных загрязнений поверхности Каспийского моря в 2007-2013 гг. и в 2020 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 3000 - 15000 кв. км. в районе нефтедобычи Нефтяные Камни, в

пределах 50 - 100 кв. км. на иранском шельфе вблизи мыса Сефид Руд и в пределах 106-210 кв. км. на туркменском шельфе вблизи полуострова Челекен.

Площадь акватории, потенциально подверженной загрязнению плёнками естественных нефтепроявлений варьирует в пределах 1100-4200 кв. км. в районе нефтедобычи Нефтяные Камни, в пределах 35-80 кв. км. на иранском шельфе вблизи мыса Сефид Руд и в пределах 106-210 кв. км. на туркменском шельфе вблизи полуострова Челекен.

V. Оценка относительного вклада каждого типа загрязнений в интегральное нефтяное загрязнение поверхности Каспийского моря в 2007-2013 гг. и в 2020 г.

Результаты, полученные в ходе второго этапа исполнения проекта свидетельствуют о том, 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. Несколько меньший вклад в общую картину загрязнения вносят естественные нефтепроявления углеводородов с морского дна. Вклад несанкционированных сбросов нефтесодержащих пленок с судов не относится к основным источникам плёночных загрязнений морской поверхности, мал по сравнению с вкладом вышеперечисленных источников загрязнения.

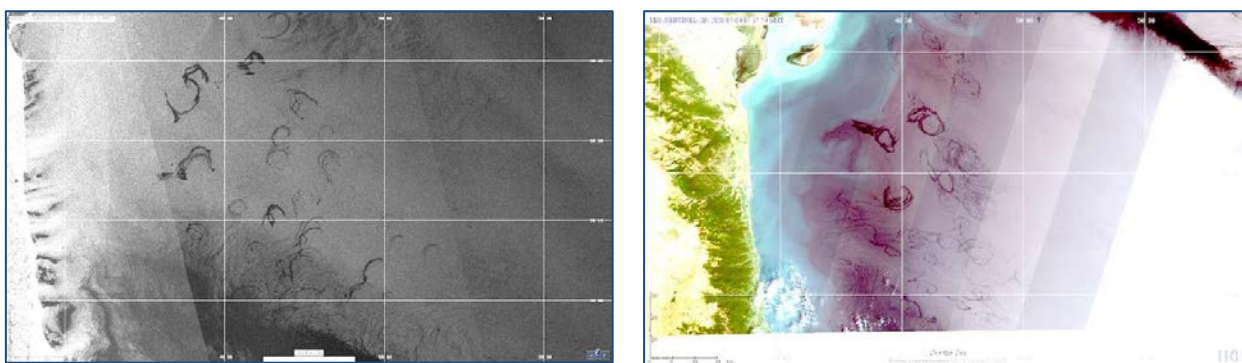
VI. Характеристики частоты и интенсивности проявлений грязевого вулканизма и естественного просачивания углеводородов с морского дна на поверхность моря в 2007-2013 гг. и в 2020 г.

В результате анализа спутниковых данных, полученных в районе Южно-Каспийской впадины, выявлены многочисленные поверхностные нефтепроявления, обусловленные грязевым вулканизмом (см. рис. 9).

На одном спутниковом изображении идентифицируется от 1-2 до нескольких десятков нефтепроявлений, связанных с грязевулканической активностью на морском дне. Площади отдельных нефтепроявлений изменяются в широком диапазоне величин – от десятых долей до первых десятков квадратных километров. Соответственно и суммарные площади нефтепроявлений на морской поверхности, обусловленных грязевулканической активностью, идентифицируемых на одном спутниковом изображении, могут изменяться от нескольких десятков до полутора – двух сотен кв. км.

Наблюдается существенная сезонная изменчивость частоты выявления нефтепроявлений, связанных с грязево-вулканической активностью на морском дне на спутниковых снимках. Более 80 процентов нефтепроявлений этого типа выявляется в теплый период года с мая по сентябрь (рис. 10).

Интегральная площадь нефтяного загрязнения морской поверхности в результате подводного грязевого вулканизма в юго-западной части Каспийского моря за год превышает тысячу кв. км.



а

б

Рисунок 9 - Грязево-вулканические проявления в Южном Каспии на спутниковых изображениях: а) ASAR Envisat. 17.09.2011. 18:33 UTC; б) MSI Sentinel-2B. 04.07.2020. 07:37 UTC

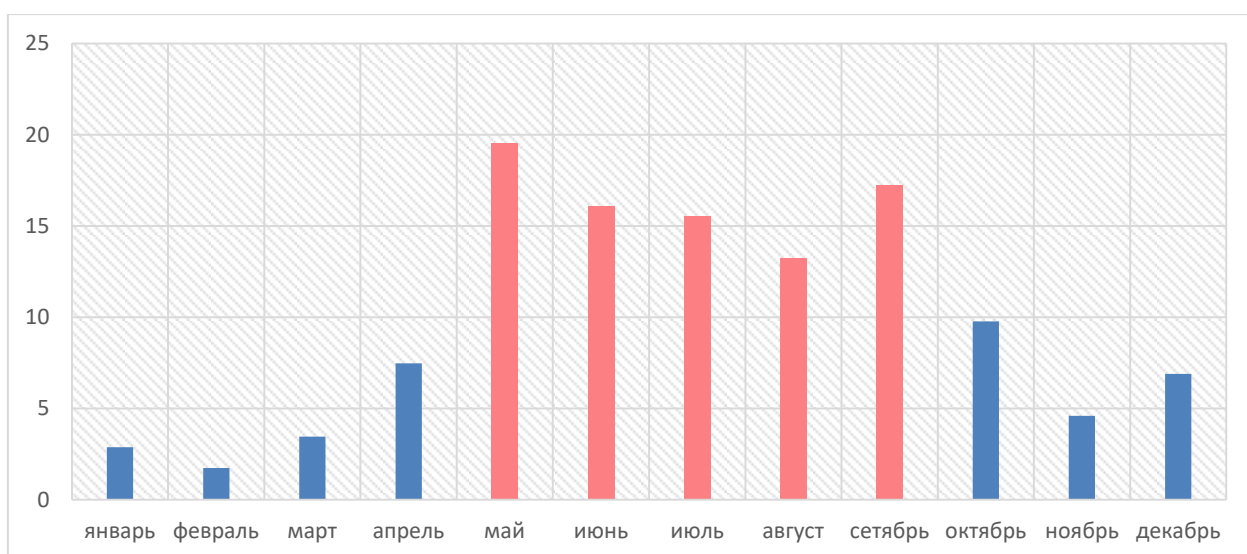


Рисунок 10 - Сезонная изменчивость частоты выявления нефтепроявлений, связанных с грязевовулканической активностью на морском дне на спутниковых снимках за отчетный период

VII. Карты районов регулярного и (возможно) аномального цветения фитопланктона в 2007-2013 гг. и 2020 г.

На основе анализа многолетних рядов спутниковых данных оптического диапазона, полученных над акваториями Южного и Среднего Каспия за 2007-2013, 2020 гг. построены карты регулярного цветения фитопланктона в Каспийском море в исследуемый период. Эти карты представляют собой набор полигонов, которые строились по каждому месяцу исследуемого года с использованием инструментария, интегрированного в STS



2007 г.



2008 г.



2009 г.



2010 г.



2011 г.



2012 г.



2013 г.



2020 г.

Рисунок 11 – Карты районов проявлений на спутниковых изображениях регулярного цветения фитопланктона в Среднем и Южном Каспии в 2007-2013 и 2020 гг., построенные в ИС STS. Выделение полигонов проводилось по каждому месяцу текущего года

Большая часть исследуемых данных за 2007-2011 гг. поступала со спутника Landsat-7. Вследствие неисправности сенсора ETM+ потребовалось использовать дополнительные инструменты для точного выделения границ с биогенными пленками. Для детальной интерпретации объектов и явлений на искаженных сценах использовалась цветовая

коррекция изображений, являющаяся частью возможностей системы STS. Также в работе были использованы подготовленные карты с концентрацией хлорофилла-а (CHL-a) следующих проектов:

- Ocean Color Web (NASA)
- Атлас биооптических характеристик (под рук. О.В. Копелевича)
- Worldview (NASA) (Карты по CHL-a доступны с 2013 года).

VIII Характеристики межгодовой, сезонной и пространственной изменчивости цветения фитопланктона в 2007-2013 гг. и в 2020 г.

В исследуемый период повышенное цветение фитопланктона Южного Каспия наблюдалось в 2009 и в 2010 гг. (Рис. 12). Наименьшие площади - в 2012 и в 2013 гг. В среднем площадь районов с регулярным цветением фитопланктона в исследуемый период оставалась постоянной, за исключением случаев 2009 и 2010 гг.

В ходе проведенного мониторинга было установлено, что большая часть интенсивного цветения в Среднем и Южном Каспии приходится на середину лета и продолжается вплоть до конца осени.

Среди исследованных участков Каспийского моря выделяются основные районы регулярного цветения фитопланктона. Как и на первом этапе исследования, этими районами остаются:

- Северный Каспий, где цветение вод начинается сразу после схода ледяного покрова и обуславливается выносами рек Волги и Урала (рис. 13);
- западное побережье Среднего Каспия в приустьевых зонах р. Терек и р. Самур;
- акватория вокруг Апшеронского полуострова, районы нефтедобычи;
- южный берег Каспийского моря, в первую очередь в районе дельты р. Сефидруд;
- юго-восточная часть Каспийского моря.

