

Наблюдение плюмов речных и лагунных вод  
в юго-восточной части Балтийского моря  
с помощью сенсоров спутникового базирования

*М.И. Митягина*

Институт космических  
исследований РАН, Москва

# ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

I. Изучение закономерностей и особенностей отображения плюмов, образованных стоком реки Вислы и выносами из Калининградского и Куршского заливов в прибрежной зоне практически бесприливного Балтийского моря в данных спутниковой радиолокации и в определении механизмов, определяющих формирование их радиолокационных сигнатур.

II. Восполнение некоторых пробелов в существующих ныне представлениях о характере общей картины распространения богатых взвешенным веществом и органикой вод Вислы в Гданьском заливе за счет учета вклада гидродинамических процессов, в первую очередь мезо- и субмезомасштабных вихрей, которые способны транспортировать воду и содержащиеся в ней примеси различной природы на большие расстояния. При проведении исследования мы сосредоточились на использовании данных мультиспектральных сенсоров оптического диапазона спутникового базирования для выявления и дальнейшего анализа пространственно-временных характеристик распространения вод Вислы при её впадении в Гданьский залив.

# ОБЛАСТИ ИНТЕРЕСА



**Река Висла** – самая длинная и вторая по водоносности (после Невы) река бассейна Балтийского моря. Средний годовой расход воды в пределах устья составляет  $1080 \text{ м}^3/\text{с}$ . С конца 19-го века Висла впадает в Гданьский залив через искусственный канал. Такое поступление речных вод без промежуточного эстуария способствует тому, что воды реки смешиваются с морскими водами прямо в заливе.

**Калининградский залив** – классический пример прибрежной лагуны (мелководный залив или бухта, отделенная от моря полосой наносной суши или соединенная с ним узким проливом) в южной части Балтийского моря. Сообщение между Калининградским заливом и Балтийским морем осуществляется через Балтийский пролив длиной 2 км, шириной 440 м и глубиной около 10–12 м.

**Куршский залив**, расположенный в юго-восточной части Балтийского моря – крупнейшая прибрежная мелководная лагуна Европы. С морем Куршский залив соединяется через узкий (0,4–1,1 км) Клайпедский пролив в северной части залива. Динамика вод в Куршском заливе зависит от размера и колебания притока рек в течение года.

# ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ

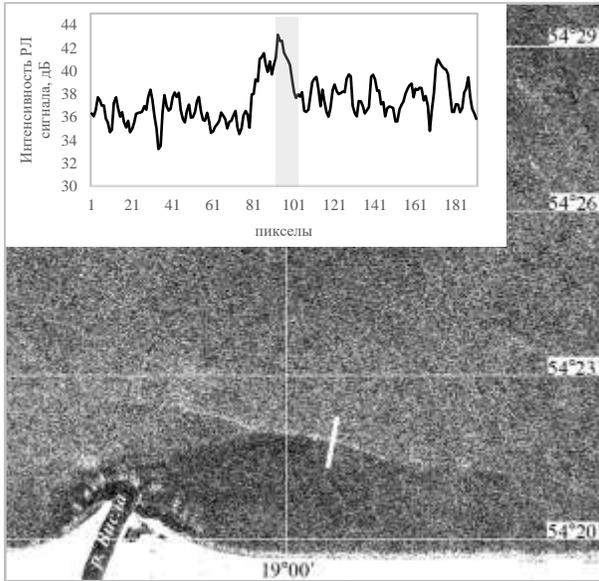
*Массив спутниковых данных, полученных для юго-восточной части Балтийского моря за двухлетний период с 1 мая 2022 г. по 30 апреля 2024 г.*

Сенсор	Количество снимков по районам интереса		
	Устье Вислы	Калининградский залив	Куршский залив
SAR-C Sentinel -1A, -1B	197	239	236
OLI Landsat-8, -9	180	182	183
MSI Sentinel-2A, -2B	288	288	287

