

**Сергей А. Лебедев**



*Геофизический Центр РАН*



*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*



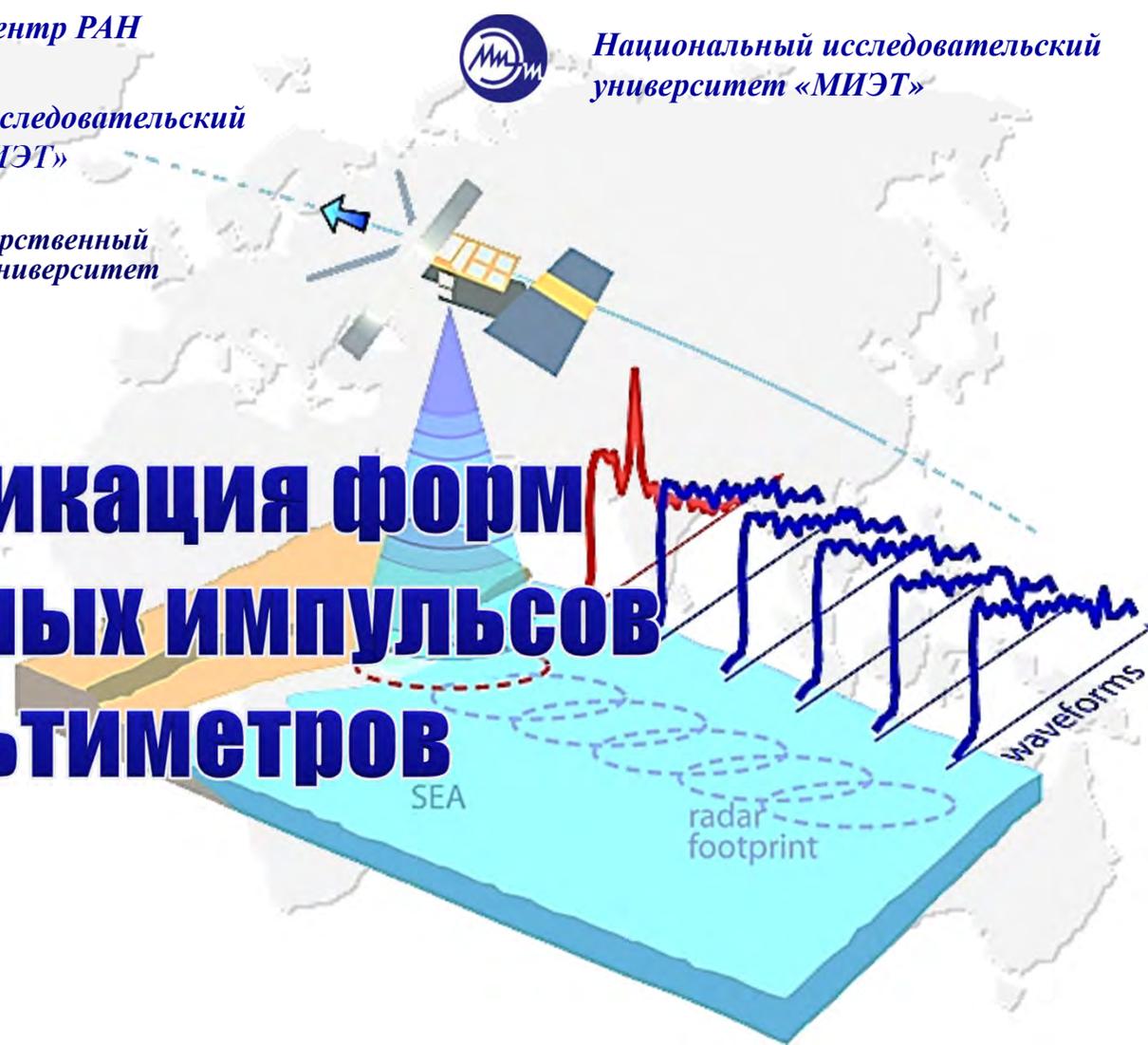
*Майкопский государственный технологический университет*