Области интенсивного цветения фитопланктона отсутствуют вдоль восточного берега Среднего Каспия.



Рисунок 12 - Аномальное цветение Южного и Среднего Каспия в 2010г.

Во время исследуемого периода аномальное цветение наблюдалось в 2009 и 2010 гг. В 2009 году на территории Южного Каспия наблюдается интенсивное цветение фитопланктона, которое начинается в начале июля, достигает своего пика в сентябре и уходит на спад в конце осени. Исходя из представленных результатов, площадь загрязнения оказалось куда меньше чем в случаях 2001 и 2005 гг.



Рисунок 13 – Цветение фитопланктона в Северном Каспии

На рис. 14 указано количество полигонов, которые оконтуривали районы с интенсивным цветением фитопланктона, выявленные на основе оптических спутниковых 2020 г. данных с облачностью 15%.



Рисунок 14 - Количество полигонов, которые оконтуривали районы с интенсивным цветением фитопланктона

Результаты по данному направлению были представлены в статье *Bonyad Ahmadi, Mehdi Gholamalifard, Tiit Kutser, Stefano Vignudelli and Andrey Kostianoy «Spatio-temporal variability in bio-optical properties of the Southern Caspian Sea: A historic analysis of ocean color data» (Q1)* и в докладе: *Князев Н.А. Мониторинг интенсивного цветения фитопланктона в Средней и Южной частях Каспийского моря на основе спутниковых оптических данных (2007-2013, 2020 гг.)* на 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 16-20 ноября, 2020, ИКИ РАН.

IX. Характеристики изменчивости и трендов основных гидрометеорологических параметров Каспийского моря: температуры поверхности моря, температуры воздуха, атмосферных осадков, облачности, уровня моря, поля ветра за 2007-2013 гг.

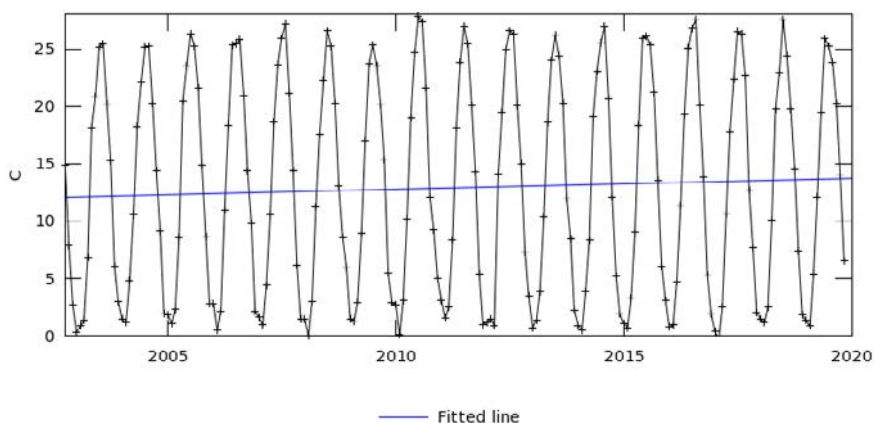
В 2020 г. проведено исследование долговременной изменчивости температуры поверхности Каспийского моря в целом и его регионов (Северного, Среднего, Южного

Каспия и залива Кара-Богаз-Гол (КБГ)) с 2002 по 2019 г. и сезонного характера особенностей региональной циркуляции моря, влияющих на пространственную изменчивость зоны апвеллинга у восточного побережья Каспия.

Были использованы: доступные через Интернет данные on-line системы NASA Giovanni в период с 31 сентября 2002 г. по 30 ноября 2019 г.: временная последовательность среднемесячных значения температуры поверхности моря (ТПМ) с пространственным разрешением 4 км (измерения радиометром MODIS-Aqua, ночные), для каждого из выбранных районов и моря в целом; карты ТПМ моря с месячным осреднением для каждого месяца теплого сезона (май–сентябрь) рассматриваемого периода 2003–2019 гг. Для удобства осреднения спутниковых данных в пределах трех районов Каспия границы между Северным и средним Каспием выбраны вдоль широты 44,5° с.ш., между Средним и Южным Каспием – вдоль 40,5° с.ш.

Линейные тренды температуры поверхности моря (ТПМ), оцененные по временным последовательностям среднемесячных значений ТПМ для районов Каспийского моря за рассматриваемый период (примерно 17 лет, Рис. 15 а–г), составили: 0,09°С/год для Северного Каспия; 0,06°С/год для Среднего Каспия; 0,10°С/год для Южного Каспия и 0,10°С/год для залива Кара-Богаз-Гол (КБГ). Тренды положительные, что свидетельствует о продолжающемся потеплении всех районов Каспия в данный период. Тренд ТПМ, средний для всего Каспия (включая КБГ), оказался равным 0,08°С/год (Рис. 15д), без КБГ – 0,07°С/год. Полученные тренды, за исключением тренда ТПМ для Северного Каспия, близки к полученным ранее для периода с января 2003 по декабрь 2017 гг.: 0,05, 0,067, 0,087 и 0,106°С/год для Северного, Среднего, Южного Каспия и залива КБГ соответственно и 0,059°С/год для Каспия в целом (без КБГ).

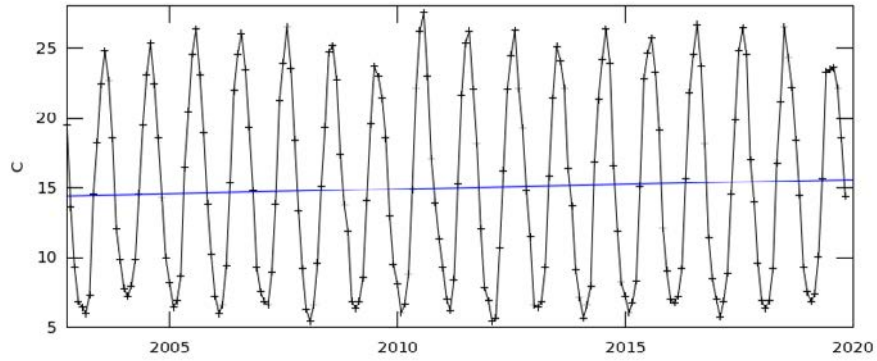
Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Night) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_NSST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2002-09-30 12.05Z - 2019-11-30 14.25.00Z, Region 46.5E, 44.5N, 53E, 47.5N



(a)

- The user-selected region was defined by 46.5E, 44.5N, 53E, 47.5N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 46.5208E, 44.5208N, 52.9792E, 47.4792N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Night) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_NSST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2002-09-30 12.05Z - 2019-11-30 14.25.00Z, Region 46.5E, 40.5N, 53E, 44.5N

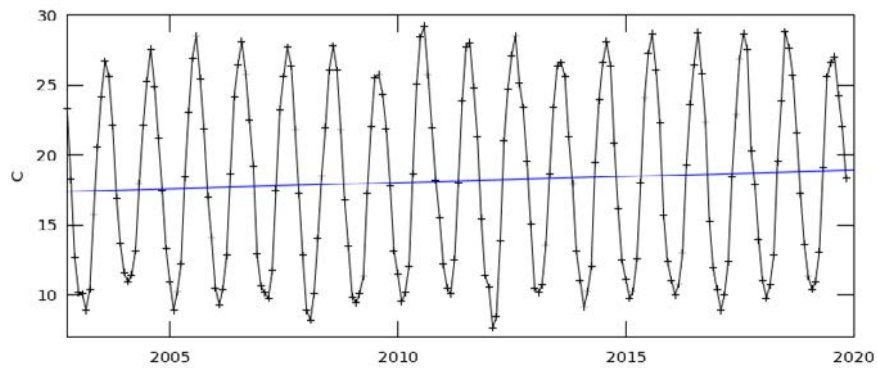


— Fitted line

- The user-selected region was defined by 46.5E, 40.5N, 53E, 44.5N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 46.5208E, 40.5208N, 52.9792E, 44.4792N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted 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_NSST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2002-09-30 12.05Z - 2019-11-30 14.25.00Z, Region 49E, 36N, 54E, 40.5N

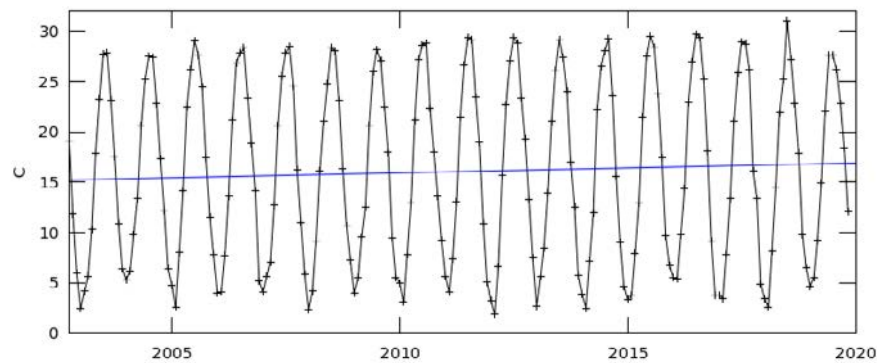


— Fitted line

- 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 subsetted 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_NSST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2002-09-30 12.05Z - 2019-11-30 14.25.00Z, Region 53E, 40.5N, 55E, 42.5N