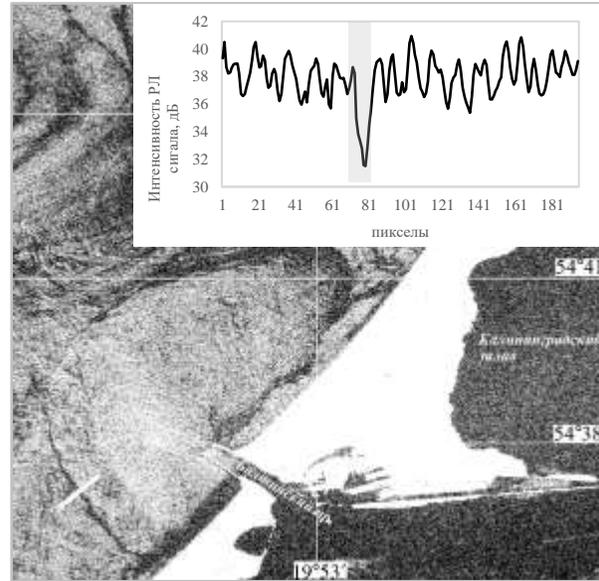
В общей сложности в рамках данного исследования было проанализировано 2080 спутниковых снимков юго-восточной части Балтийского моря.

- 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.
- Расчет концентрации взвеси по спутниковым данным оптического диапазона проводился с помощью алгоритма Nechad 2016, который входит в программный комплекс ACOLITE.
- 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.

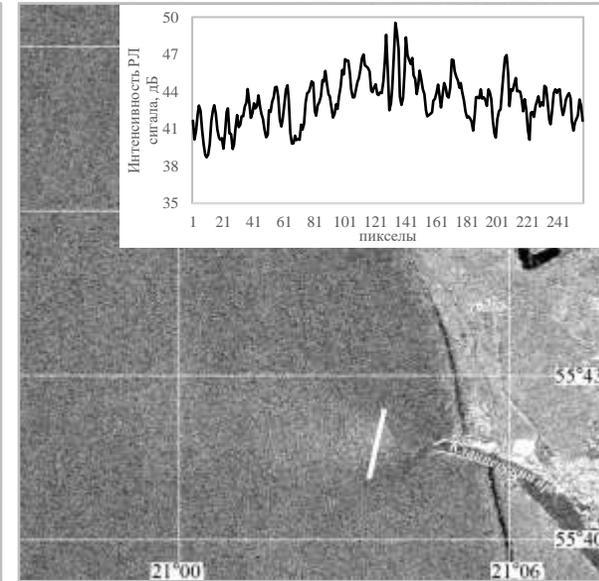
# ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПЛЮМОВ НА РЛИ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАЙОНОВ ИНТЕРЕСА



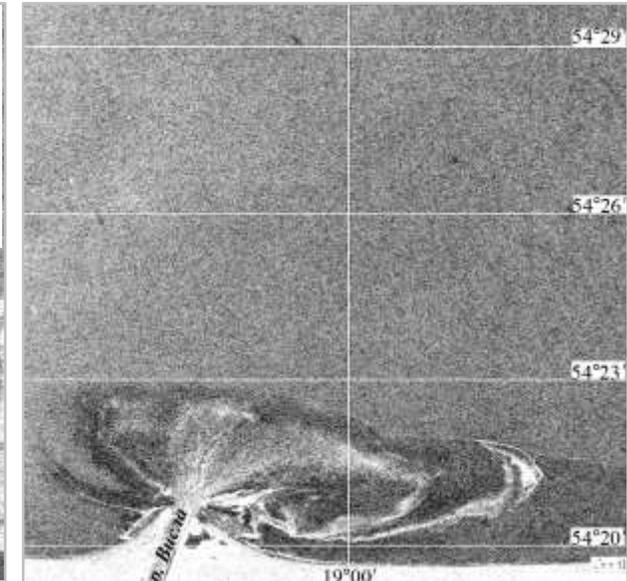
(1) плюмы с выраженной границей, видимой как яркая белая линия усиления обратнорассеянного сигнала



