

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ОСНОВНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОКЕАНА

А.Г. Костяной

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Россия, 117997, Москва, Нахимовский пр., 36,

Исследования регионального и глобального изменения климата основываются на многолетних рядах наблюдений на метеорологических станциях и постах. Метеорологическая сеть является основой информационно-измерительной системы Росгидромета.

К концу 1970-х годов число станций и постов на территории бывшего СССР достигло своего максимума и превысило 6000, из которых 4665 относились к системе Гидрометслужбы, остальные — к другим ведомствам.

Сегодня в мире существует 97 851 метеостанция, имеющая синоптический индекс Всемирной метеорологической организации (ВМО) .

Более точные прогнозы погоды и исследования регионального и глобального климата требуют расширения сети гидрометеорологических наблюдений, особенно в труднодоступных или малонаселенных районах Земного шара. К таким районам, в первую очередь, относится Мировой океан, который занимает около 70% земной поверхности или примерно 361 млн км².

Если примерно на 149 млн км² суши приходится около 98 тыс. метеостанций, которые находятся в своем большинстве на суше, то в среднем 1 метеостанция приходится на 1500 км² (для сравнения площадь Москвы в пределах МКАД составляла 1070 км²). Очевидно, что гигантская акватория Мирового океана (за исключением данных с островных метеостанций и маяков, дрейфующих и заякоренных буев, НИС и попутных судов) остается фактически вне сети регулярных наблюдений, сколько-нибудь сравнимой с сетью метеорологических наблюдений на суше.

Задача по восполнению пробелов в данных наблюдений на акватории Мирового океана решается тремя основными способами:

- (1) Развитием региональных и глобальных, национальных и международных комплексных, скоординированных систем наблюдений за океаном, которые включают экспедиционные исследования на НИС; использование попутных наблюдений с торговых и пассажирских судов ; запуск нескольких тысяч дрейфующих буев, включая профилографы Арго, и пр.
- (2) Развитием методов численного моделирования с усвоением данных наблюдений для восстановления полей гидрометеорологических параметров в узлах регулярной сетки с определенным временным шагом на всей поверхности Земного шара, включая акваторию Мирового океана. Результатом этих работ являются различные реанализы данных (число которых уже более 60).
- (3) Развитием методов дистанционного зондирования океанов и морей из космоса.

В рамках программы Глобальной системы наблюдений за климатом (GCOS) был разработан перечень из 54 основных климатических переменных (ОКП), необходимых для систематических наблюдений с целью оценки климатических изменений на Земле (<https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables/ecv-factsheets>).

К океану относятся следующие 19 ОКП, которые разделены на 3 группы:

Физические: потоки тепла на поверхности океана, морской лед, уровень океана, волнение, течения на поверхности океана, соленость на поверхности океана, напряжение трения ветра, температура поверхности океана, подповерхностные течения, подповерхностная соленость, подповерхностная температура

Биогеохимические: неорганический углерод, оксид азота, питательные вещества, цвет океана, кислород и трассеры

Биологические/экосистемы: морские места обитания, планктон.

В настоящее время (31 марта 2019г.) на разных околоземных орбитах находится 2062 ИСЗ, из них 901 – США, 709 – Европа и остальные страны, 299- Китай, 153 – Россия.

Из них:

161 работающий искусственный спутник Земли (ИСЗ), оснащенный радиолокаторами, скаттерометрами, радиометрами, спектрорадиометрами, альтиметрами и оптической техникой, работающими в разных частотных диапазонах. Все они выведены на орбиту специально для получения разносторонней метеорологической и геофизической информации, необходимой для оценки состояния окружающей среды, мониторинга погоды и климата, а также для природо-ресурсных исследований.

Спутниковые сенсоры, в основном, способны получать разнообразную информацию об океане фактически только с ее поверхности, при этом под «поверхностью океана», в большинстве случаев, понимается верхний слой толщиной порядка 1-10 м. Таким образом, «подповерхностные» параметры принципиально не могут быть измерены напрямую из-за ограничения спутниковых методов. Кроме того, содержание питательных веществ (в виде соединений азота, фосфора, калия, кальция, серы и магния), концентрация двуокиси углерода, кислотность океана, содержание кислорода и трассеры (вероятно, хлорфторуглероды) дистанционным образом в воде не измеряются.

Таким образом, спутниковые методы могут быть использованы для мониторинга прямо или косвенно следующих ОКП океана:

Физические: потоки тепла на поверхности океана, морской лед, уровень океана, волнение, течения на поверхности океана, соленость на поверхности океана, напряжение трения ветра, температура поверхности океана, подповерхностные течения, подповерхностная соленость, подповерхностная температура

Биогеохимические: неорганический углерод, оксид азота, питательные вещества, цвет океана, кислород и трассеры

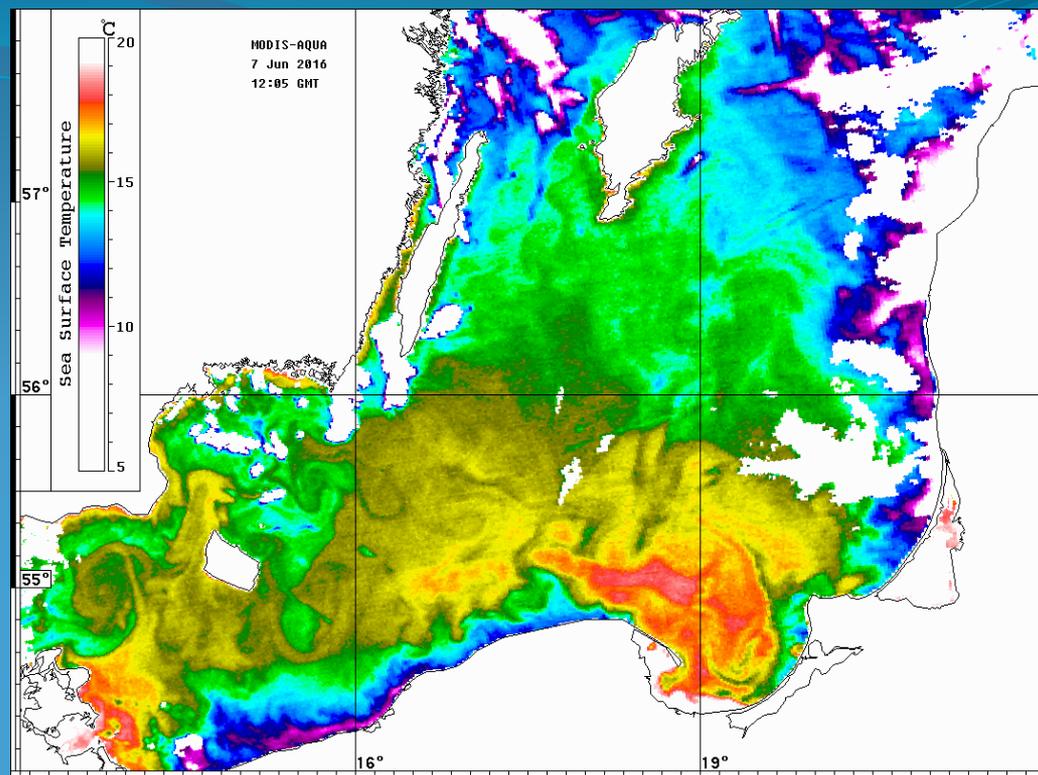
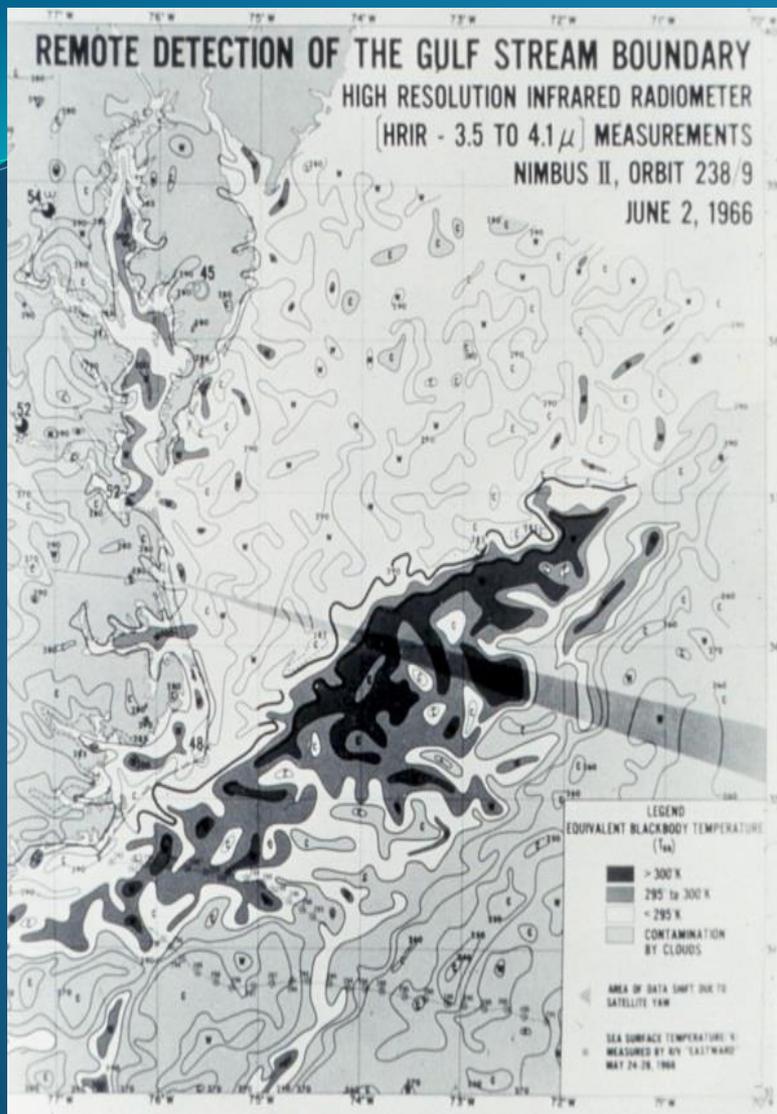
Биологические/экосистемы: морские места обитания, планктон.

(1) Температура поверхности океана

ТПО – одна из важнейших характеристик океана, которая измеряется уже более 45 лет из космоса с помощью различных радиометров, СВЧ-радиометров и спектрорадиометров, установленных на десятках спутниках.

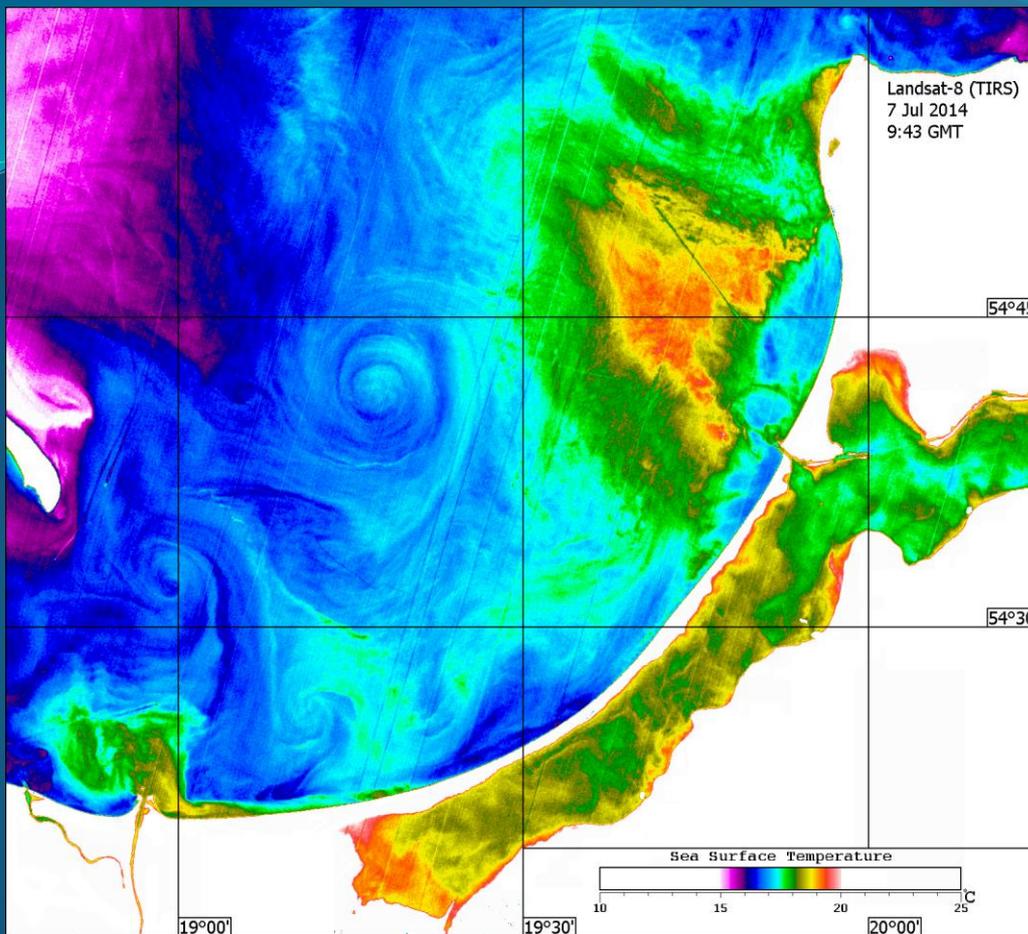
Мониторинг ТПО осуществляется с помощью различных версий радиометров AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer — усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения), установленных на нескольких спутниках серии NOAA-KLM, имеющих пять спектральных каналов, обладающих пространственным разрешением 1.1 км и разрешением по температуре 0.1°C.

Для мониторинга ТПО также используются спектрорадиометры MODIS, установленные на спутниках Terra и Aqua; оптический и инфракрасный радиометр VIIRS, установленный на спутнике Suomi NPP; AVHRR/3, установленный на спутнике MetOp-2 Европейского космического агентства и многие другие. Они позволяют получать карты ТПО всего Мирового океана каждые 1-2 дня. Основной проблемой при восстановлении полей ТПО на основе спутниковых данных является облачность, поэтому для районов, практически постоянно закрытых облачностью, используются СВЧ-радиометры, которые обладают существенно худшим разрешением по пространству — 25 км и температуре — 0.8 °C



Поле ТПО Балтийского моря (7 июня 2016 г., 12:05 GMT, MODIS-Aqua)

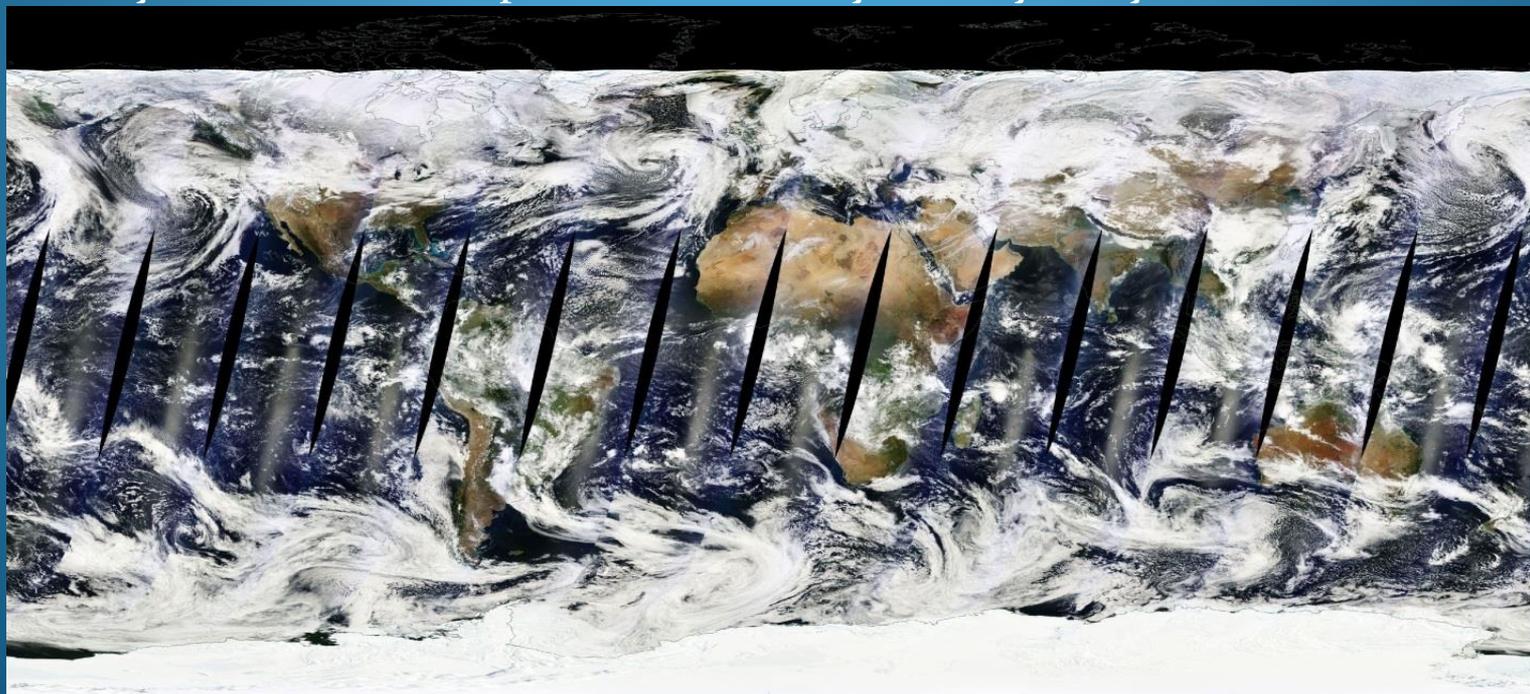
Гольфстрим в поле ТПО (2 июня 1966 г., Nimbus II)
 (<http://www.photolib.noaa.gov/bigs/spacoo06.jpg>).



