

Основные результаты, полученные в 2022 г. в ходе исполнения четвертого 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 2022 г. решение поставленных в проекте задач проводилось на основе анализа оперативных данных за 2022 г. (далее исследуемый период) и делались обобщения по всем направлениям исследования, опираясь на архивные спутниковые данные и полученные результаты за все время исполнения проекта.

В 2022 г. были получены следующие основные результаты.

I. Систематизированные результаты анализа оперативного многосенсорного спутникового мониторинга Каспийского моря (за 2022 г.).

В ходе четвертого этапа проекта проводились работы по непрерывному получению в автоматическом режиме оперативных данных спутникового дистанционного зондирования акватории Каспийского моря за 2022 г., их систематизации, анализу и интегрированию в геопортал «See the Sea» (STS), которая является частью ОИ ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Набор спутниковых данных для усвоения в систему включал в себя:

- данные радиолокатора SAR-C с синтезированной апертурой, установленного на спутнике Европейского космического агентства Sentinel-1A – более 1500 сцен. (ИС3 Sentinel-1B, радиолокационные данные которого ранее также использовались в работах по проекту, перестал функционировать в декабре 2021);
- данные многоспектрального сенсора оптического диапазона OLI ИС3 Landsat-8, -9 – более 1300 сцен (из них около 600 получено при облачном покрытии, не превышающем 10% площади снимка);
- данные многоспектрального сенсора MSI ИС3 Sentinel-2A,-2B – более 2000 сцен (из них около 770 получено при облачном покрытии, не превышающем 10% площади снимка);
- данные сканирующих спектрорадиометров среднего разрешения MODIS, установленных на ИС3 Terra и Aqua серии EOS - от 7 до 24 сцен ежедневно;

- данные 22-полосного радиометра, работающего в УФ, ИК и видимом диапазонах (0,45-12 мкм) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) ИСЗ Suomi NPP – от 7 до 14 сцен ежедневно;
- спектрометр для измерения цвета океана и земли (OLCI) ИСЗ Sentinel-3 – около 4000 сцен (из них более 1300 получено при облачном покрытии, не превышающем 10% площади снимка).

Все имеющиеся оперативные данные многосенсорного мониторинга за 2022 г. проанализированы, систематизированы и аннотированы.

Все полученные результаты внесены в ИС STS, которая является составной частью ОИ ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

II. Результаты оперативного (за 2022 г.) многосенсорного спутникового мониторинга Каспийского моря.

1. Нефтяное загрязнение морской поверхности

На начальных этапах работы по проекту нами были определены районы устойчивого загрязнения морской поверхности и выявлены источники загрязнения характерные для различных частей Каспийского моря (рис. 1).



Рис. 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 – естественные выходы углеводородов с морского дна в районе мыса Сефид Руд; 3 – естественные выходы углеводородов с морского дна к западу от полуострова Челекен; 4 – кластер грязевых вулканов на морском дне Южно-Каспийской впадины

В ходе четвертого этапа работы по проекту на основе спутниковых данных за 2022 г. составлены подробные карты нефтяного загрязнения морской поверхности в этих районах. Карты составлены с помощью картографического интерфейса, интегрированного в систему STS.

Район нефтедобычи «Нефтяные Камни» (цифра 1 на рис. 1) в Среднем Каспии 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.

Для построения карт нефтяного загрязнения в этом районе (см. рис. 2а) было проанализировано 105 РСА-изображений и 34 “безоблачных” изображения сенсоров оптического диапазона за 2022 г. Всего было идентифицирован 92 слика.

Часть акватории Каспийского моря у юго-западного побережья в провинции Гилан (Иран) к востоку от мыса Сефид Руд (цифра 2 на рис. 1)

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. 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 нефтяных сликов.

Для построения карт нефтяного загрязнения в этом районе (см. рис. 2б) было проанализировано 79 РСА-изображений и 31 “безоблачное” изображение сенсоров оптического диапазона за 2022 г. Всего было идентифицировано 42 слика.

Часть акватории Каспийского моря к западу от полуострова Челекен, административно принадлежащая Туркменистану (цифра 3 на рис. 1)

Повторяющаяся точка всплытия определяет местоположение источника углеводородов на морском дне с координатами 52°36.2′ в.д., 39°32.9′ с.ш., находящегося на глубине 1000 м. Для построения карт нефтяного загрязнения в этом районе (см. рис. 2в) было проанализировано 81 РСА-изображение и 44 “безоблачных” изображения сенсоров оптического диапазона за 2022 г. Всего было идентифицировано 68 сликов.

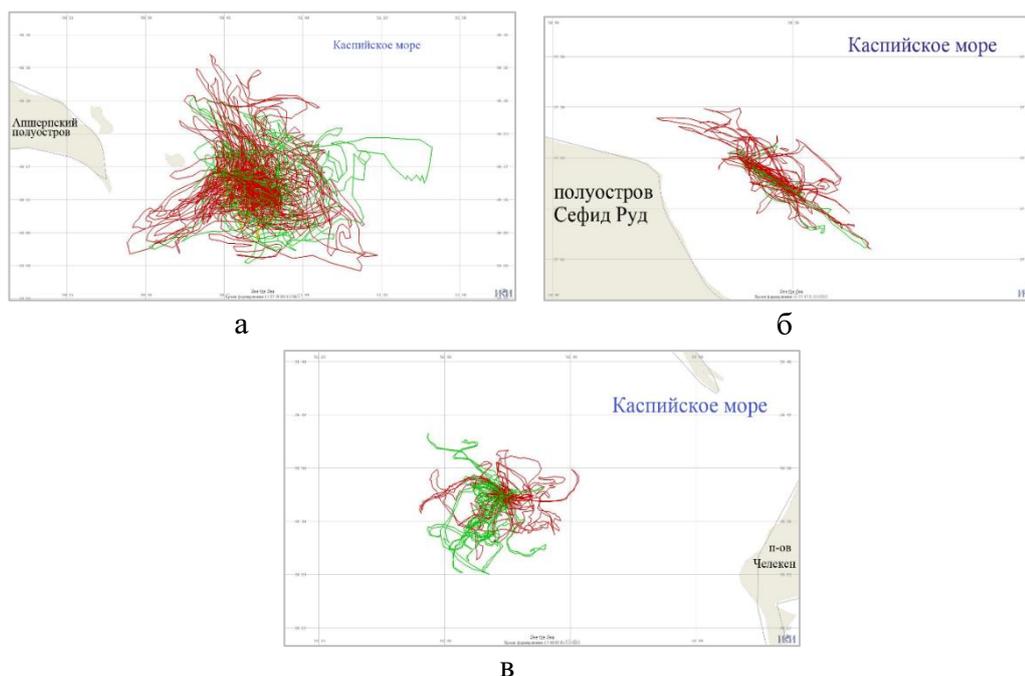


Рис. 2. Сводные карты естественных нефтепроявлений на поверхности Каспийского моря выявленных по спутниковым данным за 2022 г. вблизи района нефтедобычи Нефтяные Камни (а), мыса Сефид Руд (б) и полуострова Челекен (в)

Кроме того, по спутниковым данным, полученным в районе Южно-Каспийской впадины, выявлены и нанесены на карту многочисленные поверхностные нефтепроявления, обусловленные грязевым вулканизмом на морском дне.

Площади акватории, потенциально подверженные загрязнению нефтяными плёнками в различных районах

Слики естественных нефтепроявлений после выхода на поверхность под влиянием ветра и течений формируют тонкие изогнутые полосы и могут распространяться на большие расстояния – вплоть до 30 км в районе м. Сефид Руд, до 19 км в районе п-ва Челекен и до 50 км в районе нефтедобычи Нефтяные Камни (по данным 2022 г.). Это существенно увеличивает площадь акватории, потенциально подверженной нефтяному загрязнению, несмотря на относительно небольшую площадь каждого отдельного слика. Площадь акватории, потенциально подверженной загрязнению плёнками естественных нефтепроявлений, определенная по спутниковым данным в 2022 г. составляет 4037 кв. км в районе нефтедобычи Нефтяные Камни, 445 на иранском шельфе вблизи мыса Сефид Руд и 503 кв. км на туркменском шельфе вблизи полуострова Челекен.

Характеристики сезонной и пространственной изменчивости нефтяного загрязнения морской поверхности в 2022 г.

Рассчитаны распределения площадей индивидуальных нефтяных загрязнений морской поверхности в различных тестовых районах (рис. 3). Следует отметить, что представленные оценки базируются исключительно на спутниковых данных и могут в большую или меньшую сторону отличаться от измерений, проведённых *in situ*.

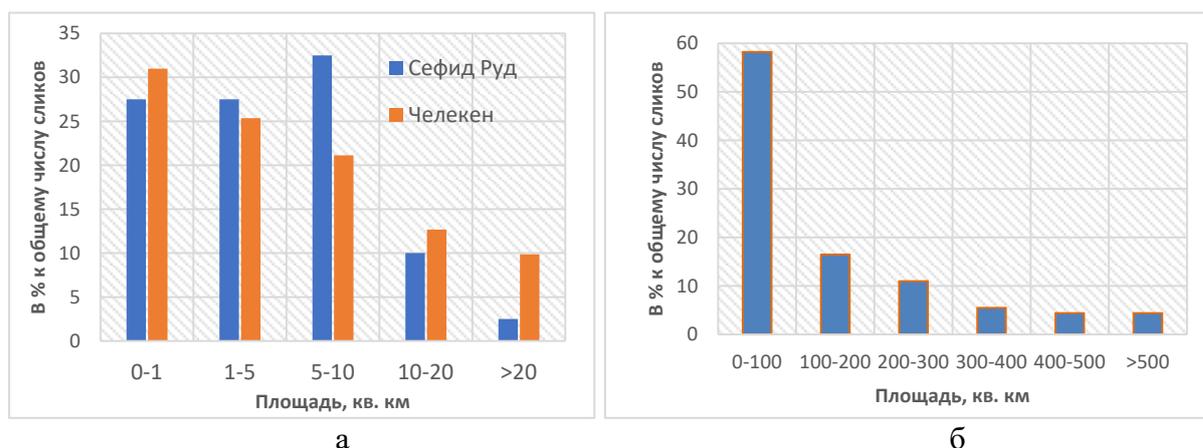


Рис. 3. Распределение индивидуальных площадей нефтяных загрязнений поверхности Каспийского моря: а) в районе мыса Сефид Руд и в районе полуострова Челекен; б) в районе нефтедобычи Нефтяные Камни

Мы можем констатировать, что объемы поступления сырой нефти с морского дна на поверхность в туркменских водах районе п-ва Челекен в 2022 г. выше, чем на иранском шельфе вблизи мыса Сефид Руд. Более, чем в 40% случаев, площади сликов, обнаруживаемых вблизи мыса Сефид Руд, не превышают 5 кв. км, площади еще 32 % сликов варьируют в пределах 5 – 10 кв. км. В то же время в районе п-ва Челекен более половины естественных нефтепроявлений на поверхности моря имеют площади, превышающие 10 кв. км.

В очередной раз подтвержден факт наличия сезонной изменчивости количества естественных нефтяных проявлений на поверхности моря, выявляемых на спутниковых изображениях. Особенно ярко выражена эта изменчивость для данных, полученных в видимом диапазоне.

Характеристики частоты и интенсивности проявлений грязевого вулканизма и естественного просачивания углеводородов с морского дна на поверхность моря в 2022 г.

На спутниковых данных, полученных в районе Южно-Каспийской впадины, регулярно выявляются многочисленные поверхностные нефтепроявления, обусловленные грязевым вулканизмом

На одном спутниковом изображении идентифицируется от нескольких единиц до нескольких десятков нефтесодержащих сликов, порожденных грязево-вулканическими процессами на морском дне. Площади отдельных нефтепроявлений изменяются в широком диапазоне величин – от десятых долей до первых единиц 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. Интегральная площадь загрязнения морской поверхности нефтесодержащими пленками в результате подводного грязевого вулканизма в юго-западной части Каспийского моря, выявленная за 2022 г. на спутниковых изображениях, превышает тысячу 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 детектируется на спутниковых снимках в теплый период года — с мая по сентябрь.

Загрязнения морской поверхности Каспийского моря, вызванные сбросом с судов вод, содержащих нефтепродукты

В 2022 г. отдельное внимание было уделено и выявлению антропогенных загрязнений, связанных со сбросом с судов вод, содержащих нефтепродукты. Было проанализировано 1444 радиолокационных изображений, полученных с помощью SAR-C ИСЗ Sentinel-1A. Выявлены и сохранены в тематическую базу системы STS данных 88 случаев нефтяных загрязнений этого типа. В системе STS построены карты судовых сбросов нефтепродуктов за 2022 г. (рис. 4). В ходе проведенного мониторинга были выявлены особенности детектирования судовых нефтяных загрязнений на морской поверхности Каспия. Ввиду многочисленных ложных нефтяных подобию, имеющих на радиолокационных изображениях визуальное отображение, схожее с нефтяными сликами, были отобраны лишь те случаи, которые однозначно можно интерпретировать как судовые сбросы.

Сезонное распределение доступных в системе STS спутниковых данных Sentinel-1 в 2022 г., покрывающих поверхность Каспийского моря и количество выявленных судовых сбросов за каждый период, представлено на рис. 5.