(2) граница плюма очерчена сликами, т.е. темными линиями ослабления радиолокационного сигнала



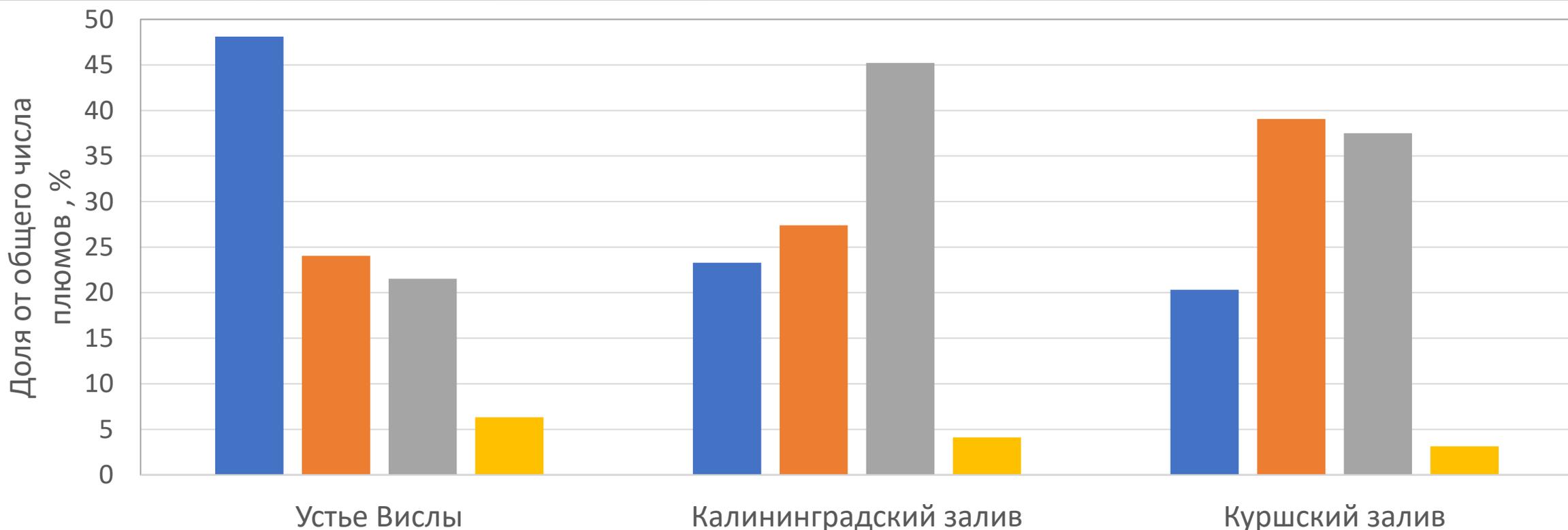
(3) яркие темные или светлые области усиления/ослабления РЛ-сигнала в плюме без формирования выраженного фронта



(4) проявление плюма за счёт трассеров, таких как лед/скопление биогенных пленок и т.п.

*Несмотря на то, что РЛ сигнатуры плюмов отличаются разнообразием морфологических форм, на основе обобщения результатов проведенного анализа были выделены четыре основных типа их визуализации на РЛИ морской поверхности районов интереса.*