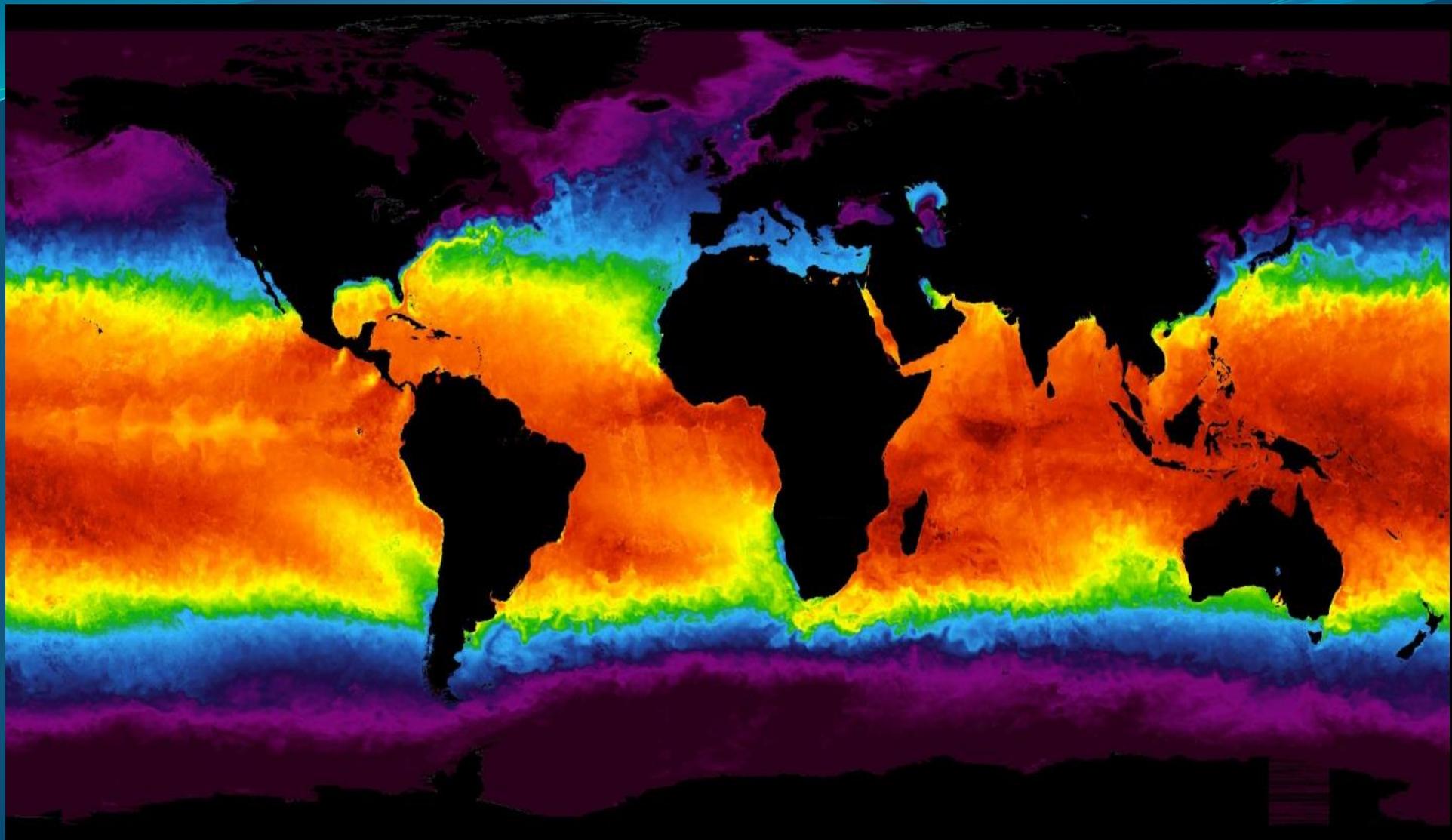
Поле ТПО восточной части Гданьского залива (7 июля 2014 г., 09:43 GMT, TIRS Landsat-8).

Для исследования мезомасштабной динамики вод вполне хватает разрешения радиометров порядка 1 км, однако новые сенсоры с инфракрасными каналами, установленными на спутниках серии Landsat (TM на Landsat-5, ETM+ на Landsat-7 и TIRS на Landsat-8), имеют разрешение 60-100 м и дают исключительные по своей детальности изображения ТПО, сравнимые только с оптическими изображениями высокого пространственного разрешения. Недостаток этих данных заключается в том, что эти приборы осуществляют съемку одного и того же района один раз в 16 дней, что с учетом вероятности частичного или полного облачного покрова исследуемого района делает их непригодными для климатических задач. Кроме того, 100-метровое пространственное разрешение, вероятно, избыточно для климатических исследований.

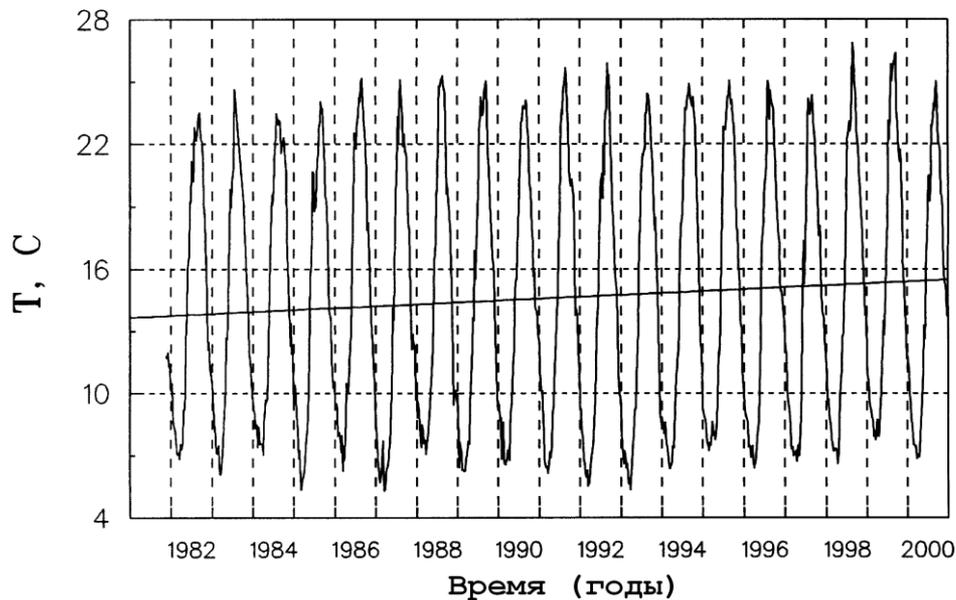
Для решения климатических задач используются композитные карты ТПО, в которых убраны эффекты облачности и локального солнечного прогрева за счет осреднения значений ТПО и с помощью численных методов, например, за неделю, месяц, сезон или год для определенного моря, района или всего Мирового океана в целом. На рис. 4 представлена композитная карта Земного шара в истинных цветах на 1 февраля 2017 г., которая показывает, насколько различные акватории Мирового океана покрыты облачностью. На рис.5 представлена уже композитная карта ТПО также на 1 февраля 2017 г., полученная по совокупности данных радиометров с различных спутников, на которой облачность уже отсутствует.



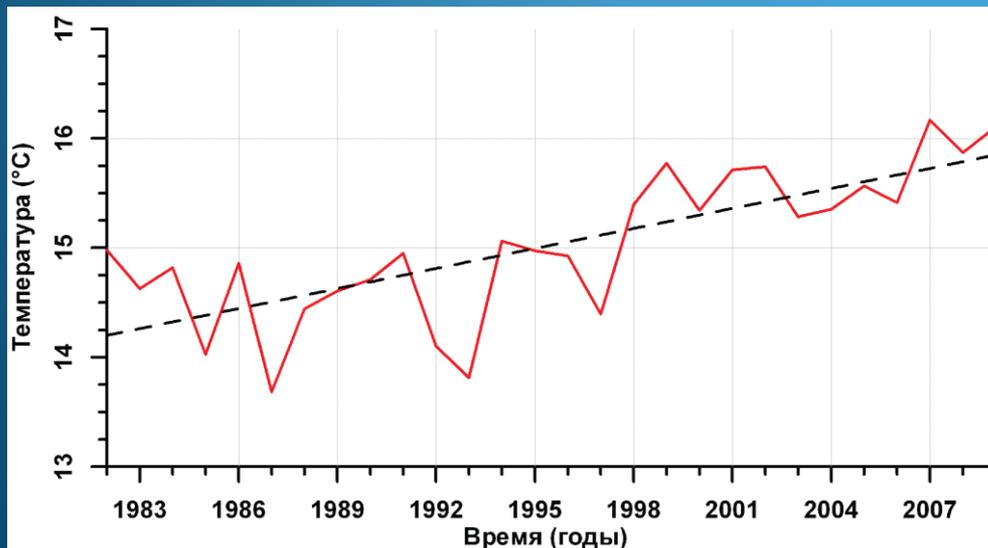
Композитная карта Земного шара в истинных цветах (1 февраля 2017 г., MODIS-Terra) (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>)



Композитная карта ТПО Мирового океана (1 февраля 2017 г.).
Диапазон ТПО от 0 до 32°C
(<https://worldview.earthdata.nasa.gov>)



Межгодовая и сезонная изменчивость среднемесячных значений ТПМ (°С) Черного моря с 1982 по 2000 год по спутниковым данным. Линейный тренд равен $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (Костяной и др., 2012).



Межгодовая изменчивость среднегодовых значений ТПМ (°С) в Черном море в целом в 1982–2009 гг. по спутниковым данным проекта NASA JPL PO.DAAC AVHRR-Pathfinder. Линейный тренд равен $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$. (Гинзбург и др., 2011).

(2) Соленость поверхности океана

2 ноября 2009 г. на орбиту был запущен спутник SMOS Европейского космического агентства, предназначенный, в частности, для измерения солености на поверхности океана. SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity - влажность почв и соленость океана) является очередным космическим аппаратом из серии спутников Earth Explorer, задача которых – изучение важнейших параметров Земли в рамках проводимой Европейским космическим агентством (ЕКА) программы «Живая планета» (Living Planet). SMOS – первый спутник, предназначенный для глобальных измерений влажности почв на суше и солености Мирового океана.

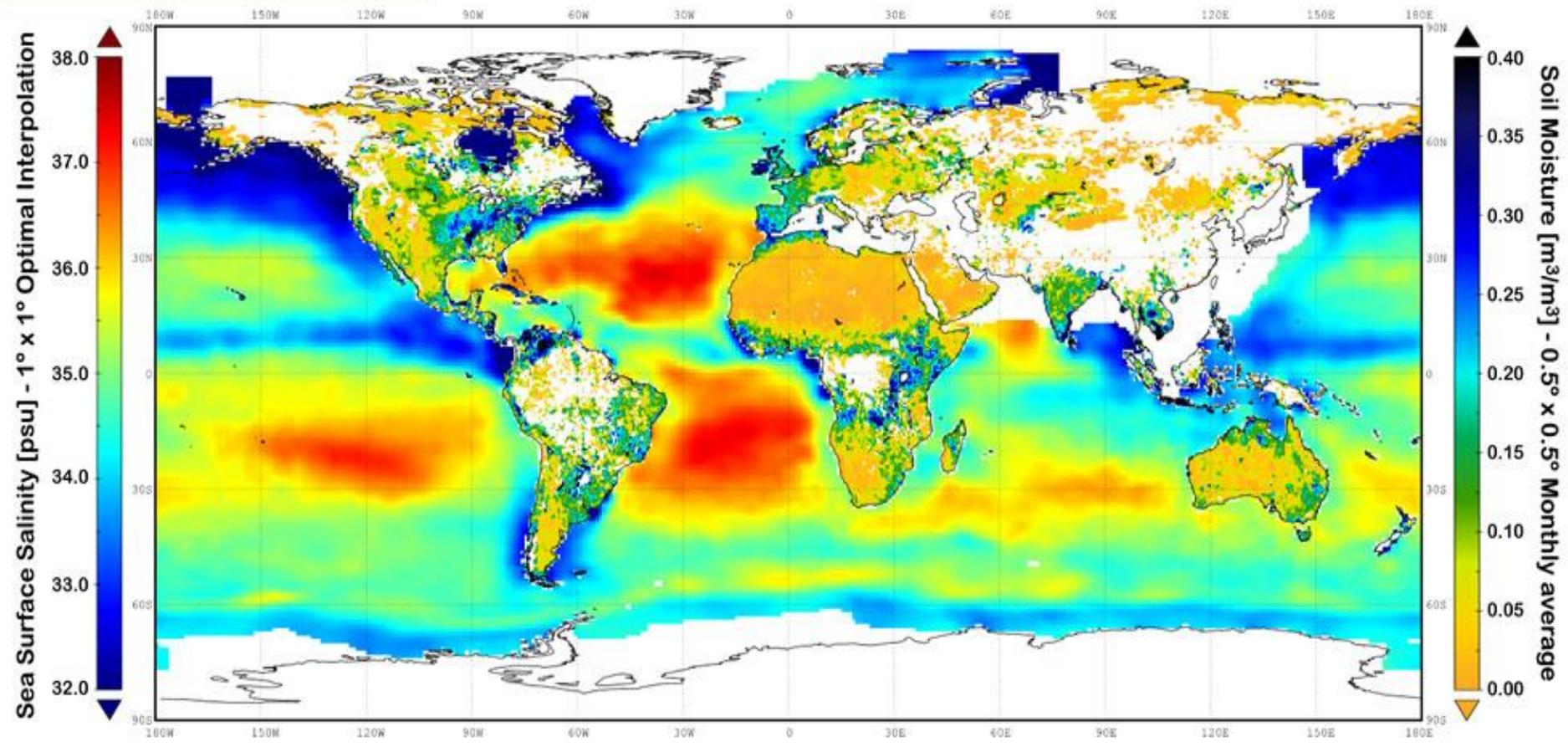
Программа SMOS использует на одноименном спутнике интерферометр-радиометр MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis), позволяющий проводить в глобальном масштабе измерения влажности почв и растительности суши с пространственным разрешением 60 км и солености морских вод с разрешением 200 км. Радиометр дает изображения, соответствующие интенсивности собственного излучения поверхности в L-диапазоне (длина волны 21 см). Вычисление значений солености осуществляется на основе измеренных значений яркостной температуры в L-диапазоне при разных углах наклона и поляризации приемной антенны.

Данные со спутника SMOS впервые позволили построить относительно высокоточную (пространственное разрешение 35 км, точность измерения солености 0.3‰), регулярно обновляемую (каждые 3 дня) глобальную карту солености Мирового океана, что расширяет наши знания о закономерностях океанических течений, взаимодействии океана и атмосферы, водообмене и их воздействии на климатическую систему.

Проблема заключается в том, что соленость вод на поверхности Мирового океана варьируется в диапазоне всего 32-38‰ (или г/кг в современных единицах измерения солености), поэтому современной точности спутниковых методов в 0.3‰ и 7-ми летнего ряда наблюдений пока явно недостаточно для полноценных климатических исследований.

Кроме SMOS, с 2011 по июнь 2015 на орбите работал американо-аргентинский спутник Aquarius/SAC-D, а 31 января 2015 г. был запущен спутник НАСА SMAP (Soil Moisture Active Passive), который, несмотря на свою нацеленность на измерение влажности почвы, будет давать информацию о поле солености поверхности Мирового океана.

Sea Surface Salinity and Soil Moisture November 2011



Equirectangular projection centered on 0.00°E

Среднемесячная соленость Мирового океана и влажность почвы за ноябрь 2011 г. по данным SMOS (http://www.smos-bec.icm.csic.es/new_combined_map)

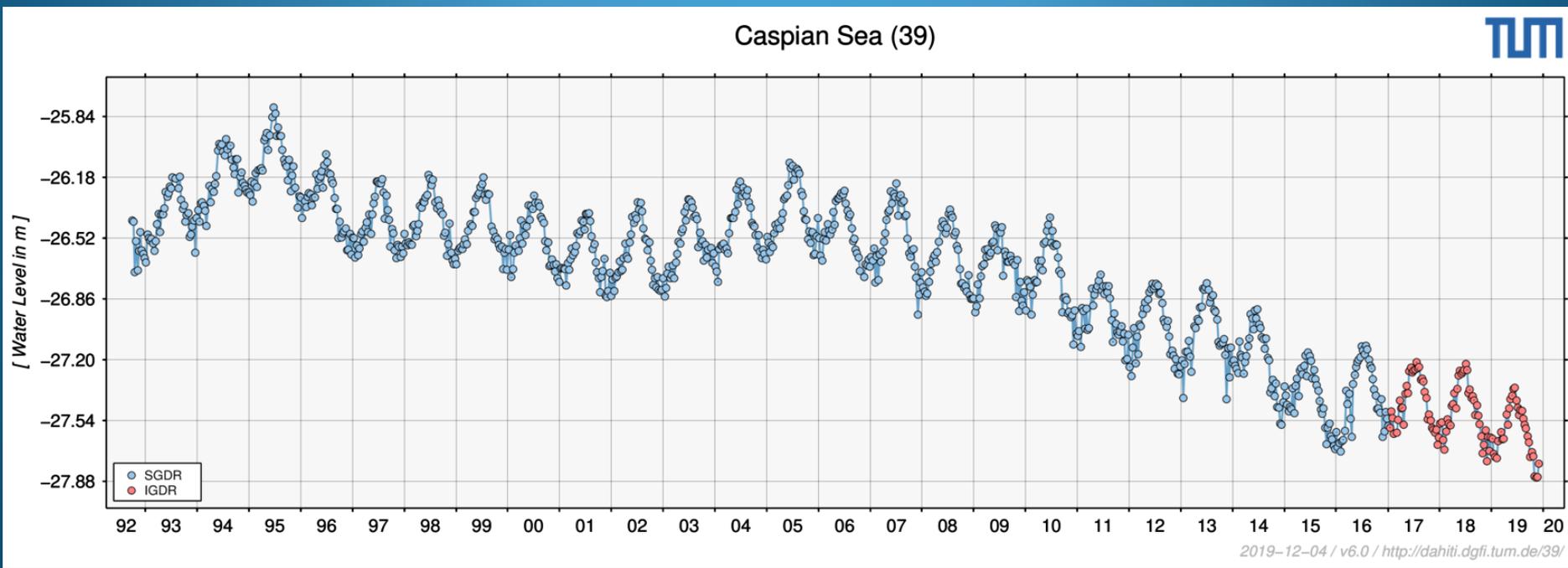
(3) Уровень океана

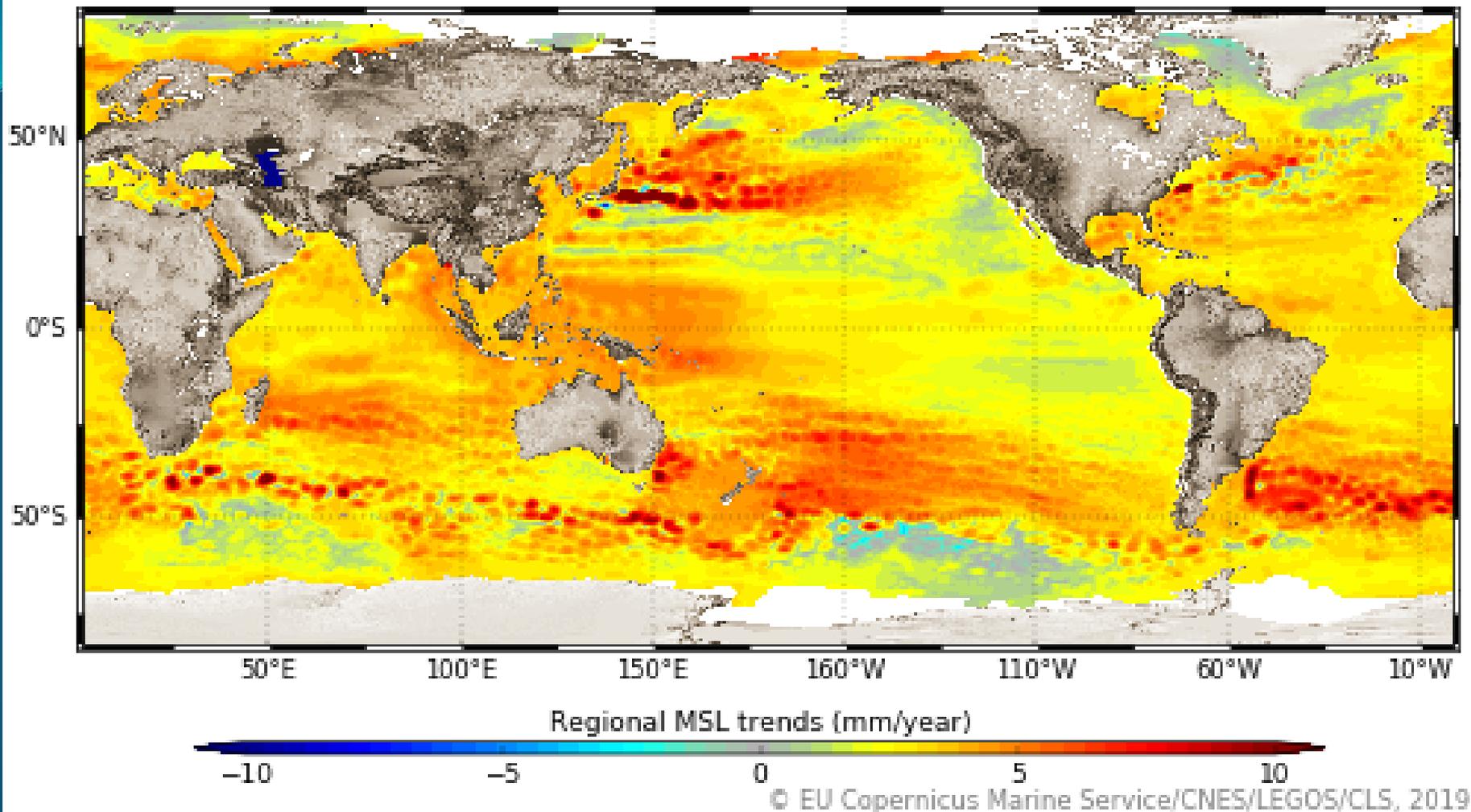
Среди дистанционных методов определения уровня океанов и морей в первую очередь следует выделить спутниковую альтиметрию как основной инструмент исследования изменчивости уровня по всей акватории океанов и внутренних морей, а не только у их побережья на метеостанциях и постах.

