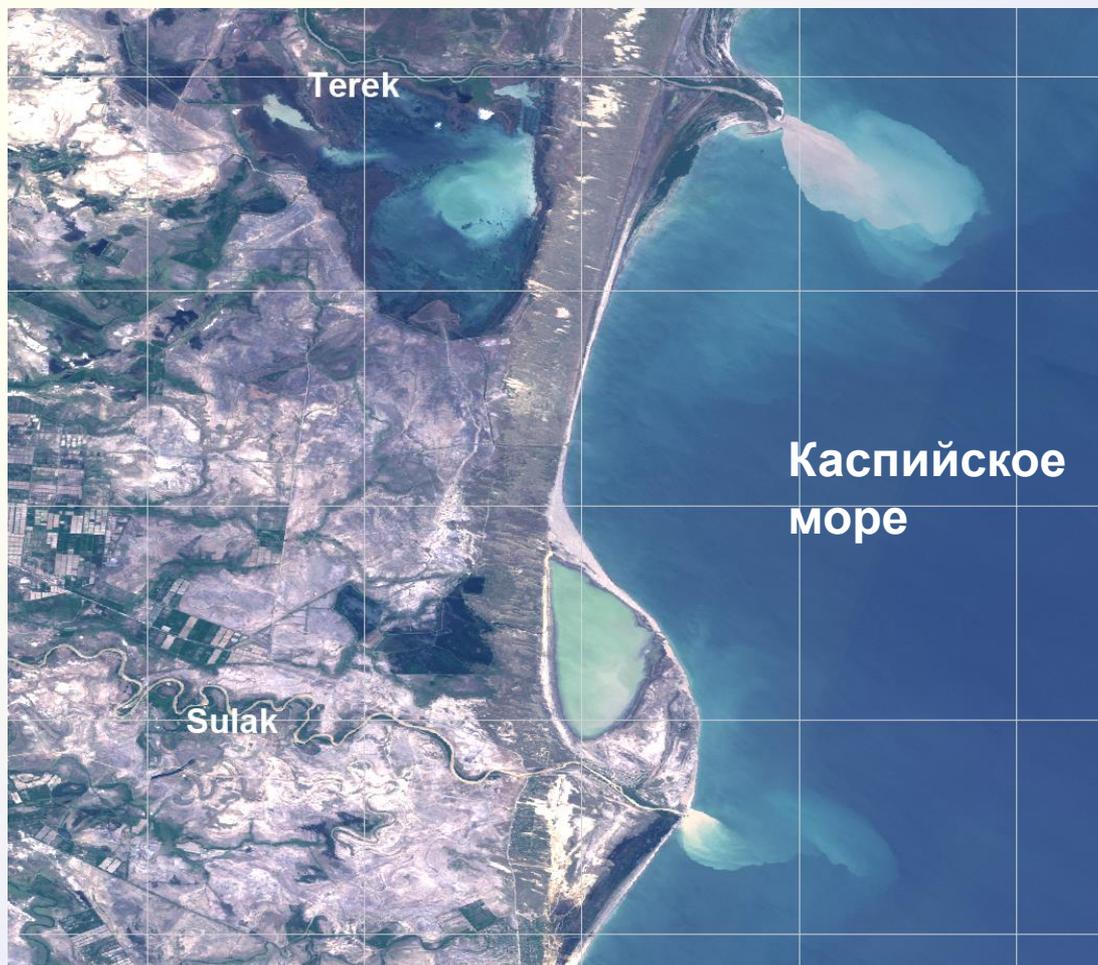


Реализация уточненных алгоритмов расчета температуры поверхности моря, мутности воды и концентрации взвешенного вещества по данным дистанционного зондирования в информационно-аналитической системе “See the Caspian Sea”

Лаврова О.Ю. (1), Костяной А.Г. (2), Жаданова П.Д. (1), Кашницкий А.В. (1)