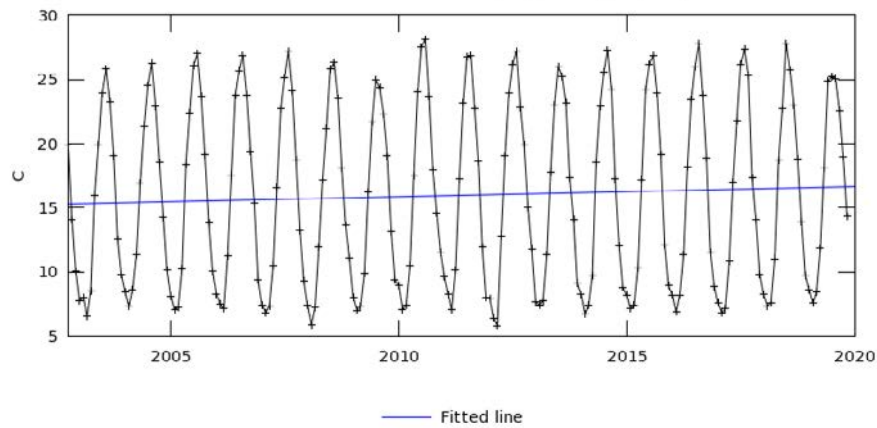


— Fitted line

- The user-selected region was defined by 53E, 40.5N, 55E, 42.5N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 53.0208E, 40.5208N, 54.9792E, 42.4792N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.

(r)

Time Series, Area-Averaged of Sea Surface Temperature at 11 microns (Night) monthly 4 km [MODIS-Aqua MODISA_L3m_NSST_Monthly_4km vR2019.0] C over 2002-09-30 12.05Z - 2019-11-30 14.25.00Z, Region 46.5E, 36N, 55E, 47.5N



(д)

The user-selected region was defined by 46.5E, 36N, 55E, 47.5N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 46.5208E, 36.0208N, 54.9792E, 47.4792N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.

Рисунок 15 - Временная последовательность значений ТПМ, средней для Северного (а), Среднего (б), Южного (в) Каспия, залива КБГ (г) и моря в целом, включая залив КБГ (д) в период с 31.09.2002 по 30.11.2019 гг.

Были проанализированы среднегодовые данные уровня Каспийского моря (УКМ) по Бакинскому футштоку с 1837 по 2018 год, любезно предоставленные академиком Р.М. Мамедовым (Институт географии НАНА, г. Баку) и А.В. Фроловым (Институт водных проблем РАН, г. Москва). Изменения среднегодовых значений уровня Каспийского моря (Рис. 16а) демонстрируют снижение УКМ с 2005 г., которое уже в 2016-2017 гг. достигло отметки -28,0 м., и в 2018-2019 гг. продолжает снижаться дальше. Отметим, что ни резкий перелом 1977 г., ни локальный максимум 1995 г., ни дальнейшее уже 25-летнее понижение УКМ никем не были предсказаны. Одним из таких факторов может являться температура в регионе Каспийского моря.

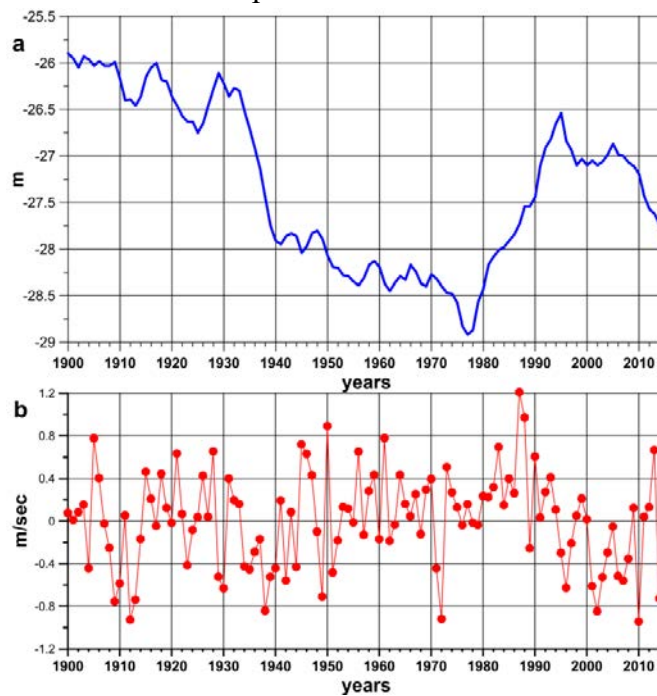


Рисунок 16 - а) Изменения среднегодовых значений уровня Каспийского моря (УКМ) по Бакинскому футштоку за 1900-2015 гг. б) Изменения средних для июля-сентября аномалий зональной компоненты (U) скорости ветра на уровне 99.5% атмосферного давления у поверхности (ЗВП) в регионе Каспийского моря за 1900-2015 гг.

Изменения средних аномалий ТВП в регионе Каспийского моря (Рис. 17а) демонстрируют резкий рост, произошедший во второй половине 1990-х. Причем и до и после этого роста декадные значения ТВП (Рис. 17а, синяя линия) менялись гораздо менее заметно. Таким образом, в середине 1990-х произошел некий климатический сдвиг средней ТВП исследуемого региона. Возможно, что этот сдвиг мог явиться одной из причин в переломе изменений уровня Каспийского моря, произошедшем в 1995 году (Рис. 17а).

Тенденция повышения среднегодовой температуры воздуха на Каспии наблюдается с 1890 г. (Терзиев и др., 1992; Костяной и др., 2014), что может быть вызвано глобальным потеплением климата. На фоне продолжительных (вековых) изменений температуры (Рис. 17а, черная линия) наблюдаются их более короткопериодные колебания – межгодовые (периоды 1-10 лет) и междекадные (периоды 10-100 лет). За 15-летний период с 2003 по 2017 гг. положительный линейный тренд температуры воздуха оказался равным примерно $0.04^{\circ}\text{C}/\text{год}$, т.е. несколько меньшим, чем полученный ранее для периода 1979–2011 гг. $+0.067^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Это хорошо демонстрирует график накопленной суммы аномалий ТВП после удаления линейного тренда (Рис. 17а, зеленая линия). Он растет до конца 1920-х, затем снижается до середины 1930-х, и затем снова растет до конца 1940-х. Затем он медленно снижается до конца 1960-х, но затем это снижение ускоряется вплоть до середины 1990-х, после чего график накопленной суммы начинает резко повышаться. Здесь нужно отметить, что накопленная сумма выступает своего рода математической моделью «водохранилища» для аномалий, и помогает выделить их междекадные изменения.

По графику межгодовых колебаний (Рис. 17а, красная линия) видно, что около 1930 и 1970 годов происходили изменения колебаний ТВП на временных масштабах 1-10 лет. Исследована температура воздуха на высоте 2 метра от поверхности (ТВП).

Помимо ТВП на испарение и изменения УКМ может оказывать влияние скорость ветра в регионе. Проанализированы средние аномалии зональной компоненты (U) скорости ветра на высоте приблизительно 42 метра от поверхности Каспийского моря (далее ЗВП – зональный ветер у поверхности) (Рис. 18а).

С середины 2000-х начинают наблюдаться отрицательные аномалии ЗВП. Таким образом, междекадные изменения ЗВП хорошо согласуются с изменениями УКМ (Рис. 16а) – при длительных положительных аномалиях ЗВП УКМ растет, при отрицательных понижается. Учитывая, что с востока Каспийское море окружено пустынями, то ослабление при положительных аномалиях ЗВП сухого и жаркого восточного ветра из пустынь и должно приводить к уменьшению испарения с акватории Каспийского моря и

росту его уровня, и наоборот, отрицательные аномалии ЗВП должны приводить к усилению восточного ветра, и, как следствие, к увеличению испарения и понижению уровня моря.

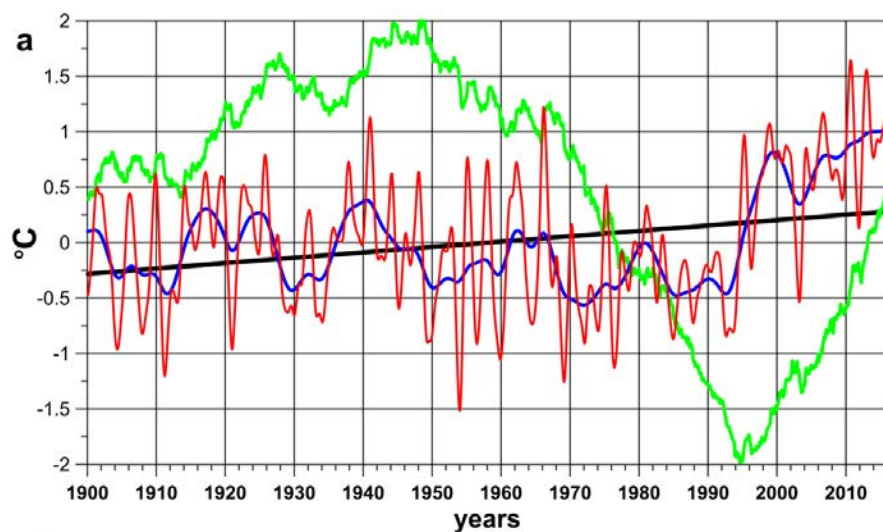


Рисунок 17 - а) Изменения средних аномалий температуры воздуха у поверхности (ТВП) в регионе Каспийского моря после применения 2-летнего (красный) и 7-летнего (синий) фильтров Баттерворта, их линейный тренд (черный) и накопленная сумма аномалий после удаления линейного тренда (зеленый).