С 1992 г. по настоящее время регулярные альтиметрические измерения выполняются спутниками TOPEX/Poseidon, GFO-1, Envisat, Jason-1, Jason-2, Jason-3, Sentinel-3A и др. Для анализа межгодовой и сезонной изменчивости уровня Мирового океана, а также внутренних морей, например, Каспийского или Черного лучше использовать данные спутников TOPEX/Poseidon (Т/Р) и Jason-1, -2, -3 (J1/2/3), что обусловлено следующими причинами.

Точность измерения высоты спутника над морской поверхностью для этой программы составляет 1.7 см, а точность расчета самой высоты моря относительно отсчетного эллипсоида для открытого океана — 4.2 см. Расположение восходящих и нисходящих треков по акваториям даже внутренних морей оптимально, что позволяет анализировать изменчивость уровня вдоль треков с пространственным разрешением 5-6 км. Временной масштаб повторения измерений вдоль трека - 9.916 суток (т.е. примерно 3 раза в месяц или 6 раз в месяц в точках пересечения треков) - оптимален для исследования синоптической и сезонной изменчивости уровня океанов и морей

Сезонная и межгодовая изменчивость уровня Каспия по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2/3 с января 1993 г. по декабрь 2019 г. (DAHITI)



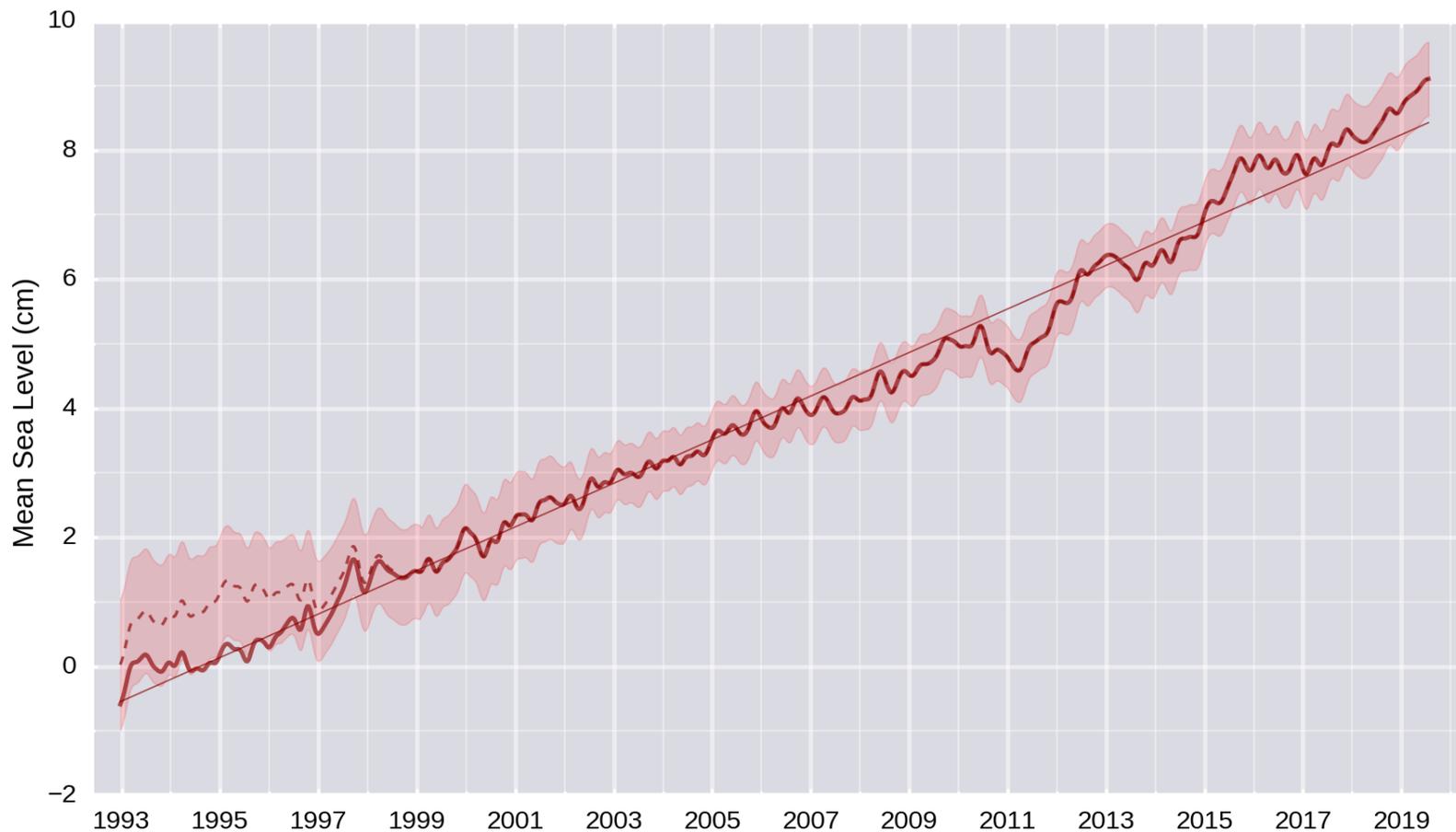


Карта скорости изменения уровня Мирового океана (мм/год) за период с 1992 по 2019 г., построенная по данным спутниковой альтиметрии Т/Р, J1/2/3 (AVISO)

Latest MSL Measurement
04 August, 2019

+3.38 mm/yr

Reference GMSL - corrected for GIA

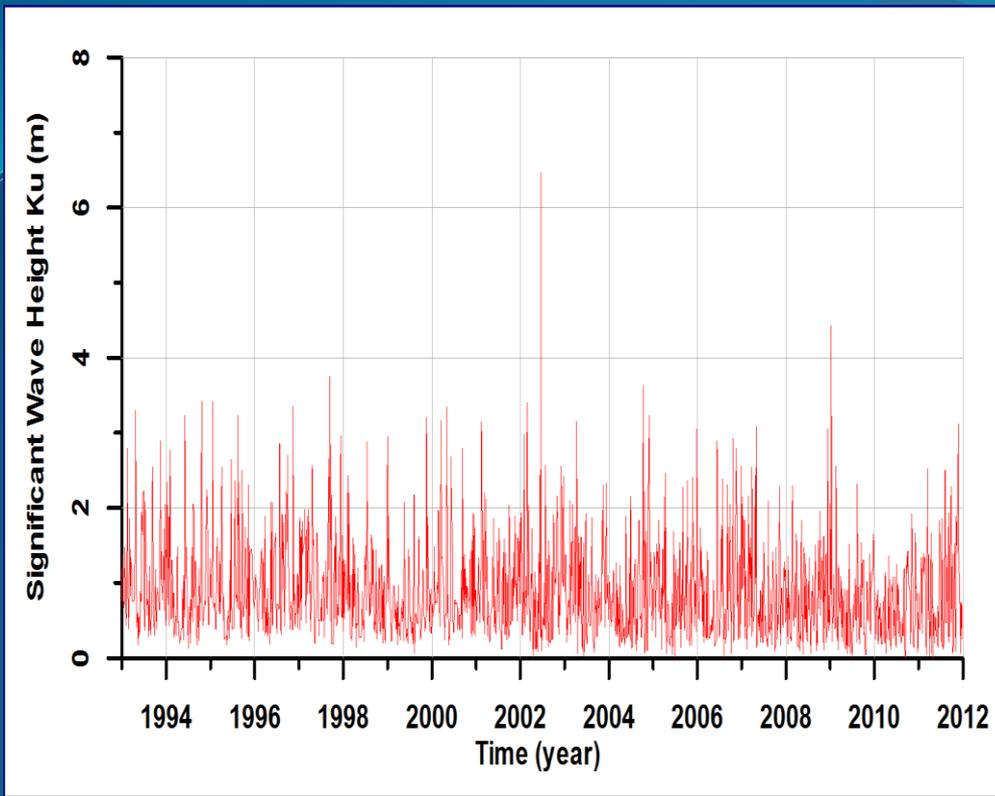


© CNES, LEGOS, CLS

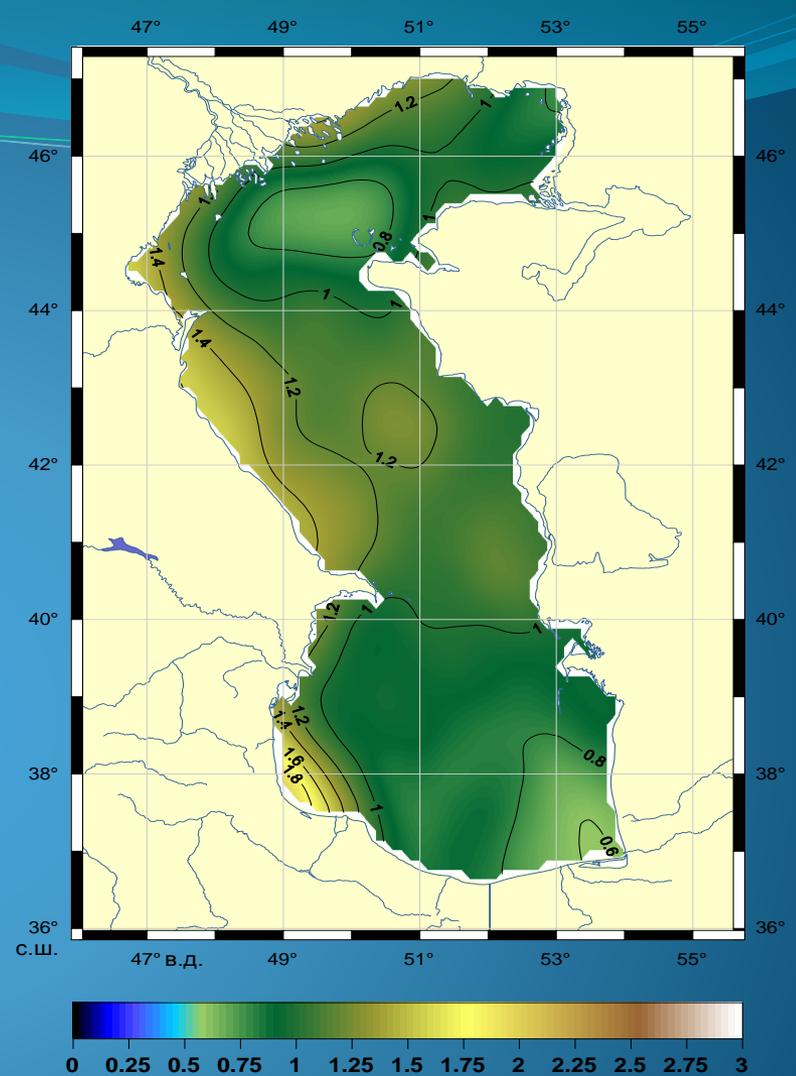
Межгодовая изменчивость уровня Мирового океана (мм) за период с 1993 по 2019г.
(AVISO)

(4) Состояние поверхности океана (волнение)

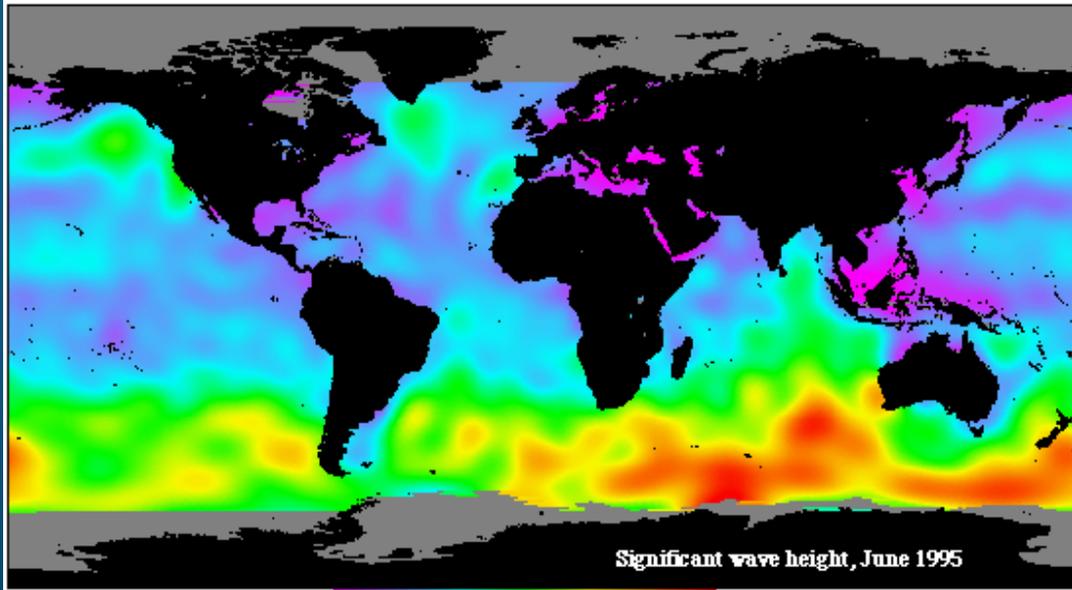
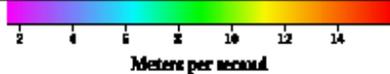
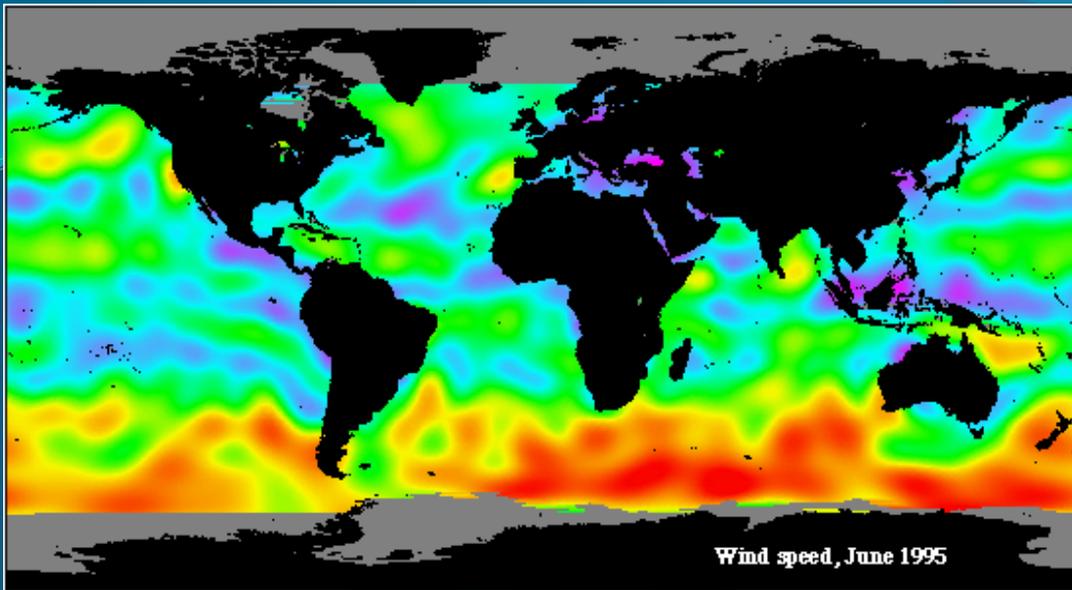
В документах программы Глобальной системы наблюдений за климатом (GCOS) под ОКП «состояние поверхности моря» понимается высота, длина и период морских волн. Напрямую эти характеристики волнения из космоса не измеряются, однако, они косвенным образом вычисляются по данным спутниковой альтиметрии, а именно по скорости приводного ветра, форме отраженного радиоимпульса и коэффициенту обратного рассеяния отраженного радиоимпульса. При этом точность расчета высоты волн составляет 5-10% или 20-50 см



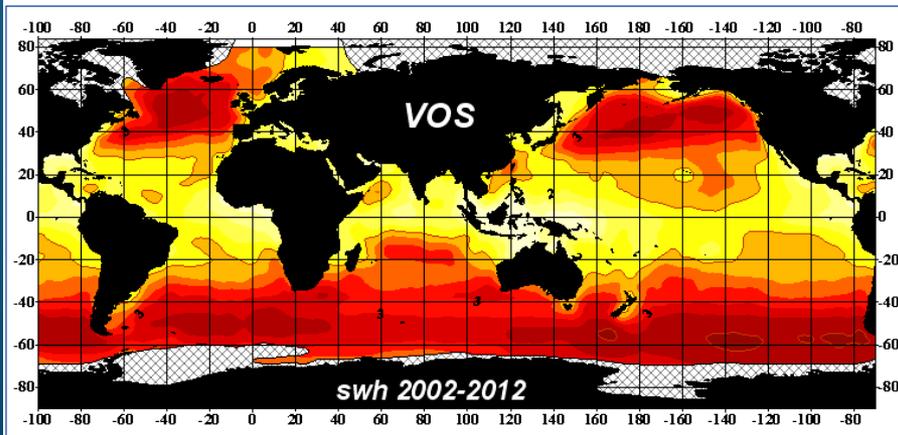
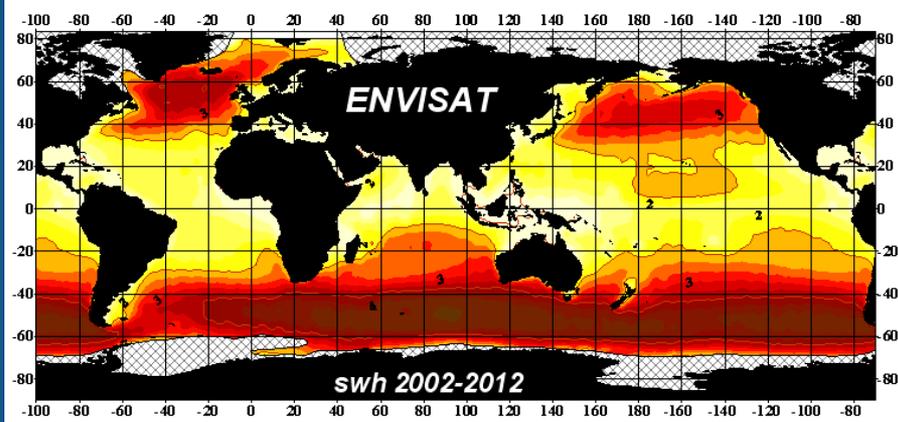
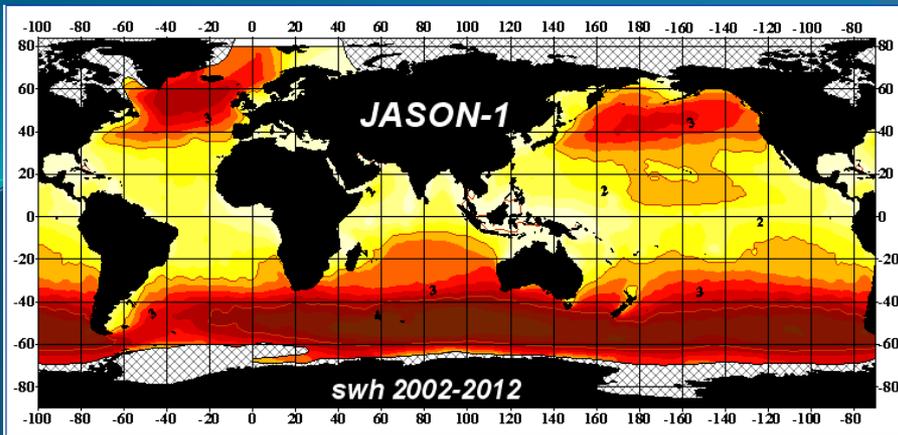
Сезонная и межгодовая изменчивость высоты волн (м) в юго-восточной части Каспийского моря по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2 в точке пересечения треков оз1-092 с января 1992 г. по декабрь 2011 г. (Kostianouy et al., 2014)