(1) Институт космических исследований РАН,
(2) Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

olavrova@cosmos.ru

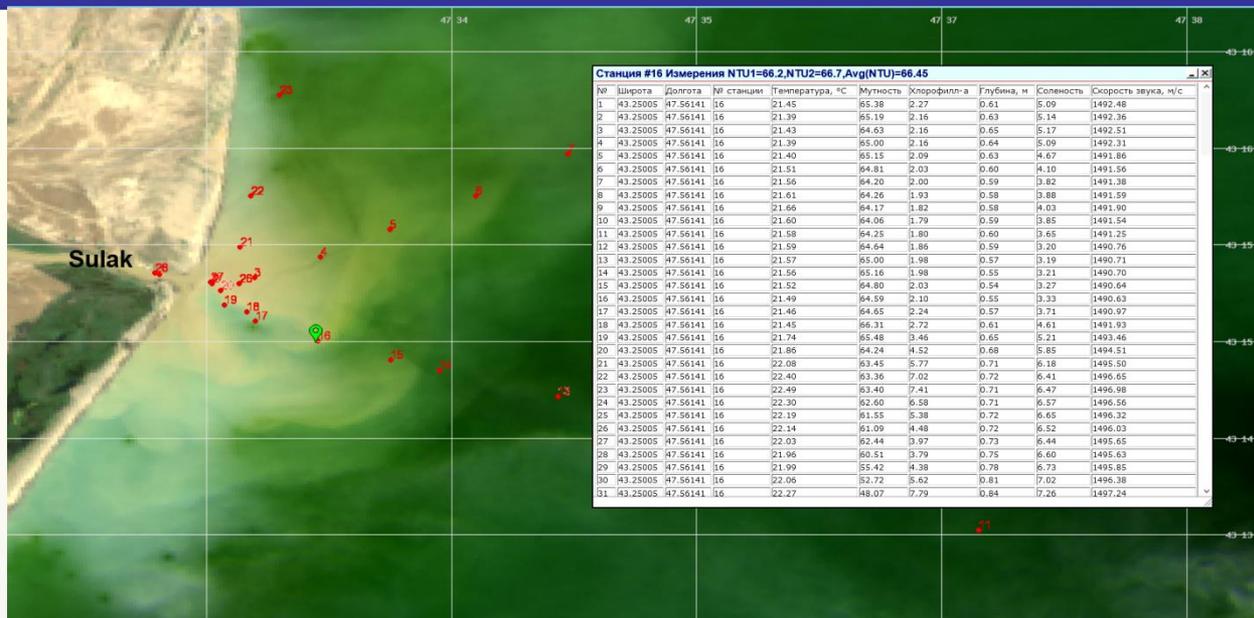


Приустьевые зоны рек Терек и Сулак - районы натуральных измерений.
Фрагмент изображения OLI-2 Landsat-9 от 18 мая 2023 года

Основные характеристики сенсоров Landsat и Sentinel-2

OLI/OLI-2, TIRS/TIRS-2 Landsat 8/9			MSI Sentinel 2		
Band	Wavelengths, μm	Spatial resolution, m	Band	Wavelengths, μm	Spatial resolution, m
1	0.43-0.45	30	1	0.43-0.45	60
2	0.45-0.51	30	2	0.46-0.52	10
3	0.53-0.59	30	3	0.54-0.58	10
4	0.64-0.67	30	4	0.65-0.68	10
5	0.85-0.88	30	5	0.70-0.71	20
6	1.57-1.65	30	6	0.73-0.75	20
7	2.11-2.29	30	7	0.77-0.93	20
8	0.50-0.68	15	8	0.79-0.90	10
9	1.36-1.38	30	8A	0.86-0.88	20
10	10.6-11.19	100	9	0.94-0.96	60
11	11.50-12.51	100	10	1.37-1.40	60
			11	1.57-1.66	20
			12	2.10-2.28	20

Обсуждаемые в данной работе алгоритмы и методики определения температуры поверхности моря (ТПМ), мутности, концентрации взвешенного вещества (SPM) основаны, прежде всего, на спутниковых данных оптического диапазона сенсоров MSI Sentinel-2A, -2B; OLI/TIRS Landsat-8 и OLI-2/TIRS-2 Landsat-9



