

Проявление плюмов реки Кура, распространяющихся в
юго-западной части Каспийского моря, в данных
спутникового дистанционного зондирования

М.И. Митягина

Институт космических
исследований РАН, Москва

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение закономерностей и особенностей отображения плюмов, образованных стоком реки Куры в шельфовой зоне практически бесприливного Каспийского моря в данных спутниковой радиолокации и в определении механизмов, определяющих формирование их радиолокационных сигнатур.

ОБЛАСТЬ ИНТЕРЕСА

Река Кура — типичный представитель рек западного побережья Каспия и сталкивается с общими для них проблемами:

- ✓ зарегулированный сток,
- ✓ постоянное снижение среднегодового расхода
- ✓ усиление антропогенной нагрузки, главным образом проявляющейся в увеличении забора воды для сельскохозяйственной деятельности.

За последние десятилетия интенсивное использование водных ресурсов рек Каспийского моря и регулирование течения основных рек привели к сокращению поверхностного стока в море и изменению его сезонного распределения. Исследования показывают, что за последние тридцать лет годовой сброс реки снизился почти на 50%. Годовой и максимальный сток реки Куры в районе ее дельты в основном уменьшился, в то время как минимальный зимний сток увеличился.



Карта Каспийского моря (слева); . Красным прямоугольником обозначен район исследований. Увеличенная область дельты реки Куры (справа).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОСНОВА ИССЛЕДОВАНИЯ

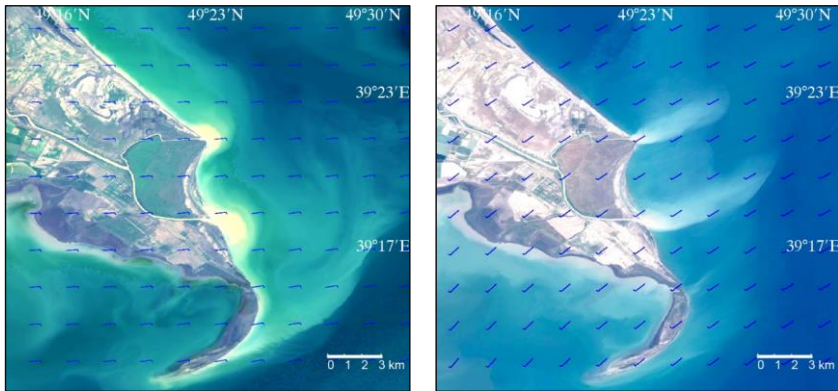
Массив спутниковых данных, полученных для района дельты Куры за десятилетний период с 2015 по 2024 г.

Сенсор	Период	Разрешение (m)	Диапазон	Длина волны	Количество изображений
SAR-C Sentinel-1A	Январь 2015 – Декабрь 2024	5x20	C	5.6 см	1029
SAR-C Sentinel-1B	Апрель 2016 – Декабрь 2024				
MSI Sentinel-2A	Сентябрь 2015 – Декабрь 2024	10	B2 – Blue	B2 (0.452–0.512 мкм)	453
MSI Sentinel-2B	Март 2017 – Декабрь 2024		B3 – Green B4 – Red	B3 (0.533–0.590 мкм) B4 (0.636–0.673 мкм)	
OLI Landsat 8	Январь 2015 – Декабрь 2024	30	B2 – Blue	B2 (0.452–0.512 мкм)	427
OLI 2 Landsat 9	Октябрь 2021 – Декабрь 2024		B3 – Green B4 – Red	B3 (0.533–0.590 мкм) B4 (0.636–0.673 мкм)	

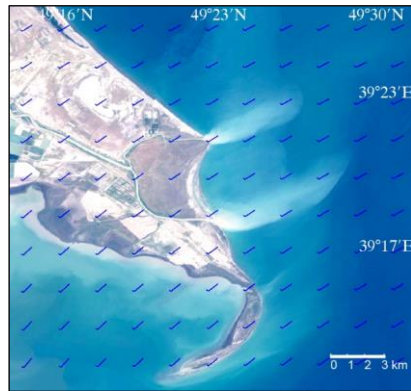
В общей сложности в рамках данного исследования было проанализировано 1658 спутниковых снимков, из них 1029 радиолокационных изображений и 880 - изображений видимого диапазона