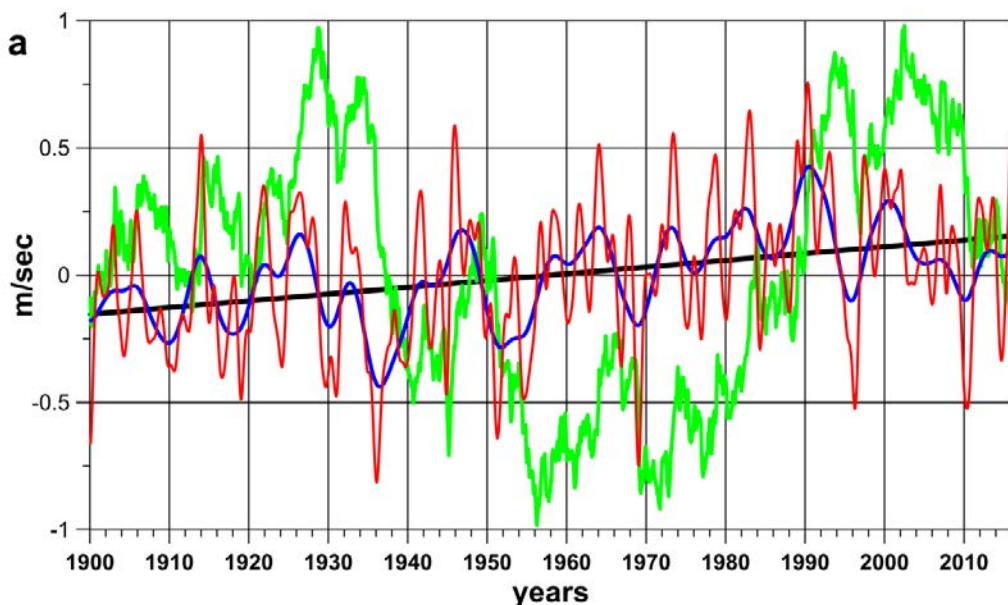


Рисунок 18 - а) Изменения средних аномалий зональной компоненты (U) скорости ветра на уровне 99.5% атмосферного давления у поверхности (ЗВП) в регионе Каспийского моря (направление оси измерения выбрано с запада на восток) после применения 2-летнего (красный) и 7-летнего (синий) фильтров Баттерворта, их линейный тренд (черный) и накопленная сумма аномалий после удаления линейного тренда (зеленый)

Поскольку изменения УКМ зависят не просто от испарения, а от видимого испарения (разность испарения и осадков), то имеет смысл рассмотреть климатические изменения суммарного количества осадков за месяц в регионе Каспийского моря (Рис. 19).

Виден положительный линейный тренд количества осадков, что согласуется с ослаблением восточного ветра в регионе (18). На фоне линейного тренда наблюдаются продолжительные положительные аномалии количества осадков в середине 1990-х и 2000-х, которые соотносятся с локальными максимумами 1995 и 2005 гг. на графике изменений УКМ (Рис. 16). Также с конца 1970-х по середину 1990-х наблюдается увеличение количества осадков, что хорошо согласуется с ростом УКМ в этот период.

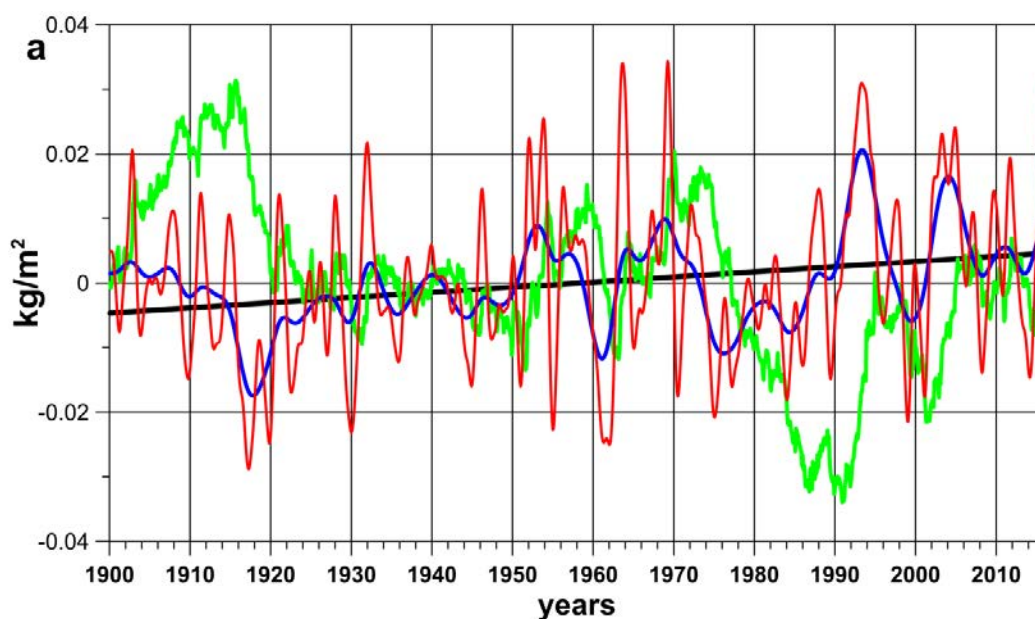


Рисунок 19. Изменения аномалий суммарного количества осадков за месяц в регионе Каспийского моря после применения 2-летнего (красный) и 7-летнего (синий) фильтров Баттерворта, их линейный тренд (черный) и накопленная сумма аномалий после удаления линейного тренда (зеленый).

Результаты по данному направлению были опубликованы в статьях Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А. «Динамика зоны апвеллинга у восточного побережья Каспия в сезонном цикле (май–сентябрь) по спутниковым среднемноголетним температурным данным (2003–2019 гг.)», Серых И.В., Костяной А.Г. «О влиянии Атлантического и Тихого океанов на изменение климатических параметров Каспийского моря» и Lebedev S.A., Kostianoy A.G. «Investigation of seasonal and interannual variability of water exchange through the Middle Caspian based on satellite altimetry»

Х. Карты-схемы границ ледяного покрова в Каспийском море за 2007-2013 гг. и 2020 г., определение площадей, занятых льдом, и выявление трендов в сроках льдообразования и очищения ото льда.

В 2020 г. на основе вновь поступивших радиолокационных данных за период 2007-2012 гг., проводилось уточнение результатов исследования ледяного покрова, проведенного в 2019 г. за весь период с 1999 по 2019 г. Существенных различий не выявлено.

Были проанализированы все безоблачные изображения спектрорадиометров MODIS-Terra, данные высокого разрешения MSI-Sentinel-1A, -B, SAR-C Sentinel-2A, -2B за период с 1 ноября 2019 г. по 31 марта 2020 г. Кроме того, за тот же период были построены графики

временной изменчивости ежедневной температуры воздуха (на высоте 2 м от поверхности) и среднемесячной температуры поверхности воды для Северного Каспия по данным атмосферного реанализа MERRA-2 для объяснения аномальной (низкой) ледовитости зимы 2019/2020 года. Анализ изменчивости температуры воздуха над Северным Каспием с 1 ноября 2019 г. по 31 марта 2020 г. показал, что появление первого льда на спутниковом изображении 18 ноября связано с резким охлаждением воздуха с $3,5^{\circ}\text{C}$ до -6°C за трое суток. В дальнейшем достаточно ровная температура воздуха в диапазоне от 0°C до -4°C приводила к поддержанию достаточно узкой полосы льда вдоль северо-восточного берега Северного Каспия. Полное исчезновение льда произошло к 26 февраля 2020 г., когда температура воздуха резко выросла сначала до 0°C к середине февраля, а затем и до $+11^{\circ}\text{C}$ к 1 апреля 2020 г.

Максимальная площадь ледяного покрова наблюдалась в середине января, она составила 36 тыс. км². Для определения площади ледяного покрова использовались инструменты, внедренные в STS: формирование цветосинтезированных изображений в различных каналах, например для различения льда и облачности, создание полигонов (окопирование интересующей области) с последующим сохранением в базу данных явлений, кластеризация (рис. 20).