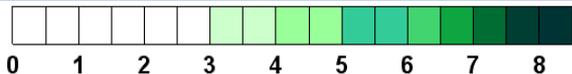
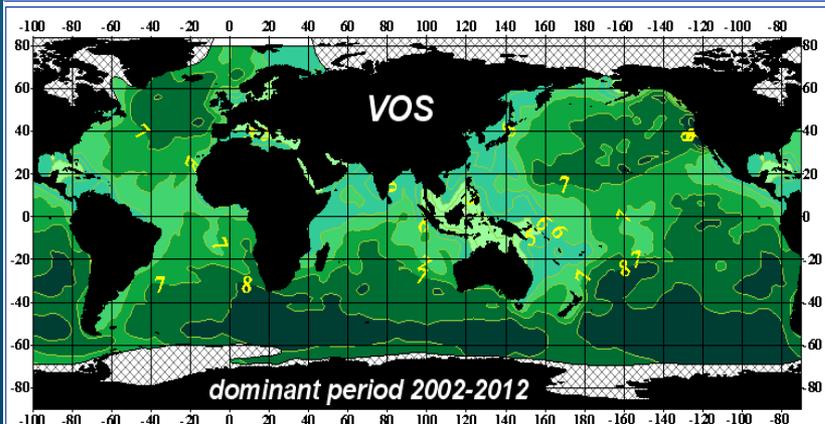
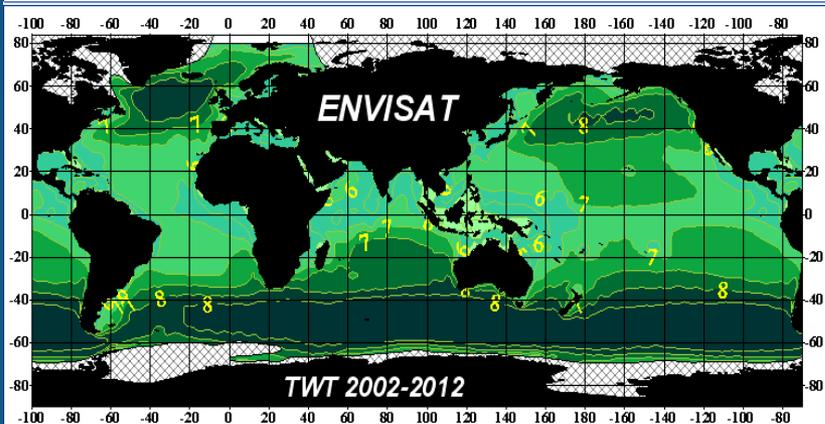
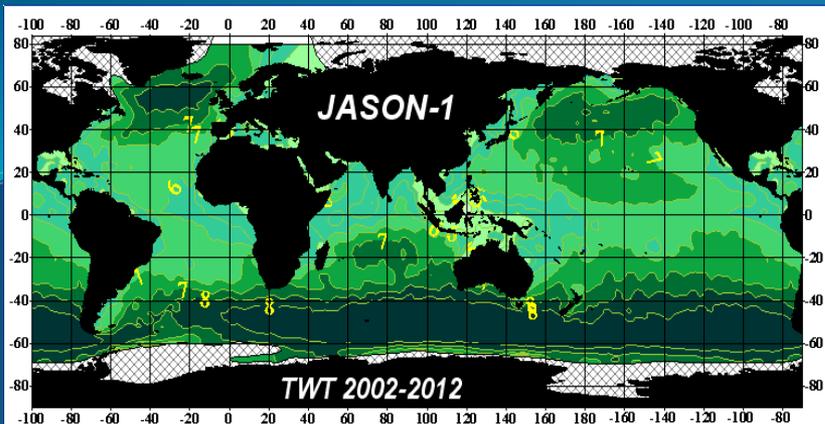
Пространственное распределение средней высоты волн (м) по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2 за период с сентября 1992 г. по декабрь 2012 г. (Лебедев, 2014)



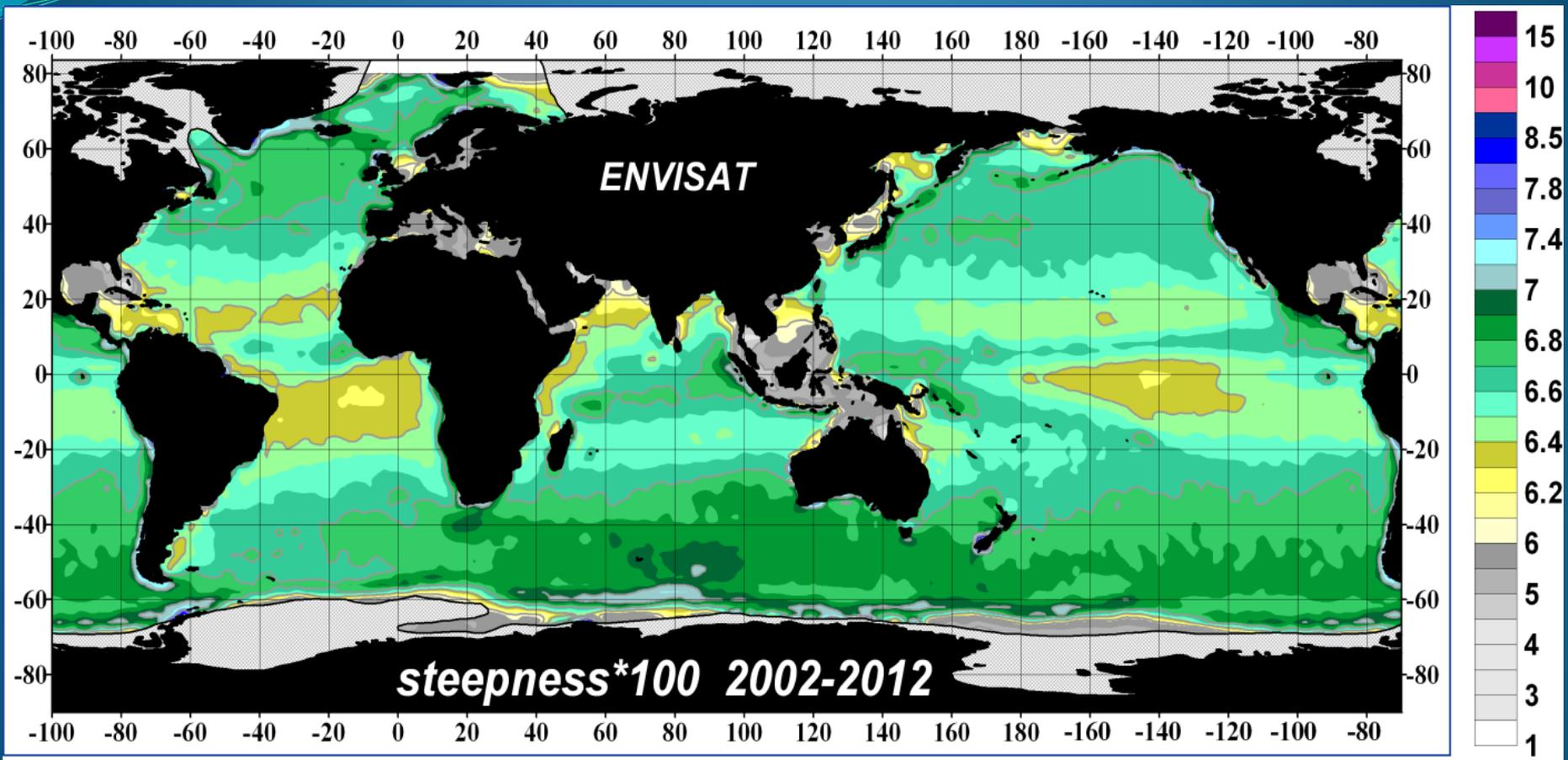
Пространственное распределение средней скорости ветра (м/с) (верх) и высоты волн (м) (низ) по данным альтиметрических измерений спутника Т/Р за июнь 1992 г. (http://sealevel.jpl.nasa.gov/files/archive/online-tutorial/wind_wave_jun.gif)



Средняя высота волн (м) за период с 2002 по 2012 г. по данным альтиметрических спутников Jason-1, Envisat и по данным визуальных наблюдений (VOS) (Григорьева, Бадулин, 2016).



Средний период волн (сек) за период с 2002 по 2012 г. по данным альтиметрических спутников Jason-1, Envisat и по данным визуальных наблюдений (VOS) (Григорьева, Бадулин, 2016).

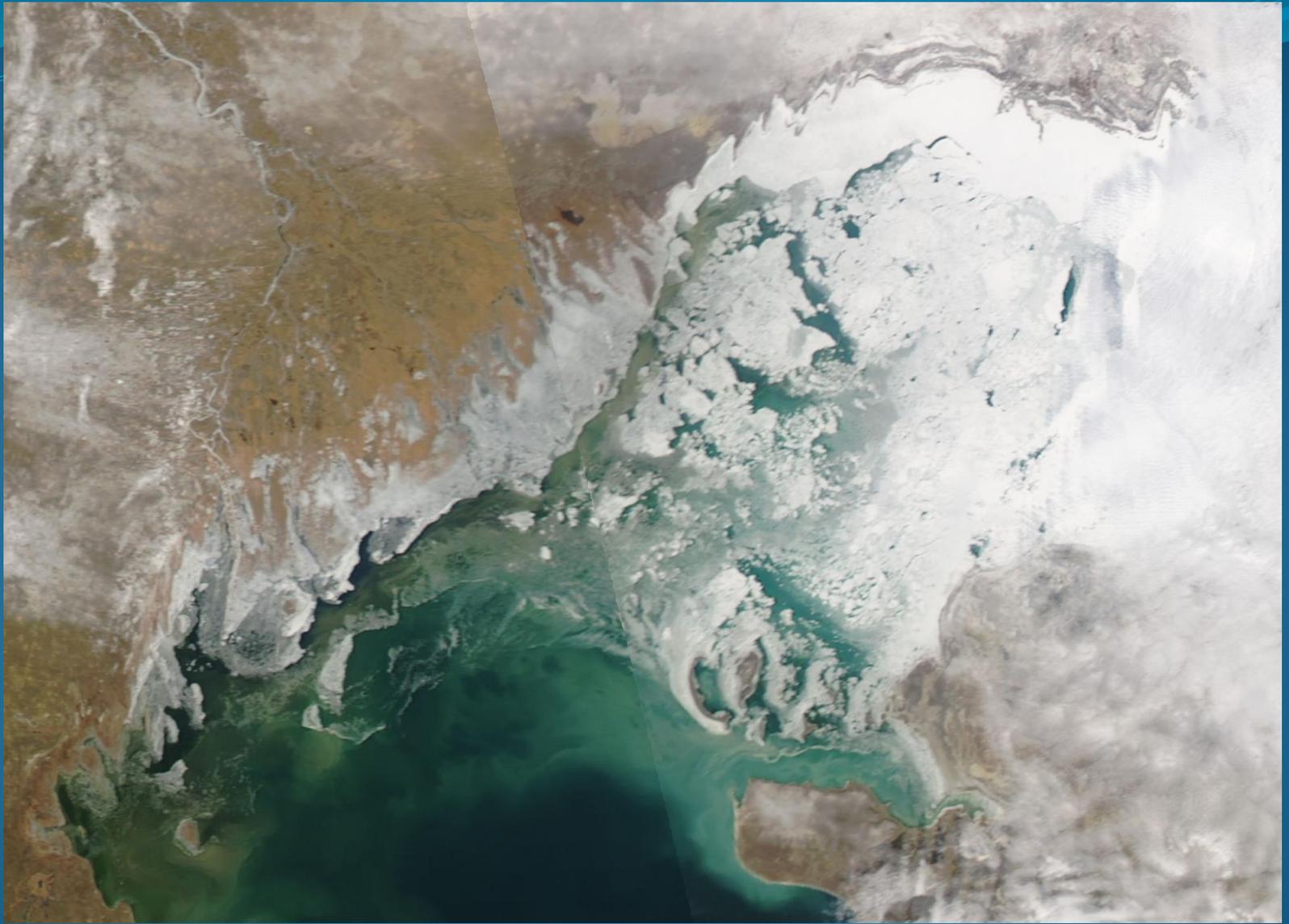


Средняя крутизна волн (м/м) за период с 2002 по 2012 г. по данным альтиметрических спутника Envisat (Григорьева, Бадулин, 2016).

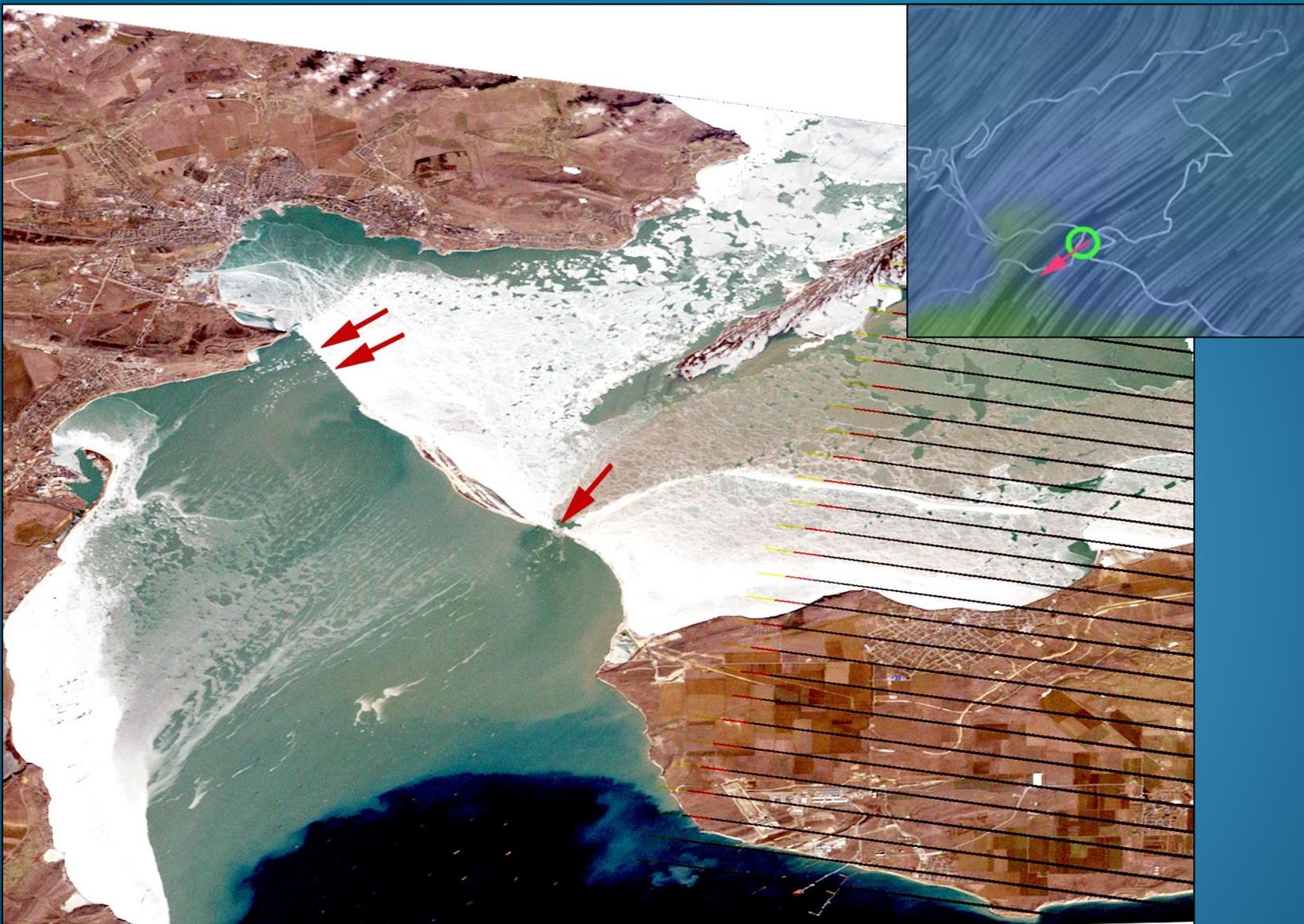
(5) Концентрация морского льда

Морской лед – является важнейшей океанической ОКП, которая характеризует региональное или глобальное потепление климата и которая хорошо измеряется со спутников. Морской лед определяется по оптическим изображениям (благодаря белому цвету, который сильно отличается от темных тонов моря), по данным инфракрасных и микроволновых радиометров (благодаря контрасту радиояркостных температур льда и открытой воды), по данным радиолокационной съемки (благодаря контрасту в шероховатости льда и открытой воды), а также по данным спутниковой альтиметрии и скаттерометрии (благодаря разному рассеянию излученного приборами импульса от морской поверхности и ледяного покрова).

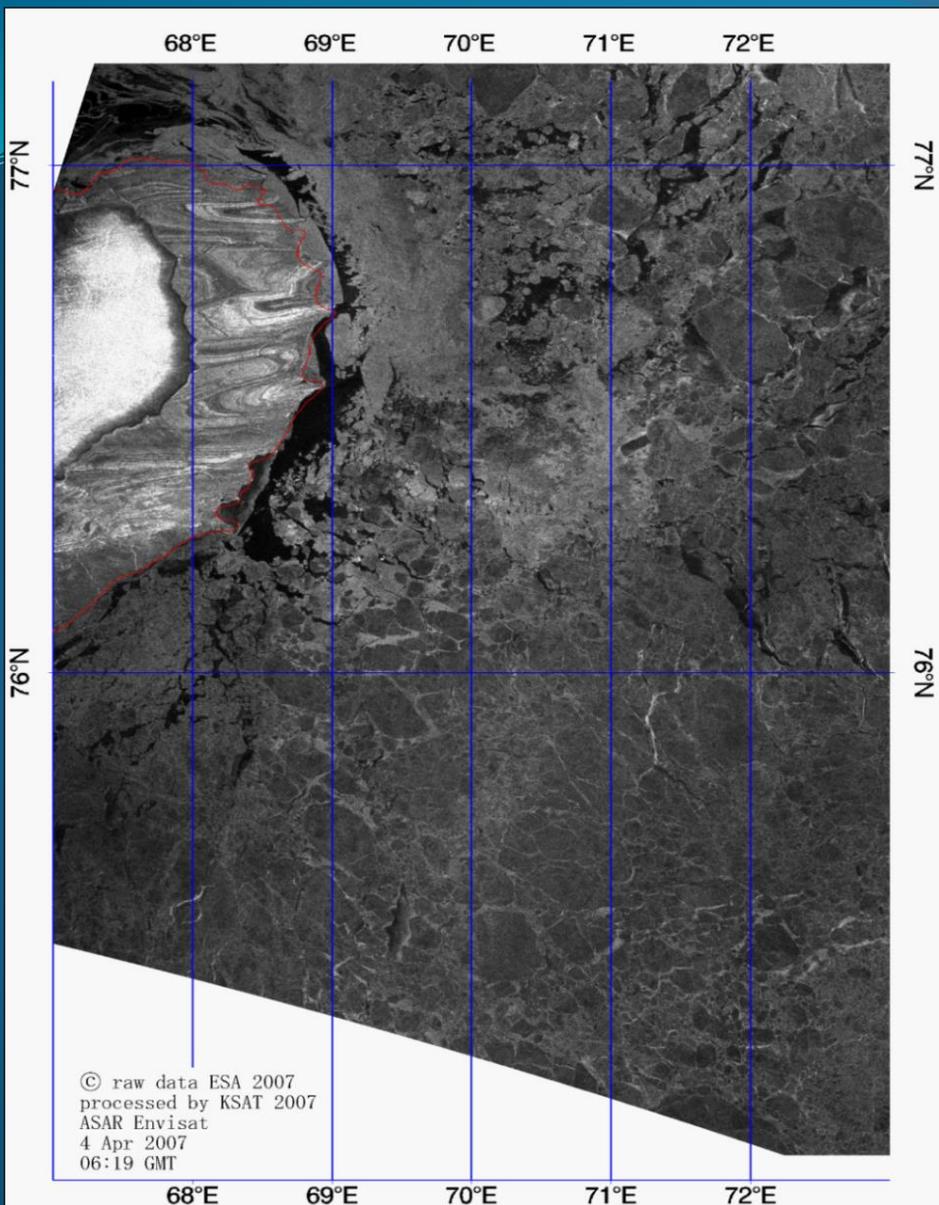
В Арктике, где облачность практически постоянно закрывает акваторию Северного Ледовитого океана, для ежедневного мониторинга ледяного покрова используют данные микроволновых радиометров, для которых облачность не является помехой. Пространственное разрешение таких карт составляет 12-25 км.