- Анализ спутниковых данных выполнялся с использованием возможностей и инструментария информационного спутникового сервиса «See the Sea» (STS), разработанного в Институте космических исследований РАН .
- При помощи инструментария сервиса STS проводился синтез по комбинации оптических каналов 640-670 нм, 530-590 нм, 450-510 нм (RGB) для сенсоров OLI IC3 Landsat-8 -9, и по комбинации каналов 650-680 нм, 542-577 нм, 456-523 (RGB) для сенсоров MSI IC3 Sentinel 2-A, -B.
- Для картографирования выявленных объектов использовался интегрированный в систему STS картографический интерфейс, а с использованием подсистемы создания и ведения описаний явлений формировался массив описаний, содержащий их количественные характеристики.
- Для специализированного анализа PCA-данных использовалась платформа приложений Sentinel SNAP (*Sentinel Application Platform*), которая кратко может быть охарактеризована как набор исполняемых инструментов и интерфейсов прикладного программирования (<https://step.esa.int/main/doc/online-help/>).
- Для получения метеорологической информации использовались как архивные данные о фактической погоде в районе интереса с сайта <https://weatherspark.com/> , так и данные реанализа NCEP/NOAA из интегрированной в систему STS базы метеорологических данных.

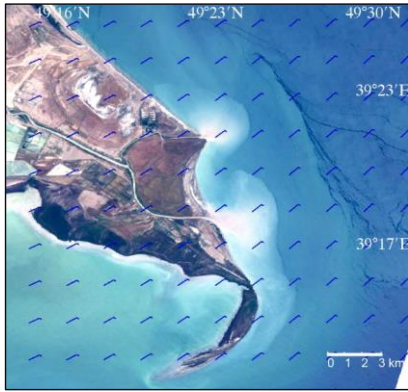
Проявления плумов реки Куры на спутниковых цветосинтезированных изображениях



