

Спутниковый мониторинг ледяного покрова в Каспийском море в 21 веке

Лаврова О.Ю. (1), Костяной А.Г. (2, 1)

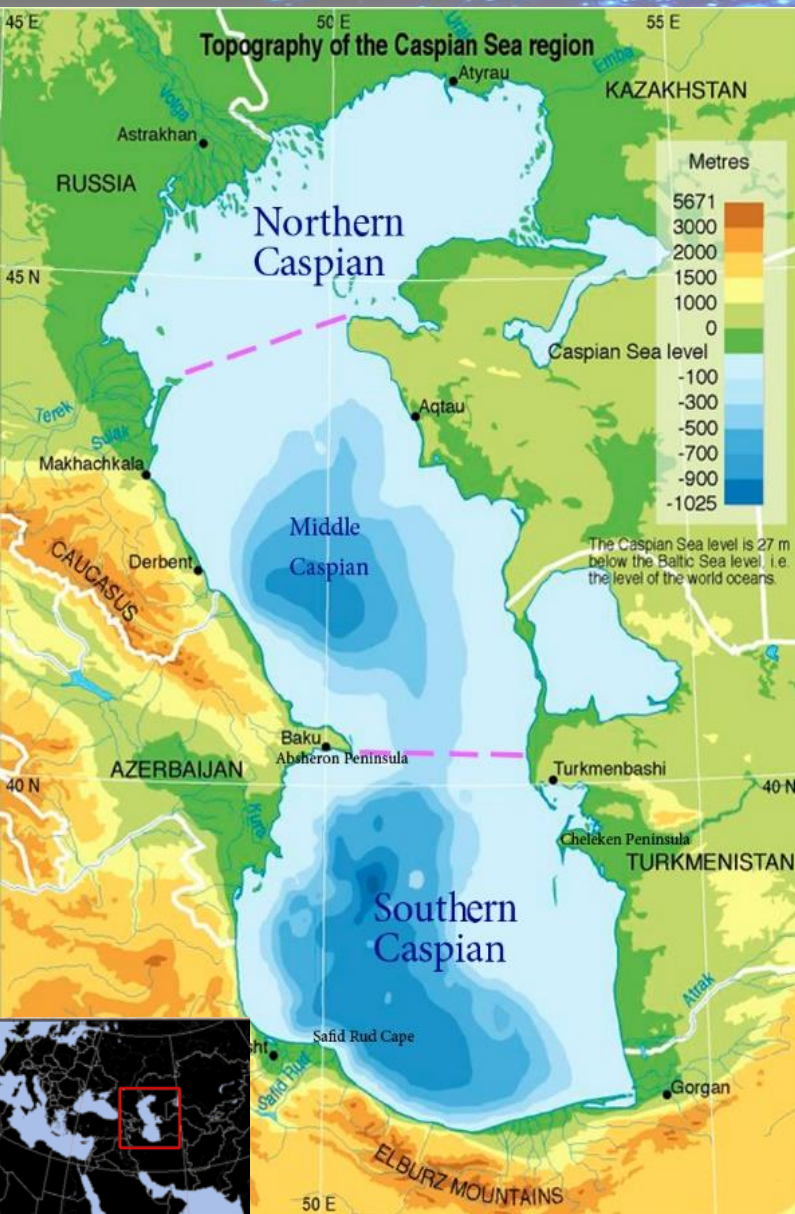
(1) Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

(2) Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

olavrova@iki.rssi.ru

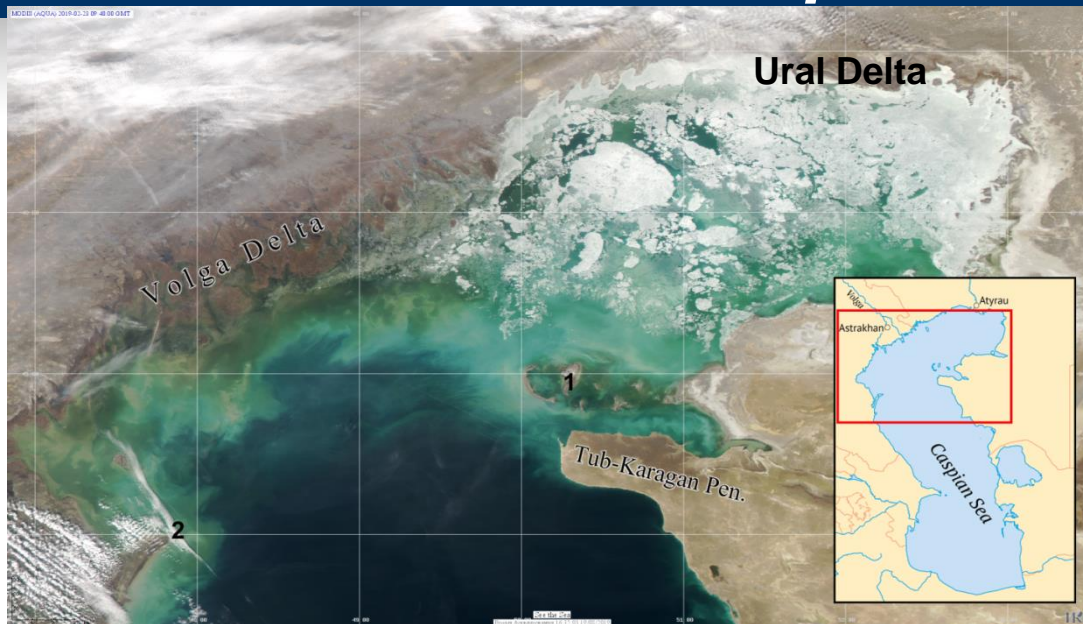


Каспийское море



- Каспийское море крупнейший в мире полностью замкнутый водоем с солоноватой водой с площадью около 0.4 млн км².
- Максимальная длина с севера на юг – примерно 1200 км, ширина 200-450 км, максимальная глубина 1025 м.
- Исходя морфологических признаков море делят на три части: Северный, Средний и Южный Каспий.
- Граница между Северной и Средней частью проходит по краю Северного Каспийского шельфа (порог Мангышлак), между островом Чечень и мысом Тюб-Караган в Форт-Шевченко. Граница между Средней и Южной частью проходит от порога Апшеронского, соединяющего остров Жилой на западе до мыса Куули на востоке.
- Прикаспийские страны - Российская Федерация, Азербайджан, Иран, Туркменистан и Казахстан.

Район спутникового мониторинга: Северный Каспий



Красный прямоугольник отмечает положение MODIS Aqua изображения от 23.02.2019.