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

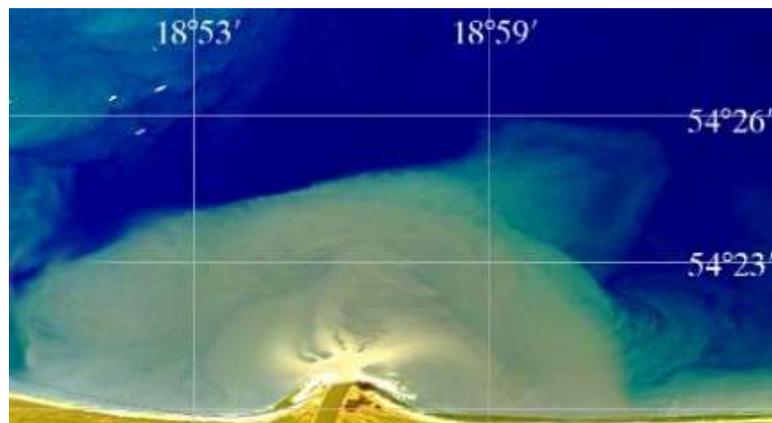


**Синие столбцы** – фронт на границе плюма визуализируется за счёт усиления обратно-рассеянного сигнала,

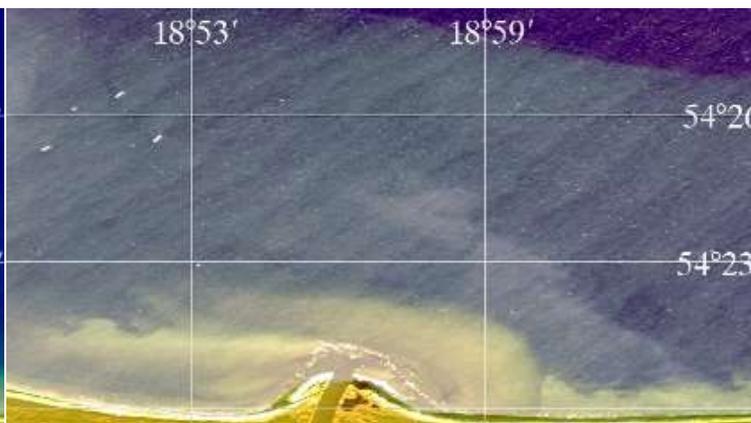
**оранжевые столбцы** – граница плюма очерчена картинками, серые столбцы – усиление/ослабление РЛ-сигнала в области плюма без формирования выраженного фронта,

**желтые столбцы** – плюм проявляется за счёт трассеров (лед/скопление пленок)

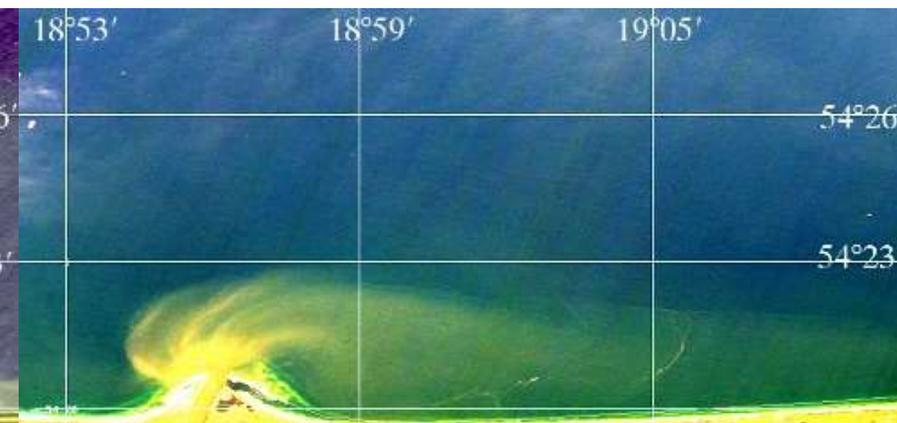
# «Стандартные» сценарии распространения вод Вислы в Гданьском заливе под влиянием ветра и вдольберегового течения



Округло-симметричная область с площадью около  $94 \text{ км}^2$ , внешняя граница на расстоянии 7 км от устья