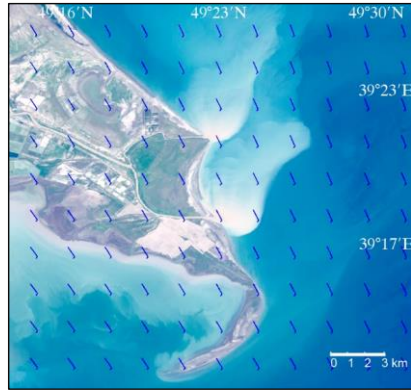
a



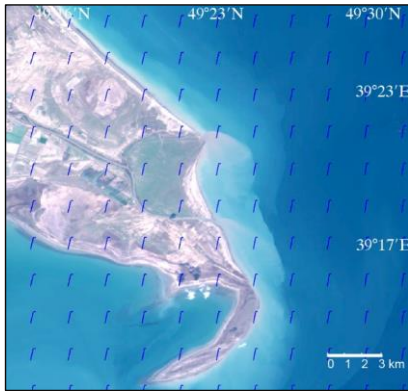
b



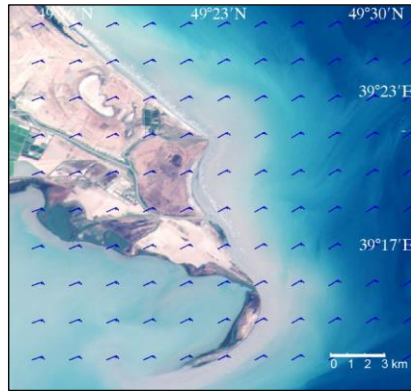
c



d



e

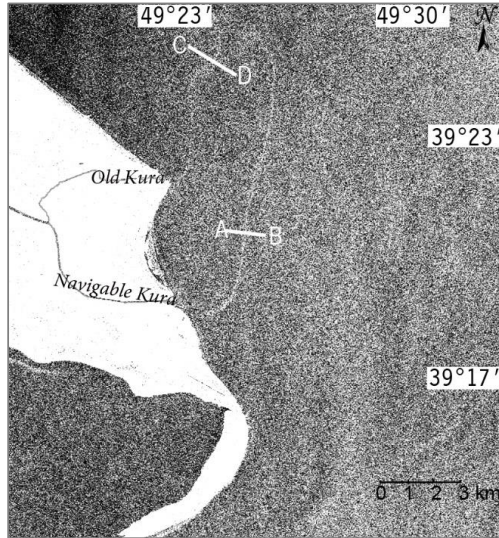


f

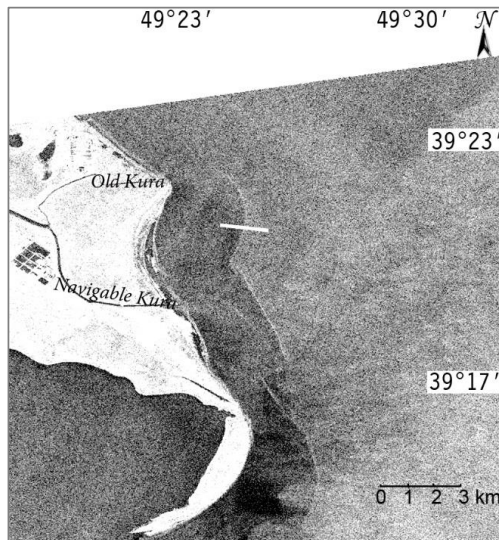
Река Кура впадает в море двумя рукавами, образуя дельту. Соответственно, плум Куры формируется двумя источниками стока, расположенными на расстоянии около 6 км друг от друга, которые подвержены колебаниям расхода воды. Скорости течения в устье достигают 1,5–2,5 м/с в периоды половодья, а в периоды маловодья – в среднем 0,5 м/с.

- Поведение плумов реки Кура в основном определяется ветром, который вызывает значительные кратковременные изменения их положения, формы и размеров. Ветровое воздействие является ключевым внешним фактором, влияющим на площадь, форму и направление плумов. Наблюдения показывают, что эти плумы быстро и сильно реагируют на смену ветра. Наши наблюдения показывают, что характер распространения этих плумов может резко меняться в течение нескольких часов, что регулярно регистрируется спутниковыми наблюдениями и согласуется с результатами, полученными для плумов других рек, впадающих в приливные моря.
- Другим критическим фактором является наличие двух близко расположенных дельтовых рукавов, служащих источниками стока пресной воды в море, что может приводить к образованию внутренних фронтов в исследуемом плуме.

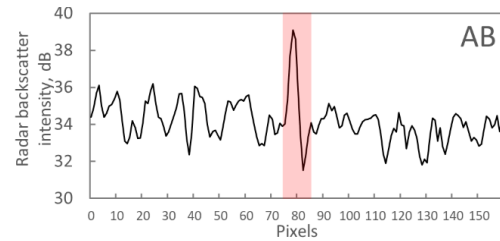
ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПЛЮМОВ НА РЛИ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАЙОНА ИНТЕРЕСА (1)



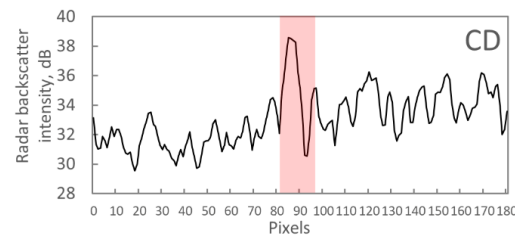
a



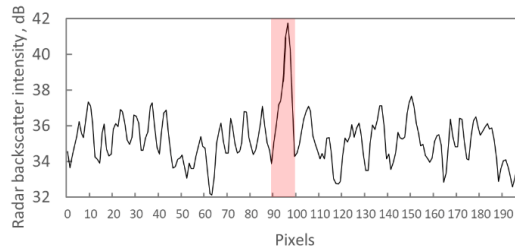
d



b



c



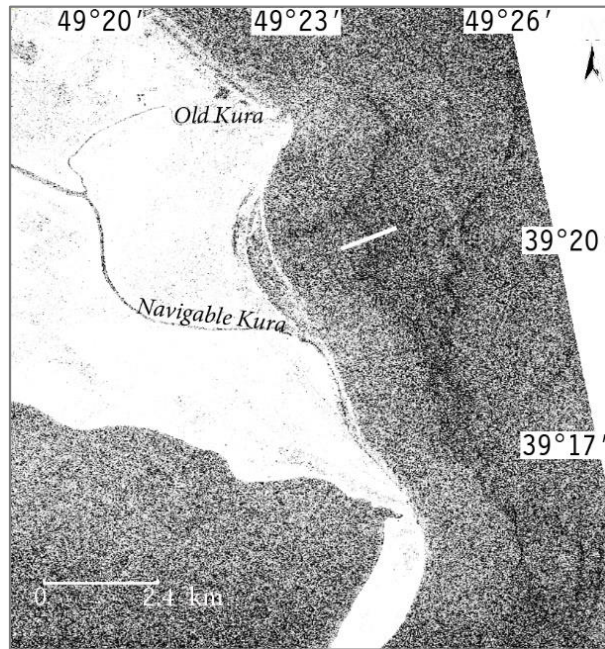
e

Фронты, связанные с плюмом, визуализируются на радиолокационных изображениях благодаря механизму, основанному на взаимодействии поверхностных волн и течений.