1 – Тюленьи о-ва,
2 - о. Чечень

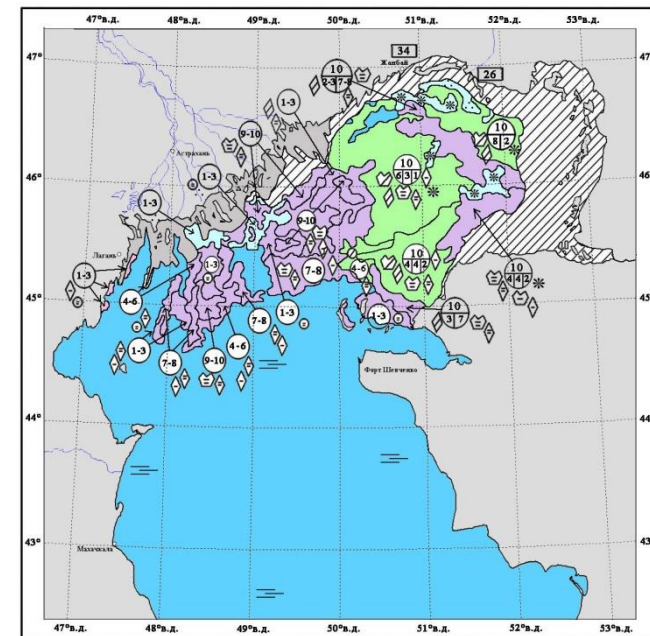
- Характерная особенность Северного Каспия - его мелководность; средняя глубина 4.4 м;
- глубины менее 2-3 м простирают от уреза воды на расстояние от 10 м до 70 км;
- две крупные реки впадают в Северный Каспий: Волга и Урал, которые образуют обширные дельты, заросшие густым тростником;
- побережье Северного Каспия сильно изрезано, устьевые участки образуют множество отмелей и мелких островов, что сильно затрудняет детектирование льда на спутниковых изображениях, особенно в период его образования и таяния;
- лед формируется каждую зиму, в особо холодные зимы ледяной покров может охватывать западное побережье Среднего Каспия.

История мониторинга ледяного покрова в Северном Каспии



Мониторинг ледяного покрова с вертолета (фото Бухарицына П.И.)

- Наблюдения начались еще во второй половине девятнадцатого века, но информация могла быть получена только о состоянии льда вдоль берега или вдоль немногочисленных судовых путей.
- Регулярные наблюдения начали проводиться во второй половине 20 века гидрометеорологической службой Советского Союза с авианосителей.
- Новый этап в проведении регулярного мониторинга ледяного покрова Северного Каспия начался в связи появлением спутниковых данных оптического диапазона, в первую очередь данных MODIS Aqua и Terra. На основе данных этого сенсора строились еженедельные карты ледяного покрова, с информацией о типах льда на них
- Такой мониторинг продолжается Росгидрометом



Карта ледяного покрова на 12.03.2018

(© НИЦ «Планета»)

Возрастные характеристики (толщина) дрейфующего льда:	Условные обозначения:	Обобщенные характеристики льда:
<ul style="list-style-type: none"> чистая вода мелкий лед (до 10 см) серый лед (10-15 см) серо-белый лед (15-30 см) тонкий оледенелый (белый) лед (30-40 см) одрезанный дог средней толщины (70-120 см) 	<ul style="list-style-type: none"> начальные виды льда блочный лед (0,3-3 м) мелкоблочный лед (<20 м) крупноблочный лед (20-100 м) облаки ледяных полей (100-500 м) большие поля (500-2000 м) обширные ледяные поля (2-10 км) 	<ul style="list-style-type: none"> сплошность льда в баллах область сплошности количество более старого льда количество более молодого льда трещины толщина приливного льда, см торосистость льда

Задачи нашего исследования

- Сравнение результатов мониторинга ледяного покрова в Северном Каспии, проведенного нами для зимних периодов с 1998/1999 по 2018/2019 гг. с ранее опубликованными данными;
- определение наличия трендов, если они существуют, для значений продолжительности периодов отрицательных температур воздуха за последние 20 лет по сравнению с последними двадцатью годами прошлого века;
- оценка максимальных площадей ледяного покрова, определение их зависимости от степени суровости зим и продолжительности периодов отрицательных температур, а также выявление изменений в максимальных значениях площади ледяного покрова за сорок лет;
- определение характеристик используемых спутниковых данных (радиолокационных и оптических), которые наилучшим образом подходят для решения задачи выявления ледяного покрова.

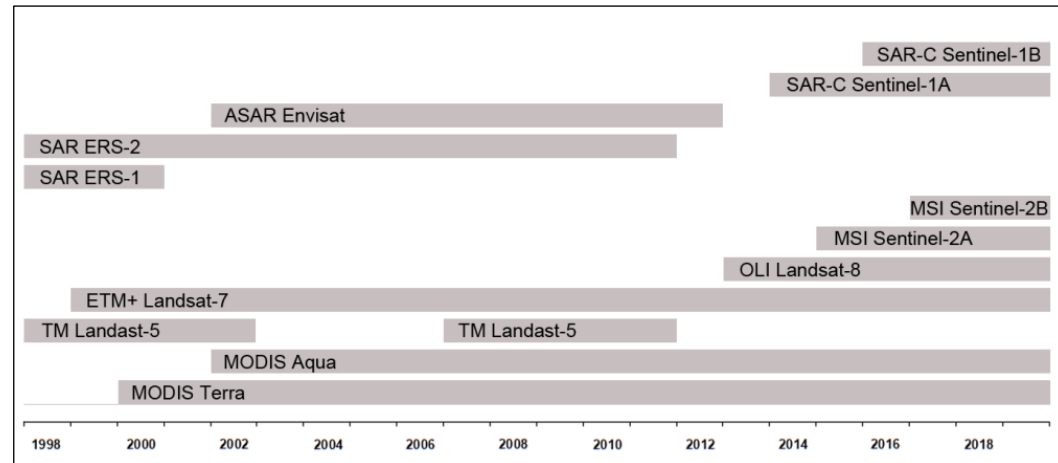
Используемые спутниковые данные

Ocean Color Data

- Terra MODIS, февраль 2000 – настоящее время;
- Aqua MODIS, октябрь 2002 – настоящее время;
- Landsat TM-5, октябрь 1998 - октябрь 2011 (с перерывом с октября 2003 по апрель 2006);
- Landsat-7 ETM+, октябрь 1999 - настоящее время;
- Landsat-8 OLI, октябрь 2013 - настоящее время;
- Sentinel-2A MSI, октябрь 2015 - настоящее время;
- Sentinel-2B MSI, октябрь 2017 – настоящее время.