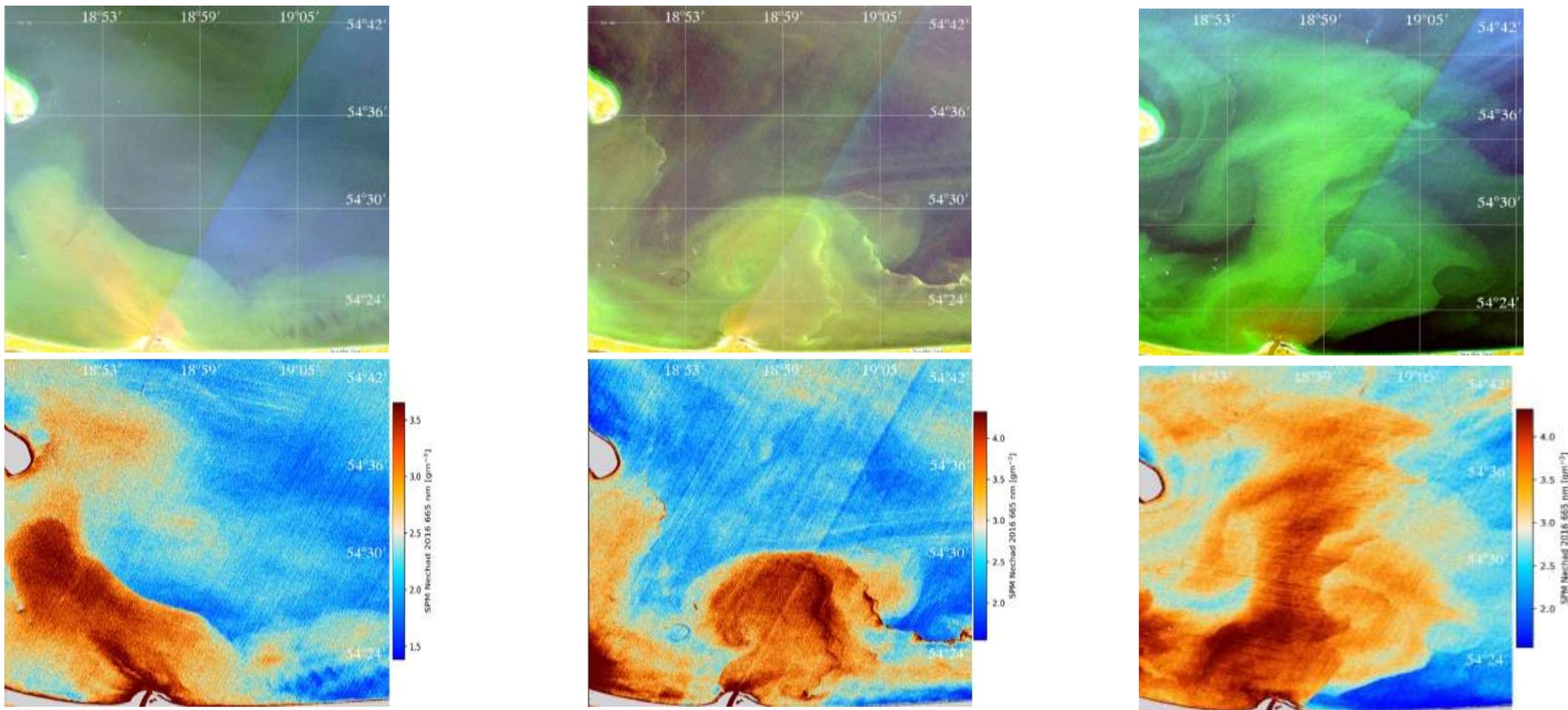


Площадь  $\sim 33 \text{ км}^2$   
Распространение - до 10 км от устья в западном направлении, удаляясь от него в мористую часть на расстояние до 4 км