Интерфейс STCS с отображением станций in-situ измерений. In-situ данные накладываются на спутниковое изображение

Специализированная информационно-аналитическая система See The Caspian Sea (STCS), предназначенная для сбора, анализа и визуализации спутниковых и метеорологических данных по региону Каспийского моря. Комплексный анализ изменений различных процессов потребовал включения в информационную систему STCS новых алгоритмов расчета по спутниковым данным мутности воды, концентрации взвешенных веществ и температуры поверхности моря, разработанных на основе подспутниковых экспериментов в Каспийском море. Также предложены инструменты для выбора комбинаций каналов, при которых те или иные процессы наиболее ярко проявляются на спутниковых изображениях.

Алгоритмы определения температуры поверхности моря (ТПМ): по данным MODIS

В системе STCS реализовано 3 алгоритма, два из которых - для данных высокого пространственного разрешения приборов TIRS/TIRS-2 спутников Landsat-8/-9 и MODIS спутников EOS Terra/Aqua. Среди всех методов наблюдения за ТМО спутники обеспечивают наиболее устойчивое глобальное покрытие. Инфракрасные (ИК) датчики обеспечивают измерения с высоким разрешением, а также имеют долгую историю.

Алгоритм MODIS - ТПМ определяется по измерениям излучения верхней части атмосферы в среднем и тепловом ИК-диапазонах (с длиной волны 3,7, 3,9, 4,0, 11 и 12 мкм), в которых атмосфера относительно прозрачна для передачи поверхностного ИК-излучения. Сравнение с независимыми измерениями с помощью судовых спектрорадиометров подтверждает, что полученные с помощью MODIS значения SST обычно имеют среднюю погрешность $< 0,1^{\circ}\text{K}$ и разброс $< 0,5^{\circ}\text{K}$.

Недостатки:

- Разрешение 1 км;
- алгоритм хорошо работает для открытого моря, для непосредственной прибрежной зоны могут быть сильные расхождения со значениями, измеренными *in-situ* непосредственно на верхнем горизонте, из-за километрового разрешения.

Алгоритмы определения температуры поверхности моря (ТПМ): по данным OLI/OLI-2 Landsat-8/-9

Алгоритмы для прибора Thermal InfraRed Sensor (TIRS), установленного на Landsat-8, и его аналога TIRS-2, установленного на Landsat-9.

Разрешение 100 м

Алгоритмы определения ТПМ основаны на данных, полученных в инфракрасном диапазоне в двух спектральных каналах, 10 и 11 мкм, на длинах волн 10,6 - 11,19 мкм и 11,50-12,50 мкм соответственно.

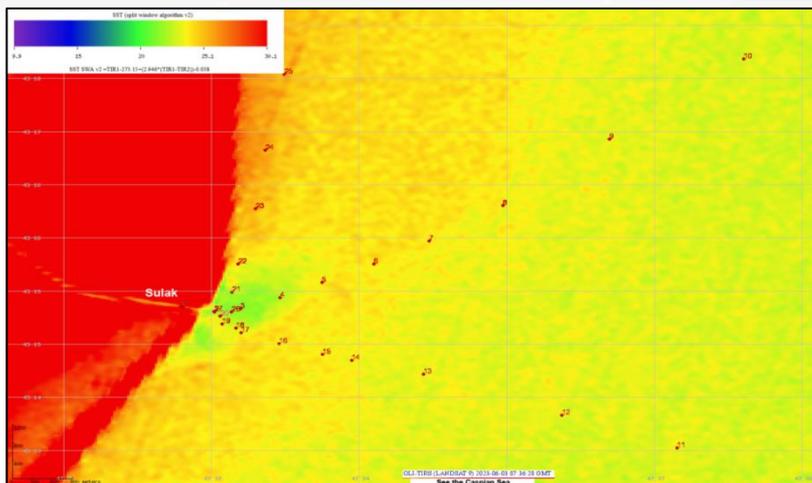
Алгоритм Split Window Algorithm (SWA v.2) использует следующую комбинацию каналов: $ТПМ = BT10 + (2.946 * (BT10 - BT11)) - 0.038$, где BT10 - значение яркостной температуры (°C) полосы 10, BT11 - значение яркостной температуры (°C) полосы 11.