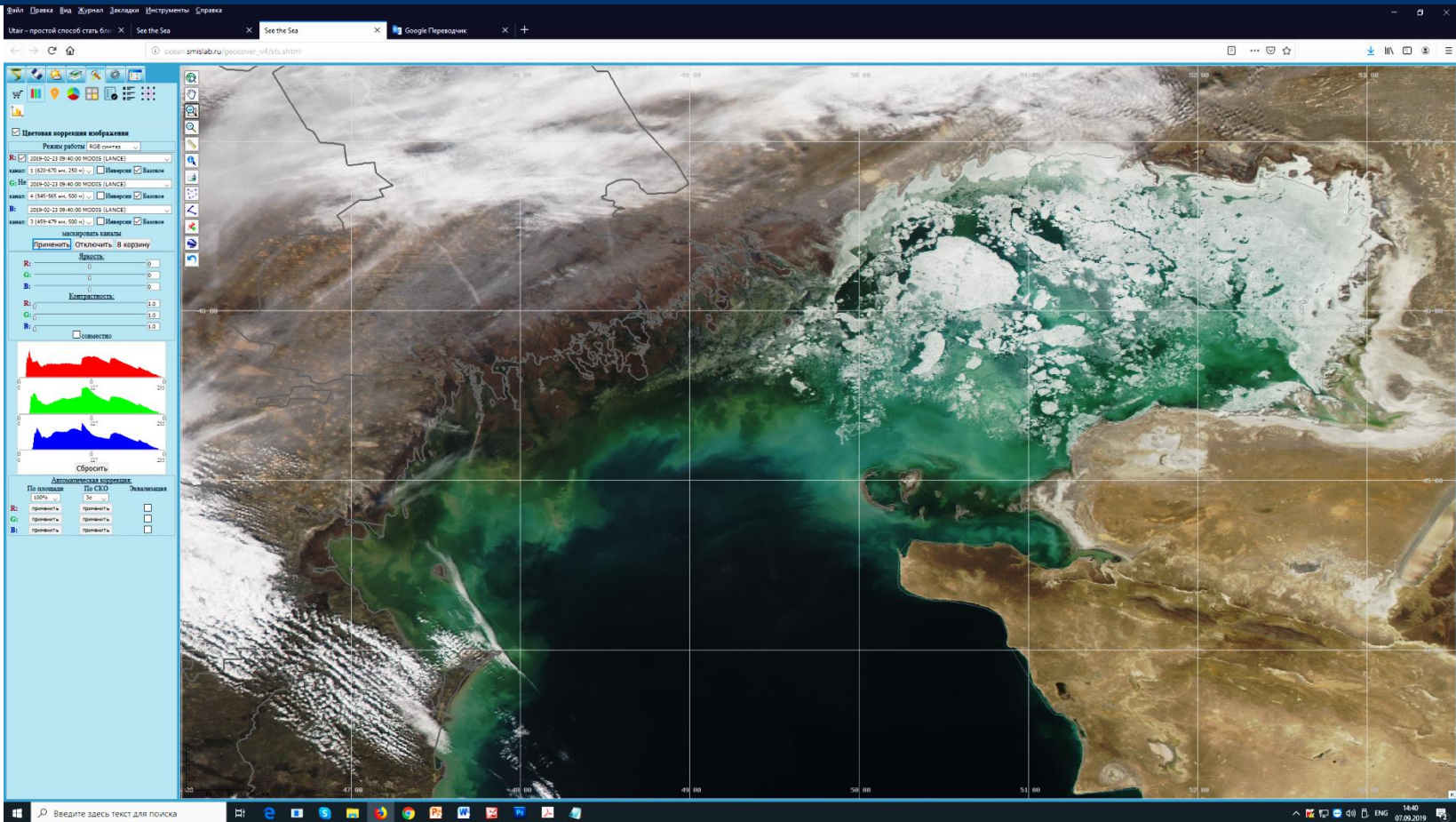
Radar Data

- ERS-1 SAR, октябрь 1998 - March 2000;
- ERS-2 SAR, октябрь 1998 - March 2011;
- Envisat ASAR, октябрь 2002 - 8 April 2012;
- Sentinel-1A SAR-C, октябрь 2014 - настоящее время;
- Sentinel-1B SAR-C, ноябрь 2016 - настоящее время.



Спутниковые данные, доступные для мониторинга ледяного покрова

Информационная система «See The Sea» (STS)



Окно в STS для цветной коррекции

“See the Sea” : <http://ocean.smislab.ru>

Специальные возможности, предусмотренные в STS для мониторинга льда

Стандартное цветосинтезированное изображение «в естественных цветах» :

Red – 4 band (630 – 680 nm),

Green – 3 band (525 – 600 nm),

Blue - 2 band (450 – 515 nm),

Не позволяет надежно отличать лед от облаков и суши

Специальные продукты для выделения ледяного покрова :

OLI Landsat-8

MSI Sentinel-2

Red – 7 канал (2100–2300 nm)

Red – 12 канал (2100–2280 nm)

Green – 5 канал (845 – 885 nm)

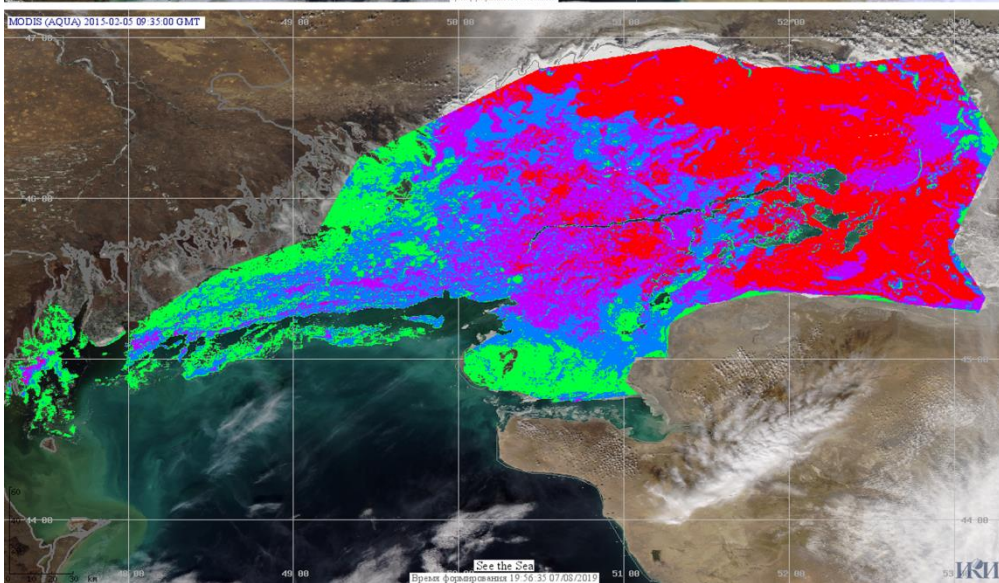
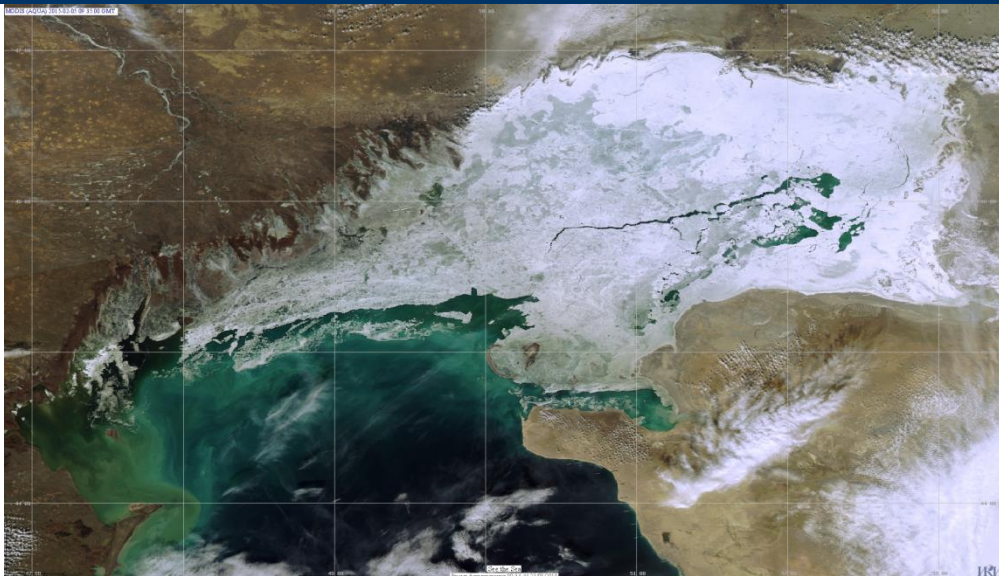
Green – 8 канал (785 – 900 nm)