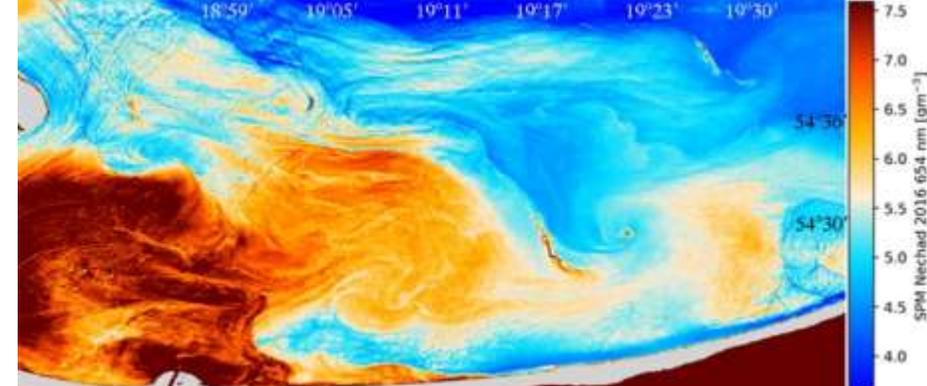
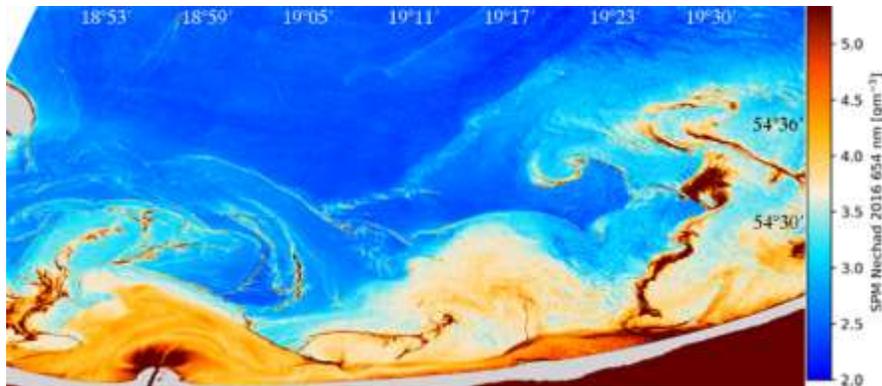
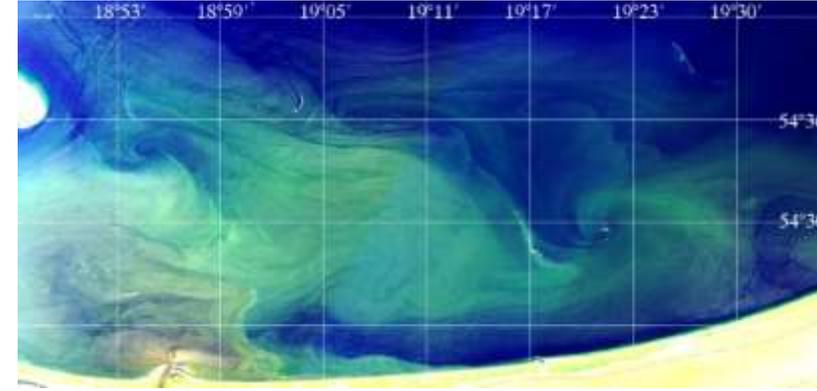
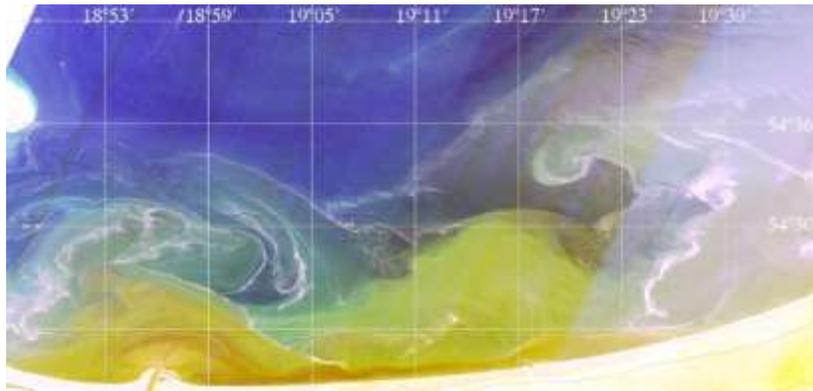
Площадь  $\sim 58 \text{ км}^2$ ,  
Распространение – до 18 км от устья в восточном направлении с максимальным отклонением к северу  $\sim 3,5$  км.