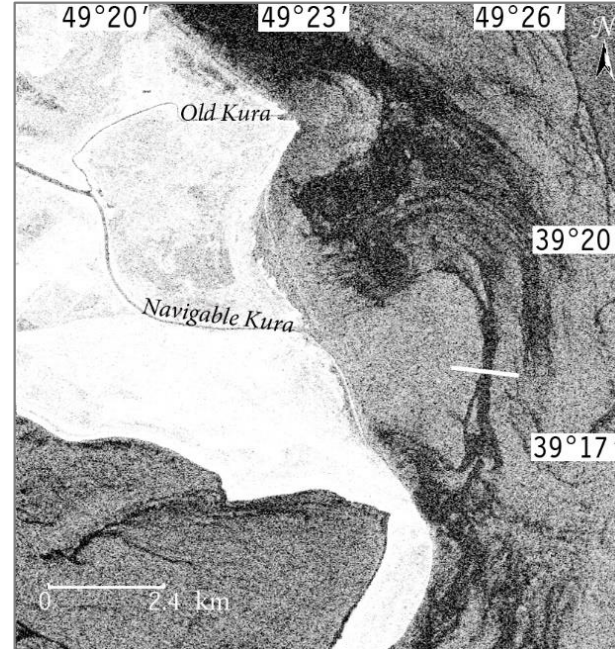
Качественно это можно описать следующим образом: в зоне конвергенции течений на границе плюма крутизна поверхностной ряби увеличивается, что, в свою очередь, приводит к повышению шероховатости морской поверхности.

С точки зрения механизма брэгговского рассеяния, величина сигнала обратного рассеяния пропорциональна пространственной спектральной плотности шероховатости морской поверхности. Следовательно, амплитуда обратно – рассеянного сигнала на границе плюма усиливается, что приводит к появлению ярких полос на радиолокационных изображениях.

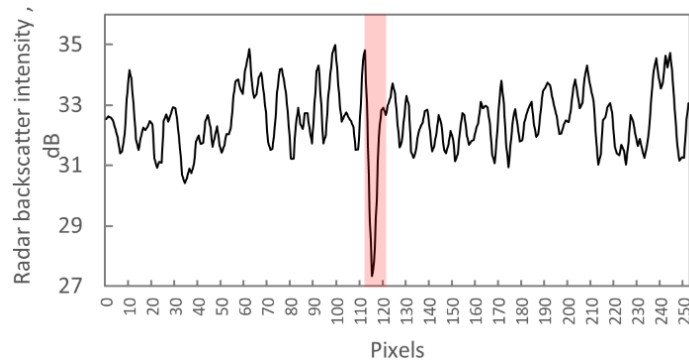
ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПЛЮМОВ НА РЛИ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАЙОНА ИНТЕРЕСА (2)