**Дмитрий А. Хвощевский**



*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

# Классификация форм отражённых импульсов радиоальтиметров

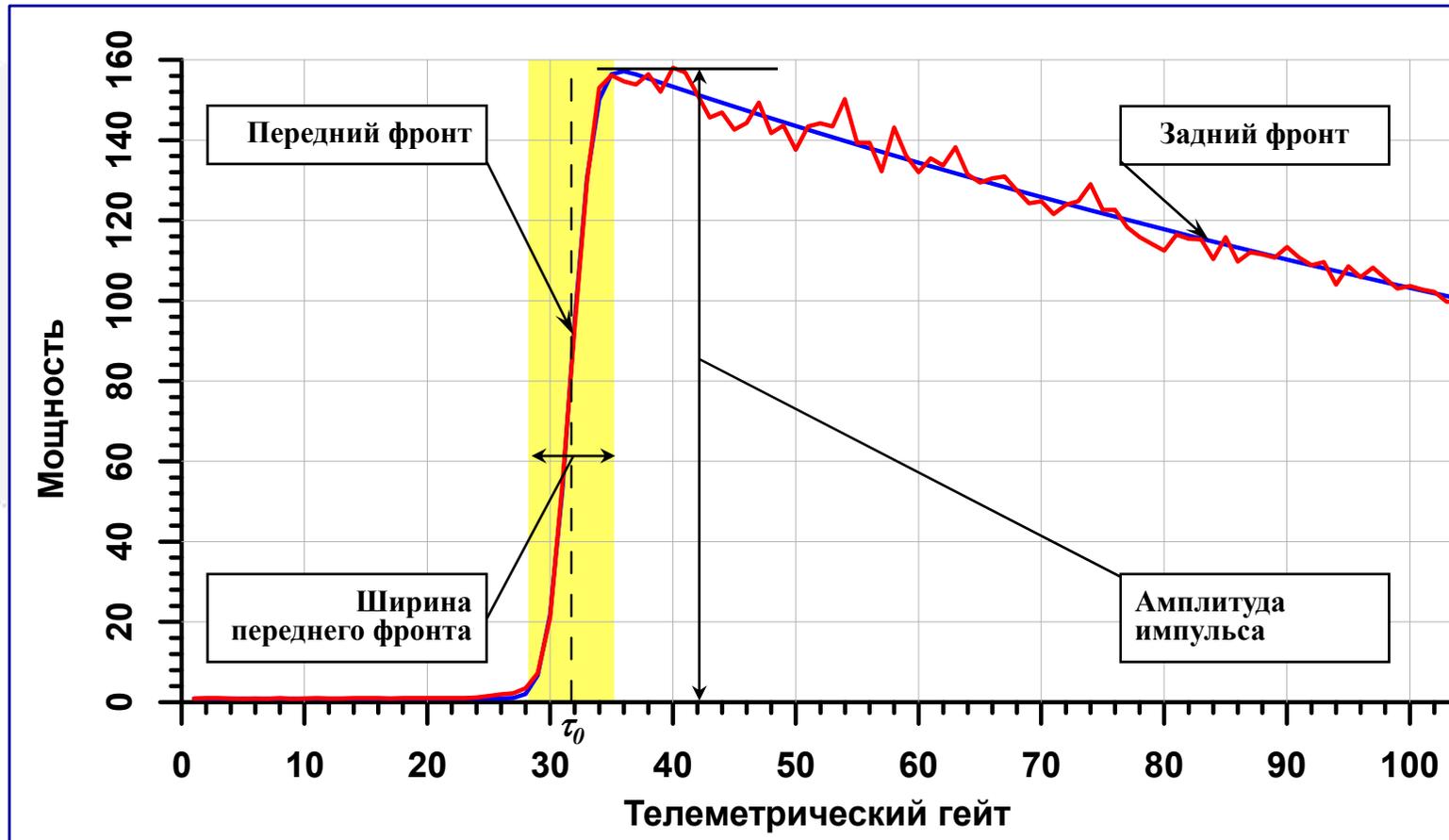


Двенадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 21–25 марта 2024 г.