Алгоритм «МНИ» (Морской гидрофизический институт, Севастополь, Россия):

$$ТПМ = 1,8236 * (BT10 - 273,15) - 0,8018 * (BT11 - 273,15) + 1,23$$

ТПМ определяется на основе калиброванных измерений ТПМ датчиком MODIS спутника Aqua. Как следствие, для открытого моря SST, полученная по данным MODIS, и алгоритм «МНИ» совпадают, в прибрежной зоне возможны расхождения с in-situ данными.

Результаты определение температуры поверхности моря, полученные различными методами в приустьевой зоне р. Сулак



ТПМ с использованием алгоритма Split Window Algorithm на 3 июня 2023 г. Цифры соответствуют номерам станций измерений in-situ в приустьевой зоне р. Сулак

Результаты, представленные в таблице, показывают, что наилучшая корреляция с данными натурных измерений наблюдается при использовании алгоритма SWA v.2. Для алгоритмов «МНІ» и MODIS корреляция с натурными данными значительно хуже, не говоря уже о значениях MODIS на ближайших к устью реки станциях (2 и 27). Это связано с тем, что при разрешении 1 км для MODIS в расчет ТПМ были включены наземные данные. При анализе данных за 13 июня 2023 г. в открытом море на расстоянии более 150 км от берега значения ТПМ совпали для MODIS и «МНІ» и составили 22,8°С и 22,6°С с использованием SWA v.2. Натурных измерений на таком расстоянии от берега не проводилось.

ТПМ (°С), полученная различными методами

Номер станции	In situ измерения	Алгоритм SWA v.2	Алгоритм МНІ	Алгоритм MODIS
2 (27)	19.03	19.9	20.5	41.0
4	22.61	22.4	20.8	24.0
7	23.28	24.1	22.1	22.8
11	22.87	23.2	21.5	21.4
12	23.06	23.1	21.5	22.0
21	22.11	21.8	20.5	24.0

Алгоритмы для определения мутности воды

Для определения мутности воды (Turbidity) по спутниковым данным в системе «See The Caspian Sea» реализованы два алгоритма, входящие в программную среду ACOLITE.

Алгоритм Nechad — универсальный алгоритм расчета мутности морской воды. Он основан на расчете мутности воды с использованием коэффициента спектральной яркости воды на длине волны ~ 645 нм. Для каждого спутника берется ближайший канал, соответствующий указанной длине волны. Для Landsat - 8/9 и Sentinel - 2A/2B – это 4 канал (RED). Для краткости обозначим значения на этих каналах RED:

$$Turbidity\ Nechad = 208,1 * RED / (1 - RED / 0,1641).$$

Недостаток: он не пригоден для использования в сильно мутных водах, так как при высоких значениях коэффициента спектральной яркости достигает порога насыщения и выдает нечисловые значения