Лед на Северном Каспии (24 января 2017 г., MODIS-Aqua)
(<https://lance.modaps.eosdis.nasa.gov/imagery/subsets/?subset=CaspianSea.2017024.aqua.250m>)



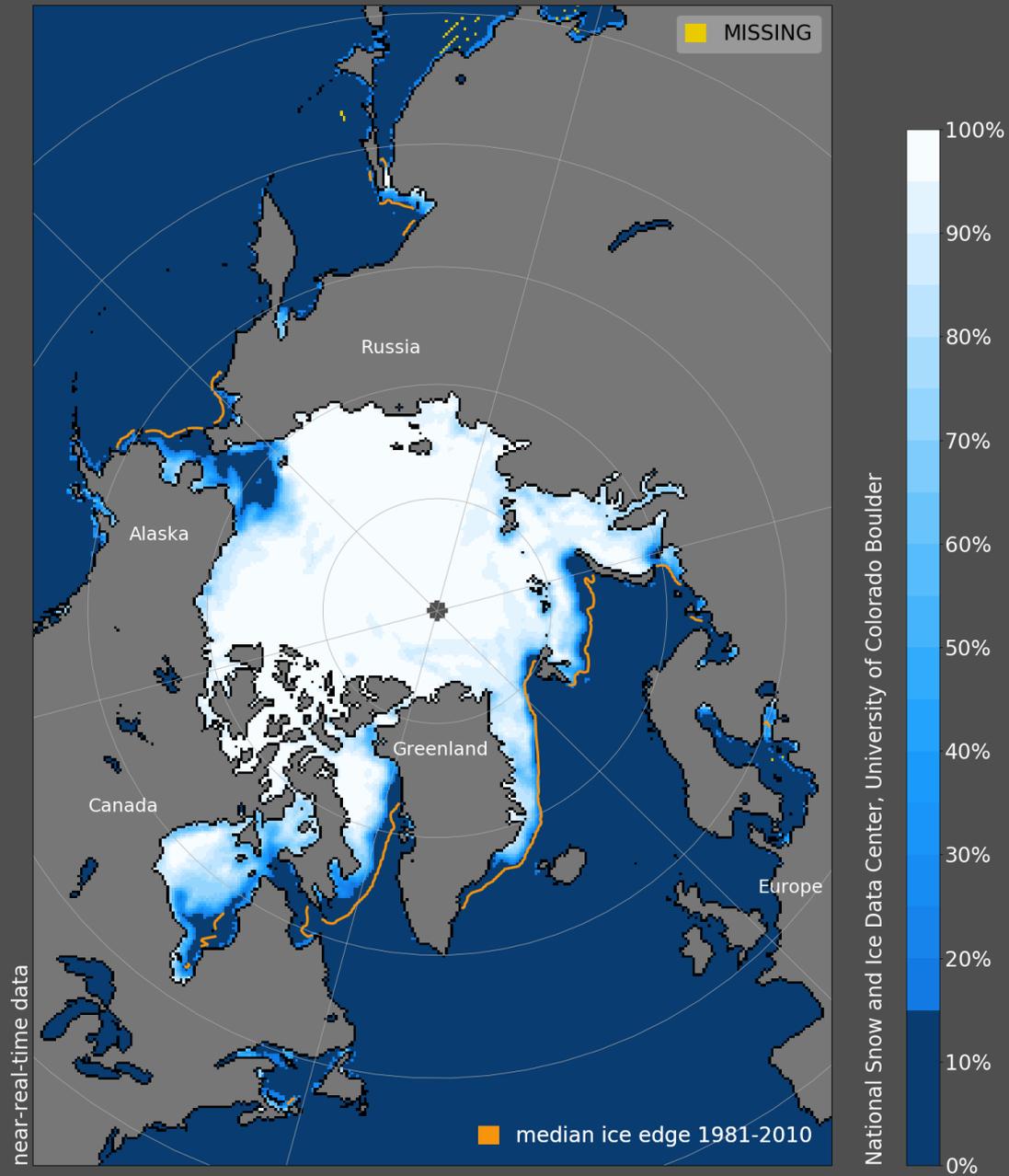
Структура ледяного покрова в Керченском проливе (17 февраля 2017, 08:21 GMT, Landsat-7).
Пространственное разрешение 20 м.



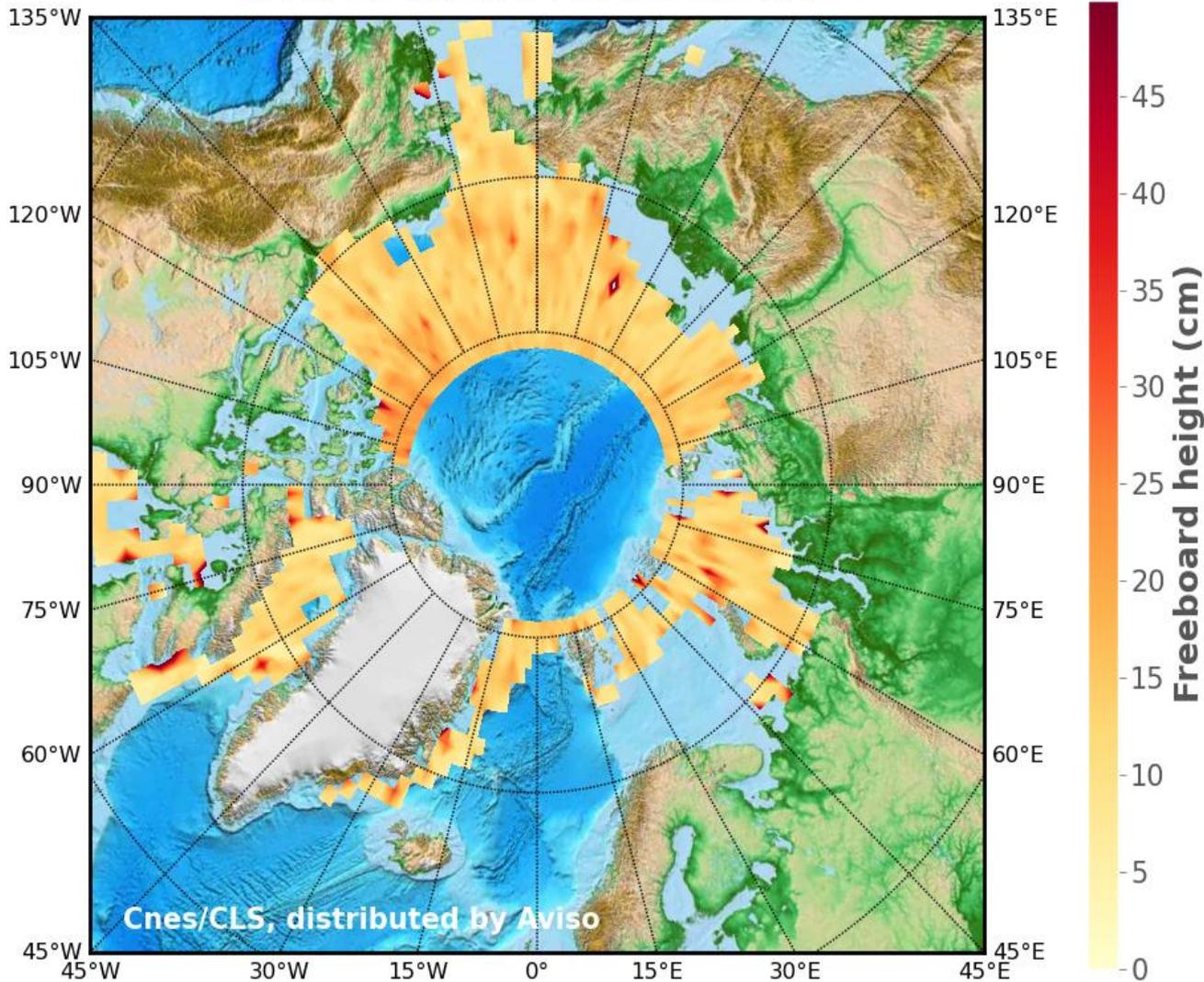
Радиолокаторы с синтезированной апертурой (ASAR), установленные на спутниках Envisat, Radarsat-1, Radarsat-2, Sentinel-1A, Sentinel-1B, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed и др., также эффективно используются для детектирования морского льда с пространственным разрешением 25-75 м, при этом облачность и освещенность не являются помехой для съемки акваторий.

Структура ледяного покрова в северо-западной части Карского моря (4 апреля 2007, 06:19 GMT, ASAR Envisat). Пространственное разрешение 75 м.

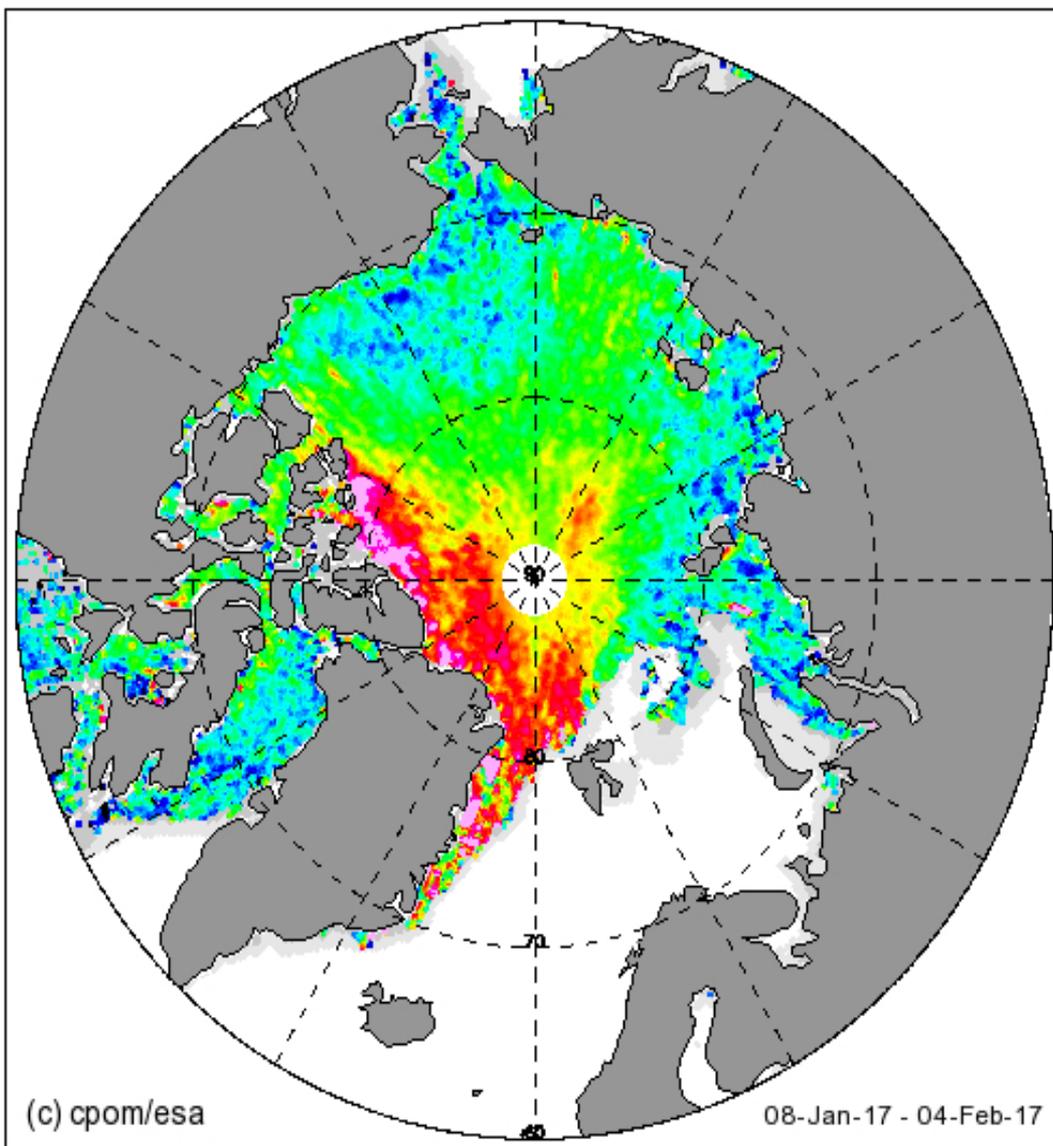
Sea Ice Concentration, 09 Dec 2019



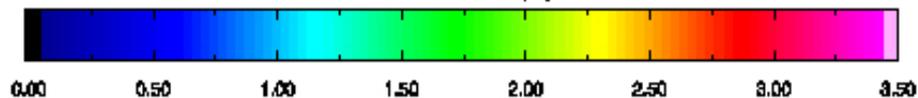
Freeboard height estimated on AltiKa Cycle 01
From 2013/03/14 to 2013/04/18



Высота льда (см) над морской поверхностью Северного Ледовитого океана по альтиметрическим данным спутника AltiKa за период с 14 марта по 18 апреля 2013 г. Центральная часть Арктики не покрывается треками спутника, поэтому данные отсутствуют. (<http://www.avisosaral.altimetry.fr/en/applications/ice-and-cryosphere/sea-ice/saralaltika-sea-ice-results.html>)



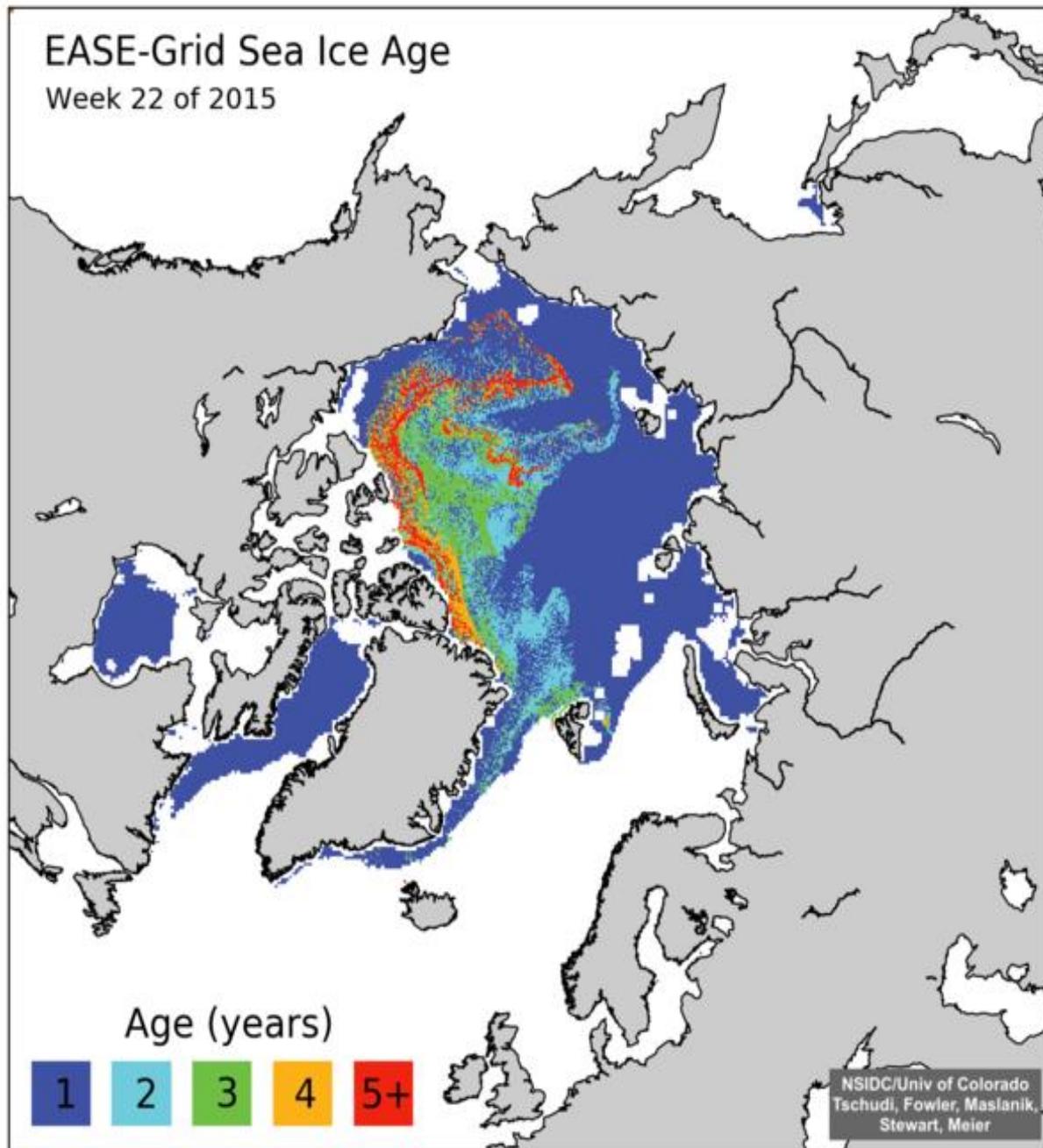
Ice Thickness (m)



Толщина льда (м) на акватории Северного Ледовитого океана по спутниковым данным за период с 8 января по 4 февраля 2017 г. (http://www.cprom.ucl.ac.uk/csopr/sidata/thk_28.png)