Blue - 4 канал (630 – 680 nm)

Blue - 4 канал (650 – 680 nm)

Примеры различных композитов для данных OLI Landsat-8 (01.03.2017, Северный Каспий)

Инструмент «классификация» в STS



- В информационной системе “See the Sea” реализован инструмент «классификация» для выделения различных типов вод;
- позволяет прямо online формировать карты на основе спутниковых данных;
- внедрены два алгоритма: с обучением и без обучения;
- результаты классификации доступны прямо в окне браузера;
- результаты классификации позволяют определить общую площадь ледяного покрова, исключая трещины, полыньи, острова и акватории, свободные ото льда.

Пример результата применения «классификация без обучения» (внизу) для Aqua MODIS изображения от 05.02.2015 (вверху)

Метеоданные



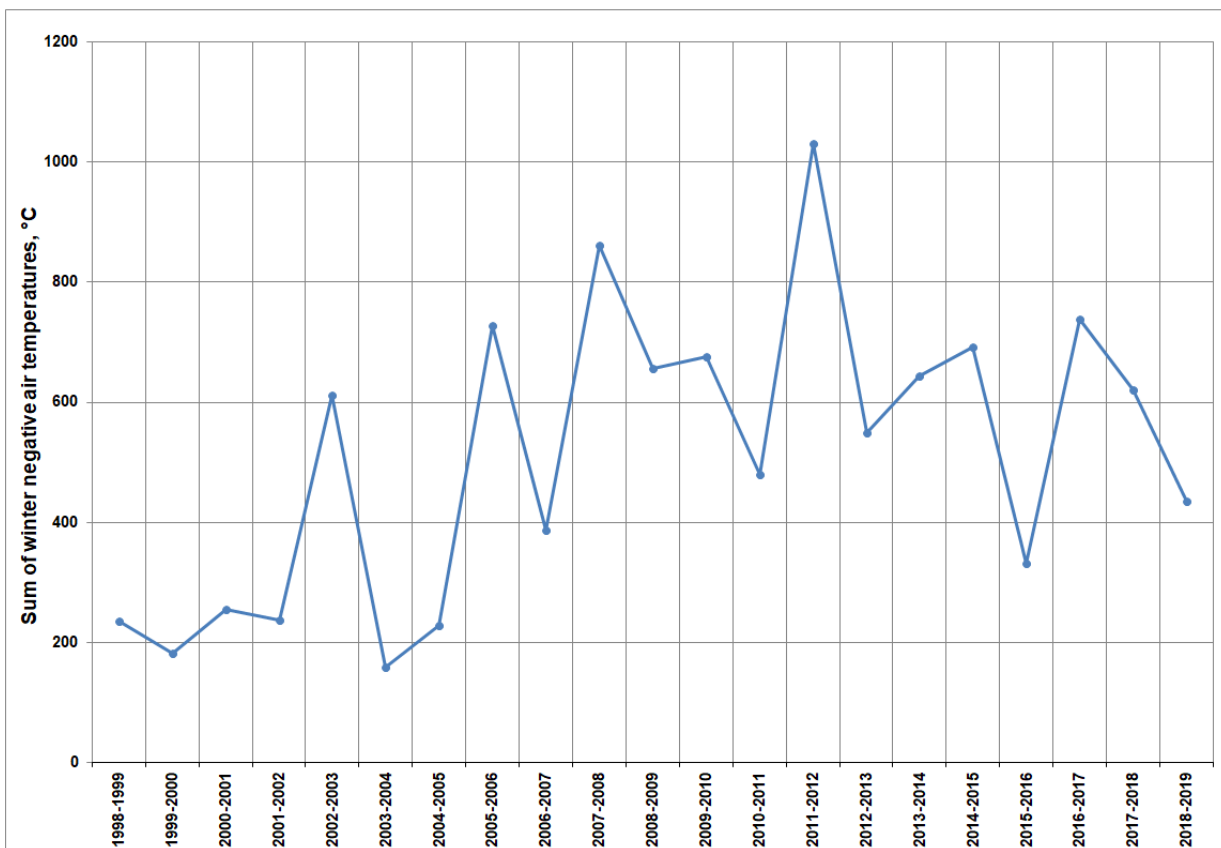
Данные о температуре воздуха брались с 4 метеостанций: Астрахань, Ганюшкино, Пешной и Атырау (<https://rp5.ru/>). Данные о температуре поверхности моря и воздуха (реанализ) брались в системе Giovanni online data system v.4.30 (NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, GES DISC).

Для сравнения с результатами предыдущих исследований использовались данные Астраханской метеостанции

Результаты: индекс суровости зимы

Очень суровая зима	Суровая зима	Умеренная зима	Мягкая зима	Очень мягкая зима
> 900	900-700	700-400	400-100	< 100