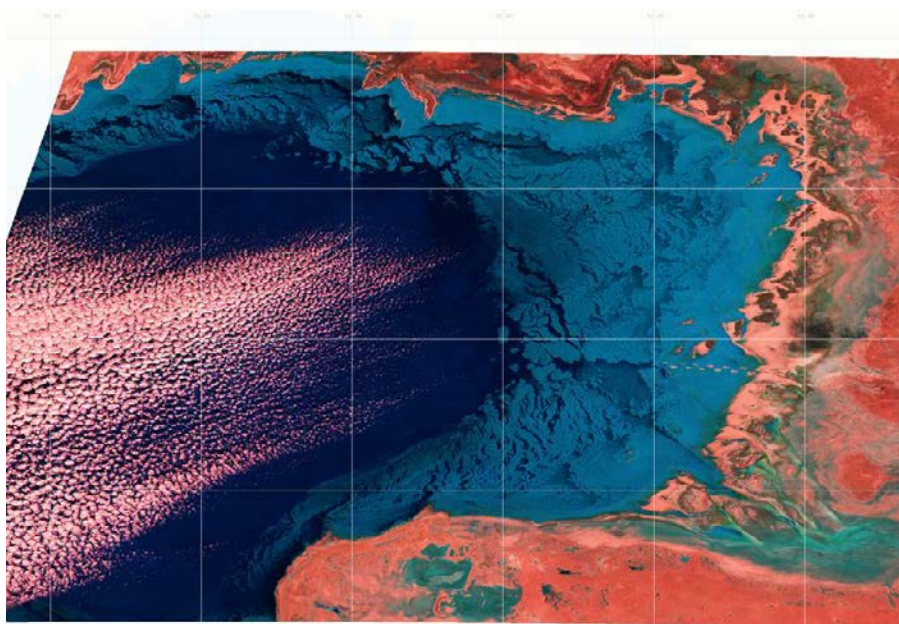


Рисунок 20 – Характерный ледяной покров в зимний период 2019/2020 гг. в Северном Каспии. Фрагмент цветосинтезированного изображения (каналы 12, 8, 4) MSI Sentinel-2A от 22 ноября 2019 г.

XI. Карты-схемы выявленных по спутниковым радиолокационным и оптическим данным за 2007-2013 гг. и 2020 г. элементов циркуляции вод Каспийского моря (вихревые структуры, внутренние волны, сгонно-нагонные явления), оказывающих влияние на перенос загрязнений. Статистика пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости гидродинамических процессов.

Выявление вихревых структур в Каспийском море по спутниковым оптическим данным за 2007-2013 гг. и 2020 г.

С целью исследования гидродинамических процессов в Каспийском море были проанализированы все доступные спутниковые данные высокого разрешения в оптическом диапазоне для периода с 2007 по 2013 гг. и отдельно 2020 г.

Всего было проанализировано 6891 сцены высокого разрешения в оптическом диапазоне. Для примера, на рис. 21 представлена гистограмма распределения спутниковых данных за весь период исследований в южной части Каспийского моря.

Отметим существенное превосходство 2020 года по количеству спутниковых сцен - было получено в 5,5 раза больше оптических данных, чем в предыдущие года. Это связано с тем, что пара спутников Sentinel-2a (MSI) и Sentinel-2b (MSI) намного лучше покрывают акваторию Каспийского моря, а так же повторяемость съемки в 2 раза чаще, чем у предшественников. В связи с неисправностью прибора Scan Line Corrector (SLC) в инструменте ETM+ космического аппарата Landsat 7, в период с 2007 до апреля 2008 года присутствуют пробелы в спутниковых данных. С апреля 2008 по октябрь 2011 при повторном включении, последний для себя временной отрезок, проработал Landsat 5 (TM), и до марта 2013 года не было ни одного снимка в оптическом диапазоне высокого пространственного разрешения. Во второй половине 2013 года появились первые данные со спутника Landsat-8 (OLI). В 2020 году к ним добавились данные с Sentinel-2a (MSI) и Sentinel-2b (MSI).

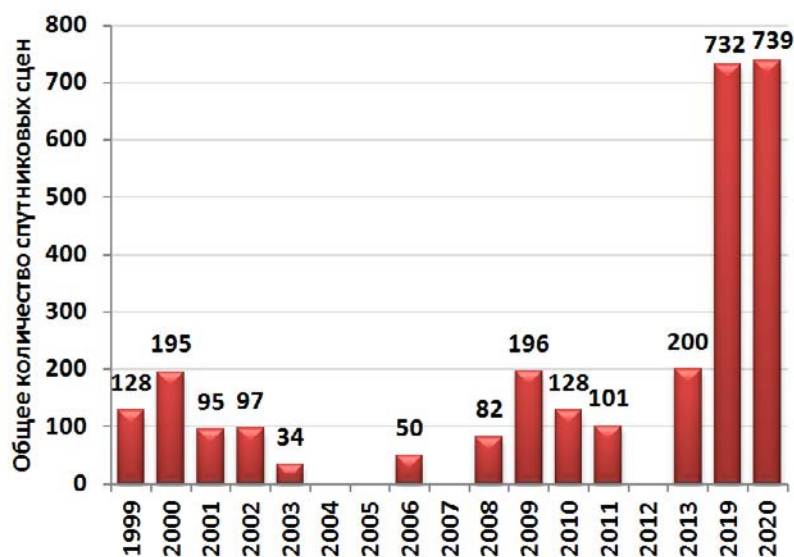


Рисунок 21 - Гистограмма распределения спутниковых данных за весь период исследований: с 1999 по 2013 гг. и 2019-2020 гг. в южной части Каспийского моря

Синоптические условия над акваторией Каспийского моря определяются частой сменой воздушных масс во все сезоны года. Поэтому около 50% сцен от полученных данных покрыты облачностью. Анализ показал, что среди оставшихся безоблачных сцен в среднем на 20-30 % сценах встречаются вихревые структуры. Было произведено картирование основных областей, где наблюдалось образование вихревых структур (рис. 22).

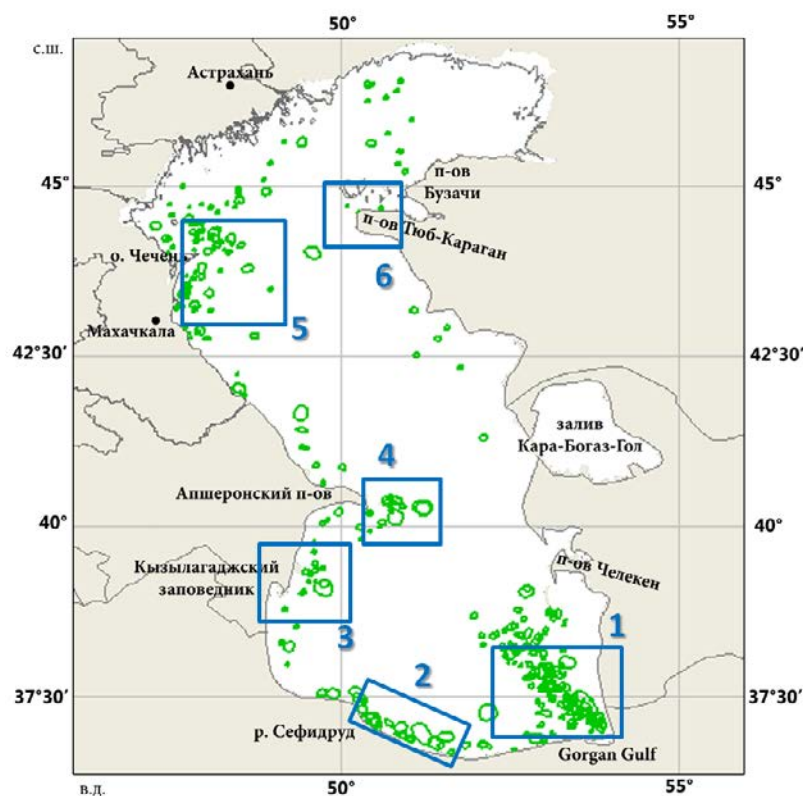


Рисунок 22 - Сводная карта поверхностных проявлений вихревых структур в акватории Каспийского моря, составленная на основе спутниковых данных видимого диапазона за 2007-2013 гг. и 2020 г.

Было выявлено, что вихревые структуры в основном встречались в шельфовой зоне Каспийского моря. Более интенсивное вихреобразование наблюдается в Южном Каспии. 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. 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. Сардобрауд. На периферии плюмов этих рек в процессе смешения речной и морской воды достаточно часто образуются вихревые структуры. К третьему району можно отнести район Кызылагаджского заповедника - в прибрежной зоне фиксируется периодическое образование вихревых структур, что вероятно, связано так же с поступлением пресного стока и сложной береговой топографией. В среднем Каспии наблюдается яркая асимметрия - вихревые структуры преимущественно образуются только вдоль западного побережья. Трассерами так же является речной сток и пресные воды водохранилищ. Так, отмечается периодическое вихреобразование в районе острова Чечень, Архангельского 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 покрыта 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. Редкие случаи образования вихревых структур были обнаружены в Мангышлакском заливе, напротив мыса Тюб-Караган и мыса Урдюк.

Выявление вихревых структур в Каспийском море по спутниковым оптическим данным за 2007-2013 гг. и 2020 г.

Одним из основных гидродинамических процессов в море, оказывающем серьезное влияние на распространение поверхностных загрязнений в поверхностном и приповерхностном слое моря, являются вихревые образования различных пространственных и временных масштабов. Вихревые образования существенно влияют на характер распространения поверхностных пассивных пленок, во многом определяя их скорость и направление распространения по поверхности моря. Сложность воспроизведения подобных нелинейных гидродинамических процессов при помощи численных моделей объясняет необходимость изучения вихревых процессов статистическими методами путем обнаружения частоты встречаемости данных процессов в акватории моря и изучения пространственной изменчивости проявления данных процессов в морях.

Существует несколько причин образования вихрей на поверхности моря, наиболее часто встречаемые из которых: неоднородности поля ветра над морской поверхностью, прохождение мощных атмосферных процессов под акваторией и процесса огибания морскими течениями выдающихся в море мысов. Считается, что процессы вихреобразования существуют практически повсеместно в Мировом океане.