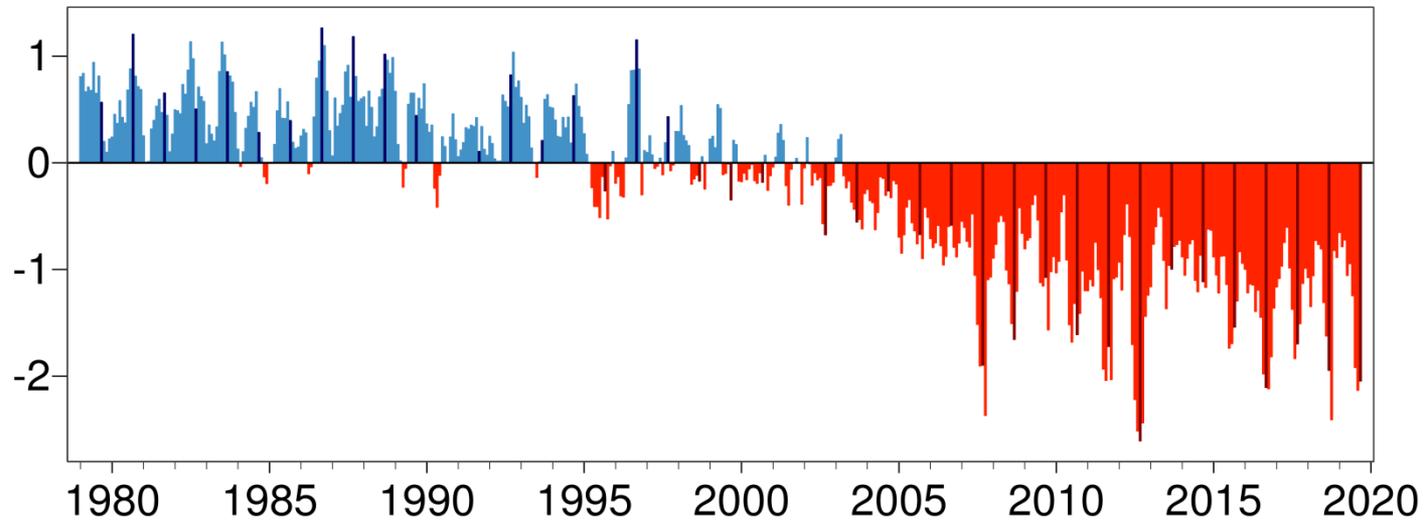
EASE-Grid Sea Ice Age

Week 22 of 2015

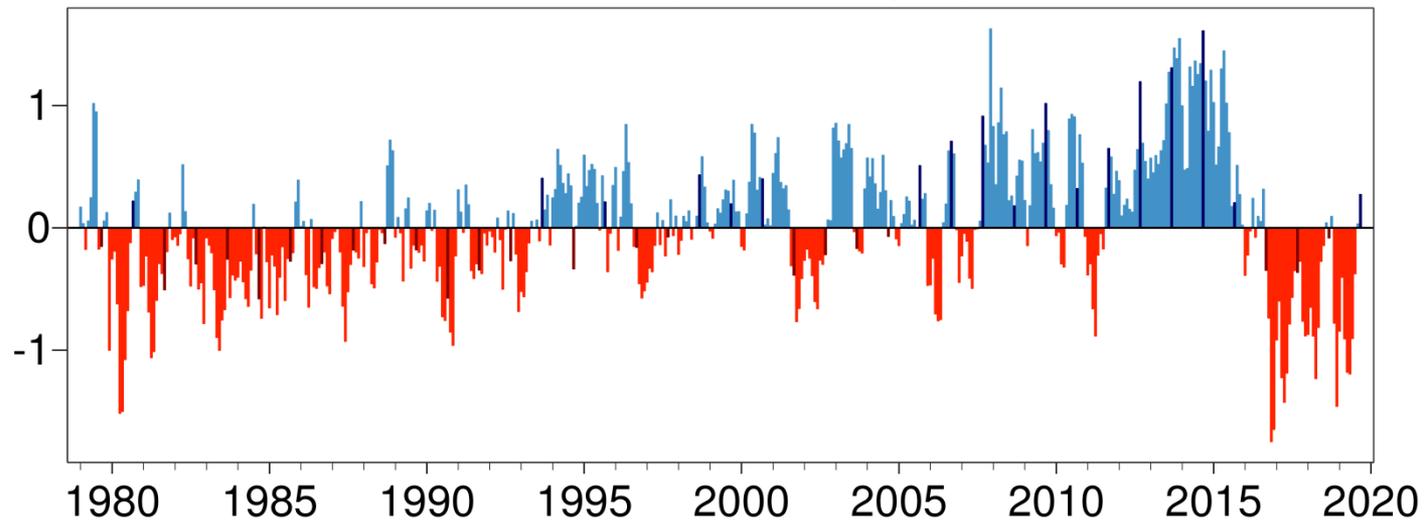


Возраст льда (года) на акватории Северного Ледовитого океана по спутниковым данным на 25-31 мая 2015 г.
(<https://icdc.cen.uni-hamburg.de/>)

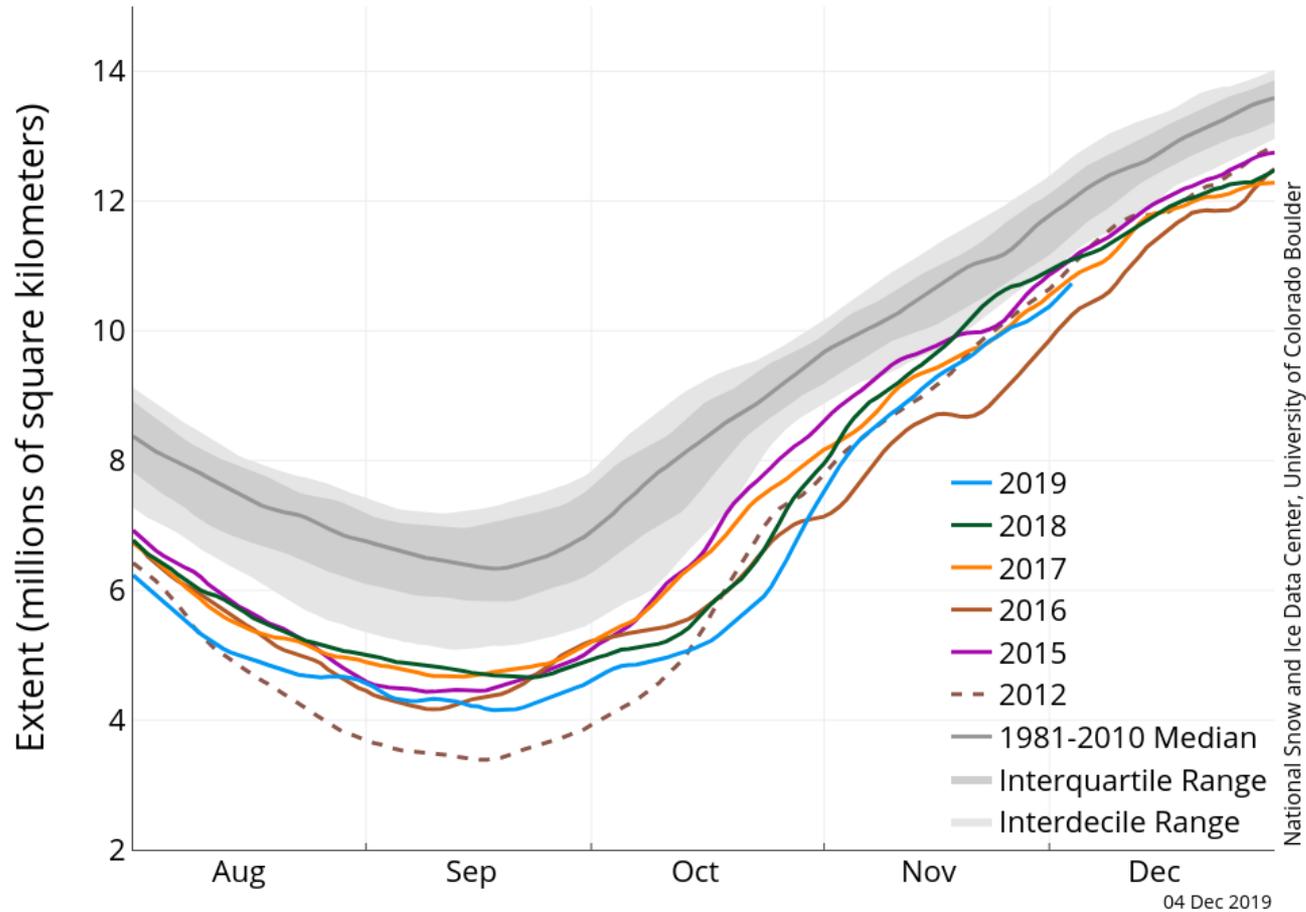
Arctic sea ice area anomalies (millions of sq km) relative to 1981-2010



Antarctic sea ice area anomalies (millions of sq km) relative to 1981-2010



Arctic Sea Ice Extent (Area of ocean with at least 15% sea ice)

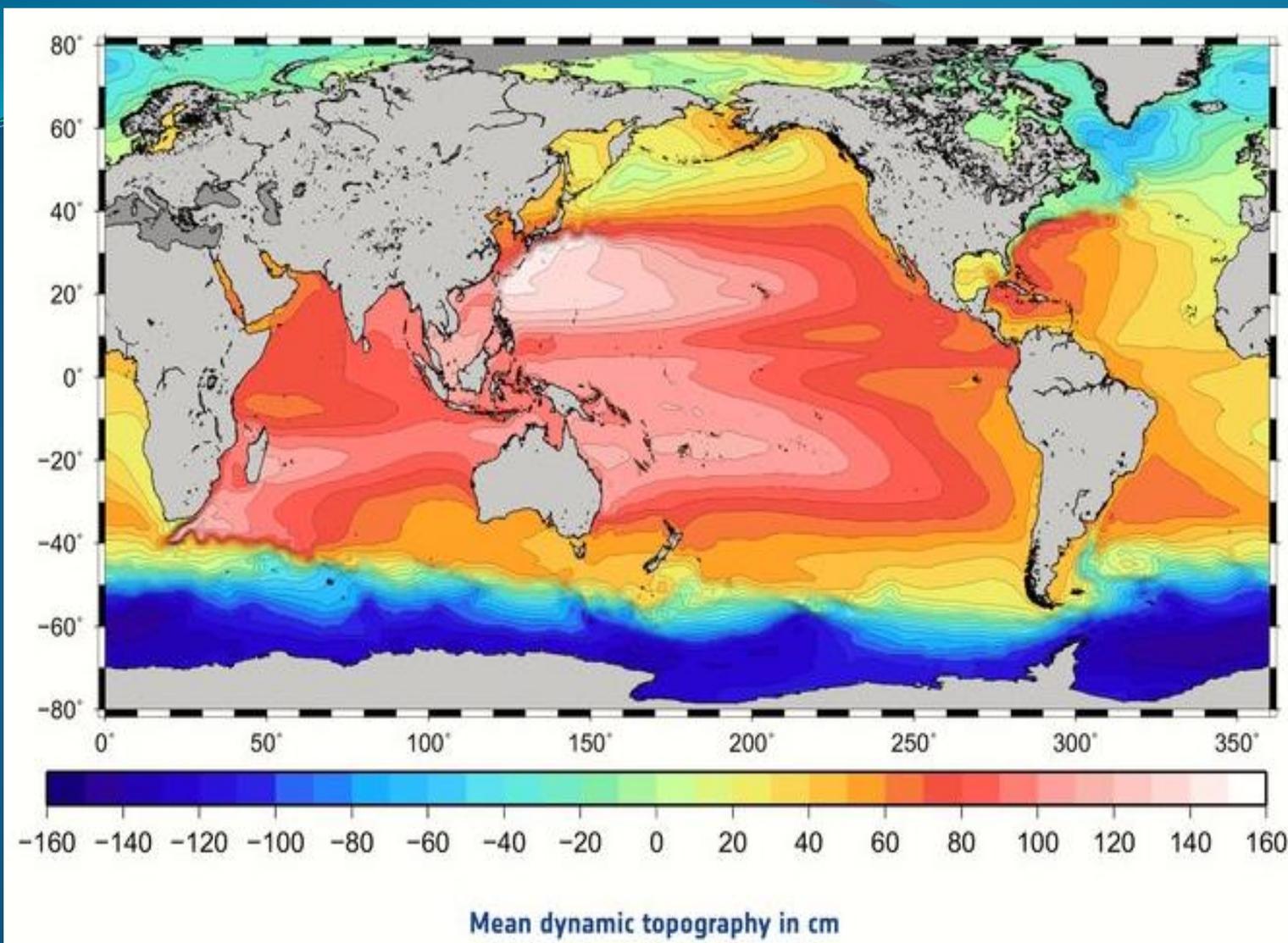


Площадь
ледяного покрова
(млн км²)
Северного
Ледовитого
океана за август-
декабрь 1981-2019
гг.
(http://nsidc.org/arcticseaicenews/files/2017/02/asina_N_iqr_timeseries.png)

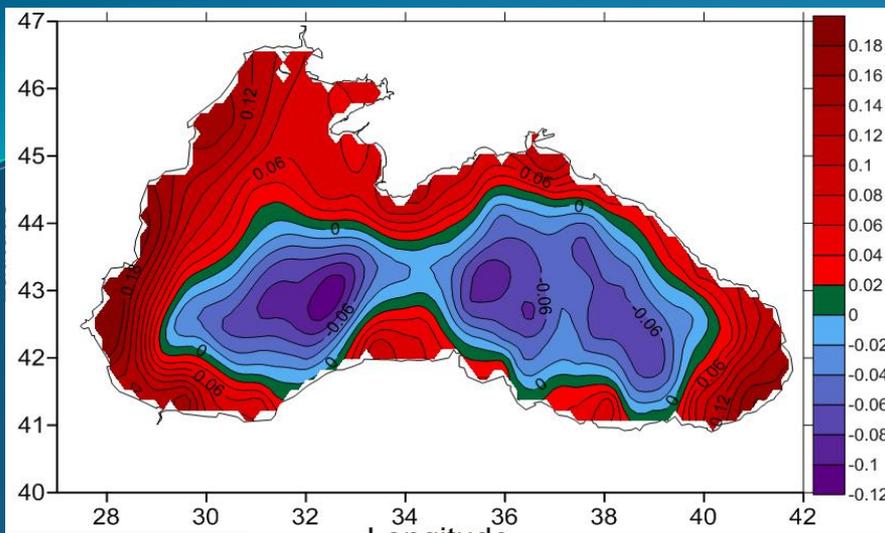
(6) Поверхностные течения

Спутниковая альтиметрия - единственный тип данных ДЗЗ, позволяющий вне зависимости от погодных условий на регулярной основе создавать карты динамической топографии морской поверхности. Сегодня точность альтиметров достигла такого уровня, что дает возможность рассчитывать по градиентам уровня моря поля поверхностных геострофических течений с точностью в несколько см/с .

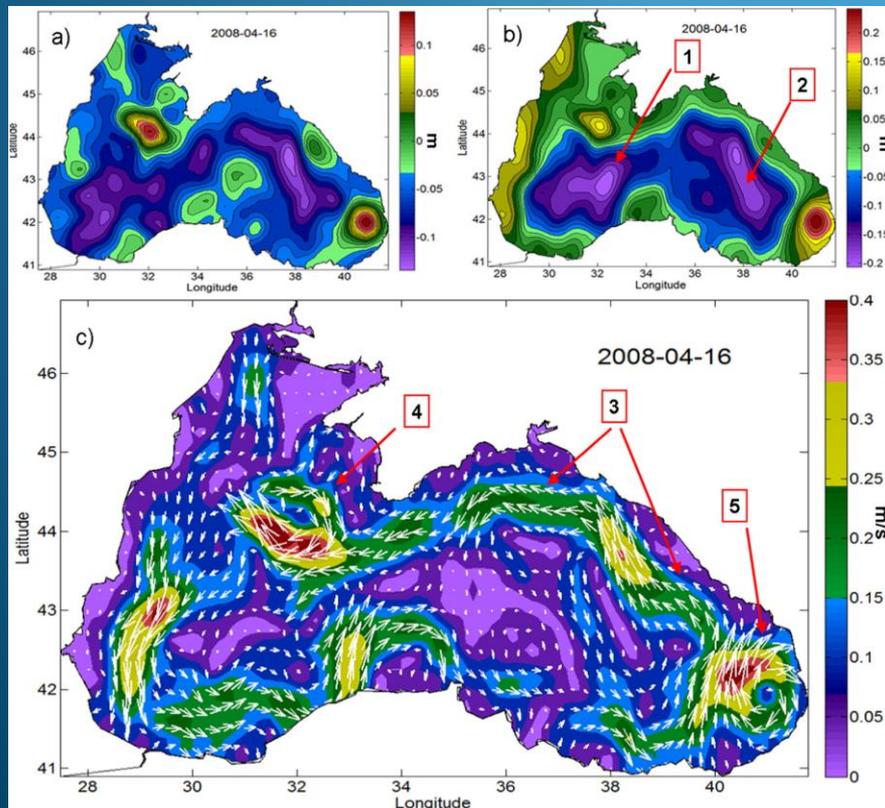
Различают два вида динамической топографии (ДТ): среднюю (или среднеклиматическую) и синоптическую. Среднеклиматическая ДТ определяется как отклонение средней высоты морской поверхности (СВМП) от высоты морского геоида. Она рассчитывается по данным спутниковой альтиметрии, дрейфующих буев и результатам расчетов по термогидродинамическим моделям. Различают глобальные и региональные модели среднеклиматической ДТ. Синоптическая (или абсолютная) динамическая топография определяется как суперпозиция среднеклиматической ДТ и аномалий уровня моря, рассчитанных, например, по ежедневным или по 10-ти дневным циклическим данным спутниковой альтиметрии .



Средняя динамическая топография (см) Мирового океана, построенная по данным спутниковой альтиметрии за 1993-2013 гг., включая новые точные данные о геоиде, полученные со спутника GOCE (http://notrickszone.com/wp-content/uploads/2015/01/Mean_dynamic_topography_node_full_image_2-1.jpg)

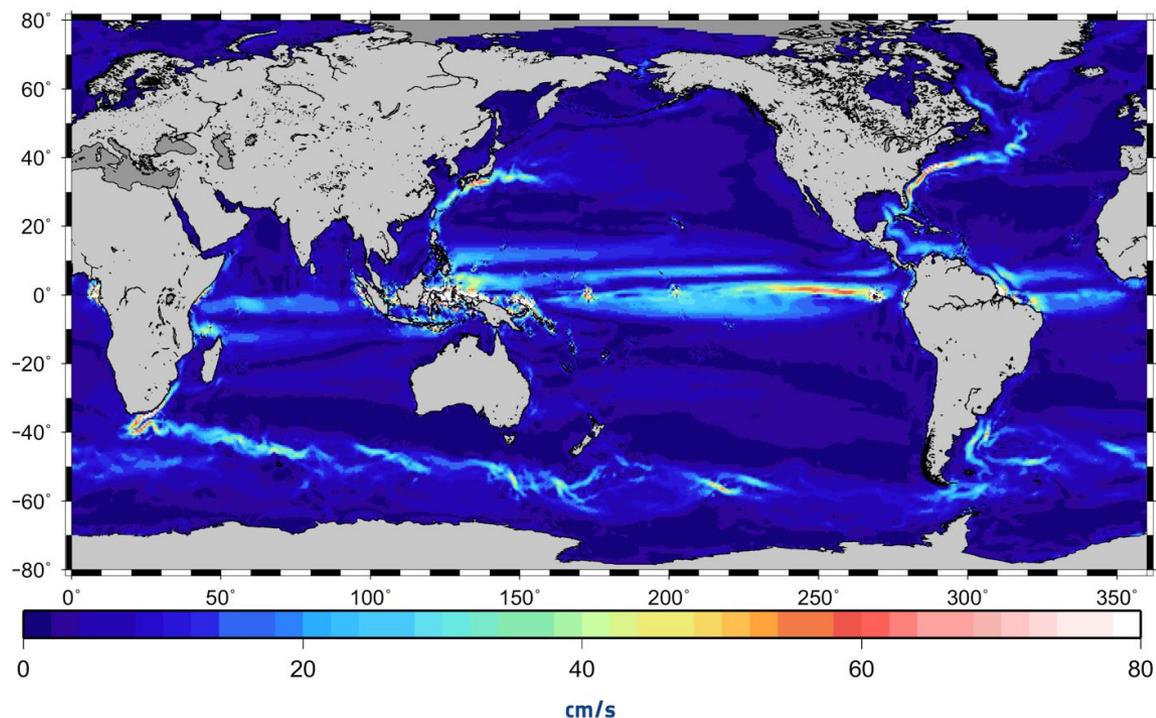


Средняя динамическая топография (м) Черного моря, построенная по данным спутниковой альтиметрии (Kubryakov, Stanichny, 2011).