Индекс суровости зимы определялся по сумме градусо-дней мороза в Астрахани

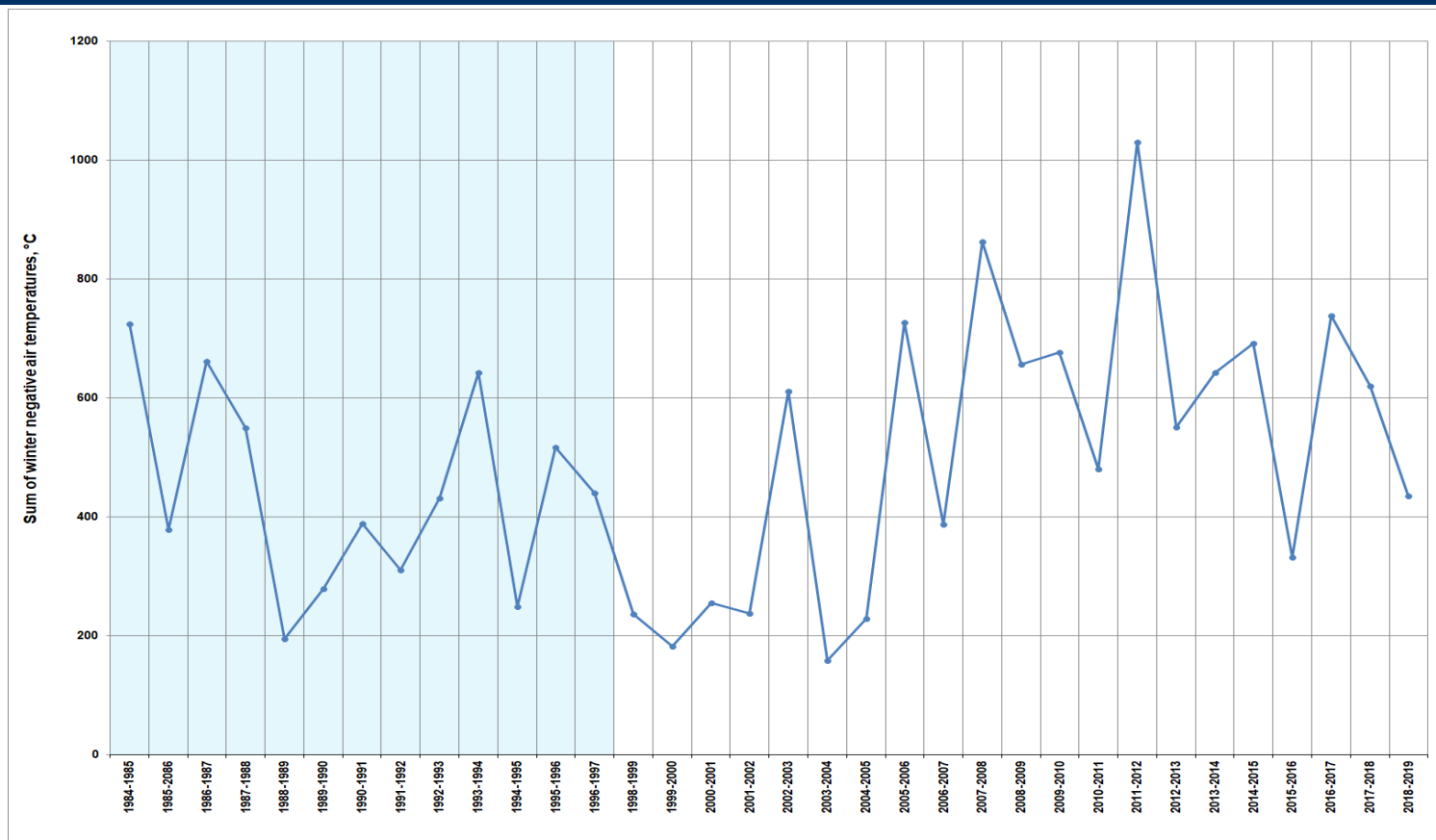


Очень суровая зима – 2011/2012
Суровая зима – 2005/2006,
2007/2008,
2016/2017

Мягких и умеренных зим по 8.
Мягкие зимы, за исключением
2015/2016 гг., были в первой
половине наблюдаемого
периода.
Очень мягких зим не было.

Сумма отрицательных температур воздуха

Результаты: суммы отрицательных температур воздуха



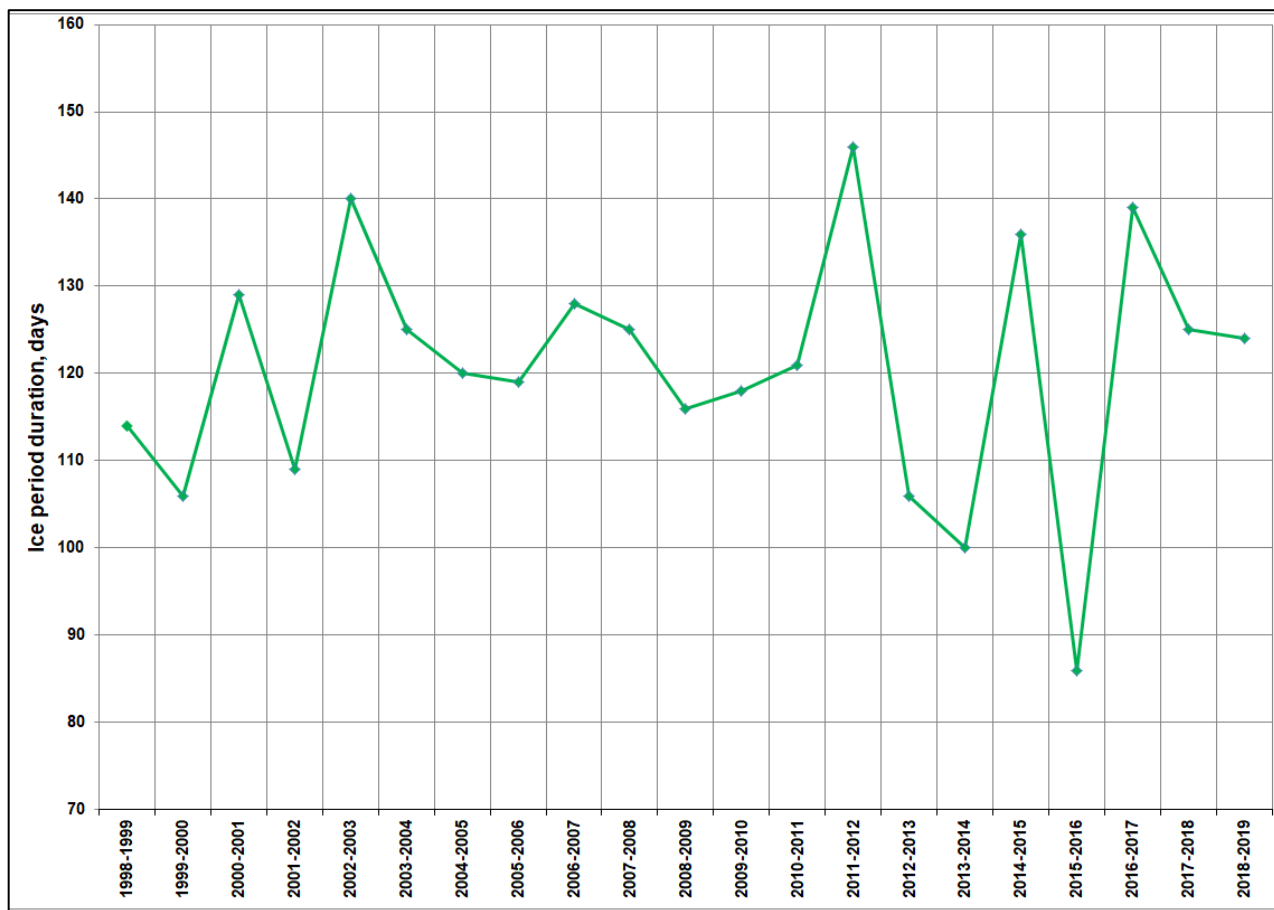
Закрашенная область – данные из научных публикаций