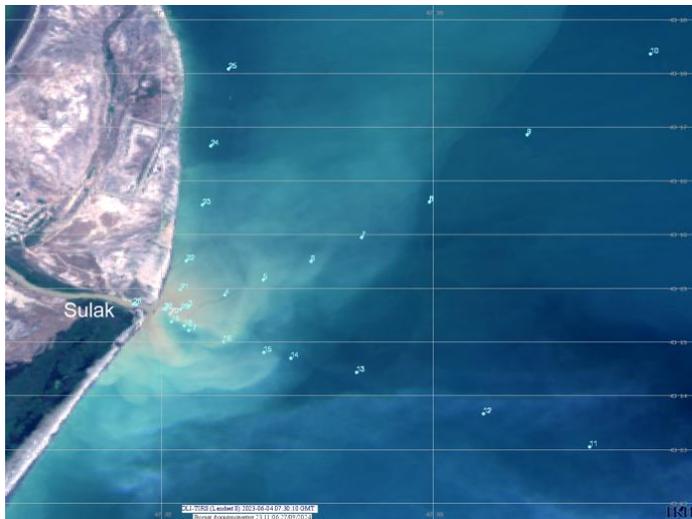
Алгоритм Dogliotti — является усовершенствованным алгоритмом Nechad и использует два канала вместо одного: 645 нм и 859 нм (каналы 4 и 5 для Landsat - 8/9, каналы 4 и 8 для Sentinel - 2A/2B). Это позволяет сдвинуть порог насыщения и получить результаты для сильно мутных вод. Мутность рассчитывается по алгоритму Nechad для двух длин волн отдельно. Затем результаты «склеиваются» с помощью линейной весовой функции (варьируется от 0 до 1), которая была применена к смоделированному индексу мутности для коэффициента спектральной яркости $\rho_w(645)$ в диапазоне от 0,05 до 0,07. Таким образом, значения спектральной полосы 645 нм используются, когда $\rho_w(645) < 0,05$, а значения полосы 859 нм - когда $\rho_w(645) > 0,07$.

$$Turbidity\ Dogliotti = (1 - w) \cdot T^{645} + w \cdot T^{859},$$

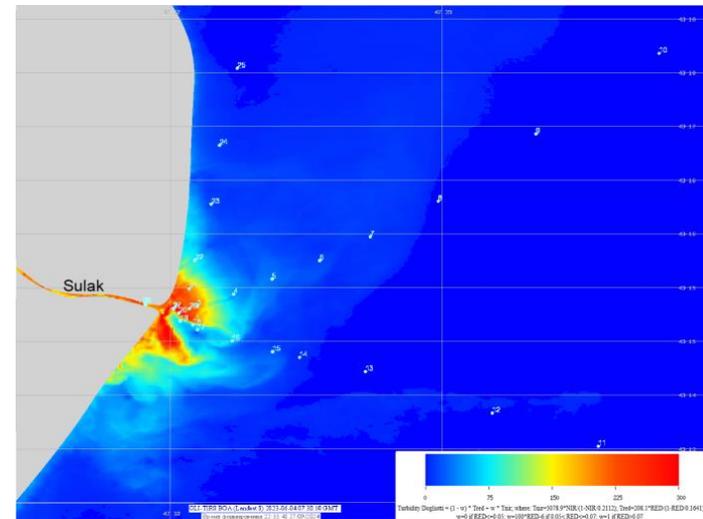
где T^{645} - мутность, рассчитанная по каналу, соответствующему длине волны ~645 нм по алгоритму Nechad, и T^{859} - мутность, рассчитанная по каналу, соответствующему длине волны ~859 нм по алгоритму Nechad, w - весовая функция. Благодаря такому решению данный алгоритм показывает высокую корреляцию с результатами натурных измерений в водах с умеренной и высокой мутностью.

Сравнение значений мутности, определенных *in-situ* и по спутниковым алгоритмам

Результаты двух описанных выше алгоритмов определения мутности сравнивались с результатами, полученными *in-situ* в приустьевых зонах рек Терек и Сулак, впадающих в Каспийское море. Для рассматриваемых районов, где максимальное значение мутности по *натурным* измерениям превышает 200 нефелометрических единиц мутности (NTU), алгоритм Nechad не использовался. Также, в связи с высокой мутностью, наблюдаемой в исследуемом регионе, пороговое значение отношения спектральной яркости было изменено на $\rho_{TOA}(\sim 1600 \text{ нм}) \leq 0,085$. При таком значении маскируются все пиксели, относящиеся к суше.