# Цветосинтезированные изображения и карты концентрации взвеси, построенные по данным спутникового сенсора MSI IC3 Sentinel-2A, -2B в период с 07.09.2023 - 17.09.2023



Воды Вислы, отличающиеся повышенным содержанием взвеси, оказались захвачены развивающимся вихрем, и, будучи вовлечены в связанные с вихрем поверхностные течения, распространились на площадь, превышающую  $500 \text{ km}^2$

# Цветосинтезированные изображения и карты концентрации взвеси, построенные по данным спутникового сенсора OLI Landsat-9 в период с 30.05.2023 - . 06.06.2023



Развитие вихревого диполя, вовлекающего в свое движение воды Вислы, попавшие в Гданьский залив, привело к существенному увеличению – в четыре раза – ареала распространения речных вод. Его площадь достигает 830 км<sup>2</sup>, при этом взвесь распространяется от устья Вислы на расстояние до 24 км в северо-западном направлении и до 27 км в северо-восточном

# НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ВЫЯВЛЕНО

- В ситуации развития активных вихревых движений в заливе и вне зависимости от колебаний уровня реки наблюдалось увеличение ареала распространения вод Вислы в Гданьском заливе до значительных площадей, зачастую превышающих 500 км<sup>2</sup>.
- Такие ситуации наблюдались не менее, чем в 20% случаев выявления выносов вод Вислы в залив на спутниковых изображениях, полученных в теплый сезон – с мая по сентябрь.

Мезомасштабные и мелкомасштабные вихревые структуры с характерными горизонтальными масштабами 5–20 км, развивающиеся в Гданьском заливе, могут оказывать существенное влияние на распространение вод Вислы после их попадания в залив и должны учитываться как один из основных факторов, контролирующих формирование ареала распространения речных вод и переноса взвешенного вещества, наряду с приводным ветром и вдольбереговыми течениями. Причем основной вклад в перенос взвеси, попавшей в залив с речными водами, вносят развивающиеся в заливе вихревые диполи.

# ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В., Соловьев Д.М., Голенко М.Н., Голенко Н.Н., Калашникова Н.А., Демидов А.Н. Влияние ветрового воздействия и гидродинамических процессов на распространение вод Калининградского залива в акватории Балтийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. No 4. С. 76–99.
2. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016, 334 с.
3. Krayushkin E.V., Lavrova O.Yu., Nazirova K.R. Distinctive features of the Vistula lagoon outflow by remote sensing and oceanographic experiments data // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019: Proc. Conf. 2019. V. 111500W. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2533024>.
4. Lavrova O., Krayushkin E., Golenko M. et al. Effect of Wind and Hydrographic Conditions on the Transport of Vistula Lagoon Waters Into the Baltic Sea: Results of a Combined Experiment // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. V. 9. No. 9. P. 5193-5201. DOI 10.1109/JSTARS.2016.2580602.
5. Митягина М.И., Лаврова О.Ю., Жаданова П.Д. Влияние гидродинамических процессов на распространение вод Вислы в Гданьском заливе по данным дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. No 4. С. 190–203. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-237-250.
6. Митягина М.И., Лаврова О.Ю., Возможности спутникового радиолокационного наблюдения плюмов речных и лагунных вод в юго-восточной части Балтийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. No 5.

# БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование особенностей проявления на спутниковых радиолокационных изображениях (РЛИ) морской поверхности распресненных плумов, образованных вытоком р. Висла и выносами вод Калининградского и Куршского заливов в юго-восточной части Балтийского 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.

Исследование влияния гидродинамических процессов на распространение вод Вислы в Гданьском заливе выполнено в рамках темы «Мониторинг» Госзадания ИКИ РАН, госрегистрация № 122042500031-8.

Обработка и анализ спутниковых данных проводились с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» с помощью инструментария информационной системы *See the Sea*.