Вихревые образования на поверхности моря могут обнаруживаться при помощи дистанционных методов исследования водной поверхности и в частности с использованием спутниковых изображений, получаемых в радиолокационной части электромагнитного спектра. Как правило, на спутниковых изображениях в радиолокационной части спектра вихревые образования обнаруживаются в поле сликовых полос в районах с активным цветением фитопланктона, наличия поверхностно-активных веществ и других пассивных трассеров, которые могут влиять на величину поверхностного натяжения морской поверхности. На рисунке 23 представлен пример обнаружения серии вихревых образований в Каспийском море по данным спутника Envisat ASAR.

На спутниковом изображении отчетливо видны обширные вихревые процессы на фоне обширных областей акватории, где присутствует наличие поверхностно-активных веществ. Отличительной особенностью обнаружения вихревых процессов по данными радиолокационной съемки является обширность областей, где наблюдаются вихревые процессы. Как правило, по радиолокационным изображениям редко наблюдаются отдельные вихри, но прослеживаются огромные области непрерывной вихревой активности.

Для решения задачи по изучению сезонной и годовой изменчивости вихревой активности по данным радиолокационных изображений в период 2007-2012 годов были построены гистограммы распределения процентного соотношения количества спутниковых изображений, на которых в каждом месяце в Каспийском море были обнаружены вихревые процессы на поверхности моря от общего количества спутниковых

изображений. На рисунке 24 представлены результаты работы за каждый год в период 2007 – 2012 гг с указанием общего количества спутниковых изображений ежемесячно и процента спутниковых изображений, на которых были определены вихревые процессы.

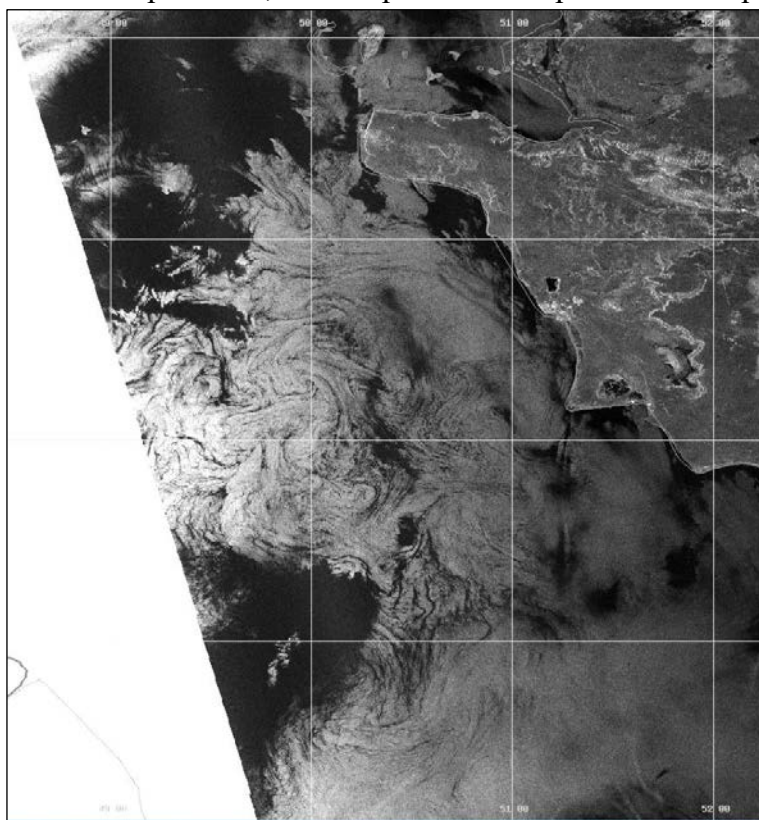


Рисунок 23 - Пример отображения цепочки вихревых образований по данным спутника Envisat ASAR

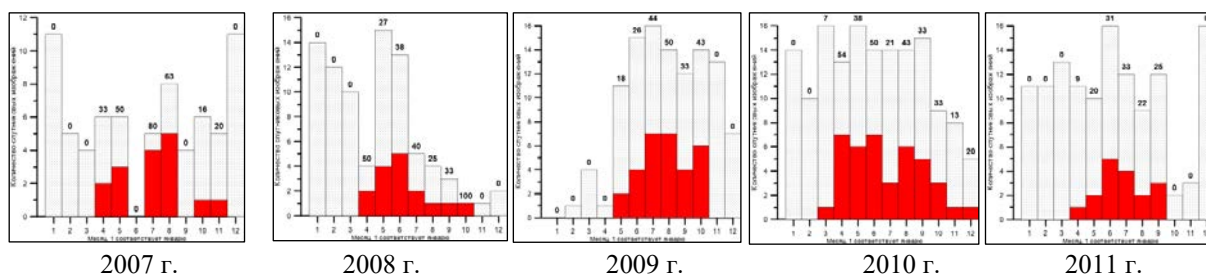


Рисунок 24 - Общее количество спутниковых изображений ежемесячно за 2007-2011 гг. и количество спутниковых изображений (в процентах), на которых были определены вихревые процессы

Основным источником радиолокационных спутниковых изображений в указанный период являлся сенсор ASAR Envisat, миссия которого была закончена в апреле 2012 года. Отличительными особенностями сезонной изменчивости вихревых процессов по данным спутниковых радиолокационных изображений является тот факт, что наиболее активно вихревые процессы проявляются именно в летний период (май-октябрь). В среднем процент спутниковых изображений в летнее время, на которых присутствуют вихри, достигает 30-50%, однако в некоторые месяцы может достигать и 80%. При этом в зимний период (ноябрь-апрель) количество зафиксированных изображений с наличием вихревой активности минимально. В период 2007-2012 годов временная изменчивость вихревой активности имеет схожий характер от года к году с выраженным максимумом в июне-августе и постепенным уменьшением процента спутниковых изображений с вихревой активностью к весеннему и осеннему периоду. При этом помимо сезонной

изменчивости была выявлена и межгодовая изменчивость статического обнаружения вихревых процессов в Каспийском море. Было показано, что, например, в 2011 году частота встречаемости вихревых образований на радиолокационных спутниковых изображениях была существенно, нежели в предыдущие годы даже при том, что общее количество спутниковых изображений было больше, чем в предыдущие годы. Эта разница может объясняться двумя причинами: во-первых, возможным существованием механизмов, влияющих на межгодовую изменчивость вихревой активности в Каспийском море и, во-вторых, методикой определения вихревых структур по данным радиолокационных спутниковых изображений. Как известно, поверхностно-активные биогенные и техногенные пленки, в поле которых, как правило, и определяются вихревые процессы, сохраняются на поверхности моря при средней скорости ветра не более 5 м/с. При более активной ветровой ситуации в поверхностном слое атмосферы пленки разрушаются, и радиолокационное спутниковое изображение не может передать признаки вихревой активности на поверхности акватории.

Помимо выявления временной изменчивости вихревой активности в Каспийском море была дополнительно проведена работа по выявлению ее пространственной изменчивости по акватории Каспийского моря и выявления основных районов вихреобразования. Для решения указанной задачи в среде STS проводилось картирование участков с активной вихревой деятельностью по данным радиолокационных спутниковых изображений с сенсора Envisat ASAR в период 2007 – 2012 гг. Как было указано выше процессы вихреобразования, определяемые по данным спутниковой радиолокации, представляют собой обширные области вихревой активности, что отражено и на рисунке 25.

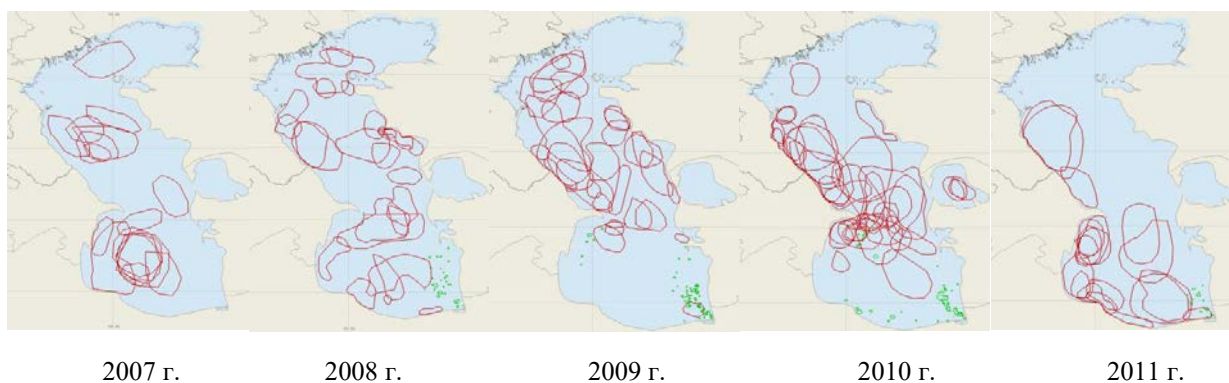


Рисунок 25 – карты-схемы областей поверхностных проявлений вихревой активности в разные годы

Были определены основные районы вихреобразования в Каспийском море. Наиболее активными районами можно назвать следующие географические регионы Каспийского моря:

1. Район Среднего Каспия между о. Чечень и полуостровом Мангышлак. В указанном районе вихревая деятельность крайне активная и была обнаружена в каждом из исследуемых интервалов времени. Наиболее часто вихри обнаруживались в открытой части моря в виде обширных районов вихреобразования, а также вдоль Российского западного побережья Каспийского моря и менее выраженного района восточного побережья Каспийского моря у полуострова Мангышлак.
2. Район Апшеронского полуострова и открытой части Среднего Каспия на линии Нефтяные Камни - Кара-Богаз-Гол. Район Апшеронского полуострова один из наиболее активных районов вихреобразования в Каспийском море. Вихревая активность в данном районе наблюдалась и севернее и южнее и мористее полуострова. В данном районе вихри

наблюдаются в поле радиолокационного сигнала из-за активного летнего цветения фитопланктона, так и вследствие частых разливов нефти в районе Нефтяных Камней.