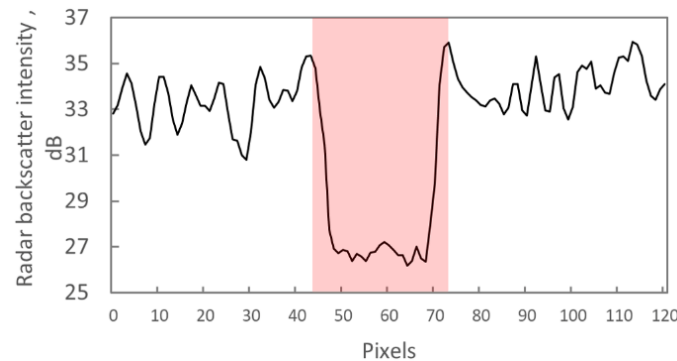
a



b



c

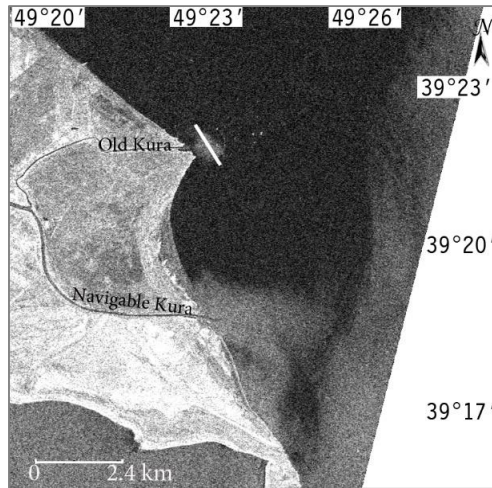


d

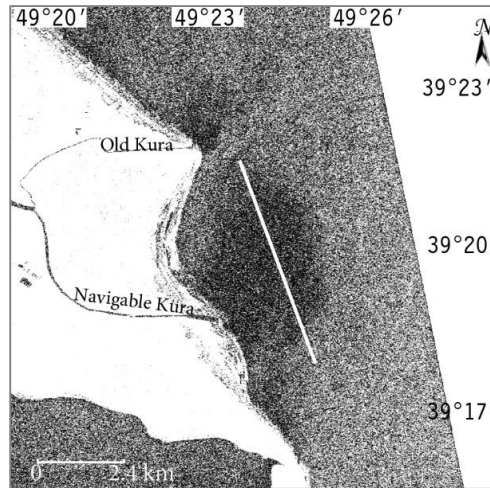
На обоих РСА-изображениях на поверхности моря в зонах конвергенции на границе плумов видны узкие искривлённые зоны с повышенной концентрацией плёнок. Высокая концентрация биогенных плёнок приводит к значительному ослаблению коротких капиллярно-гравитационных поверхностных волн и образованию гладких участков (сликов), которые формируют тёмные области пониженного обратного рассеяния на РСА-изображениях.

Формирование подобных SAR-сигнатур речных шлейфов может происходить при повышенном количестве поверхностных плёнок биогенного происхождения. Обычно это происходит при скорости ветра 3–5 м/с, когда короткие капиллярно-гравитационные волны, вызывающие брэгговское рассеяние радиолокационного сигнала на морской поверхности, ещё активны, а ветер ещё не оказывает разрушающего воздействия на поверхностные плёнки.

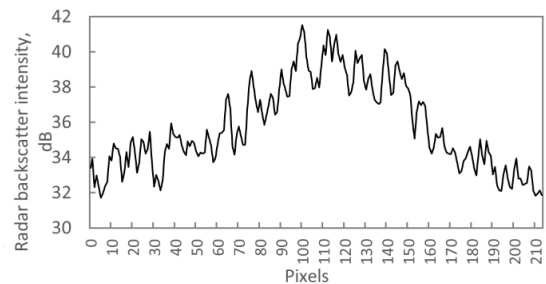
ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПЛЮМОВ НА РЛИ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАЙОНА ИНТЕРЕСА (3)