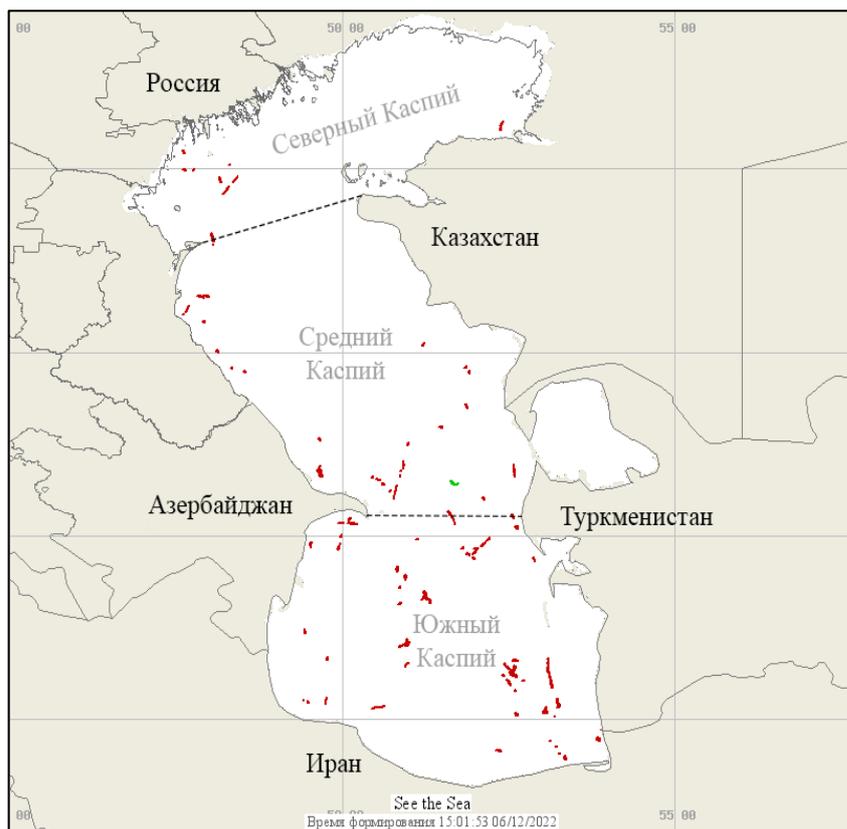


Рис. 4. Карта проявлений на РЛИ судовых сбросов вод, содержащих нефтепродукты, выявленных в 2022 г.

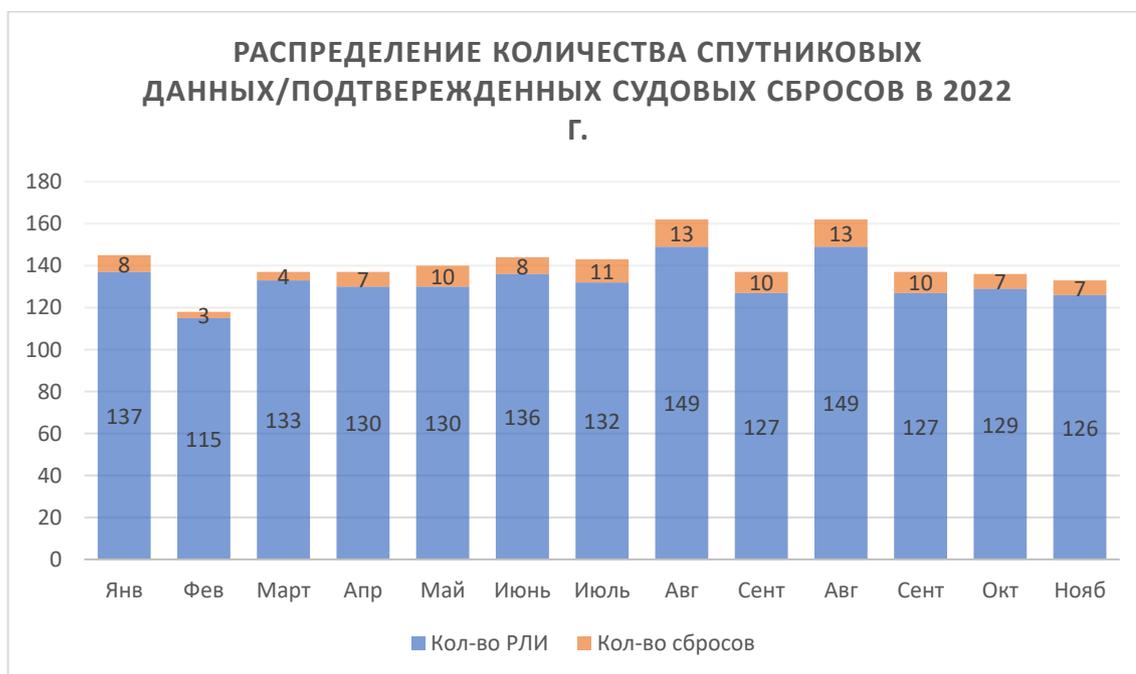


Рис.5. Распределение по месяцам количества доступных спутниковых данных за 2022 г. (голубым) и выявленных судовых сбросов (оранжевым)

Диаграмма распределения судовых сбросов на различных участках Каспийского моря в 2022 г. представлена на рис. 6. Большая часть судовых сбросов выявлена на границе между Средним и Южным Каспием — между Апшеронским п-ом и п-ом Челекен.

Подобное распределение обусловлено наличием судоходных трасс между нефтедобывающим районом «Нефтяные Камни» и нефтеперерабатывающими установками вблизи залива Туркменбаши. В Юго-западной части Каспийского моря расположен транспортный коридор, осуществляющий перевозку нефтепродуктов в иранские порты Нека и Амирабад, принимающие зарубежные нефтеналивные танкеры, в том числе, российские.

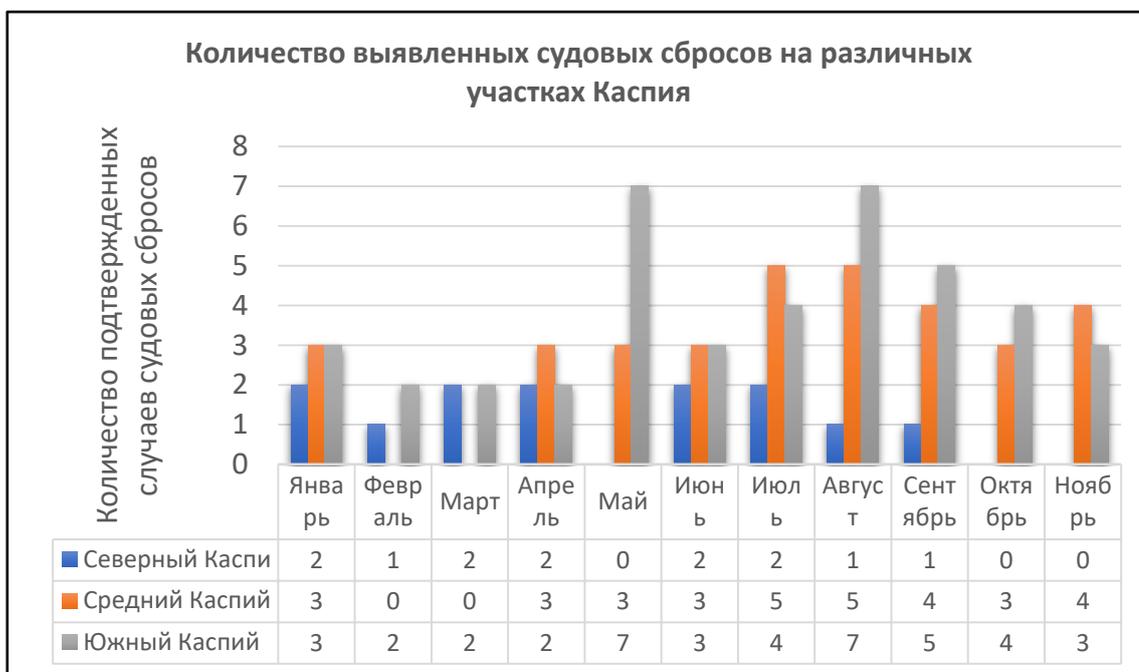


Рис. 6. Диаграмма распределения судовых сбросов на различных участках Каспийского моря в 2022 г.

Ключевой особенностью нефтесодержащего сброса с судна считается наличие на РЛИ протяженной полосы пониженного сигнала, где иногда наблюдается яркая белая точка – судно, осуществляющее сброс. С другой стороны, такими же объектами на РЛИ отмечаются и нефтеплатформы, от которых часто наблюдается схожий протяженный след. Именно поэтому, достаточно трудно и неэффективно проводить мониторинг судовых сбросов вокруг нефтедобывающих платформ, а также очагов естественного выхода нефтепродуктов на поверхность. Пример подтвержденного судового сброса, выявленного в 2022 году, представлен на рис. 7.



Рис. 7. Судовой сброс, распространяющийся в западном направлении. РЛИ от 09.07.2022 14:37:53 UTC

1.2. Результаты оперативного (за 2022 г.) многосенсорного спутникового мониторинга Каспийского моря областей цветения фитопланктона.

На основе проведенного анализа оперативной информации о пространственном распределении концентрации хлорофилла-а в различных районах Каспийского моря были оценены среднемесячные значения этого параметра для Среднего и Южного Каспия. Анализ базировался на ежедневных данных о концентрации хлорофилла-а, представленных в системе Worldview (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>), построенных на основе данных MODIS Aqua и Terra. Отдельно рассматривались среднемесячные значения, вычисленные по ежедневным значениям концентрации хлорофилла-а, для береговой зоны (где наблюдались максимальные значения этого параметра) и для акваторий моря, не захватывающих прибрежную часть. На основе полученных результатов были построены графики для каждого района, и определялась сезонная изменчивость значений концентрации хлорофилла-а (рис. 8). Были получены следующие оценки сезонной и пространственной изменчивости концентрации хлорофилла-а в 2022 г. в Среднем и Южном Каспии.

В Среднем Каспии наибольшие значения концентрации хлорофилла-а в 2022 г. были выявлены вдоль берега в районе от о. Чечень, до устья р. Сулак. Это акватория с одной стороны находится в зоне выносов рек Терек и Сулак, с другой стороны граничит с Северным Каспием, в котором концентрация хлорофилла-а повышенная по сравнению со Средним Каспием. Максимальное среднемесячное значение в 2022 г. было зарегистрировано в июле, оно достигало 7 мг/м^3 , в заливах - до 19 мг/м^3 . Минимальное значение было зарегистрировано в апреле, оно составляло не более $2,7 \text{ мг/м}^3$.

Следует отметить, что согласно нашим измерениям, проведенным в июне 2022 г. в приустьевых зонах рек Терек и Сулак, значения концентрации хлорофилла-а, определенные с помощью флуоресценции Turner Design Cyclops-7 для определения концентрации хлорофилла-а, достигали 6 мг/м^3 на глубине 9 м.

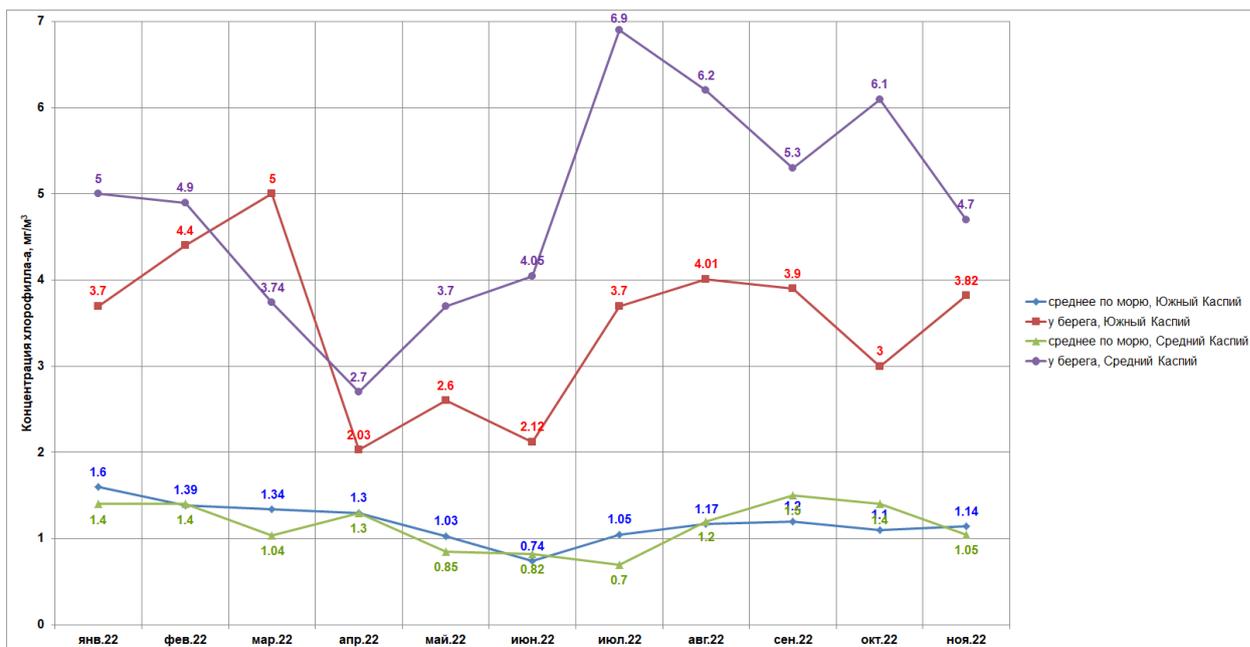
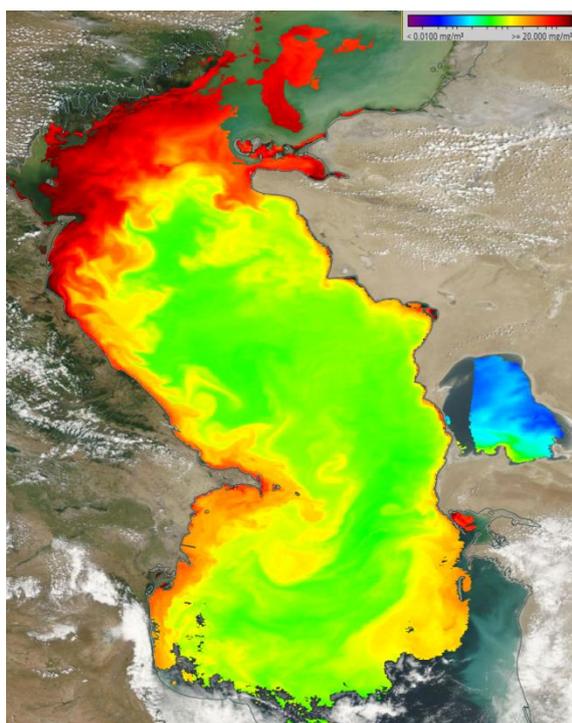


Рис. 8. Среднемесячные значения концентрации хлорофилла-а в различных районах Среднего и Южного Каспия, определенные по данным MODIS Aqua за 2022 г.