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев, Д.А. Хвощевский



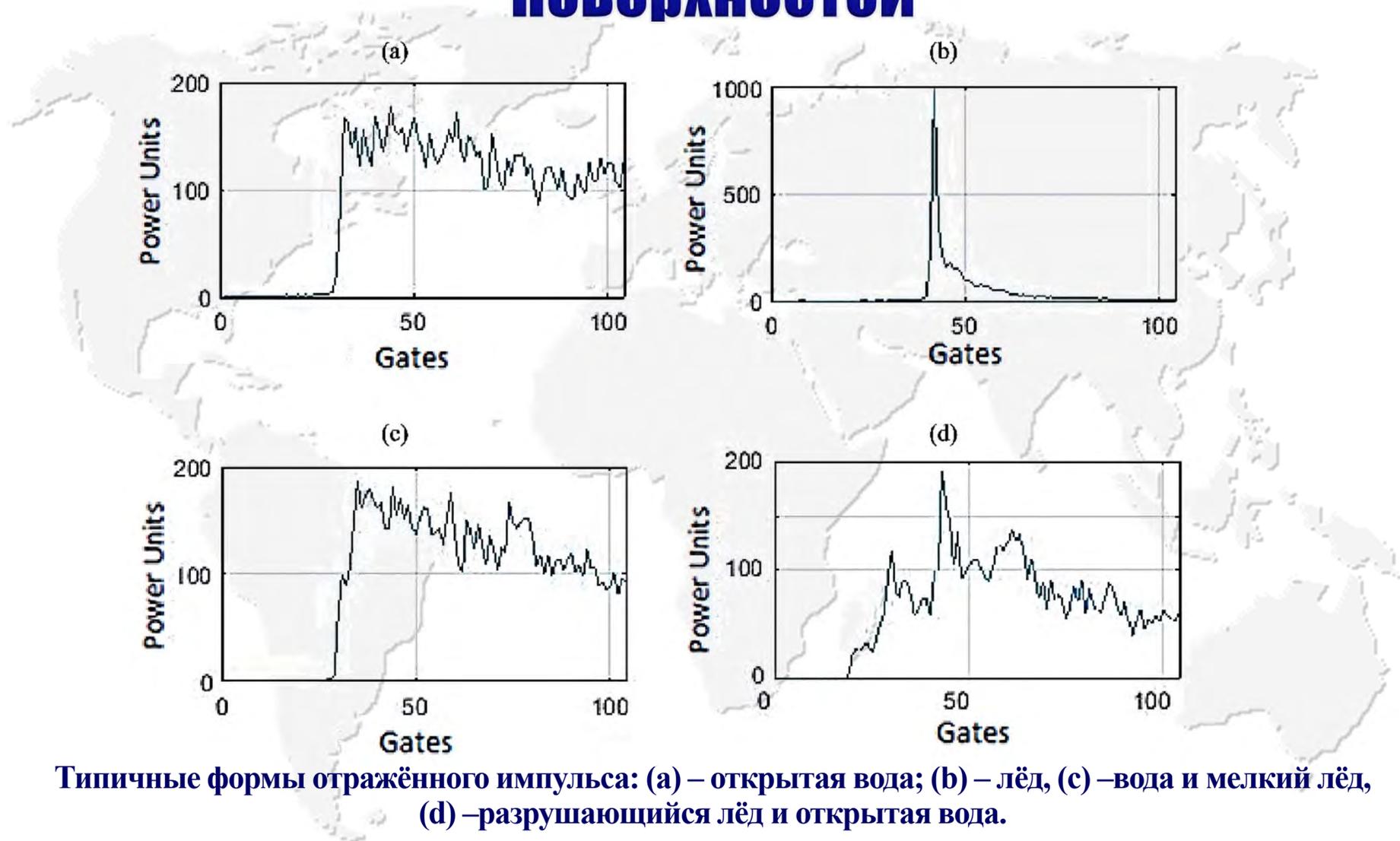
# Форма отражённого импульса



Форма импульса, отражённого от безграничной подстилающей поверхности, аппроксимированная по формуле Брауна (синяя линия) и осреднённая за 1 с форма отражённого импульса для условий открытого океана (красная линия), где  $\tau_0$  — середина переднего фронта или «эпоха». Жёлтой областью выделена ширина переднего фронта, зависящая от значимой высоты волн ( $h_{swh}$ )