Мезомасштабная динамика вод Черного моря по данным спутниковой альтиметрии на 16 апреля 2008 г.: (а) аномалия уровня (м); (б) синоптическая динамическая топография (м); (с) карта геострофических течений. (1) и (2) – западный и восточный циклонические круговороты, (3) – Основное черноморское течение, (4) – Севастопольский антициклон, (5) – Батумский антициклон (Kubryakov et al., 2016).

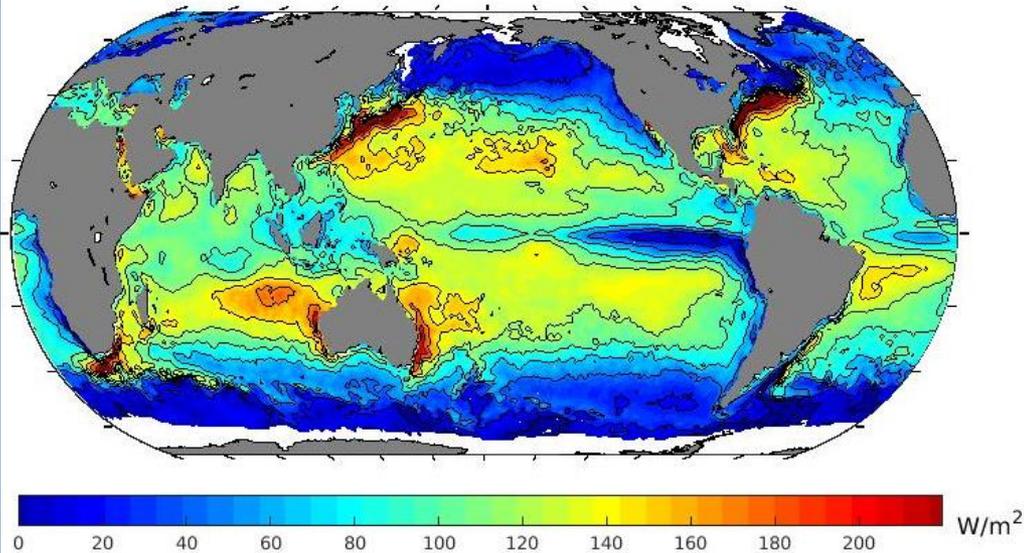
На основе синоптической динамической топографии, из геострофического соотношения (согласно которому горизонтальный градиент давления балансируется горизонтальной компонентой силы Кориолиса) можно рассчитать поле геострофических скоростей течений на поверхности моря. Такая технология успешно применяется сегодня как для исследования мезомасштабной динамики вод внутренних морей, так и Мирового океана в целом.



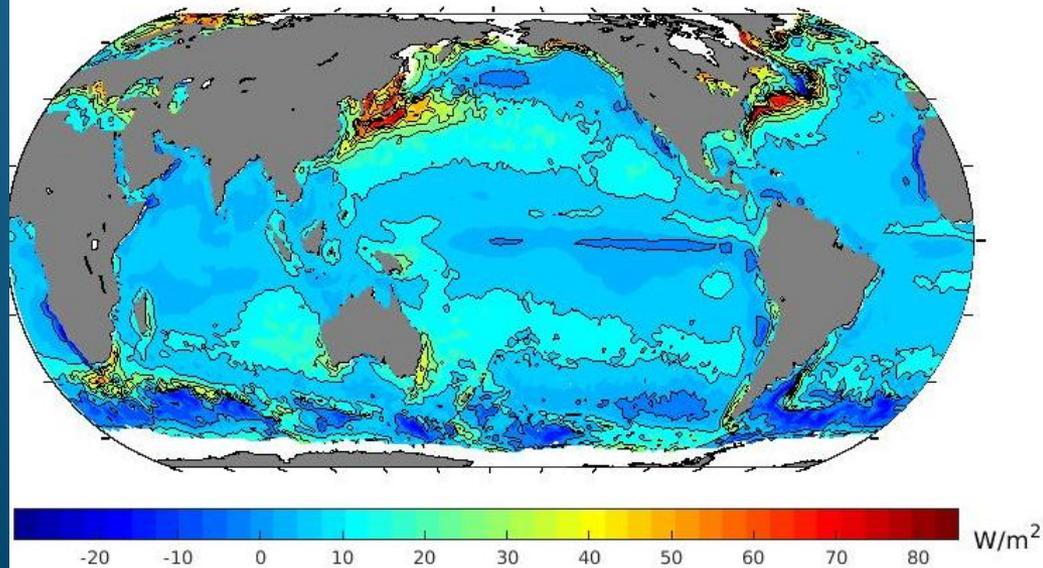
Поле геострофических течений (см/с) на поверхности Мирового океана по данным спутника GOCE (http://www.esa.int/spac_einimages/Images/2014/11/Ocean_currents_from_GOCE)

(7) Потоки явного и скрытого тепла

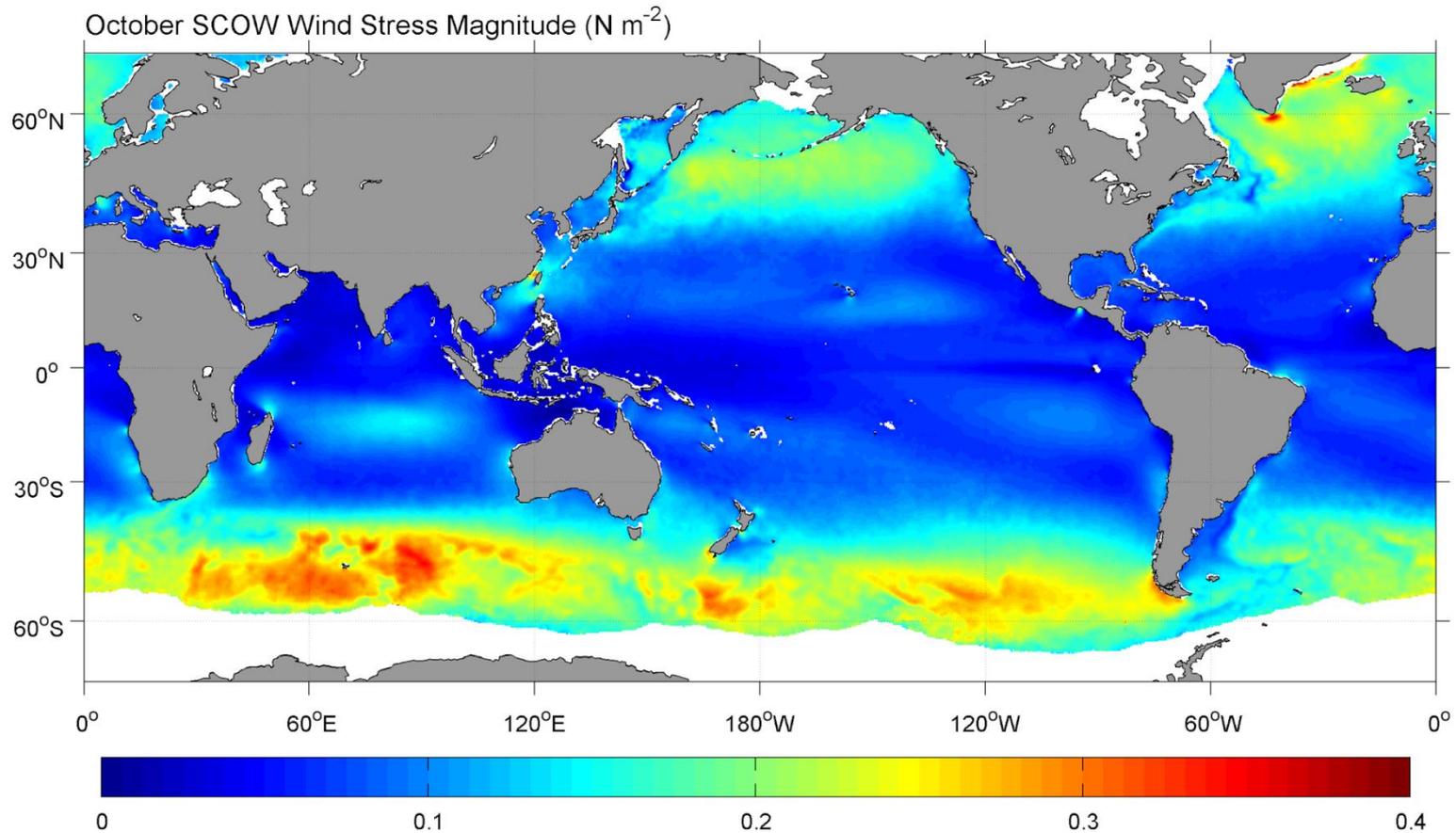
Mean Latent Heat Flux in 2017



Mean Sensible Heat Flux in 2017



(8) Напряжение трения ветра



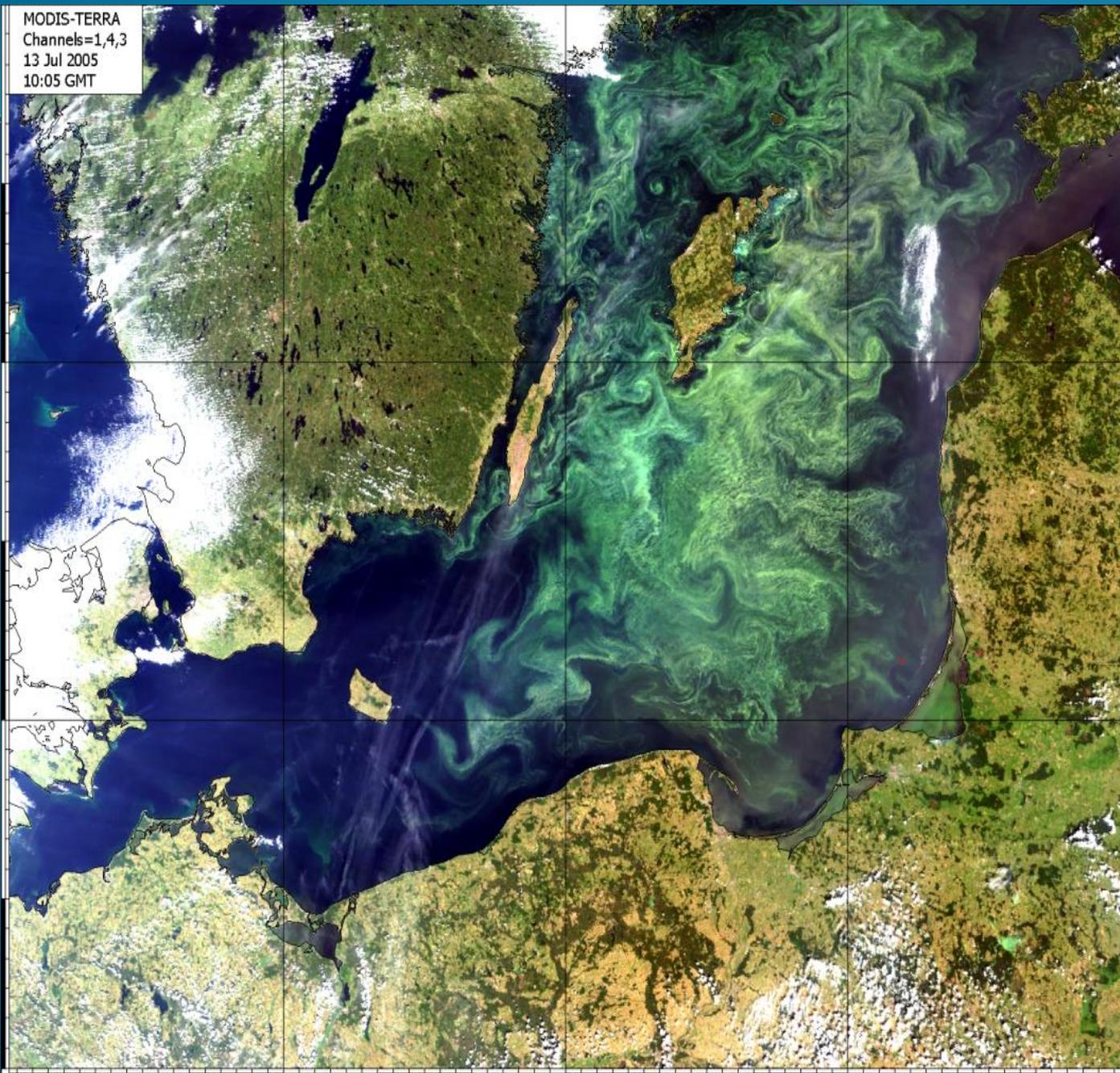
Reference: Risien, C.M., and D.B. Chelton, 2008: A Global Climatology of Surface Wind and Wind Stress Fields from Eight Years of QuikSCAT Scatterometer Data. *J. Phys. Oceanogr.*, 38, 2379-2413.

(9) Цвет океана

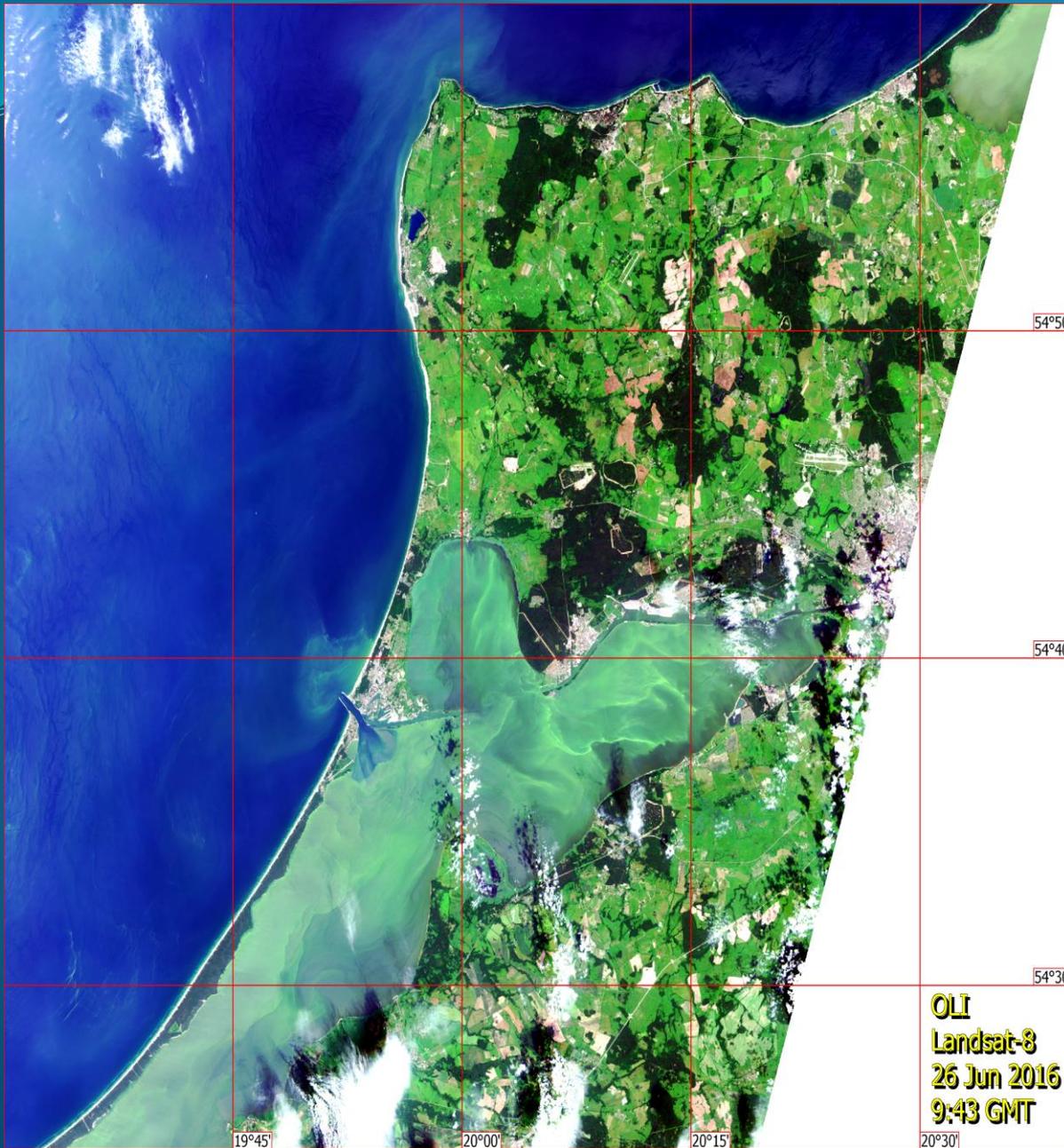
Спутниковые спектрорадиометры регистрируют величины яркости рассеянного и отражённого излучения, восходящего с поверхности моря, которое обусловлено наличием в морской воде оптически активных компонентов: хлорофилла-а, взвешенного неорганического вещества и окрашенного растворенного органического вещества — жёлтого вещества . При этом необходимо помнить, что сенсоры, работающие в видимом диапазоне, регистрируют солнечное излучение, рассеяное и отраженное от подстилающей поверхности и прошедшее через атмосферу. Истинный цвет океана обусловлен спектральным составом излучения, выходящего из водной толщи, и определяется оптическими свойствами морской воды, тогда как цвет, видимый спутниковым датчиком, обусловлен в значительной степени влиянием атмосферы. Чтобы выделить излучение, выходящее из водной толщи, проводится атмосферная коррекция, исходной информацией для которой являются спектральные значения яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеренные также спутниковыми сенсорами .