Высокие значения концентрации хлорофилла-а вдоль береговой черты сохранялись вплоть до октября, и находились примерно на одном значении в январе-феврале и ноябре 2022 г. – 4,7 – 5 мг/м³.

Благодаря высоким, по сравнению со значениями в открытом море значениям, на спутниковых изображениях, особенно на картах концентрации хлорофилла-а, хорошо выделяются прибрежные вихревые структуры и струйные потоки из Северного в Средний Каспий (рис. 9).

Рис. 9. Проявление вихревых структур и струй на изображении MODIS Aqua от 26 июля 2022 г. Трассер – хлорофилл-а

В Южном Каспии наибольшие значения концентрации хлорофилла-а были отмечены также в прибрежной зоне, у южного побережья Апшеронского полуострова и на самом юге Южного Каспия у побережья Ирана. Максимальное среднемесячное значение 5 мг/м³ было зафиксировано в марте, минимальное, как и в Среднем Каспии в апреле – чуть больше 2 мг/м³. Максимальное летнее значение приходилось на август – 4 мг/м³. В заливах концентрация хлорофилла-а достигала 12 – 14 мг/м³, что существенно меньше, чем в заливах Среднего Каспия.

Что касается собственно открытого моря, то и в Среднем и в Южном Каспии практически весь год сохранялись одинаково низкие значения, в среднем $1,2 \text{ мг/м}^3$ (см. рис. 9), не считая затока вод с высокой концентрацией хлорофилла-а струйными течениями из Северного Каспия.

Для Северного Каспия из-за практически постоянной облачности, данные о концентрации хлорофилла-а были фрагментарны, наибольшее количество карт было получено в августе и сентябре, но тоже далеко не на всю часть Северного Каспия. Поэтому, сезонная изменчивость в 2022 г. для Северного Каспия не рассматривалась. Максимальные значения достигались в районе выноса Волги и в среднем составляли $14 - 18 \text{ мг/м}^3$.

На основе полученных данных проведено картирование областей интенсивного цветения фитопланктона в 2022 г. в системе STS, являющейся составной частью ОИ «ИКИ-Мониторинг» (рис. 10).



Рис. 10. Карта-схема областей интенсивного цветения фитопланктона в 2022 г., построенная на основе данных MODIS Aqua

1.3. Результаты спутникового мониторинга ледяного покрова Северного Каспия в 2022 г.

В 2022 г., были уточнены все основные параметры, характеризующие ледяной покров в Северном Каспии за все зимние периоды, начиная с зимы 1999/2000 г. по 2021/2022 г. К основным параметрам относятся: даты начала ледообразования и очищения ото льда, продолжительность ледяного покрова, максимальная площадь ледяного покрова в конкретный зимний период (годовой максимум площади ледяного покрова), сумма отрицательных температур за зимний период и определенный по ним индекс суровости

зимы. Сумма отрицательных температур за зимний период была пересчитана отдельно для восточной части Северного Каспия, где каждый зимний сезон бывает ледяной покров и для всего Северного Каспия по данным реанализа MERRA-2 (источник систем NASA Giovanni), и отдельно по архивным данным метеостанции Астрахань.

В зимний сезон 2021/2022 г. начало льдообразования пришлось на 11 ноября 2021 (в восточной прибрежной части), а полное очищение ото льда наблюдалось на спутниковых изображениях 25 марта 2022, что почти полностью совпадало с началом и окончанием отрицательных температур воздуха по реанализу. Таким образом, продолжительность ледяного покрова составила 134 дня. Годовая максимальная площадь ледяного покрова, наблюдаемая на спутниковых изображениях, составила около 59,5 тыс. кв. км (03 февраля 2022 г.). Из-за большого числа облачных дней в зимний период 2021/2022 г. для мониторинга ледяного покрова использовались радиолокационные спутниковые данные (Рис. 11).

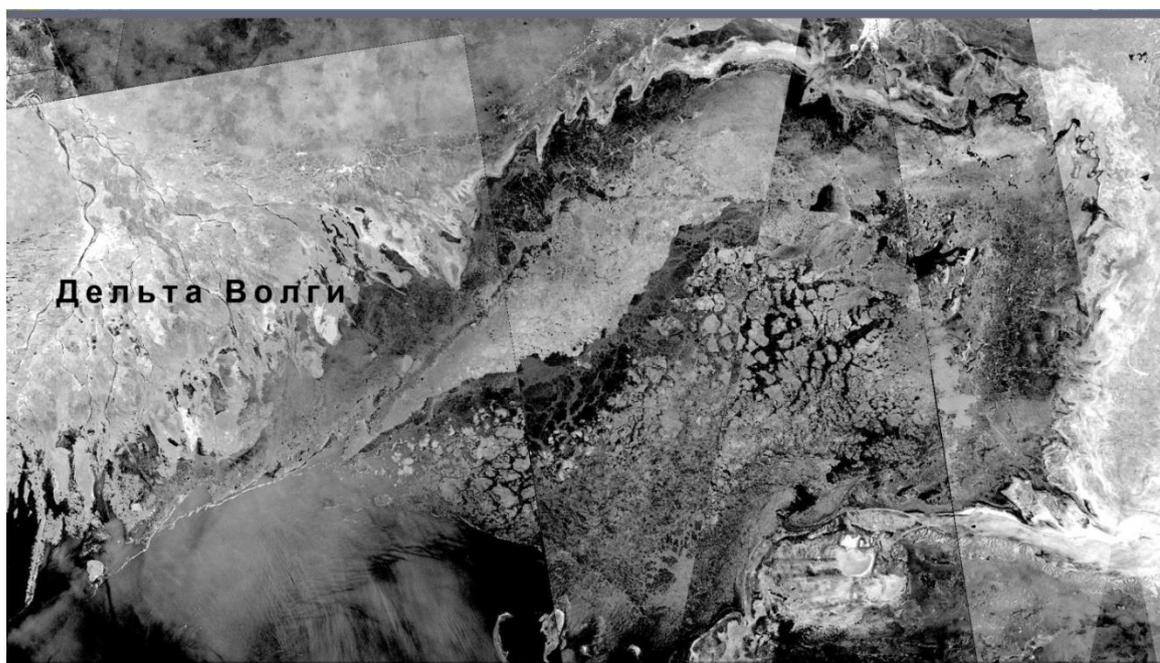


Рис. 11. Проявление годового максимального ледяного покрова в Северном Каспии на композиции РЛИ Sentinel 1 за 2 – 4 февраля 2022 г.

По данным реанализа сумма отрицательных температур за зимний период составила -443°C ; это соответствует мягкой зиме.

Обобщение результатов спутникового мониторинга ледяного покрова в Северном Каспии, его межгодовая изменчивость, сравнение с данными других исследователей за период 1999 – 2022 гг. опубликовано в статье Lavrova O. Yu., Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Vocharova T. Yu., *Interannual variability of ice cover in the Caspian Sea*, J. Hydrology X. 2022, Vol. 17, Art. No. 100145, 14 p. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2022.100145> и в монографии Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А. Г. «Спутниковые методы исследования изменчивости Каспийского моря».

Карты-схемы ледяного покрова в Каспийском море были уже построены для зимних периодов 1999-2021 гг., в 2022 они были дополнены информацией о максимальной площади ледяного покрова в зимний период 2021/2022 гг.

1.4. Элементы циркуляции вод Каспийского моря

На основе анализа спутниковых радиолокационных и оптических данных продолжено изучение следующих гидродинамических процессов: вихревые структуры, внутренние волны, сгонно-нагонные явления, выносы рек Терек и Сулак

Вихревые структуры

Анализ спутниковых данных за 2022 г. подтвердил полученные ранее результаты об особенностях образования вихревых структур в акватории Каспийского моря. Основными трассерами являлся хлорофилл-а для данных оптического диапазона и слики биогенных и нефтяных пленок для радиолокационных изображений и данных видимого диапазона, полученных в зоне солнечного блика. Это определяет сезонную изменчивость проявлений вихревых структур на спутниковых изображениях. Накопленный архив спутниковых данных позволяет давать оценки о характере вихреобразования и об особенностях его поверхностных проявлений на всей акватории Каспийского моря за период с 1999 по 2022 гг. Анализ многолетних рядов данных показал, что выявленные основные районы вихреобразования неизменны из года в год, а именно: 1) юго-восточная часть Южного Каспия - район выноса из Горганского залива (побережье Ирана); 2) южное побережье Каспийского моря - район обильного поступления речного стока (р. Чалус, р. Машалак, р. Коркруд, р. Сардаб, р. Сефидруд и др.); 3) район Кызылагаджского заповедника; 4) район Апшеронского полуострова; 5) вдоль западного побережья Среднего Каспия; 6) напротив мыса Тюб-Караган. Наиболее типичные горизонтальные поверхностные размеры вихрей 10-12 км, со сроком жизни около 1-2 суток. Периодически на границе условно чистых морских вод и распресненных прибрежных мутных вод в Южном Каспии (например, в районе Кызылагаджского заповедника) образуются цепочки субмезомасштабных вихрей с радиусом 1-3 км. Продолжительность их существования, как правило, несколько часов. За счет поступления речного стока с побережья Ирана, стало возможным исследовать образование довольно крупных грибовидных структур за мысом Амир Абад (Amir Abad). Горизонтальные размеры вихрей могут достигать 30 и более км, период жизни таких структур 2–3 суток. В целом, как и во все предыдущие периоды исследования, южная часть Каспийского моря отличается более интенсивным вихреобразованием по сравнению с другими районами водоема. И, как правило, большинство выявленных случаев вихреобразования соответствуют границе шельфовой зоны и материкового склона.

Примеры проявлений вихревых структур на оптических спутниковых изображениях с оценкой их пространственных масштабов представлены на рис. 12, 13.

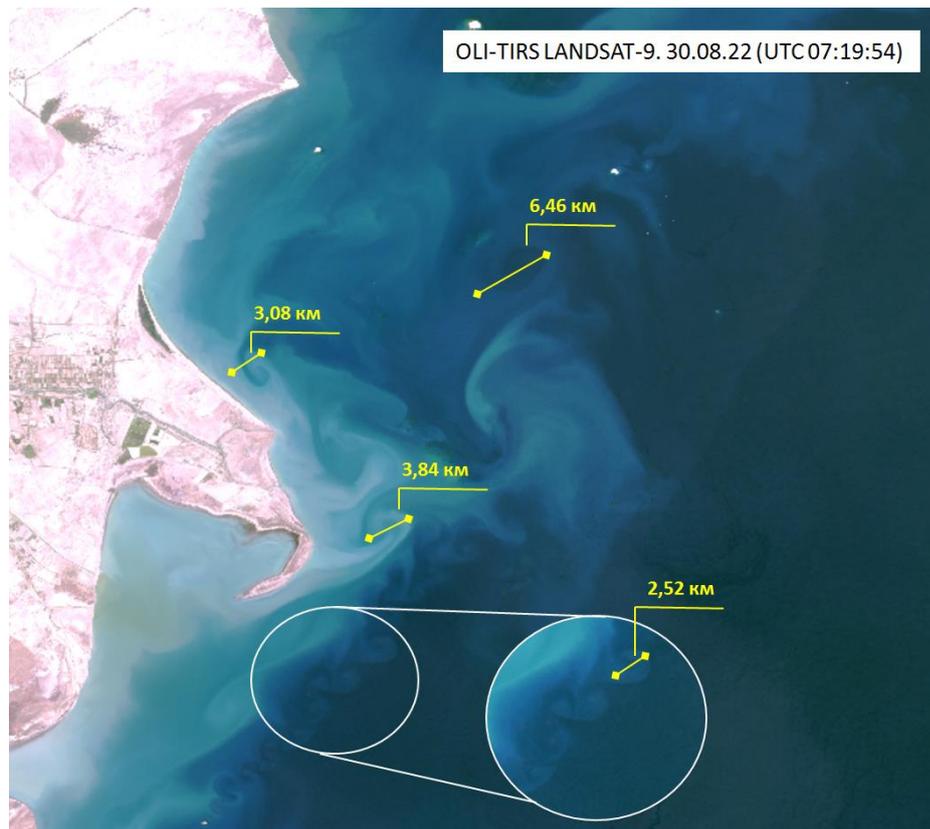


Рис. 12. Фрагмент спутникового изображения OLI-TIRS Landsat-9 за 30 августа 2022 г., полученное в районе полуострова Куркоса (Азербайджан)