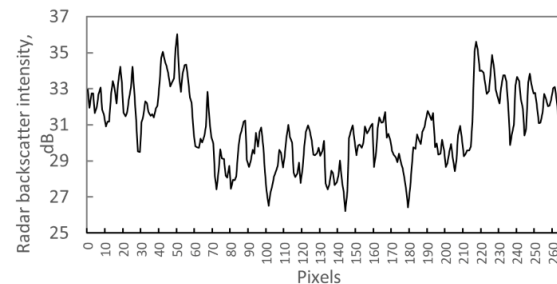
a



b



c



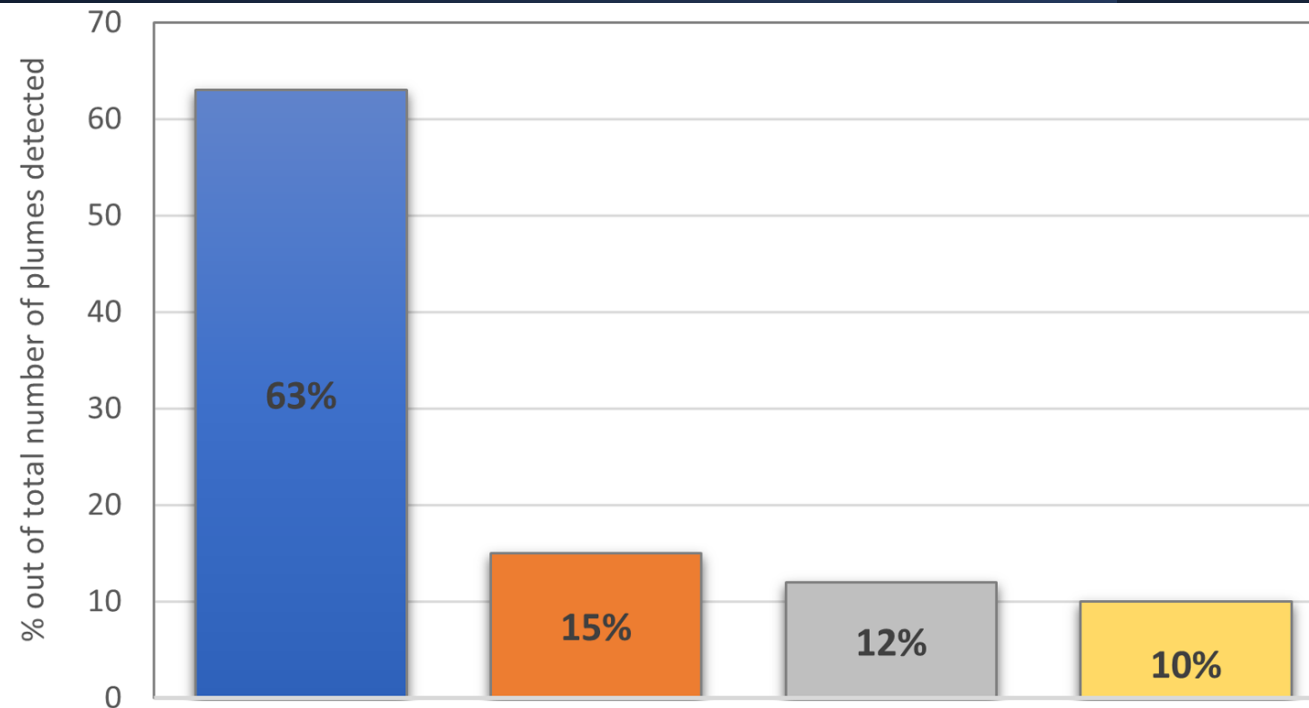
d

Слева - фрагмент РСА-изображения, полученного в районе дельты реки Куры в условиях штиля. Капиллярно-гравитационная составляющая поля поверхностного волнения не развивалась в условиях слабого ветра или безветрия. В результате на РСА-изображении появляются большие тёмные зоны низкого обратного рассеяния. В этих штилевых условиях перенос речной воды от устья приводит к развитию и усилению капиллярно-гравитационной составляющей поля поверхностного волнения в области плюма. Два вытока из рукавов реки видны на РСА-изображении как две яркие области повышенного рассеяния. Интенсивность сигнала обратного рассеяния достигает максимума вдоль продольной оси — в центре она примерно на 6 дБ выше, чем вне плюма — и постепенно уменьшается к краям.

Справа - фрагмент, РСА- изображения, полученного над районом дельты реки Куры при слабом южном ветре в холодный период года. Накануне съёмки в этом районе наблюдался умеренный юго-западный ветер, способствующий формированию поля поверхностного волнения. На радиолокационном снимке видны две основные струи вытоков из рукавов реки в виде двух тёмных областей пониженного рассеяния. Величина обратно рассеянного сигнала в области шлейфа примерно на 4 дБ ниже, чем вне его, поскольку температура речной воды в этот момент была на несколько градусов ниже температуры поверхности моря в прибрежной зоне. Температура и солёность в зоне плюма отличались от температуры и солёности окружающей морской воды, что влияло на поверхностное натяжение воды и, следовательно, на спектр капиллярно-гравитационных волн. Это привело к изменению интенсивности обратного рассеяния в зоне плюма.

Фронт на границе плюма не сформировался, а плюм отображается как область повышенной или пониженной по сравнению с окружающей морской поверхностью интенсивности отраженного радиолокационного сигнала, границы которой размыты.

Относительный вклад различных механизмов в визуализацию плюмов, выявленных на РЛИ трех районов интереса



Синие столбцы – фронт на границе плюма визуализируется за счёт усиления обратно-рассеянного сигнала, **оранжевые столбцы** – граница плюма очерчена сликами, серые столбцы – усиление РЛ-сигнала в области плюма без формирования выраженного фронта, **желтые столбцы** – ослабление РЛ-сигнала в области плюма без формирования выраженного фронта

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование особенностей проявления на спутниковых радиолокационных изображениях (РЛИ) морской поверхности распресненных плюмов, образованных вытоком р. Кура в шельфовой зоне Каспийского моря выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00182 «Развитие методов дистанционной диагностики распространения речных вод в прибрежной зоне морей» (<https://rscf.ru/project/24-17-00182/>) в Институте космических исследований РАН.