Средние значения:

1984/1985 – 1997/1998: - 444°C; 1998/1999 – 2018/2019: - 511°C

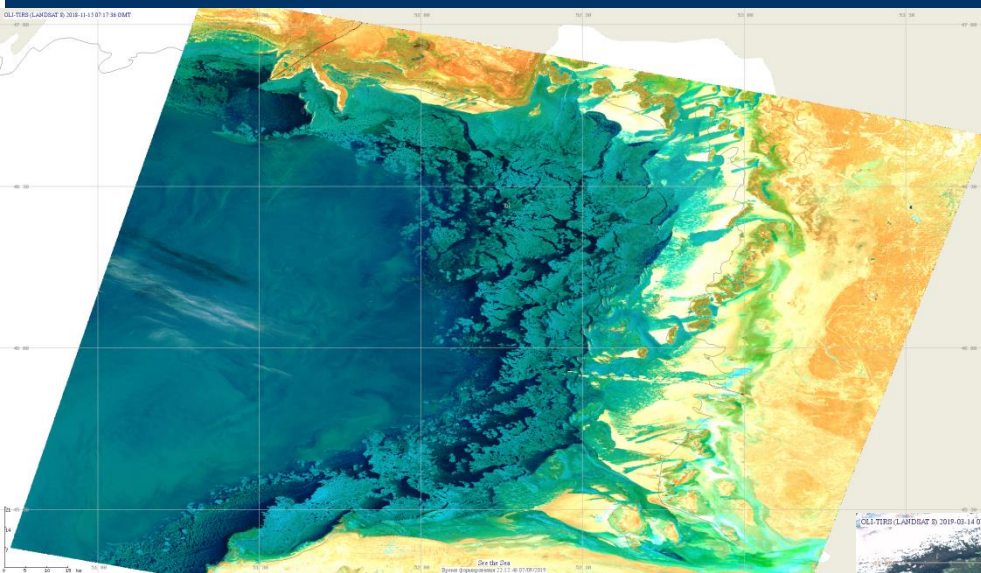
Положительного тренда в данных по температуре воздуха не выявлено

Результаты: продолжительность ледяного покрова



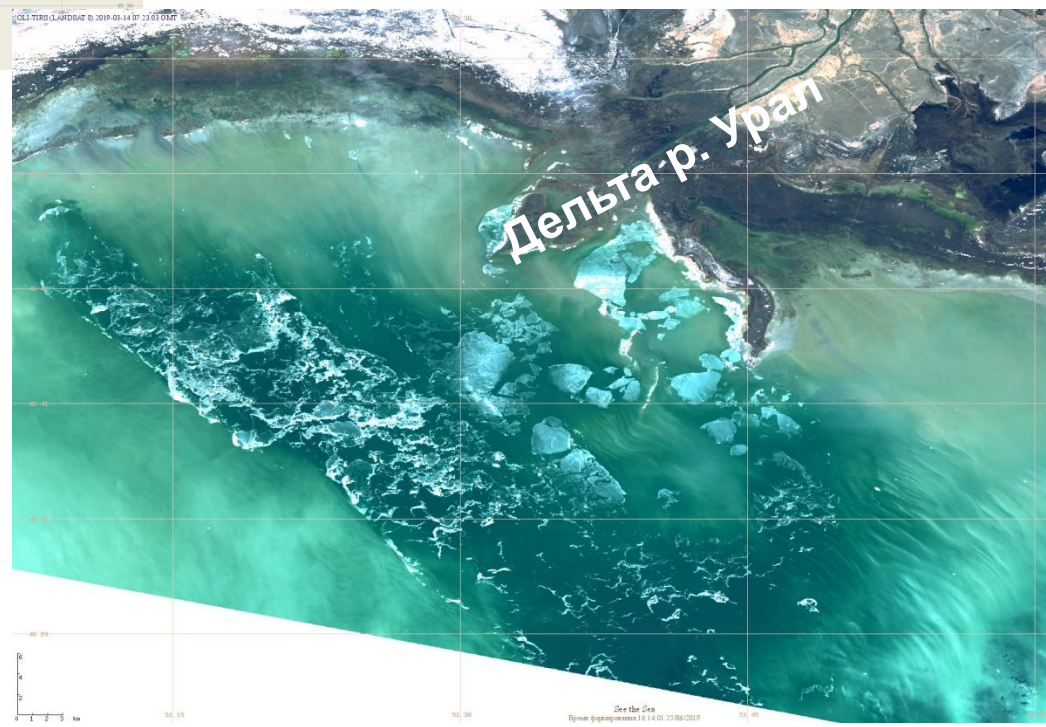
- определялась по спутниковым данным;
- максимальная продолжительность: 146 дней в очень суровую зиму 2011/2012;
- минимальная продолжительность: 86 дней в мягкую зиму 2015/2016;
- средняя продолжительность ледяного покрова: 115 дней;
- график продолжительности ледяного покрова характеризуется годичной периодичностью и увеличением амплитуды;
- сравнение с опубликованными данными показало, продолжительность ледяного покрова во всяком случае в восточной части Северного Каспия несколько снизилась, и не достигала 160 дней, как это наблюдалось в 80-е годы прошлого столетия