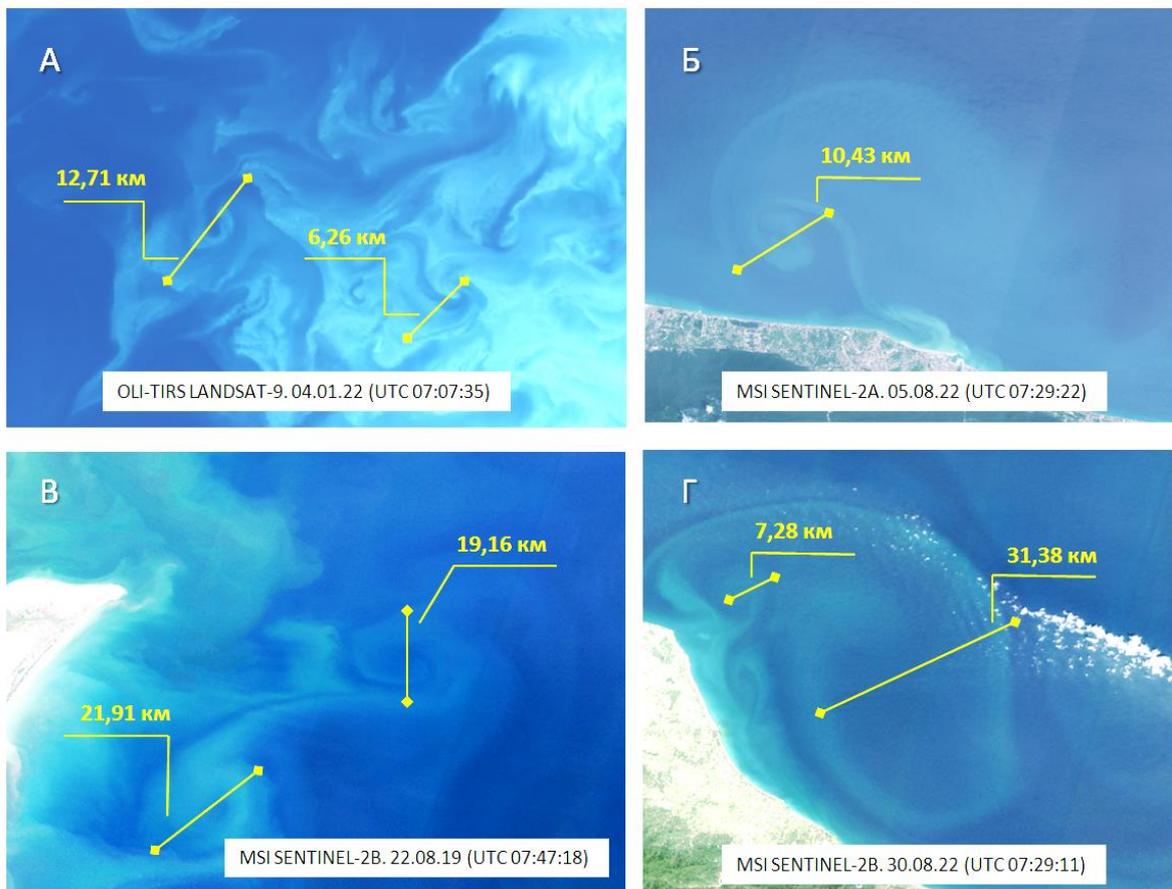


Рис.13. Проявление вихрей и вихревых цепочек на спутниковых изображениях видимого диапазона, полученных над акваторией Каспийского моря

Внутренние волны

На основе радиолокационных и оптических спутниковых данных за 2022 г. проведено картирование поверхностных проявлений внутренних волн (ППВВ) в Каспийском море. Существенных различий с результатами предыдущих двух лет 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. На рис. 14 представлена карта-схема поверхностных проявлений внутренних волн за период с 2000 по 2022 г.

Для внутренних волн, выявленных у восточного берега Среднего Каспия, характерны размеры: длина волны – 200-300 м, протяженность фронтального гребня в среднем 15 км (но может достигать и 30 км), направление распространения – к берегу.

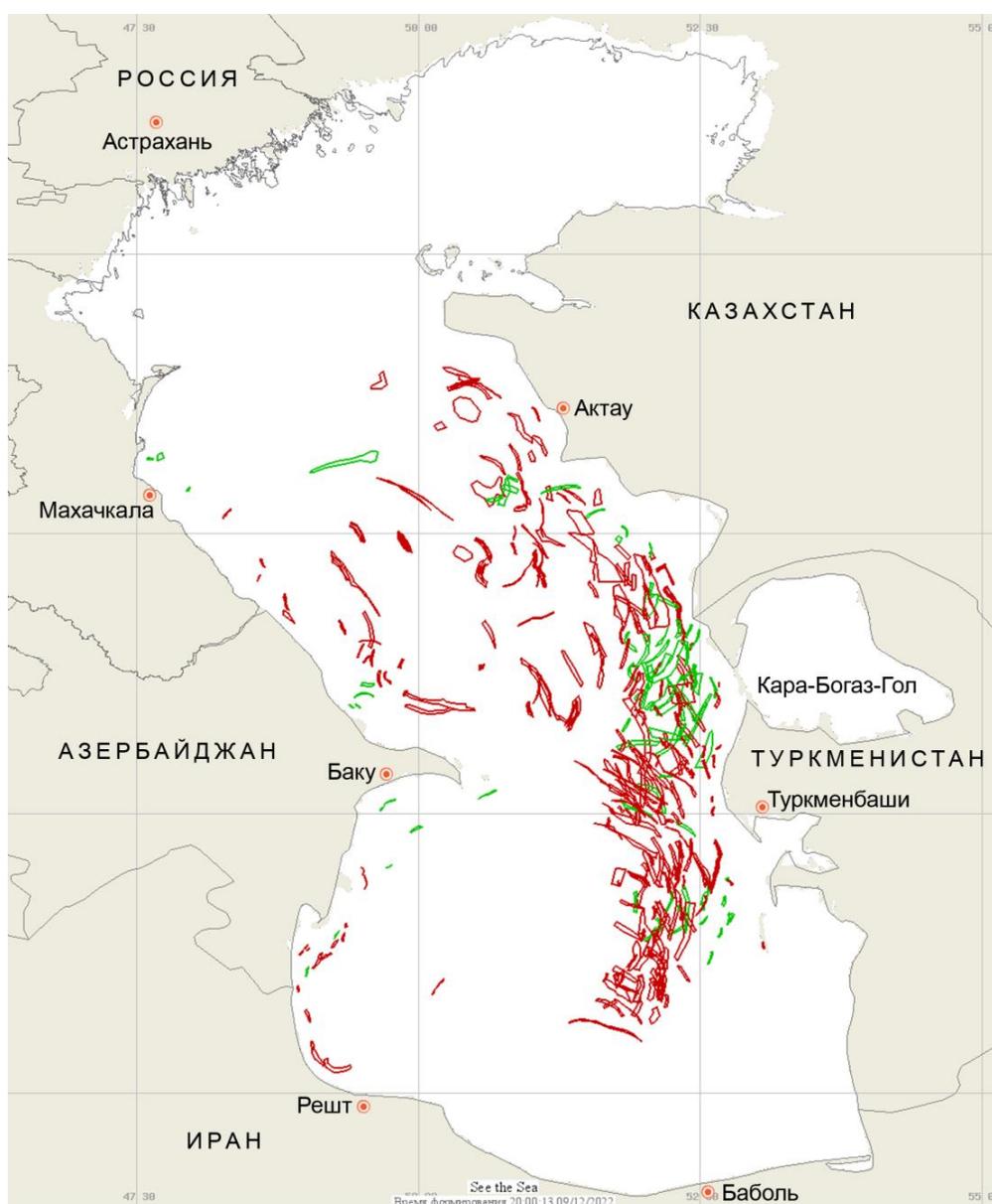


Рис. 14. Основные районы поверхностных проявлений внутренних волн, выявленных на радиолокационных спутниковых изображениях (красные контуры) и изображениях оптического диапазона (зеленые контуры)

Выносы рек Терек и Сулак

Изучению выносов рек Терек и Сулак были посвящены экспедиционные исследования, проведенные квазисинхронно со спутниковой съемкой в приустьевых зонах этих рек в июне 2022 г.

Определена изменчивость положения границ плюмов в период с 31 мая по 12 июня. На основе анализа спутниковых данных выявлено, что положение границы плюма р. Терек не сильно менялось в данный период, что позволило использовать для верификации спутниковых данных результаты натурных измерений, полученных в предыдущий день (рис. 15). Граница плюма р. Сулак достаточно сильно менялась в этот период, что затрудняло сравнение данных спутникового зондирования с измерениями in-situ (рис. 16).



Рис. 15. Границы плюма р. Терек, определенные по спутниковым изображениям, полученным с 31 мая по 12 июня 2022 г. Красными точками отмечены положения станций зондирования от 06 июня 2022 г.

Выявлено, что мутность вод в плюме р. Терек существенно выше мутности в плюме р. Сулак. На станциях зондирования вблизи устья р. Терек измеренные значения мутности достигали 608 NTU, в то время как значения мутности у устья р. Сулак не превышали 140 NTU.

Для определения мутности в приустьевой зоне р. Терек наилучшие результаты показало использование алгоритма Dogliotti, разработанного именно для вод с большой мутностью. Для вод плюма р. Сулак ни один из алгоритмов не показал близкие к измеренным in-situ значениям мутности, что может быть объяснено разницей в сутки между спутниковым зондированием и натурными измерениями, учитывая, что положение границы плюма р. Сулак сильно меняется во времени.



Рис. 16. Границы плюма р. Сулак, определенные по спутниковым изображениям, полученным с 31 мая по 12 июня 2022 г. Красными точками отмечены положения станций зондирования от 09 июня 2022 г.

По данным рентгенофазового анализа установлено, что вблизи устьев минеральный состав взвеси в Тереке и Сулаке почти одинаковый. Он характеризуется содержанием безводных алюмосиликатов, глинистого и карбонатного материала примерно в равном количестве. Существенное отличие состава взвеси в выносе этих рек проявляется в количественном соотношении минералов у границ плюмов. Изменение минерального состава взвеси сопровождается значительным изменением мутности вод, определенной, как in-situ, так и по спутниковым данным.

Следует отметить, что исследования параметров плюмов на основе спутниковых данных и измерений in-situ проводятся впервые в данном районе.

Результаты проведенных в июне 2022 г. измерений выносов рек Терек и Сулак подробно рассмотрены в статье Лаврова О. Ю., Назирова К. Р., Алферьева Я. О., Жаданова П. Д., Строчков А. Я. Сопоставление параметров плюмов рек Сулак и Терек на основе спутниковых данных и измерений in situ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 264–283. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283.

Сгонно-нагонные явления

Сгонно-нагонные явления изучались для мелководных районов Северного Каспия, восточнее дельты р. Урал и в районе самой дельты. Было выявлено 9 случаев нагонов и 11 случаев сгонов.

2. Характеристики межгодовой изменчивости и трендов основных гидрометеорологических параметров Каспийского моря: температура поверхности

моря, температура воздуха, атмосферные осадки, облачность, уровень за 1999 – 2022 гг.

На основе анализа многолетних рядов данных, проведенного с помощью системы Giovanni, были получены следующие результаты.

Температура воздуха

Для определения сезонной и межгодовой изменчивости среднемесячной температуры воздуха вблизи поверхности (ТВП) были использованы данные реанализа MERRA-2 на высоте 2 м с разрешением 0,5 x 0,625 град. за период ноябрь 1999 г. – ноябрь 2022 г. отдельно для Северного Каспия целиком, его восточной части (рис. 17), Среднего и Южного Каспия (рис. 18).

В **Северном Каспии** в 21 веке максимальная среднемесячная температура воздуха не превышала 30°C, максимальная летняя температура была зафиксирована в июле 2010 г. и составила 29,7°C; минимальная зимняя температура была в феврале 2012 г., она составила -7,4°C. За 23 года значения тренда ТВП составило +0,05°C/год. Однако для **восточной части Северного Каспия** значения тренда были минимальны из всех частей моря и составили +0,03°C/год. Зато минимальная среднемесячная температура воздуха над морем достигла – 9,7°C в декабре 2020 г., что на 2,5 °C ниже, чем по всему Северному Каспия в самый холодный зимний сезон 2011/2012 г.

В **Среднем Каспии** максимальная среднемесячная летняя температура воздуха была зафиксирована также в июле 2010 г. и составила 27,4°C; минимальная зимняя температура была в также феврале 2012 г., она составила, как и в январе 2008 г., 0,4°C. За 23 года значения тренда ТВП составило +0,04°C/год.

В **Южном Каспии** максимальная среднемесячная летняя температура воздуха была зафиксирована в июле 2018 г. и составила 29,2°C; минимальная зимняя температура была в январе 2008 г., достигла 3,5°C. За 23 года значения тренда ТВП составило +0,042°C/год.