а



б

Цветосинтезированное изображение в псевдоестественных цветах OLI Landsat-8, полученное в прибрежной зоне реки Сулак 04.06.2023. Точками отмечены места расположения станций подспутниковых измерений (а); карта пространственного распределения мутности, полученная по алгоритму Dogliotti (б)

Сравнение значений мутности, определенных in-situ и по спутниковым алгоритмам

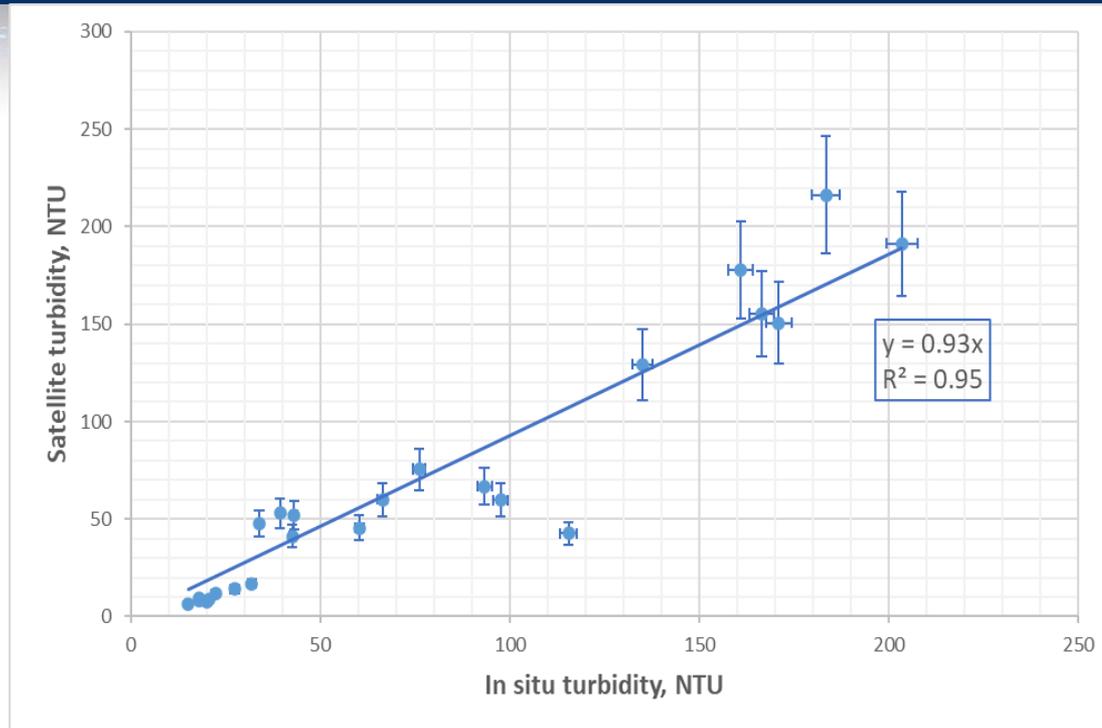


Диаграмма рассеяния значений мутности воды, полученных по спутниковым данным (алгоритм Dogliotti) и in-situ измерениям для реки Сулак 04.06.2023

Результаты in-situ измерений были сопоставлены с данными дистанционного зондирования. Как видно из графика, диаграмма рассеяния значений мутности хорошо описывается линейной функцией с коэффициентом $R^2 = 0,95$

Алгоритмы для определения концентрации взвешенного вещества

Для определения концентрации взвешенного вещества (SPM) по спутниковым данным используются специальные алгоритмы, которые связывают спектральные характеристики излучения, отраженного от поверхности воды, с содержанием взвешенных частиц. Алгоритм Nechad для расчета концентрации взвешенного вещества основан на ряде допущений и приближений относительно первичных оптических свойств морской воды.