Результаты: максимальная площадь ледяного покрова



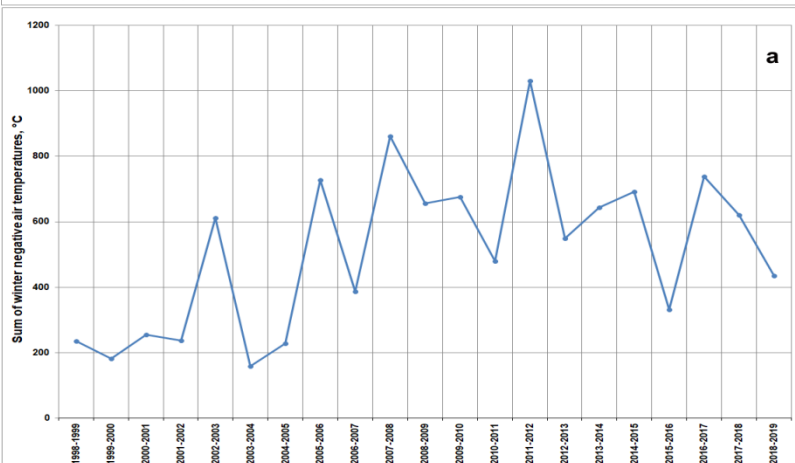
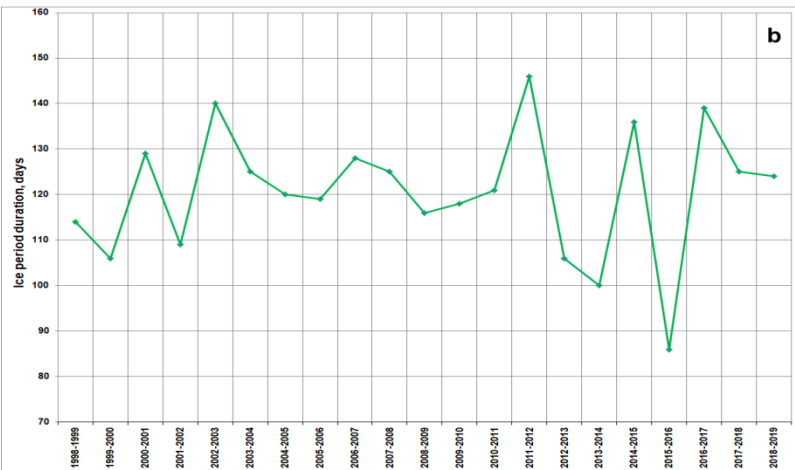
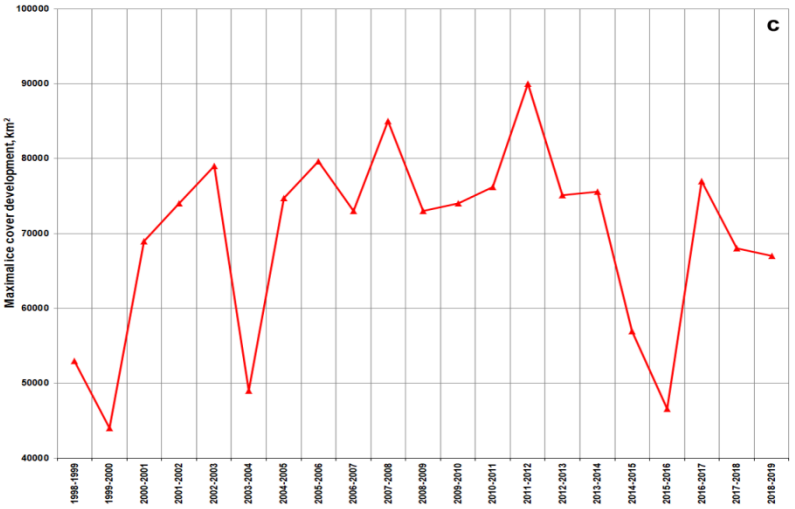
- Ледовый покров формируется в Северном Каспии каждый год;
- лед образуется первоначально в восточной части (самой мелководной);
- лед дольше всего наблюдается в акватории между Дельтой р. Урал и Тюленьими островами

Landsat-8 OLI изображение, полученное 15.11.2018 (каналы: Red – 7; Green – 5; Blue – 4)



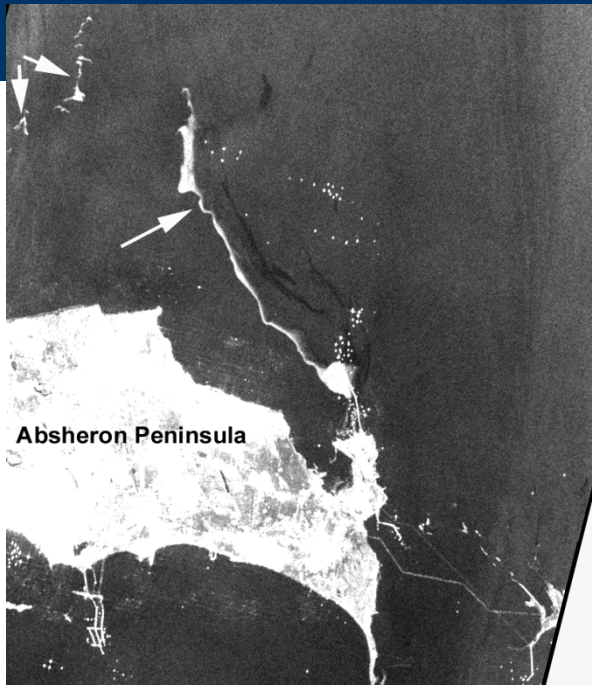
Landsat-8 OLI изображение, полученное 14.03.2019 (каналы: R – 4; G – 3; B – 2)

Результаты: максимальная площадь ледяного покрова

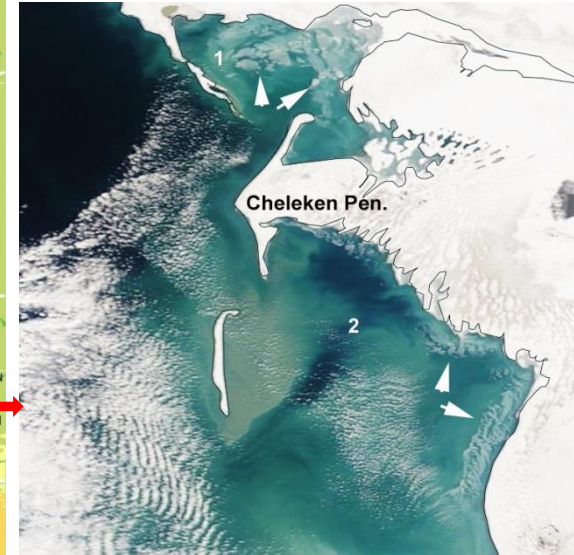
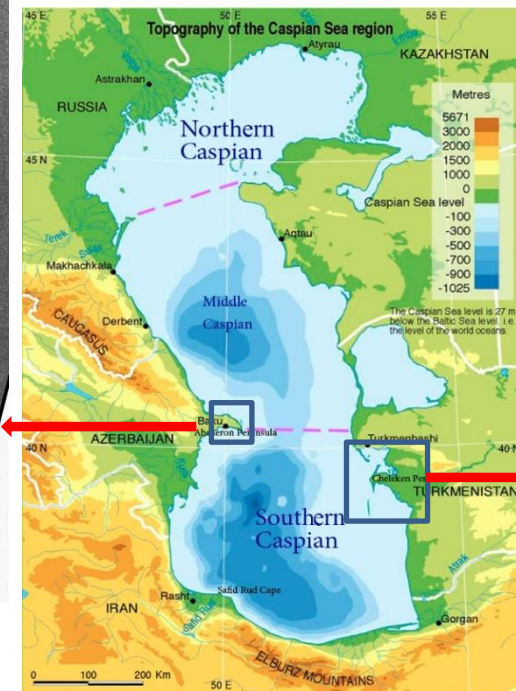