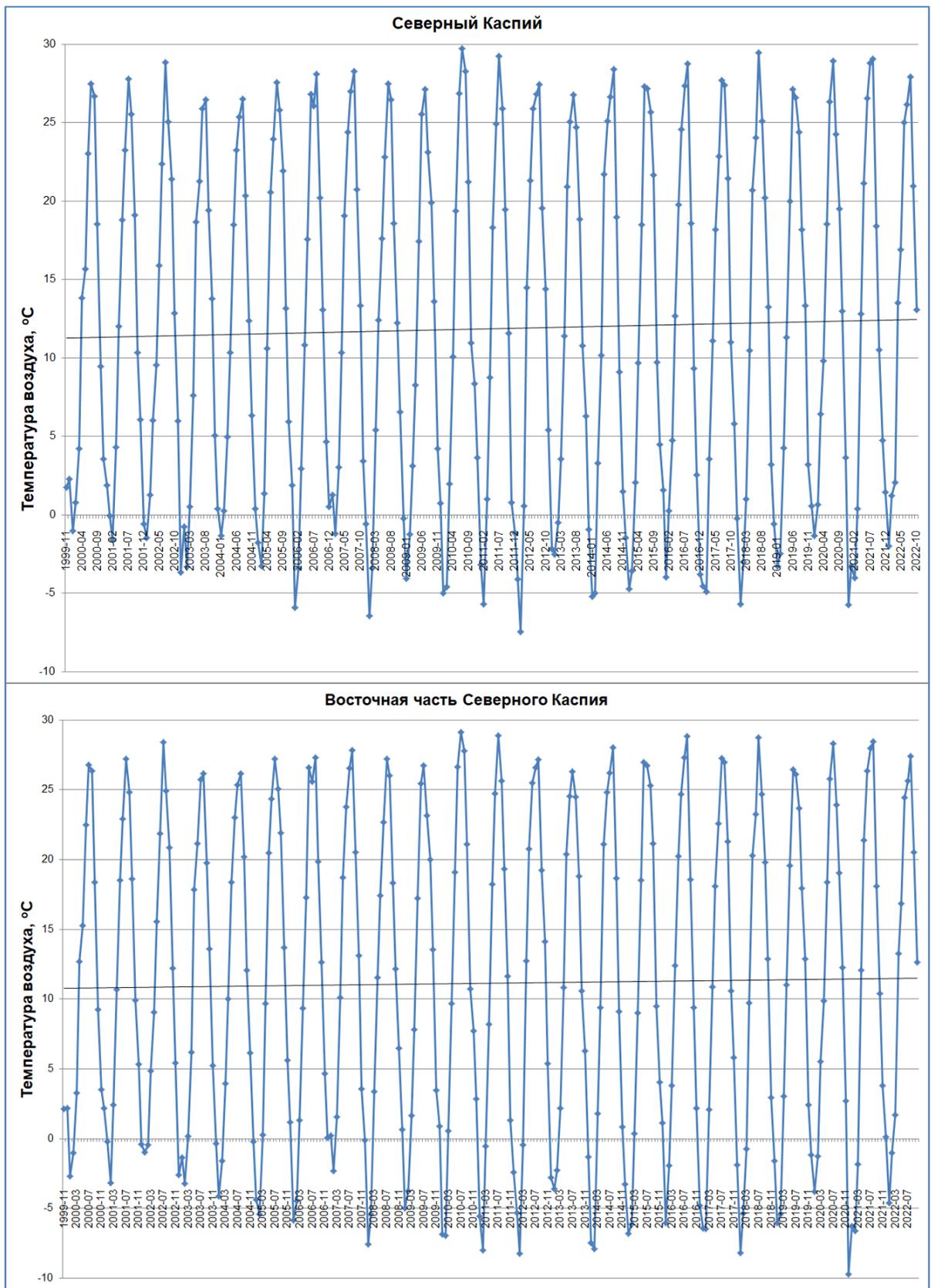


Рис. 17. Среднемесячная температура на высоте 2 м по данным реанализа MERRA-2 для всего Северного Каспия и для его восточной части. Черная линия – линейный тренд

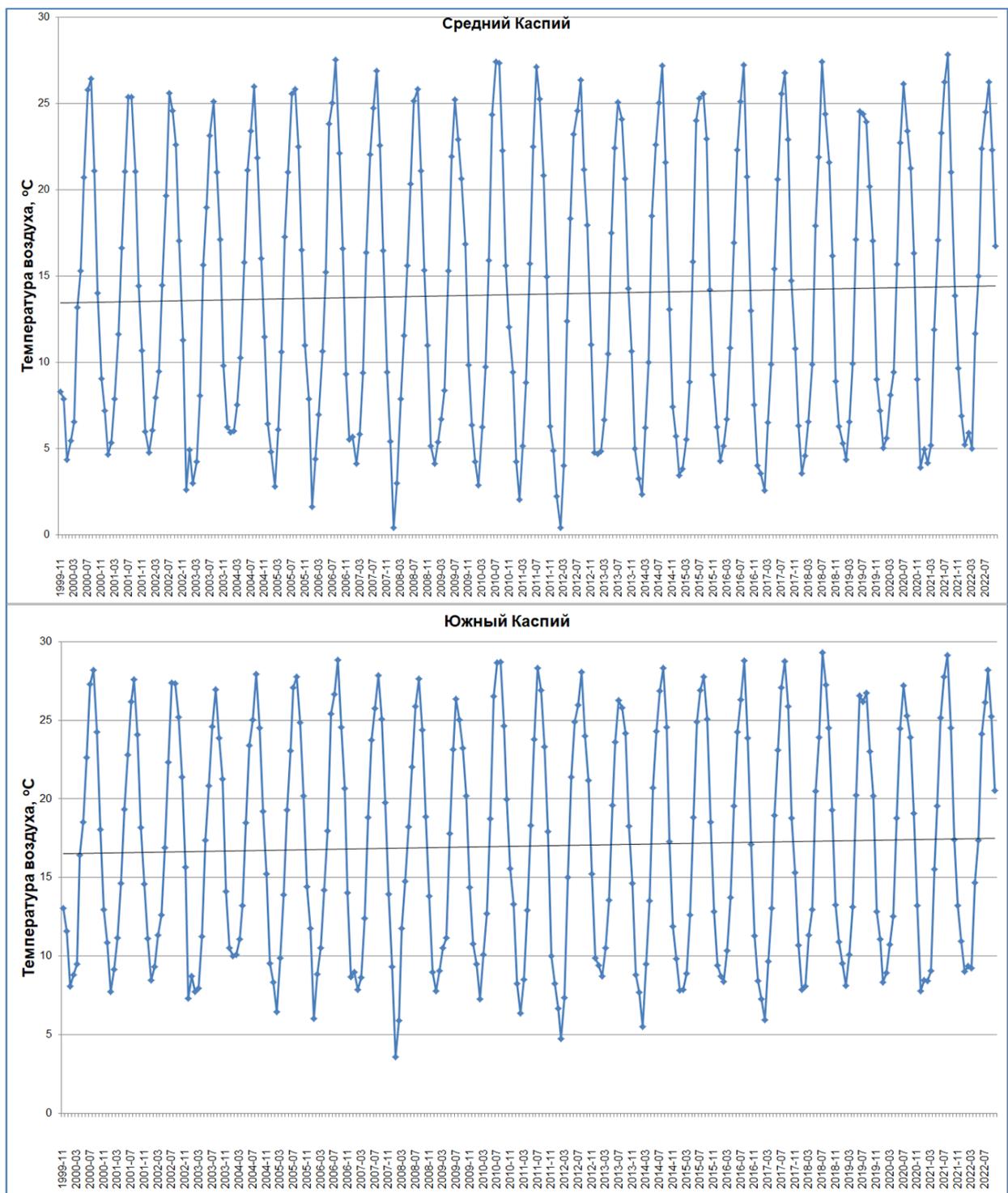


Рис. 18. Среднемесячная температура на высоте 2 м по данным реанализа MERRA-2 для Среднего и Южного Каспия. Черная линия – линейный тренд

Температура поверхности моря (ТПМ)

Для определения сезонной и межгодовой изменчивости среднемесячной температуры поверхности моря (ТПМ) были использованы находящиеся в архиве Giovanni данные спектрометра MODIS ИСЗ Aqua на длине волны 11 мкм, ночные, с пространственным разрешением 4 км. Проанализированы данные за период июль 2002 г.

(первые доступные данные MODIS Aqua) – октябрь 2022 г. Результаты представлены отдельно для Северного, Среднего и Южного Каспия (рис.19).

В *Северном Каспии* за период 2002-2022гг. максимальная температура поверхности моря наблюдалась в июне-июле 2020 г. и составила почти 28°C. За 20 лет значения тренда ТПМ составило +0,03°C/год.

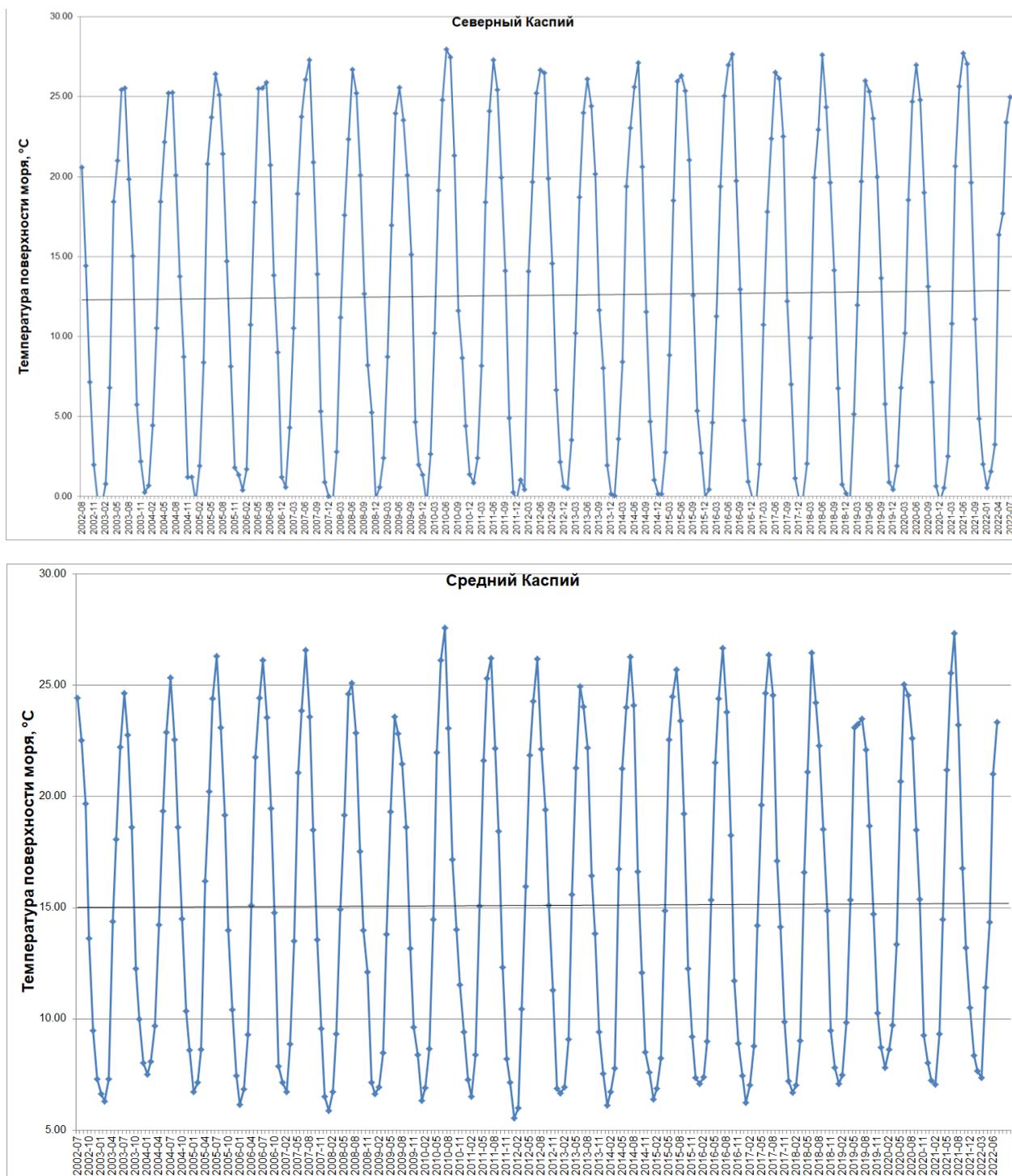


Рис. 19. Среднемесячная температура поверхности моря по данным MODIS Aqua (11 мкн, ночные). Черная линия – линейный тренд