3. Район Южного Каспия, преимущественно в западной части моря, где также можно выделить два основных района: обширные территории вихреобразования в мористой части моря в поле цветения фитопланктона и прибрежный район Южного Каспия, где преимущественно наблюдаются небольшие вихри, распространяющиеся вдоль морского побережья.

Помимо выделения основных районов вихреобразования было показано, что существует и значительная пространственная изменчивость от года к году в наблюдениях вихревых процессов в Каспийском море, что также представлено и на рисунке 3. Например: в 2011 году наиболее активным районом вихреобразования был Южный Каспий и районы южнее Апшеронского полуострова, в то время как в 2010 году (этот год отличался наибольшим количеством зафиксированных случаев обнаружения процессов вихреобразования) наиболее активным районом был все-таки Средний Каспий в районе Нефтяных Камней и Российского побережья Республики Дагестан. В тоже время в 2009 году наблюдался максимум вихревой активности в северной части Среднего Каспия, в то время как в Южном Каспии не было зафиксировано практически ни одного случая обнаружения вихревой активности по данным радиолокационных спутниковых изображений.

Внутренние волны

На основе радиолокационных и оптических спутниковых данных за 2007-2013 гг. и 2020 г. проведено картирование поверхностных проявлений внутренних волн (ППВВ) в Каспийском море (рисунок 26). Существенных различий с результатами первого года работы над проектом не выявлено. ППВВ на спутниковых изображениях наблюдались в основном в Среднем Каспии у его восточного берега, и были приурочены к изобатам – 50-100м. В весенний период конец апреля- май ППВВ наблюдались в Южном Каспии у западного побережья.



Рисунок 26 - Карта-схема поверхностных проявлений внутренних волн, выявленных на радиолокационных (красные) и оптических (зеленые) изображениях за период 2007-2012 и 2020гг.

Апвеллинг

Анализ среднемноголетних и среднемесячных (май–сентябрь, 2003–2019 гг.) карт ТПМ в зоне прибрежного апвеллинга у восточного побережья Каспия позволил проследить характерные для этой зоны изменения границ в меридиональном и зональном направлениях и смещение положения очагов апвеллинга в сезонном цикле, а также установить причины такого смещения с учетом полученной информации о месяцах наиболее частого проявления элементов мезомасштабной циркуляции вод моря, влияющих на протяженность зоны апвеллинга вдоль берега.

Установлено, что положение северной границы зоны апвеллинга, меняющейся на среднемноголетних картах ТПМ от $44,3^\circ$ с.ш. в июне–июле до 45° с.ш. в августе–сентябре, зависит от (1) вторжения (преимущественно в июне–июле) струй теплых вод из Северного Каспия в Средний Каспий вдоль западного побережья п-ова Тюб-Караган и исключают локальный апвеллинг, и (2) характерного для августа–сентября образования на фронте апвеллинга у побережья Тюб-Карагана циклонических вихрей, переносящих трансформированные воды апвеллинга на запад и юго-запад на расстояния до 100 км. Смещение южной границы зоны на север с $39,4^\circ$ с.ш. в мае и июне на $40\text{--}40,6^\circ$ с.ш. в июле–сентябре и областей минимальных температур с $41\text{--}42^\circ$ с.ш. в июне на $\approx 42,6\text{--}43,5^\circ$ с.ш. в июле–сентябре определяется вторжением языков южно-каспийских вод в Средний Каспий вдоль побережья в пределах примерно 50-метровой изобаты, наиболее частым – в июле–октябре (при восточных ветрах).

Сгонно-нагонные явления

На основе анализа оптических и радиолокационных данных высокого пространственного разрешения было показано, что для четкого определения зон осушки дна или затопления прибрежной зоны в результате сгонно-нагонных явлений необходимо использовать коротковолновые инфракрасные каналы, например, 11 и 12 спектральные каналы MSI, или 6, 7 каналы OLI. В проведенном тестировании различных комбинаций каналов, наилучший результат был получен с использованием «теплого» канала (Red – 12, Green – 8, Blue – 4) (рис. 27 слева). Для выделения области осушки дна и определения его площади использовался инструмент «классификация» (рис. 27 справа).

Использование радиолокационных изображений, которые имеют близкие характеристики по пространственному разрешению к оптическим данным и не имеют влияния облачности, не позволили надежно выявлять зоны осушки дна или затопления берегов из-за специфики отражающей способности подстилающей поверхности. Совместный анализ радиолокационных и оптических данных показал, что РЛИ без сопутствующей оптической спутниковой информации, метеорологических данных и данных уровнемерных постов не могут быть использованы для мониторинга сгонно-нагонных явлений. Именно по этой причине наличие метеорологических данных (скорость и направление ветра) на метеостанциях, наиболее близко расположенным к тем или иным участкам побережья Северо-восточного Каспия имеет чрезвычайно важное значение для корректного анализа спутниковой информации.

В результате анализа ветровых условий, были определены периоды времени, когда сгонно-нагонные явления могли быть наиболее вероятными.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

- (1) На северном побережье Северо-восточного Каспия (по метеостанции в Атырау) наблюдается в 2,5 раза больше нагонов, чем сгонов.
- (2) На южном побережье Северо-восточного Каспия (по метеостанции в Форт-Шевченко) наблюдается чуть больше нагонов (9), чем сгонов (7).

- (3) На восточном побережье Северо-восточного Каспия (по метеостанции в Жана Каратон) наблюдается чуть больше сгонов (10), чем нагонов (8).
- (4) Больше всего сгонов/нагонов (18) наблюдается на восточном побережье Северо-восточного Каспия.
- (5) В среднем в месяц наблюдается 1 нагон и 1 сгон на каждом участке побережья, за исключением северного побережья, где сгонов в 2-3 раза меньше, чем в других местах. Количество сгонов/нагонов на каждом участке побережья варьируется от 1 до 4 в месяц.
- (6) Средняя продолжительность нагонов – 4 суток по всем районам, сгонов – 4 суток, однако, на северном побережье, где они редки, средняя продолжительность – 5 суток, на южном берегу – 4 суток, и на восточном – 3.5 суток.
- (7) Отсутствие синхронности в сгонах/нагонах на противоположных сторонах Северо-восточного Каспия, а также наблюдение этих явлений в разные даты на разных участках побережья говорит о том, что они вызываются гораздо чаще локальными ветрами, чем едиными крупномасштабными атмосферными процессами над всем Северным Каспием.
- (8) В районах частично покрытых льдом сгонно-нагонные явления должны наблюдаться в ослабленном виде, что также чрезвычайно интересно с научной точки зрения, и что требует дальнейшего изучения.
- (9) Битый лед и отдельные ледяные острова, а также сплочение или разрежение льда у берега могут служить трассерами сгонно-нагонных явлений.

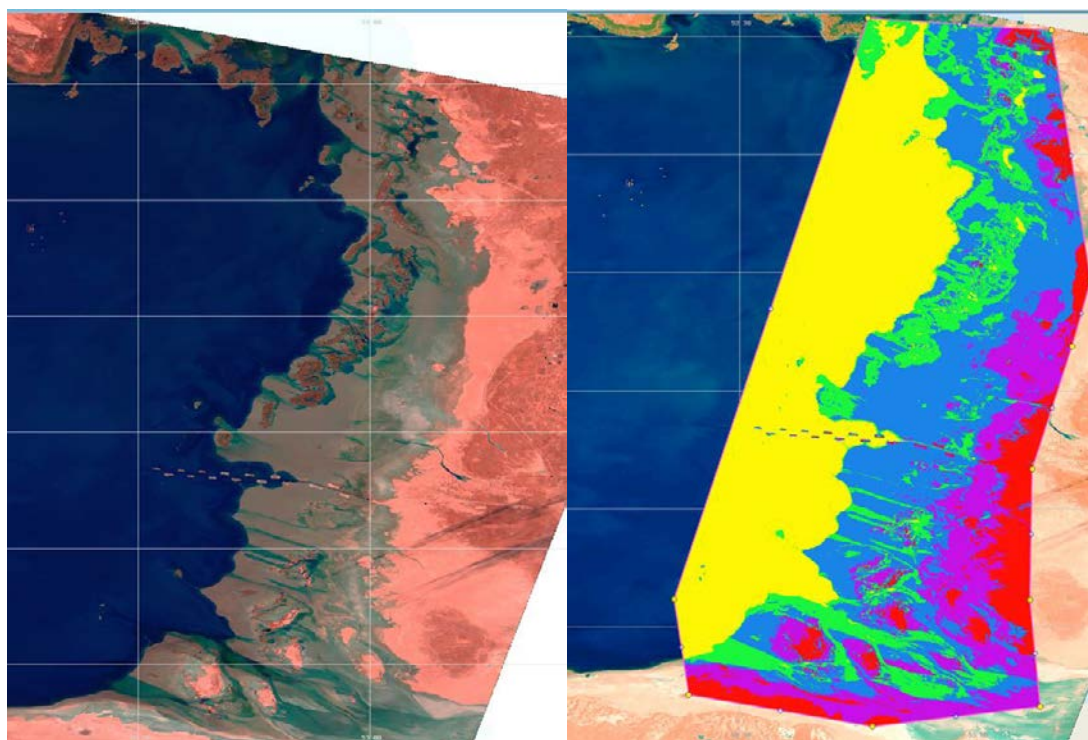


Рисунок 27 – Использование инструментов STS для выделения области осушки дна.