Исследование различных оптических характеристик морских вод, ареалов распространения взвешенного вещества, определение зон интенсивного цветения фитопланктона проводится многоканальными спектрорадиометрами, такими как – CZCS, MODIS Aqua/Terra, MERIS Envisat, MSS и TM Landsat-5, ETM+ Landsat-7, OLI Landsat-8, MSI Sentinel-2, гиперспектральными сенсорами Hyperion, HICO и другими

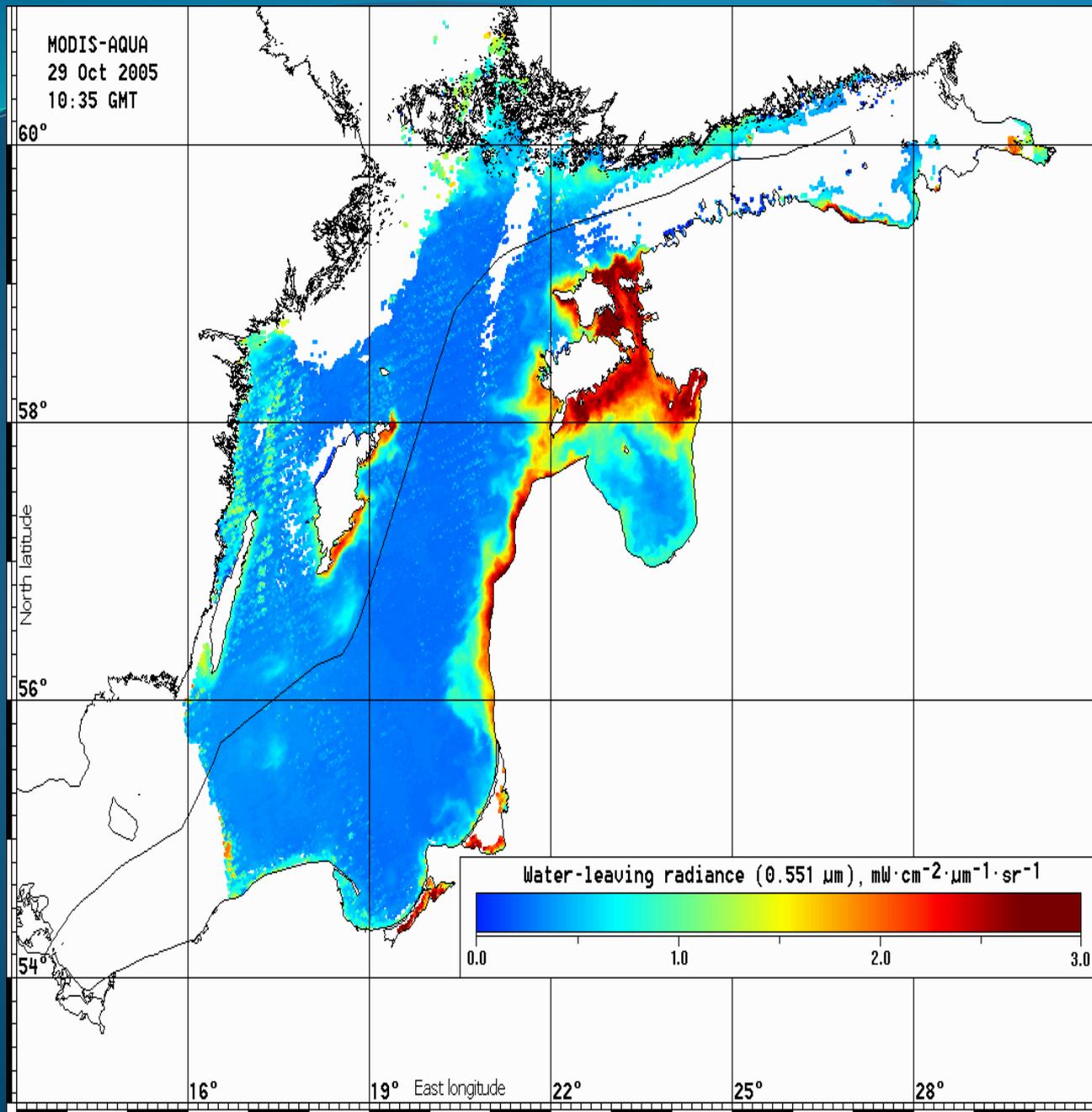
MODIS-TERRA
Channels=1,4,3
13 Jul 2005
10:05 GMT



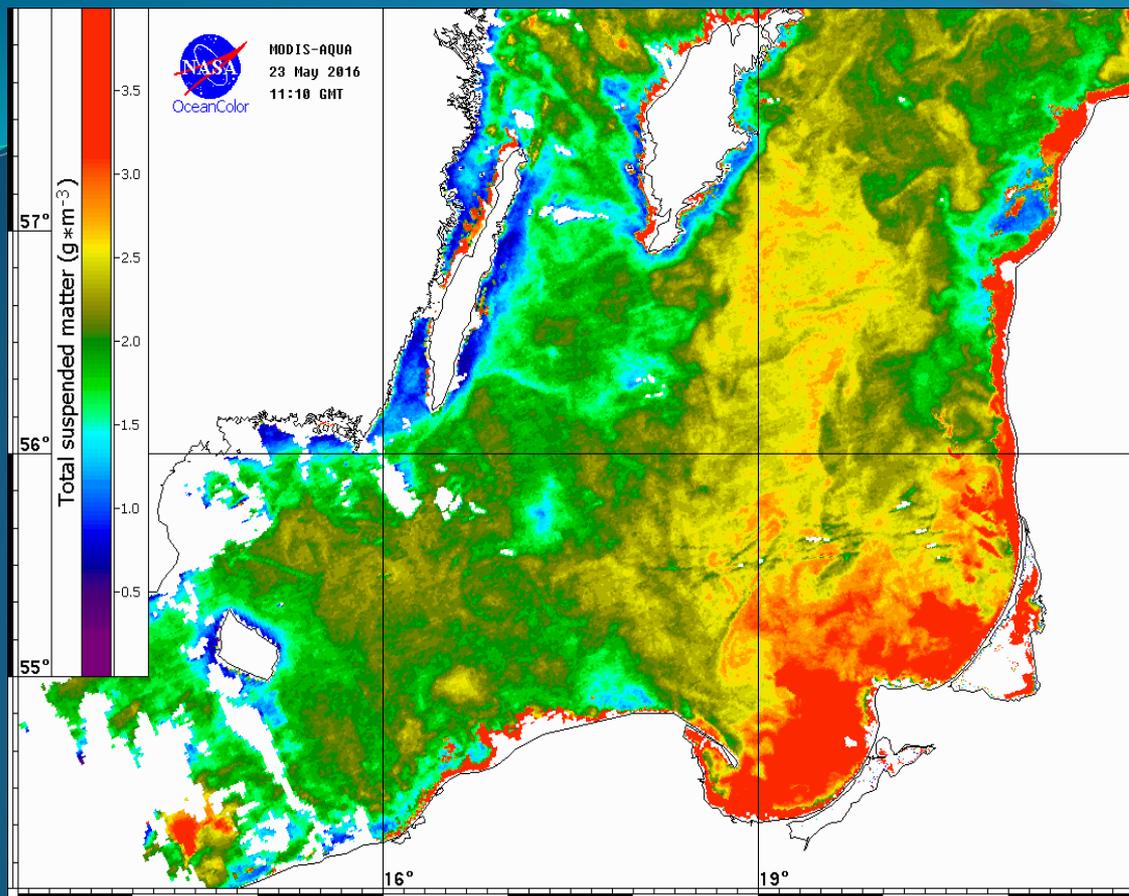
Цветение вод Балтики (зеленые цвета) по данным спектро радиометра MODIS-Terra (комбинация каналов 1, 4, 3) 13 июля 2005 г. (10:05 GMT).



Цветение вод
Калининградского
залива (зеленые цвета)
по данным сенсора OLI
Landsat-8 26 июля 2016
г. (09:43 GMT).



Распределение мутности вод на поверхности Балтийского моря по уровню восходящего излучения (Water Leaving Radiance) по данным спектрорадиометра MODIS-Aqua 29 октября 2005 г. (10:35 GMT).



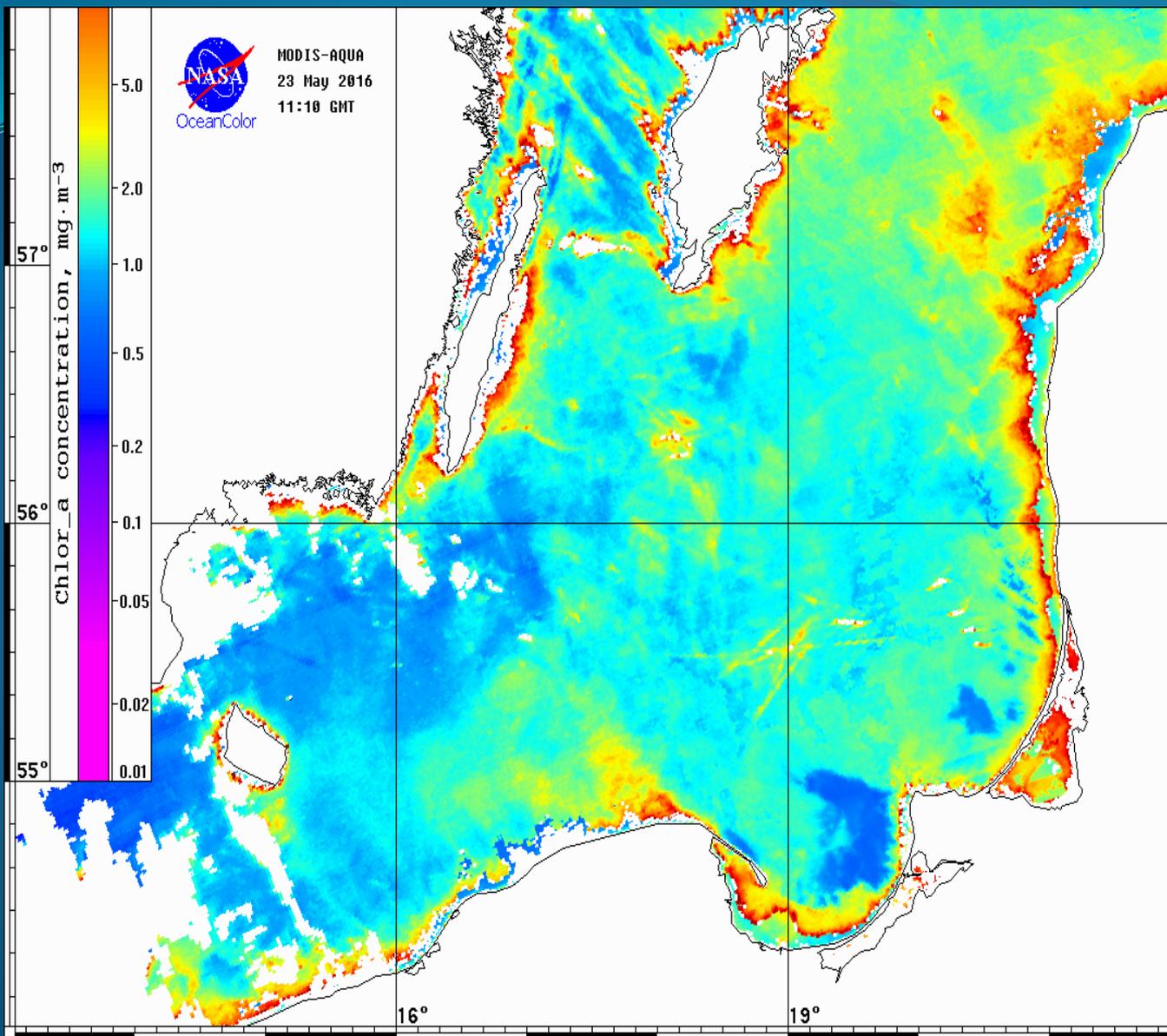
Концентрация суммарного взвешенного вещества ($\text{г}/\text{м}^3$) в Балтийском море по данным спектрорадиометра MODIS-Aqua 23 мая 2016 г. (11:10 GMT).

Определение концентраций взвешенного вещества по спутниковым данным и интегральная оценка взмученности вод осуществляется, например, по данным сенсоров MODIS и MERIS, отличительной характеристикой которого является возможность рассчитывать концентрацию общего взвешенного вещества (TSM — Total Suspended Matter) в абсолютных единицах ($\text{г}/\text{м}^3$) и строить карты с пространственным разрешением 260 м. Взвешенное вещество входит практически во все существующие в настоящее время классификации качества вод, так как является одним из основных элементов в круговороте вещества в природных водоёмах.

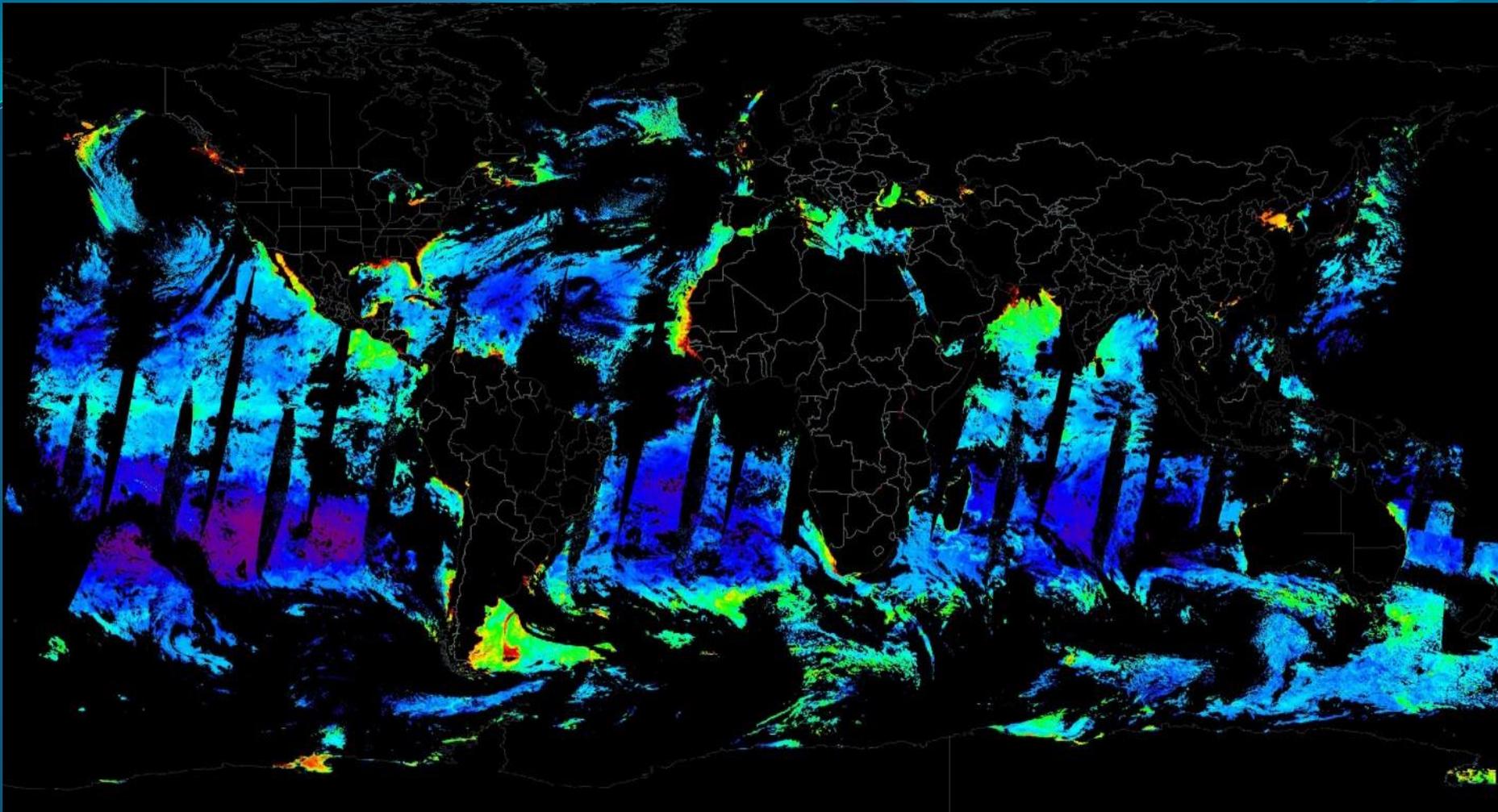
(10) Фитопланктон + (11) Места обитания

Наиболее затребованная характеристика, определяемая спектрорадиометрами, — концентрация хлорофилла. Этот параметр характеризует биомассу фитопланктона и является ключевой характеристикой для расчёта первичной продукции океана и морей. Это единственная характеристика морских экосистем, изменчивость которой, благодаря спутниковым наблюдениям, может быть изучена в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Вопрос о построении алгоритмов расчёта концентрации хлорофилла-а по спутниковым данным до конца не решён, поскольку стандартные алгоритмы разработаны для открытых океанических вод и показывают существенное завышение значений для некоторых региональных морей иногда более чем на порядок, по сравнению с натурными данными. Поэтому большое внимание уделяется разработке региональных алгоритмов, которые основываются на использовании данных подспутниковых измерений .

Массовому развитию водорослей вплоть до цветения воды способствует увеличение эвтрофирования водоёмов — насыщение водоёмов биогенными элементами, прежде всего азотом и фосфором, сопровождающееся ростом биологической продуктивности водных бассейнов. Увеличение эвтрофирования водоёмов происходит как под влиянием природных факторов, так и в значительно большей степени под влиянием антропогенных факторов. Региональное изменение климата приводит к увеличению ТПМ, усилению стратификации, и, как следствие, к увеличению содержания биогенных элементов в поверхностных водах.



Концентрация хлорофилла-а (мг/м³) в Балтийском море по данным спектрорадиометра MODIS-Aqua 23 мая 2016 г. (11:10 GMT).



Композитная карта концентрации хлорофилла-а (Chl-a) в Мировом океане (1 февраля 2017 г., MODIS-Terra). Диапазон Chl-a от 0.01 (фиолетовый цвет) до 20 мг/м³ (красный цвет). (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>)

Преимущества спутниковых методов заключаются в следующем:

- (1) возможность прямого измерения 8 из 10 океанических ОКП, соответствующих поверхности океана (до глубины 15 м);
- (2) глобальное покрытие Земного шара за 1-10 суток (в зависимости от параметров и сенсоров), включая все районы Мирового океана и труднодоступные районы Арктики и Антарктики;
- (3) измерения океанических ОКП с пространственным разрешением даже в 1 км являются эквивалентом около 360 млн виртуальных метеостанций, что существенно превышает число метеостанций на суше (98 тыс.);
- (4) мгновенная съемка обширных акваторий;
- (5) уникальная возможность точного определения площади, толщины и концентрации льда в Арктике и Антарктике, а также на акватории окраинных и внутренних морей;
- (6) наивысшая оперативность в получении данных;
- (7) возможность ежедневного повтора наблюдений (для некоторых сенсоров и районов – по несколько раз в сутки);
- (8) высокое пространственное разрешение (от 1 км до 60 см);
- (9) получение комплексных и мультисенсорных данных;
- (10) использование тех же спутниковых данных для решения широкого круга научных и прикладных задач;
- (11) существенно низкая стоимость спутникового мониторинга по сравнению с морскими наблюдениями.

Ограничения спутниковых методов заключаются в следующем:

- (1) невозможность прямого измерения всех 8 подповерхностных (глубже 15м) океанических ОКП (хотя, некоторые из них можно оценить косвенно);
- (2) облачность является помехой для инфракрасных сенсоров (в районах, закрытых сплошной облачностью, используются микроволновые радиометры);
- (3) облачность и отсутствие дневного света (ночь, полярная ночь) являются помехами для оптических сенсоров;
- (4) спутниковые альтиметры измеряют аномалии уровня, скорость ветра и высоту волн только вдоль фиксированных треков, расстояние между которыми у экватора достигают 300 км (при измерениях вдоль трека с разрешением около 7 км)
- (5) направление ветра и волн не определяется по альтиметрическим данным;
- (6) измерения цвета океана и фитопланктона требуют региональных алгоритмов расчета соответствующих характеристик;
- (7) в целом, точность спутниковых измерений океанических ОКП примерно в 5-10 раз меньше измерений этих параметров *in-situ*.

Костяной А.Г. Спутниковый мониторинг климатических параметров океана. Часть 1. – Фундаментальная и прикладная климатология. 2017, №2, С.27-49.

Костяной А.Г. Спутниковый мониторинг климатических параметров океана. Часть 2. – Фундаментальная и прикладная климатология. 2017, №3, С. 57-83

Копелевич О.В., Костяной А.Г. Использование биооптических параметров океана, определяемых по спутниковым данным, в качестве основных климатических переменных. - Фундаментальная и прикладная климатология, 2018, № 3, С.8-29

Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Kopelevich O.V., Kudryavtsev V.N., Lavrova O.Yu., Lebedev S.A., Mitnik L.M., Mityagina M.I., Smirnov V.G., Stanichny S.V., Troitskaya Yu.I. Ocean Remote Sensing in Russia. In S. Liang (Ed.), Comprehensive Remote Sensing, 2018, vol. 8, pp. 284–325. Oxford: Elsevier.

Спасибо за внимание!

Костяной Андрей Геннадьевич

Профессор, доктор физико-математических наук

Главный научный сотрудник лаборатории экспериментальной физики океана

Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Ведущий научный сотрудник Геофизического центра РАН

Приглашённый профессор Льежского Университета (Бельгия)

Почетный профессор Тверского государственного университета

info@gcras.ru