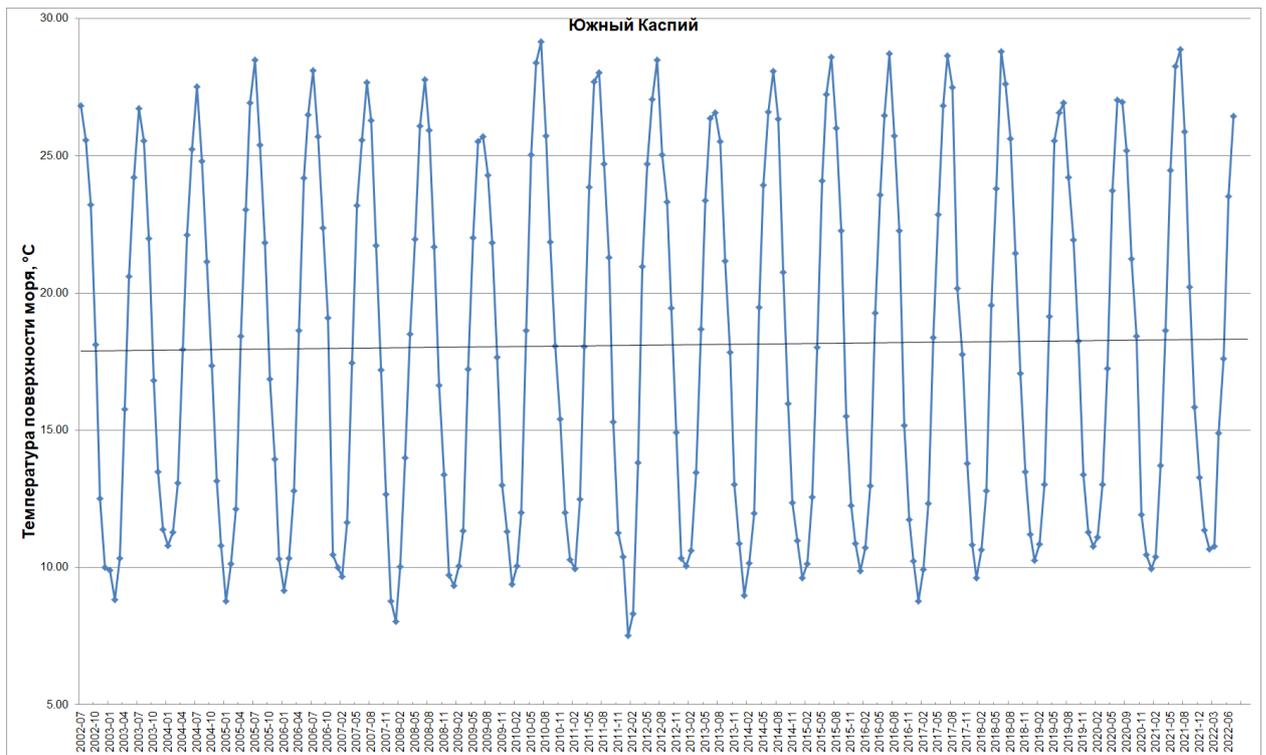


Рис. 19 (продолжение). Среднемесячная температура поверхности моря по данным MODIS Aqua (11 мкм, ночные). Черная линия – линейный тренд

В *Среднем Каспии* максимальная среднемесячная ТПМ была зафиксирована также в июле 2010 г. и составила 27,6°C; минимальная зимняя ТПМ наблюдалась в январе 2012 г. она опустилась до 5,5°C. Значения тренда ТПМ не превышало +0,01°C/год.

В *Южном Каспии* максимальная среднемесячная ТПМ была зафиксирована также в июле 2010 г. и составила 29,2°C; минимальная зимняя ТПМ наблюдалась также в январе 2012 г. она составила 7,5°C. Значения тренда ТПМ не превышало +0,02°C/год.

Таким образом, в 21 веке наибольшая температура, как воздуха, так и поверхности моря зафиксирована в июле 2010 г. во всех частях Каспийского моря. Самыми холодными были январь-февраль 2008 и 2012 г.

Атмосферные осадки

Наибольший отрицательный тренд количества атмосферных осадков с июля 2000 по январь 2021 г. по данным NASA Giovanni наблюдался для Среднего Каспия. Он оказался равным $-0,3$ мм/месяц/год (рис. 20), что на порядок превышает определённого ранее для периода 1979–2010 гг. ($-0,01$ мм/месяц/год). Это можно объяснить тем, что в июле 2009 г. количество атмосферных осадков резко возросло и достигло 110 мм/мес, а в период с января 2008 по декабрь 2010 г. отрицательный тренд несколько увеличился, что сказалось на общем тренде за весь период.

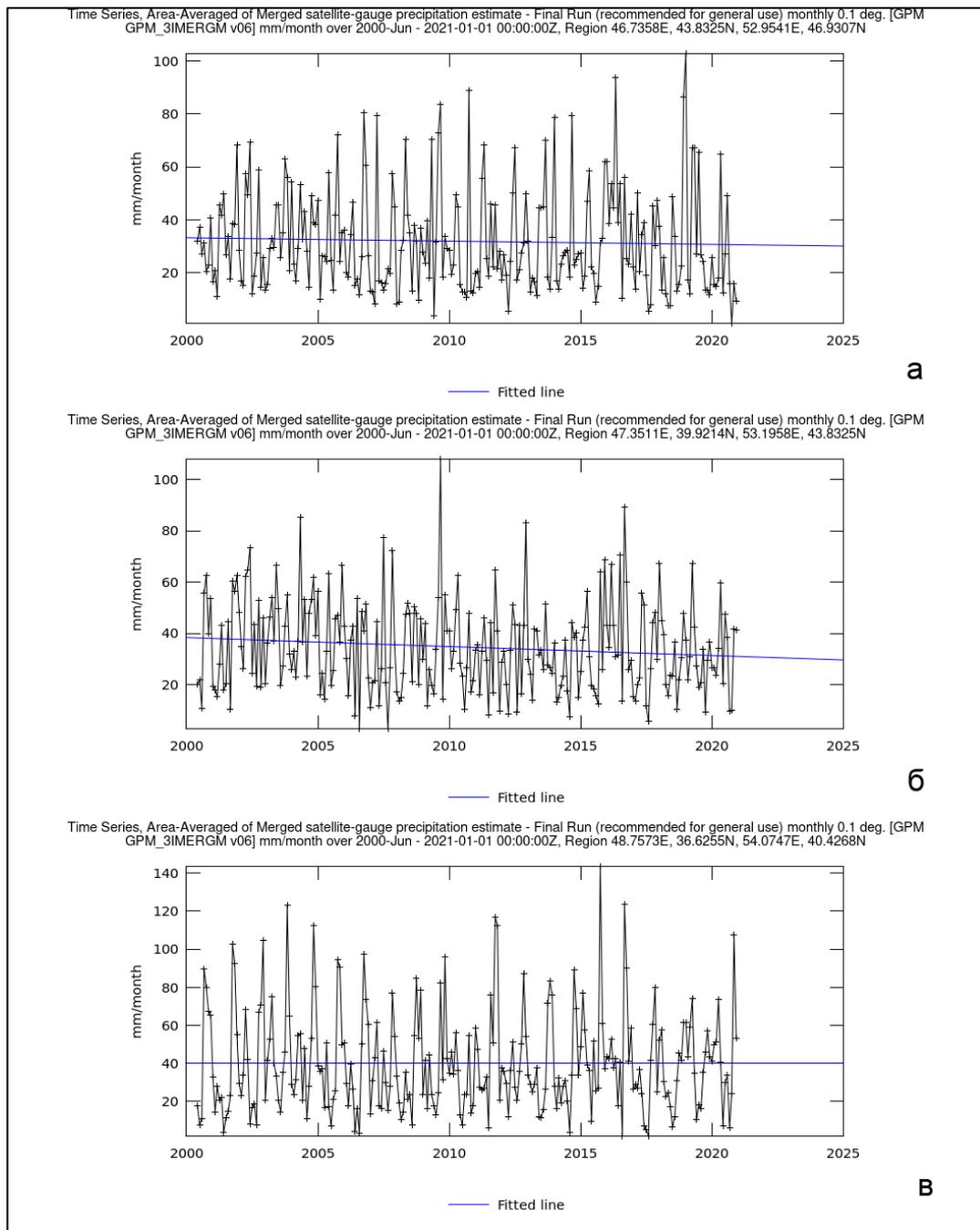


Рис. 20. Временные серии среднемесячных значений атмосферных осадков (мм/мес) с июля 2000 по январь 2020 г.: а - Северный Каспий; б – Средний Каспий; в – Южный Каспий. Синяя прямая линия показывает тренд осадков в рассматриваемый период

Отрицательный тренд, правда, не такой существенный, наблюдался и в Северном Каспии. Он составил порядка $-0,2$ мм/месяц/год (см. рис. 20а). Наибольшее значение атмосферных осадков наблюдалось в январе 2019 г. и составило 100 мм/мес (рис. 20). В Северном Каспии в зимний период свой вклад в общее количество осадков вносит и снег. За трехлетний период с 2018 по 2020 гг. в Северном Каспии отрицательный тренд количества атмосферных осадков резко увеличился и составил -3 мм/месяц/год (рис. 20), и это несмотря на то, что в этот период (в январе 2019 г.) наблюдалось максимальное за месяц количество осадков. За 20 лет, с 2000 по 2020 гг. в Южном Каспии в среднем тренд количества атмосферных осадков был близок к нулю (рис. 20в).

Однако, для периода с января 2016 по декабрь 2018 г. наблюдался резкий отрицательный тренд, который составил $-3,5$ мм/месяц/год, и это несмотря на то, что в этот период (в июле 2016 г.) наблюдалось максимальное за месяц количество осадков, которое составило почти 130 мм/мес.

Максимальные значения среднемесячных осадков в Среднем и Южном Каспии наблюдаются в июле месяце и составляли 100 – 130 мм/мес.

Уровень моря

Межгодовые изменения уровня Каспийского моря по данным инструментальных измерений (с 1837 г.) и спутниковых альтиметров (с 1993 г.) в разные временные периоды рассматривались во многих работах. Представление об изменении уровня Каспия по данным альтиметрических измерений с 1993 г. по 2020 гг. дает рис. 21.

За исключением двух периодов подъема уровня – с зимы 1992/1993 г. до лета 1995 г. со скоростью $+19,93 \pm 2,14$ см/год до отметки $-26,4$ м БС и с зимы 2001/2002 гг. до лета 2005 г. со скоростью $+9,92$ см/год до отметки $-26,7$ м БС – и его относительной стабилизации в 2015–2017 гг. (слабый отрицательный тренд $-0,37 \pm 0,12$ см/год), уровень Каспия падал (рис. 21). Падение уровня после лета 2005 г. не было монотонным: резкое уменьшение уровня имело место в конце 2010 – начале 2011 гг. в связи с засухой в Европейской части России, включая бассейн р. Волга, в конце июня – августе 2010 г. (Агре et al., 2012), в конце 2014 и в конце 2018 гг. Средняя скорость падения уровня в 28-летний период 1993–2020 гг. составила $-5,37 \pm 1,24$ см/год. К концу 2020 года уровень достиг отметки $-28,5$ м БС. Таким образом, с максимального значения в рассматриваемый период в 1995 г. ($-26,6$ м БС) до минимального в 2020 г. ($-28,5$ м БС) уровень упал на 1,9 м, и от минимума 1977 г. (-29 м БС) его отделяет всего лишь 0,5 м. С декабря 2020 г. по декабрь 2022 г. средний уровень Каспия снизился еще на 43 см, таким образом, уровень Каспия фактически приблизился к минимуму 1977 г.

Сравнительный анализ характера изменения уровня Каспия и стока Волги в период 1992–2016 гг. показал, что подъем уровня в 1993–1995 гг. и его спад до 1997 г. соответствовали изменениям стока Волги (Гинзбург, Костяной, 2018). В дальнейшем определяющим фактором падения уровня моря, при падении в среднем речного стока, являлось увеличившееся испарение с поверхности моря (Chen et al., 2017; Гинзбург, Костяной, 2018; Серых, Костяной, 2020).

Гинзбург А.И., Костяной А.Г. Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-ые – 2017 гг.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 195–207.

Серых И.В., Костяной А.Г. О влиянии Атлантического и Тихого океанов на изменение климатических параметров Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 96–107.

Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S. Long-term Caspian Sea level change // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44. P. 6993–7001. DOI:10.1002/2017GL073958.

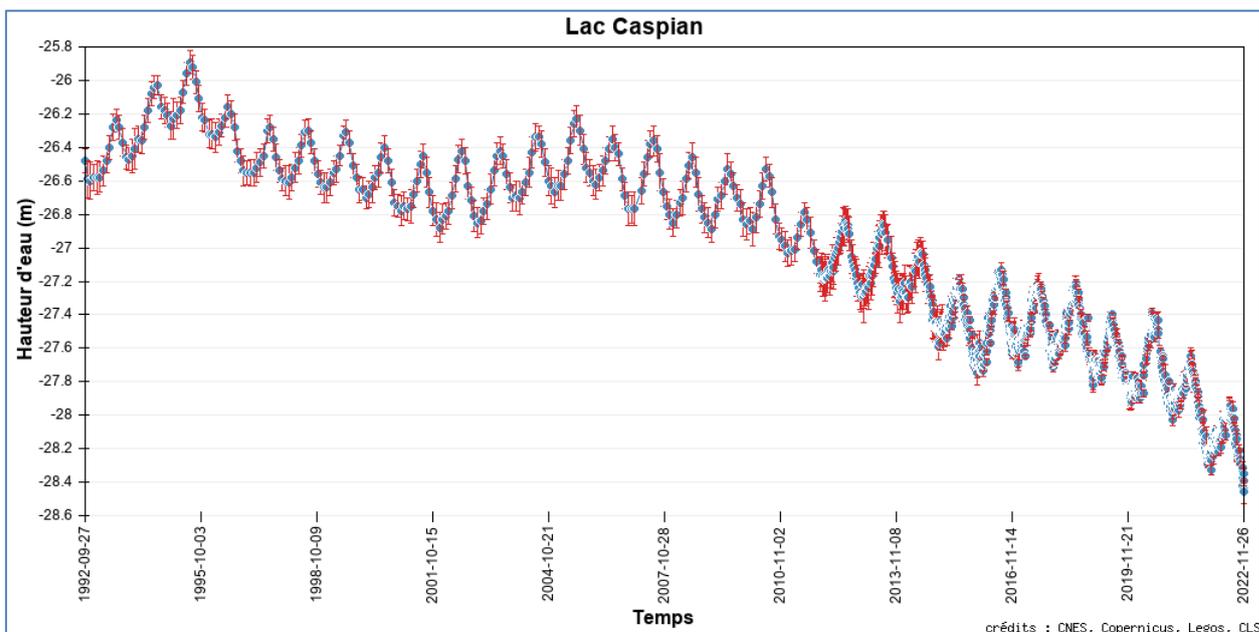


Рис. 21. Сезонная (сплошная линия) и межгодовая (пунктир) изменчивость аномалий уровня Каспийского моря (м) с января 1993 г. по 26 ноября 2022 г. по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2/3 (Hydroweb, LEGOS, Франция)

3. Тренды в географическом распространении загрязнений различных типов и в удельном вкладе каждого из них в интегральное загрязнение Каспийского моря в текущем столетии. Оценка связей с природными и антропогенными факторами, региональным изменением климата.