Слева - формирование цветосинтезированного изображения, полученного с помощью MSI Sentinel-2 09 марта 2020г. (каналы R – 12, G – 8, B – 4). Область осушки светло-коричневая.

Справа – результат классификации для того же изображения. Область осушки голубая

Результаты по исследованию изменчивости элементов циркуляции вод Каспийского моря представлены в статьях: Лаврова О. Ю., Костяной А. Г. «Использование современных спутниковых данных для мониторинга сгонно-нагонных явлений» и Nazirova K.R. «Mapping vortex structures in the Caspian Sea», а также в докладах на международных конференциях EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, SPIE Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2020, September 21-26, 2020, Free Digital Forum; и Восемнадцатая

XII. Элементы изменчивости экологического состояния Каспийского моря, тренды, выявленные на основе сравнения результатов, полученных на первых двух этапах исполнения проекта

1) По результатам сравнения полученных в ходе второго этапа исполнения проекта параметров нефтяного загрязнения морской поверхности (интегральные оценки нефтяных загрязнений, их межгодовая, сезонная и пространственная изменчивость, относительный вклад каждого типа загрязнений в интегральное нефтяное загрязнение), восстановленные на основе спутниковых данных за 2007-2013 гг. и 2020 г. с аналогичными результатами, полученными в ходе первого этапа исполнения проекта по данным за 1999-2006 гг. и за 2019 г. можно утверждать, что соотношение вкладов различных типов загрязнений в интегральное нефтяное загрязнение поверхности Каспийского моря существенно не меняется: основной вклад в интегральное нефтяное загрязнение вносит непрерывное загрязнение морской поверхности нефтью в районе Нефтяных Камней, а также грязевулканическая активность на морском дне в районе Южно-Каспийской впадины. Несколько меньший вклад в общую картину загрязнения вносят естественные нефтепроявления углеводородов с морского дна. Несанкционированные сбросы нефтесодержащих пленок с судов не являются основным источником плёночных загрязнений морской поверхности, однако их объёмы с каждым годом увеличиваются.

2) Исследование изменчивости биооптических свойств поверхностных вод Южного Каспия, проведенное с использованием архива спутниковых данных Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS) и спектрорадиометра среднего разрешения (MODIS) показало общее увеличение концентрации Chl-a на 0,3358 мг м⁻³ в течение 1998–2015 гг. (годовой прирост 0,018 мг м⁻³ в год) и четыре сильнейших события цветения водорослей, сопровождающиеся аномальным повышением концентрации Chl-a, которые произошли в августе 2001 г., сентябре 2005 г., сентябре 2009 г. и августе 2010 г.. Линейная модель показала, что концентрация Chl-a в северной и средней части Южного Каспия с задержкой на 1 месяц реагировала на изменения коэффициента ослабления. Анализ выявили резкое снижение концентрации Chl-a в течение 2011–2015 гг. и показал высокую корреляцию с коэффициентом мутности и ослабления в южном регионе. Проведенное исследование может быть использовано в качестве основы для моделирования изменений качества воды и биооптических показателей в Южном Каспии.

XIII. Новые инструменты информационной системы «See the Sea».Карты различных типов нефтяных загрязнений морской поверхности, выявленных по спутниковым данным за 2007-2013 гг. и за 2020 г.

Разработан программный инструментальный анализа пространственных распределений и вероятностно-временных характеристик различных явлений на морской поверхности. Данные о времени и месте возникновения явлений, выявленные пользователями системы в процессе работы, сохраняются в базе данных в виде контуров с привязкой к спутниковым изображениям. Новый инструментальный позволяет на основе этих данных определить число эпизодов возникновения явлений в узлах регулярной сетки (рис. 28).

В зависимости от решаемой задачи, пользователь определяет регион исследования, диапазон времени наблюдения, тип анализируемых явлений и также требуемое пространственное разрешение. Обработка сформированного таким образом запроса позволяет получить непрерывное поле вероятностно-временных характеристик явления на основе регулярной сетки с заданным шагом. Абсолютное число эпизодов возникновения явлений в тех или иных узлах сетки приводится к относительной шкале путем нормирования на общее число эпизодов в регионе исследования в заданный период времени.

Разработан программный инструментарий анализа пространственных распределений и вероятностно-временных характеристик различных явлений на морской поверхности. Данных о времени и месте возникновения явлений, выявленных пользователями системы в процессе работы, сохраняются в базе данных в виде контуров с привязкой к спутниковым изображениям. Новый инструментарий позволяет на основе этих данных определить число эпизодов возникновения явлений в узлах регулярной сетки.

В зависимости от решаемой задачи, пользователь определяет регион исследования, диапазон времени наблюдения, тип анализируемых явлений и также требуемое пространственное разрешение. Обработка сформированного таким образом запроса позволяет получить непрерывное поле вероятностно-временных характеристик явления на основе регулярной сетки с заданным шагом. Абсолютное число эпизодов возникновения явлений в тех или иных узлах сетки приводится к относительной шкале путем нормировки на общее число эпизодов в регионе исследования в заданный период времени.

Для визуализации таких данных в картографическом интерфейсе системы See the Sea используются изолинейные или растровые карты, при этом цветовая шкала градуируется таким образом, чтобы максимальное значение (100%) соответствовало точке максимальной пространственно-временной концентрации явлений в регионе исследования, а все остальные значения нормировались на локальный максимум.

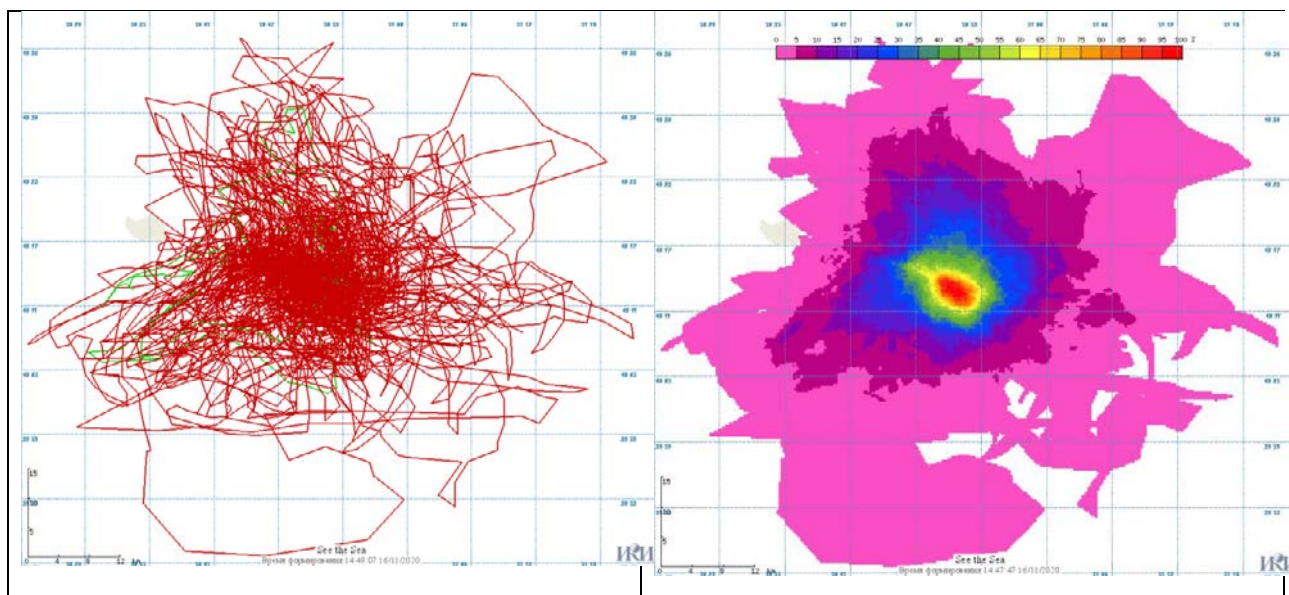


Рисунок 28 - Контурные и пространственное распределение загрязнений у Нефтяных Камней

Для визуализации таких данных в картографическом интерфейсе системы See the Sea используются изолинейные или растровые карты, при этом цветовая шкала градуируется таким образом, чтобы максимальное значение (100%) соответствовало точке максимальной пространственно-временной концентрации явлений в регионе исследования, а все остальные значения нормировались на локальный максимум. Результаты представлены на 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 16-20 ноября, 2020, ИКИ РАН в докладе Уваров И.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. «Оценки пространственных распределений и вероятностно-временных характеристик явлений на морской поверхности в рамках системы See the Sea».