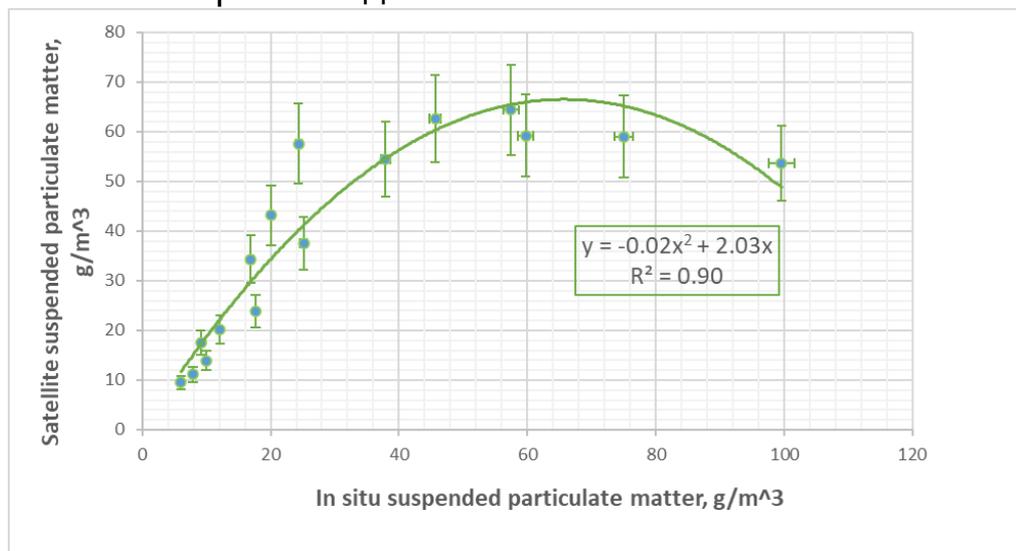


Диаграмма рассеяния значений SPM, полученных по спутниковым данным и натурным измерениям, для реки Сулак 04.06.2023

При сравнении значений, рассчитанных по спутниковым данным, с данными подспутниковых измерений было обнаружено, что значения, не превышающие 40-60 г/м³, имеют практически линейную зависимость. При более высоких значениях SPM наблюдается параболическая зависимость, что можно объяснить тем, что алгоритм SPM Nechad2015 был создан на основе алгоритма Nechad для расчета мутности воды, поэтому имеет те же ограничения. Таким образом, станции, соответствующие значениям SPM выше 40 г/м³, требуют отдельного рассмотрения и, возможно, поиска другого алгоритма расчета.

- В докладе представлен обзор новых алгоритмов и методик, разработанных за последнее десятилетие, по определению температуры поверхности моря, мутности воды и концентрации взвешенного вещества на основе, прежде всего, данных о цвете океана: MSI Sentinel-2A, -2B; OLI/TIRS Landsat-8 и OLI-2/TIRS-2 Landsat-9. Наш опыт спутникового дистанционного зондирования основных параметров среды Каспийского моря и *натурных* измерений показывает, что во многих случаях стандартные алгоритмы получения этих параметров по данным ДЗЗ, разработанные, откалиброванные и валидированные для условий открытого океана, не подходят для Каспийского моря, как и для других внутренних морей, имеющих свои специфические физико-географические, океанографические и метеорологические условия.
- Для понимания современного состояния и эволюции окружающей среды Каспийского моря, связанной с сильными климатическими изменениями в регионе Каспийского моря, и проведения ее комплексного анализа необходимо использовать данные дистанционного зондирования и корректно определять различные параметры окружающей среды. В связи с этим необходимо проводить как спутниковое дистанционное зондирование Каспийского моря, так и *натурные* измерения для получения корректных значений параметров, чтобы избежать неверных выводов о реальном экологическом состоянии Каспийского моря.

- Андрей Костяной и Ольга Лаврова выполнили анализ спутниковых оптических изображений при поддержке гранта РГНФ N 23-77-00027 «Исследование климатической изменчивости термогидродинамического режима Каспийского моря по данным дистанционного зондирования», <https://rscf.ru/en/project/23-77-00027/>.
- Никита Князев, Полина Жаданова и Александр Кашницкий обрабатывали спутниковые исходные данные в системе «See The Caspian Sea» в рамках Государственного задания Института космических исследований РАН, тема «Мониторинг», № государственной регистрации

Спасибо за внимание!