Нефтяное загрязнение морской поверхности

1. В ходе исполнения проекта нами были определены районы наиболее интенсивного загрязнения морской поверхности нефтяными пленками и выявлены источники загрязнения характерные для различных частей Каспийского моря. Выявленные источники характеризуются строгой приуроченностью к определённым географическим координатам (показано на рис. 1).

2. Выявлена изменчивость площади акватории, потенциально подверженной загрязнению нефтяными плёнками в различных районах (см. рис. 22). Пробел в результатах за 2012–2014 гг. связан с тем, что ИСЗ Envisat перестал функционировать, а ИСЗ Sentinel-1A еще не был выведен на орбиту, и радиолокационные данные в количестве, обеспечивающем получение статистически достоверных результатов, в этот период времени были недоступны.

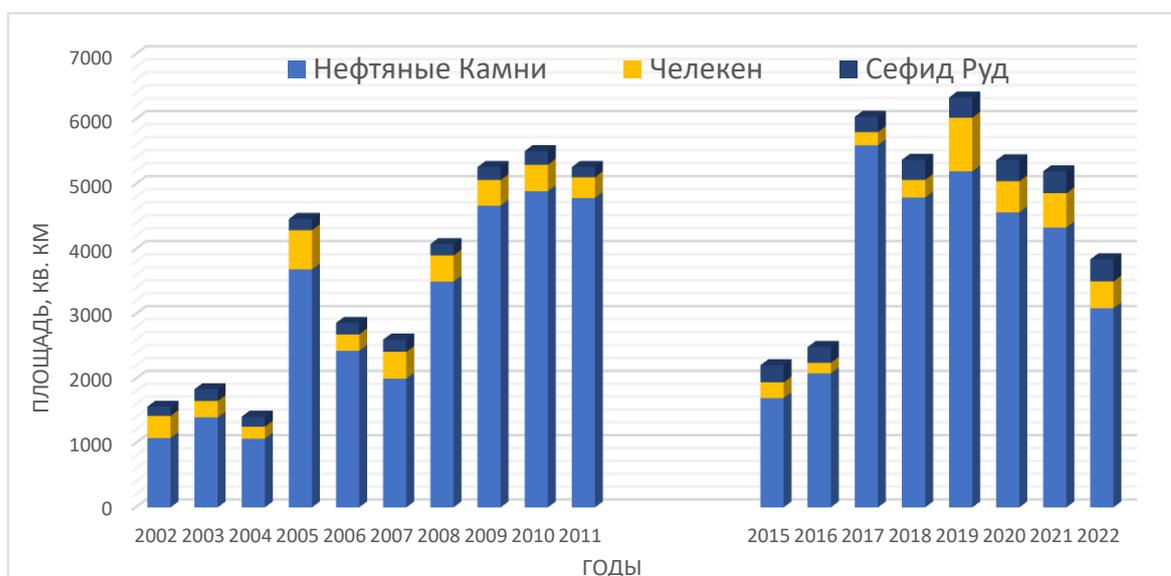


Рис. 22 Межгодовая изменчивость потенциально подверженной загрязнению площади акватории вблизи источника загрязнения для различных районов Каспийского моря

Площадь акватории, потенциально подверженной загрязнению плёнками естественных нефтепроявлений, варьирует в пределах 1070–5600 кв. км в районе нефтедобычи Нефтяные Камни, в пределах 145–263 кв. км на иранском шельфе вблизи мыса Сефид Руд и в пределах 165–826 кв. км на туркменском шельфе вблизи полуострова Челекен.

Установлено, что естественные нефтепроявления после выхода на поверхность под влиянием ветра и течений, могут оказаться вовлечены в вихревые движения и распространяться на большие расстояния вплоть до 35 км в районе м. Сефид Руд и до 50 км в районе полуострова Челекен, что существенно увеличивает площадь акватории, потенциально подверженной нефтяному загрязнению. Скачки площади потенциально подверженной загрязнению плёнками естественных нефтепроявлений в районе п-ва Челекен, наблюдаемые в 2005 и 2019 гг. произошли из-за интенсификации вихревой активности. При этом площадь, с высокой вероятностью подверженная загрязнению оказывается в разы меньше (см. рис. 23).

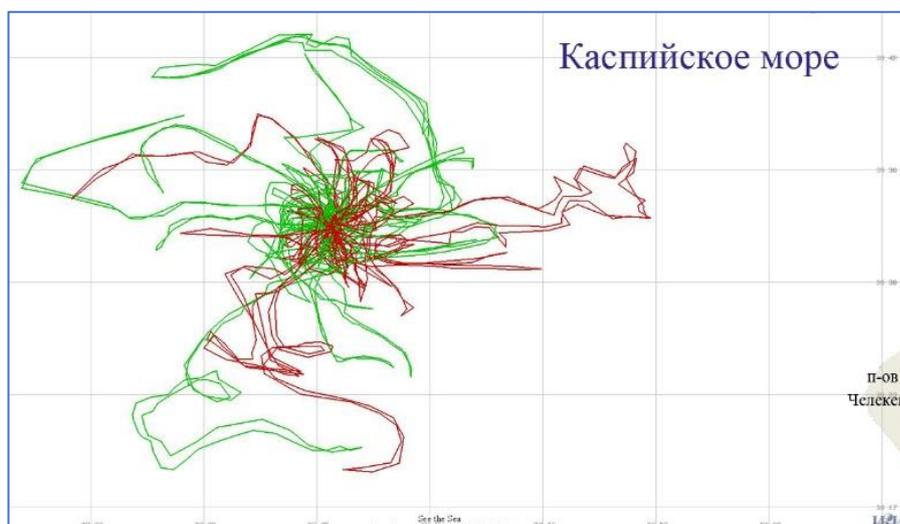


Рис. 23. Сводная карта естественных нефтепроявлений на поверхности Каспийского моря выявленных вблизи полуострова Челекен по спутниковым данным за 2019 г. Площадь потенциально подверженная загрязнению плёнками естественных нефтепроявлений составляет 826 кв. км. Площадь с высокой вероятностью подверженная загрязнению плёнками естественных нефтепроявлений составляет 165 кв. км

3. 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 нефтяными пленками в районе нефтедобычи Нефтяные Камни (60-65%), а также грязевулканическая активность на морском дне в районе Южно-Каспийской впадины (18–23%). Меньший вклад в общую картину загрязнения вносят естественные нефтепроявления углеводородов с морского дна на иранском и на туркменском шельфах (7–10%) и (8–11%) соответственно. Однако, следует отметить, что в районе Иранского шельфа максимальная площадь, потенциально подверженная нефтяному загрязнению, обусловленному выходами углеводородов с морского дна увеличивается, хотя и не монотонно (максимальное значение зафиксировано в 2022 г. и составляет 340 кв. км).

4. Особенности изменений в характере типичных для Каспийского моря гидродинамических процессов на основе анализа многолетних рядов спутниковых данных: тренды в изменчивости поля течений, волновой и вихревой активности.

Существенных изменений в характере типичных для Каспийского моря гидродинамических процессов на основе анализа многолетних рядов спутниковых данных не выявлено.

5. Прогнозы возможного трансграничного переноса загрязнений с учетом выявленных в ходе исполнения проекта трендов гидрометеорологических параметров Каспийского моря, его циркуляционных и динамических процессов.

Трансграничные воды Каспия омывают пять стран — Азербайджан, Иран, Казахстан, Россию и Туркменистан, лидеры которых подписали конвенцию о правовом статусе Каспия летом 2018 г. На карте моря (см. рис. 24) появились районы с различным правовым режимом: а) территориальные воды, их размер равен 15 морским милям, а их внешняя граница приобретает статус государственной; б) 10-мильная рыболовная зона, примыкающая к территориальным водам, в которой каждая страна обладает исключительным правом на промысел; в) открытая часть моря, находящаяся в общем пользовании.

1. К числу факторов, тормозящих трансграничный перенос, следует отнести некую обособленность отдельных экосистем Каспийского моря, обусловленную, в основном, донным рельефом. В частности, Мангышлакский порог отделяет Северный Каспий от Среднего, а Апшеронский порог – Средний Каспий от Южного. Эта обособленность не носит характер абсолютной изоляции, но означает, что скорость водообмена внутри каждой части водоема выше, чем между соседними частями.

2. В Южном Каспии сосредоточены основные источники нефтяного загрязнения морской поверхности (см. рис. 24).

Результаты, полученные в ходе исполнения проекта на основе спутниковых данных позволяют утверждать, что в этой части моря на водообмен и перенос загрязнений оказывают следующие факторы:

- Основная схема течений носит антициклонический характер (судя по всему, ветер не является основной причиной возникновения течений в этом районе; определяющее влияние на направление и скорость течения здесь оказывают конфигурация берега, морфология дна и сила Кориолиса). Мезомасштабные антициклоны с присоединенными циклонами регулярно выявляются (i) над склоном южно-каспийской впадины от Апшеронского п-ова до юго-восточного «угла» моря, (ii) вдоль южного

побережья от м. Сефид-Руд (где расположены естественные выходы углеводородов на морском дне) до самой южной точки моря, (iii) в глубоководной части моря.

- Вихри, образовавшиеся в районе м. Сефид-Руд, смещаются на восток. На периферии антициклонов проявляются циклонические вихри меньшего или сравнимого с ним диаметра.
- Для глубоководной части Южного Каспия характерны более крупные антициклонические и циклонические вихри, а также вихревые диполи и их комбинации. Вовлечение вод по перифериям вихрей, в том числе вихрей на границе Среднего и Южного Каспия, способствует усилению водообмена и, возможному переносу загрязнений.
- Следует также обращать внимание на сравнительно короткоживущие струйные потоки, которые способствуют интенсификации горизонтального водообмена. Ветры восточных румбов, часто наблюдающиеся в августе — октябре, способствуют распространению вод из Южного Каспия в Средний в виде струйных потоков, имеющих скорость продвижения около 20 см/с.

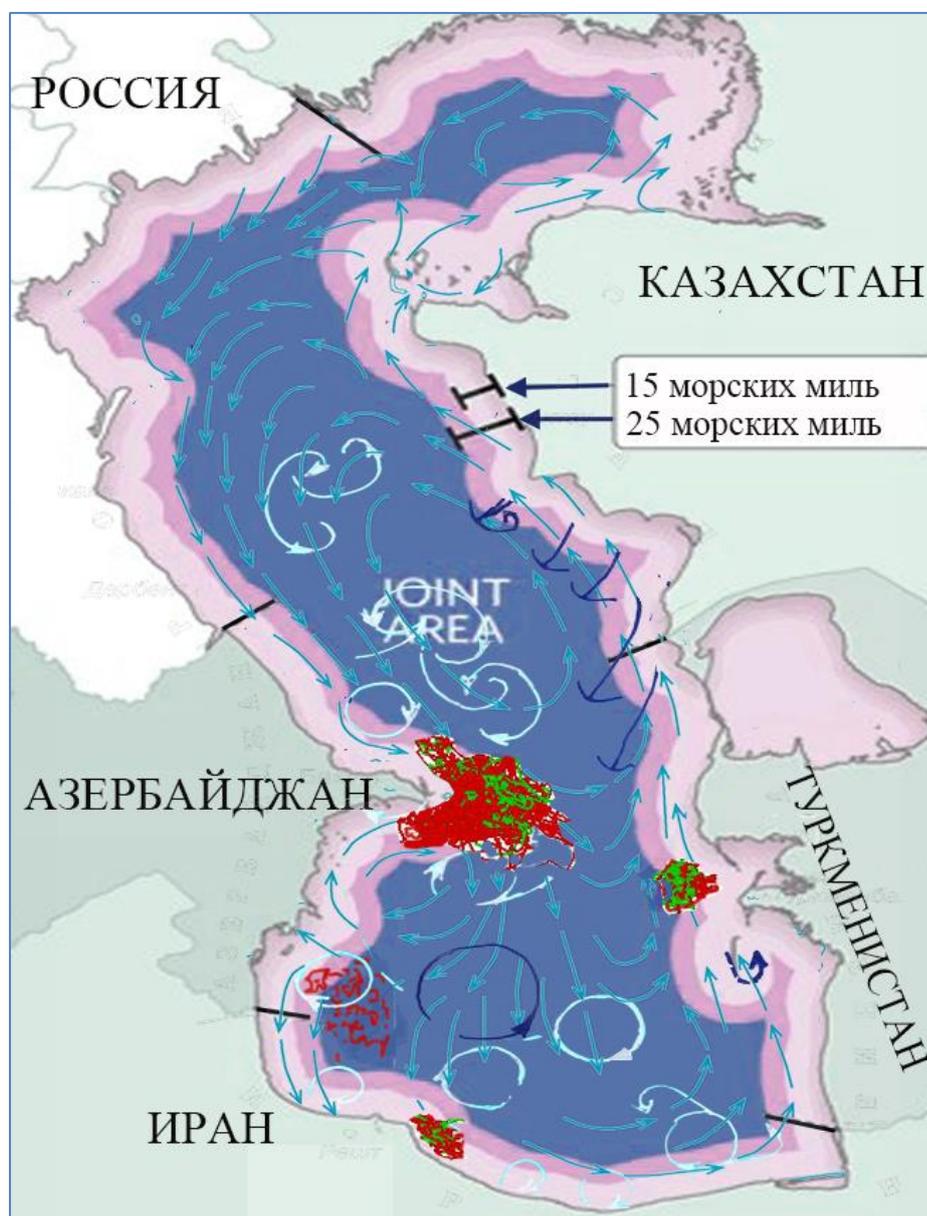


Рис. 24. Карта Каспийского моря с отмеченными районами различного правового режима, районами нефтяного загрязнения и основными элементами циркуляции