- Нет устойчивой корреляции между продолжительностью ледового периода и площадью ледяного покрова.
- Наибольшая корреляция этих параметров наблюдается для «экстремальных» зимних периодов – наиболее суровых и мягких зим.
- Наблюдается высокая корреляция между такими параметрами, как сумма отрицательных температур и максимальная площадь ледяного покрова
- Минимальные значения максимальной площади ледяного покрова зафиксированы в 1999/2000 и 2015/2016 – 44 тыс. и 46.6 тыс. кв. км соответственно.
- Средняя максимальная площадь ледяного покрова за последние 21 год – 69.5 тыс. кв. км.
- Корректное сравнение с данными за 1978/1979 – 2006/2007, приведенными в научных публикациях невозможно, поскольку они получены совершенно разными методами. Для пересекающихся годов имеется хорошее качественное, но не количественное соответствие. Наши результаты, полученные на основе всех доступных спутниковых данных, дают величины максимальной площади почти на 20 % выше. Например, для суровой зимы 2005/2006 наши оценки составили 79.6 тыс. кв.км, по данным спутниковой альтиметрии – 65 тыс. кв.км

Результаты: максимальная площадь ледяного покрова



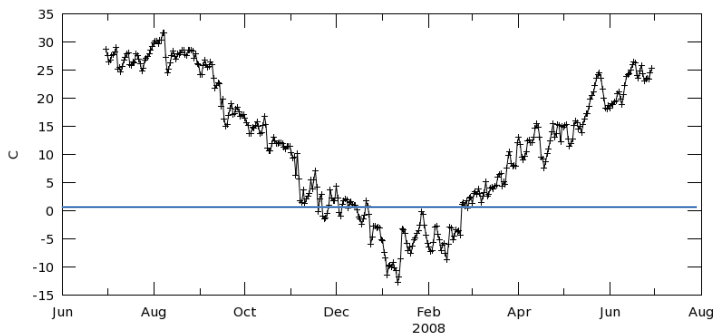
ASAR Envisat изображение от 15.02.2012



MODIS Terra изображение color composite.

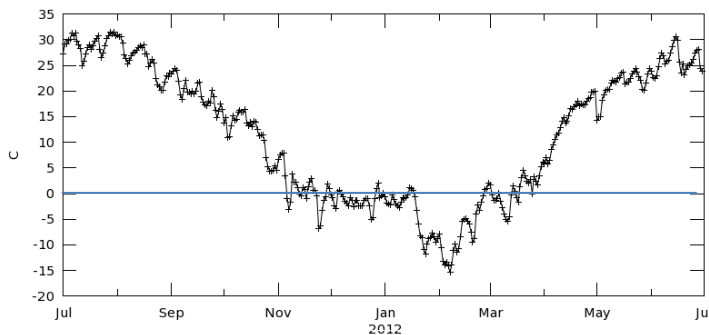
*1 – the Türkmenbaşy Bay;
2 – the South Cheleken Bay.*

- Максимальная площадь ледяного покрова наблюдалась в самую суровую зиму 2011/2012, когда она достигла 90 тыс. кв. км;
- весь Северный Каспий был покрыт льдом;
- в эту зиму лед также сформировался вдоль всего западного побережья Среднего Каспия вплоть до Апшеронского полуострова и даже в заливах Южного Каспия Türkmenbaşy (Красноводский) и South Cheleken



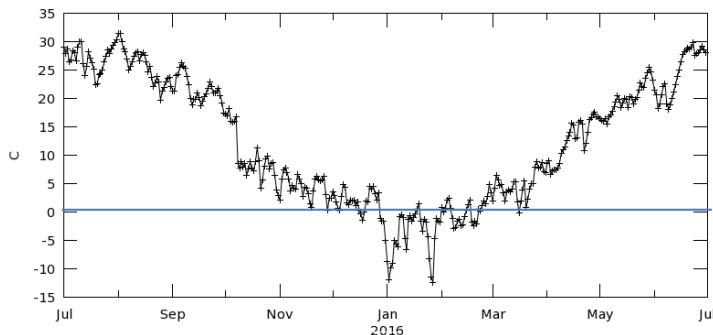
- The user-selected region was defined by 47E, 44.5N, 53E, 47N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 47.5E, 44.5N, 52.5E, 47N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.

2007/2008 суровая зима



- The user-selected region was defined by 47E, 44.5N, 53E, 47N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 47.5E, 44.5N, 52.5E, 47N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.

2011/2012 очень суровая зима



- The user-selected region was defined by 47E, 44.5N, 53E, 47N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 47.5E, 44.5N, 52.5E, 47N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.

2015/2016 мягкая зима

Сравнение метеорологических условий в «экстремальные» года

- Важная задача «предсказать» суровость зимы и максимальную площадь ледяного покрова.
- Проанализированы данные по температуре воздуха. Но никаких явных предвестников, что зима будет суровой, а ледяной покров максимальный. Северный Каспий - очень большая географическая область, подверженная различным атмосферным процессам, действующим на западной и восточной стороне Северного Каспия.
- Для этой области атмосферное воздействие очень важно, этот вопрос все еще планируется тщательно изучить в течение более длительного промежутка времени.

Выводы

Анализ ледового режима в Северном Каспии, выполненный с помощью спутниковых радиолокационных и оптических данных, а также метеоданных за период с 1998 по 2019 годы, показал следующее:

(1) Индекс суровости зимы не очень хорошо коррелирует с ледяным покровом и продолжительностью льда. Скорее всего, это объясняется тем, что он рассчитывается на основе температуры воздуха, измеренной на метеостанциях, расположенных довольно далеко от моря (например, в Астрахани), и не может адекватно описать всю огромную площадь Северного Каспия, подвергшегося к различным атмосферным воздействиям.

(2) Развитие ледяного покрова и продолжительность ледяного покрова иногда не коррелируют, что также объясняется различными атмосферными процессами в западной и восточной частях Северного Каспия.

(3) За период с июля 2002 года по июль 2019 года мы наблюдали небольшую отрицательную динамику температуры воздуха и SST. Мы не наблюдали заметных изменений в количестве суровых / умеренных зим, основанных на индексе суровости зимы, между двумя последними десятилетиями 20-го века и двумя прошлыми десятилетиями.

(4) Сегодня слишком рано делать выводы о существовании тренда, необходимо собрать больше данных для получения статистически достоверных результатов.

(5) Система STS является мощным инструментом для анализа ледового режима в Каспийском море, который может использоваться в режиме, близком к реальному времени, для морских нефтегазовых и судоходных компаний, работающих в Каспийском море.

Благодарности

- Исследование выполнено в рамках и при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-77-20060 “Оценка изменчивости экологического состояния Каспийского моря в текущем столетии по данным спутникового дистанционного зондирования”.
- Обработка и анализ спутниковых данных осуществлялись с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» с помощью информационной системы "See The Sea", которая разрабатывается и совершенствуется в рамках гос. задания, тема «Мониторинг» номер гос. регистрации 01.20.0.2.00164.

A satellite image of a coastal region, likely the Arctic or Antarctic, showing a mix of green and white patches. The green areas represent open water or low-lying vegetation, while the white areas represent ice or snow. The surrounding land is brown and tan. The text "Спасибо за внимание" is overlaid in the center.

Спасибо за внимание

olavrova@iki.rssi.ru