Поскольку Каспийское море омывает территории 5 стран, то наблюдаемые судовые сбросы, так или иначе, идентифицируются на внутренних и территориальных водах прибрежных государств. Оценивая пространственное распределение судовых сбросов в Каспийском море, были обнаружены случаи нефтяных загрязнений, пересекающих морские государственные границы (см. Рис. 25)

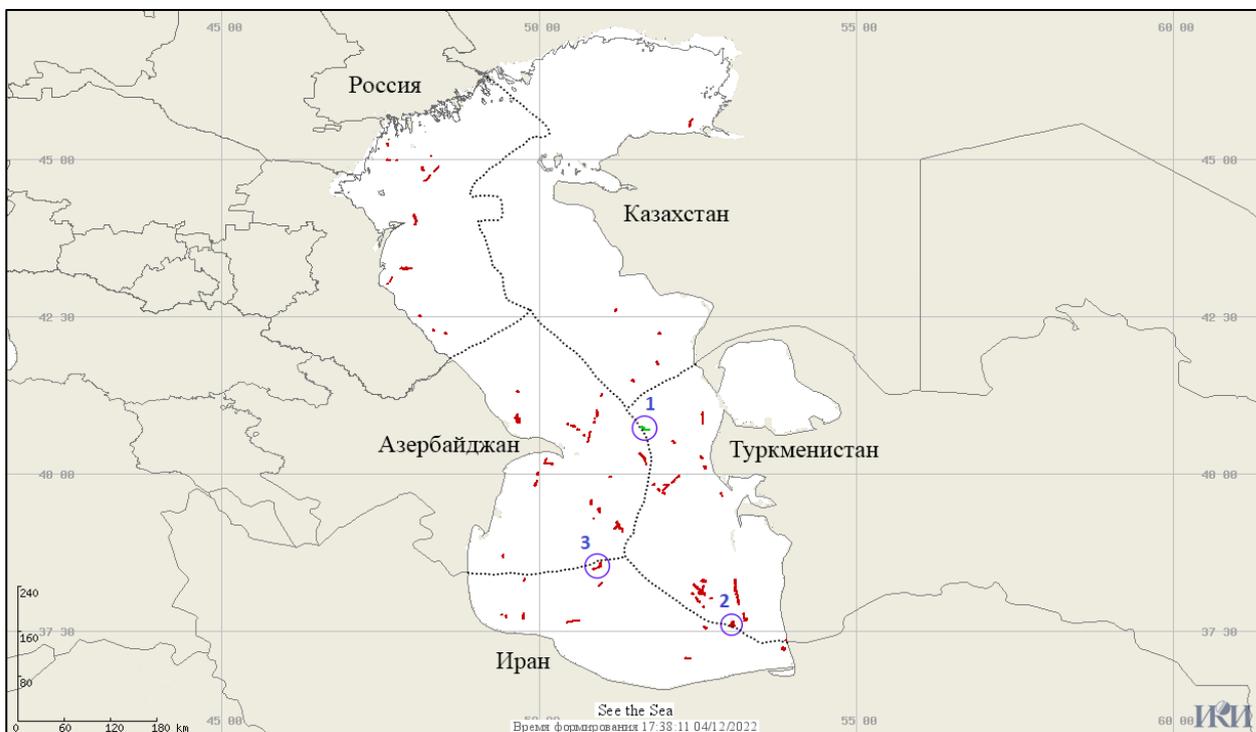


Рис. 25. Карта судовых сбросов с выделенными межгосударственными границами. Синими кружками обозначены случаи пересечения нефтяной пленки территорий двух государств

Далее представлено описание каждого из выявленных случаев трансграничного переноса:

1. Пересечение границы между Туркменистаном и Азербайджаном (рис. 26).
Нефтяное пятно было выявлено на оптическом изображении, полученном сенсором OLI-TIRS спутника LANDSAT 8, за 14.07.2022 07:13:18 UTC. На момент съемки зарегистрирован восточный ветер, который распространял пленку на территорию Азербайджана.

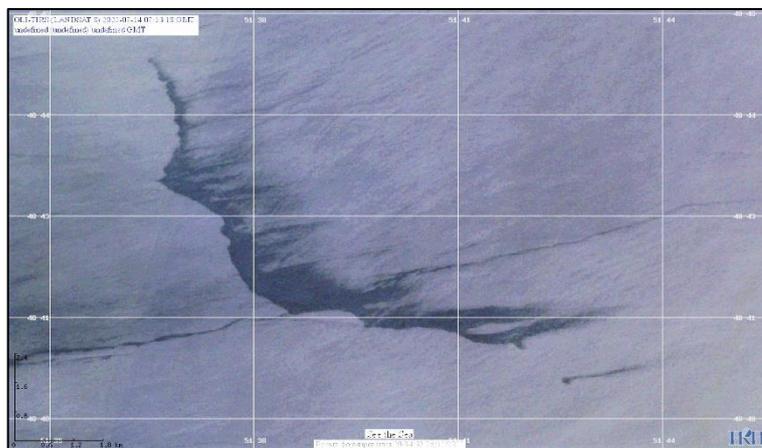


Рис.26. Судовой сброс, зарегистрированный на оптическом изображении Landsat-8, 14.07.2022 07:13:18 UTC

2. Пересечение границы между Туркменистаном и Ираном (рис. 27). На РЛИ наблюдается темное пятно площадью 23,59 кв.км., полученное в результате судового сброса. На изображении также зафиксированы прилегающие суда в 15,5 км от границы пленки. В момент съемки действовал юго-западный ветер.

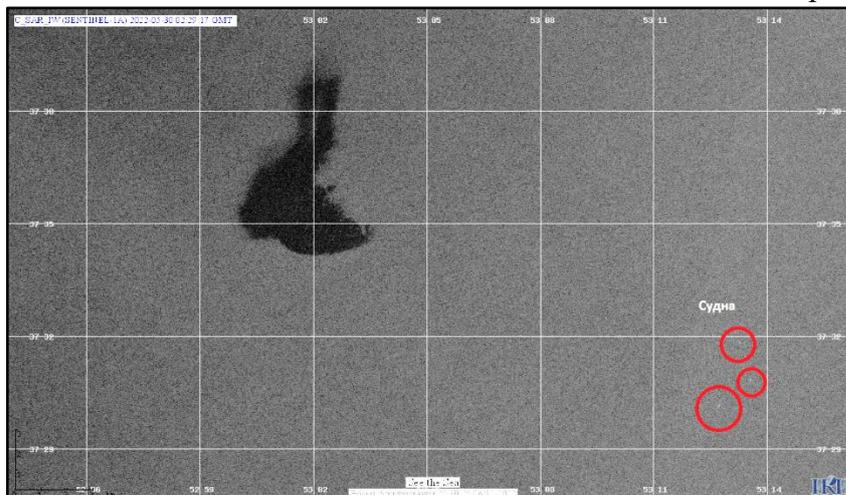


Рис. 27. Судовой сброс, зарегистрированный на РЛИ, 30.05.2022 02:29:17 UTC

3. Пересечение границы между Ираном и Азербайджаном (рис. 28). Под действием юго-западного ветра нефтяное пятно площадью 4,23 кв.км. распространялось в северном направлении, достигнув границы с Азербайджаном.

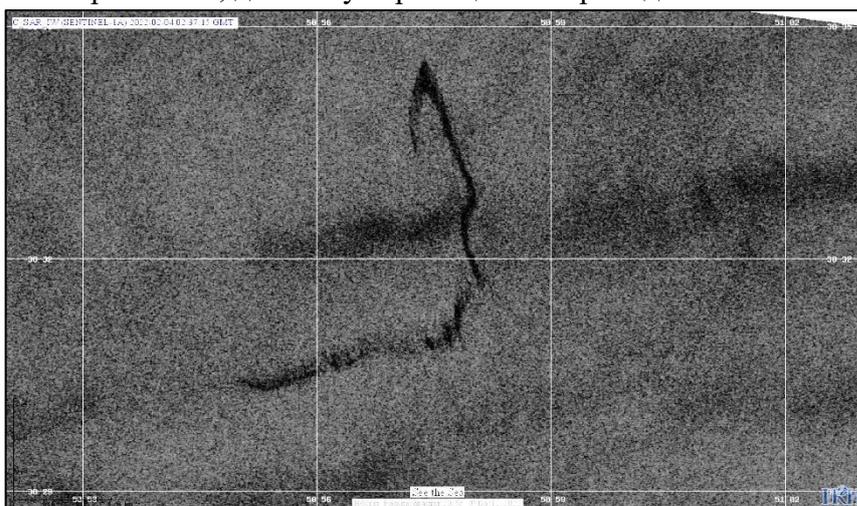


Рис. 28. Судовой сброс, зарегистрированный на РЛИ, 04.02.2022 02:37:15 UTC

6. **Модернизация информационной системы «See The Sea».**

В рамках работы по модернизации информационной системы «See the Sea» (STS) реализованы новые функциональные возможности, ориентированные на работу с данными натуральных инструментальных измерений. Для этих целей были разработаны программные решения, позволяющие в автоматическом режиме проводить предварительную обработку и коррекцию исходных данных измерений, а затем запись в базу данных, созданную для этих целей. Специальный web-интерфейс обеспечивает пользователям возможность ввода данных в систему, управления ими, отображения их в графической и табличной формах. Помимо этого, реализована интеграция с основным

картографическим интерфейсом системы STS, что позволяет проводить совместный анализ данных натуральных измерений со спутниковыми изображениями, метеорологическими и тематическими данными.

После проведения подспутниковых экспериментов в июне 2022 г. в приустьевых зонах рек Терек и Сулак, данные CTD-зонда со всех станций измерений были интегрированы в систему STS (см. рис. 29), что позволило проводить совместный анализ данных спутникового зондирования и измерений in-situ прямо в системе STS.

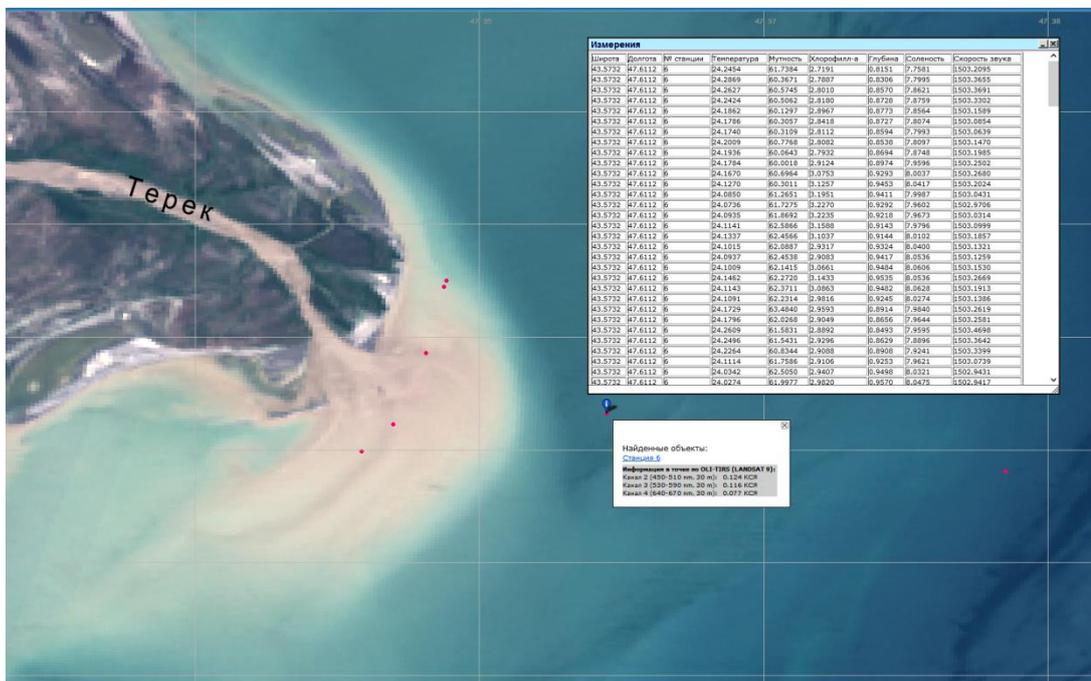


Рис. 29. Пример интеграции данных CTD-зонда, полученных во время in-situ измерений в июне 2022 г.