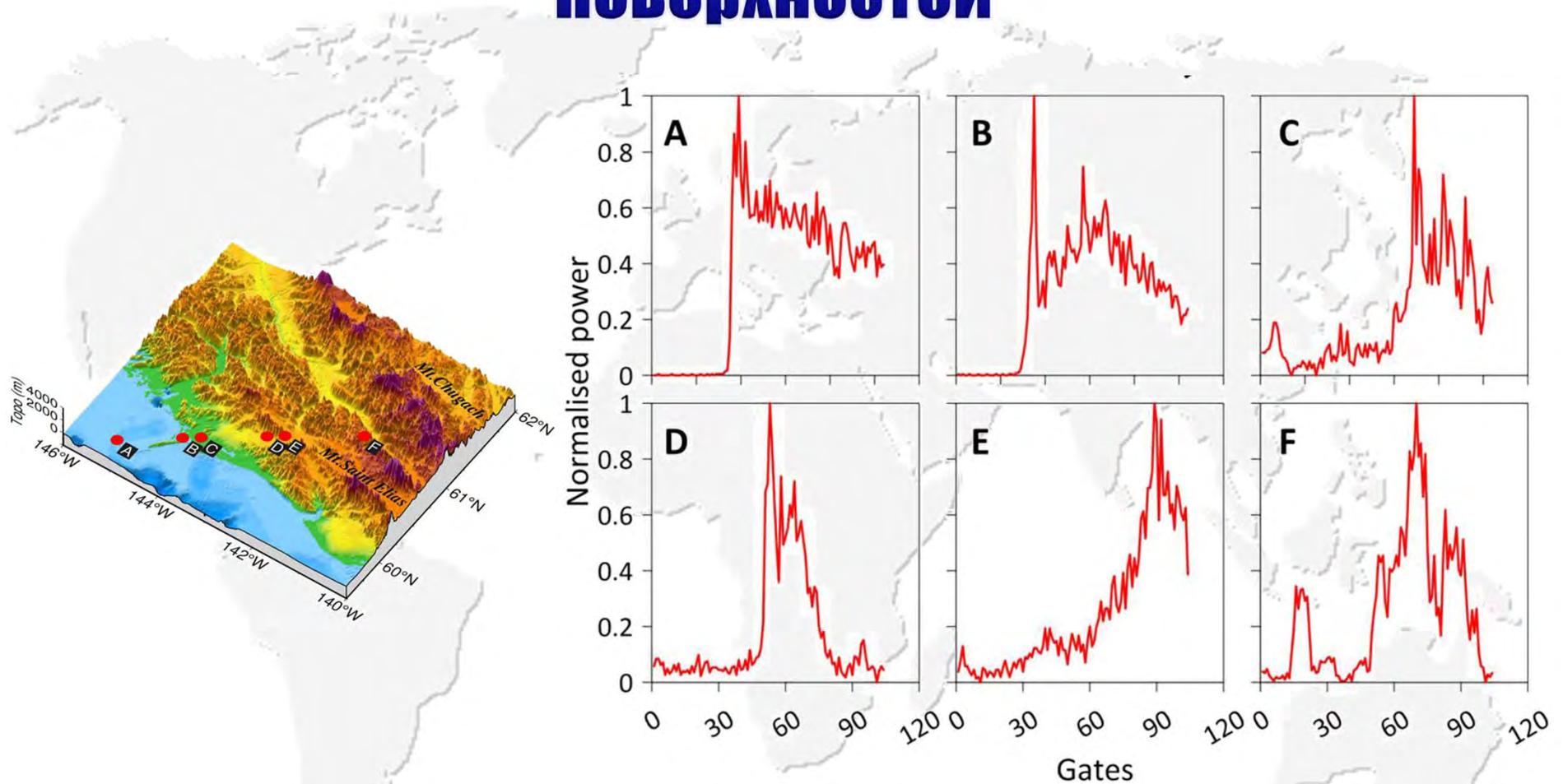
# Форма отражённого импульса от различных поверхностей



Типичные формы отражённого импульса: (a) – открытая вода; (b) – лёд, (c) – вода и мелкий лёд, (d) – разрушающийся лёд и открытая вода.



# Форма отражённого импульса от различных поверхностей



Типичные формы отражённого импульса над различными типами поверхности на Аляске:  
А – океан, Б – прибрежная зона (океан и суша), С – равнинная местность, Д – лёд, на суше,  
Е – неровная поверхность суши, F – смесь камней и льда.

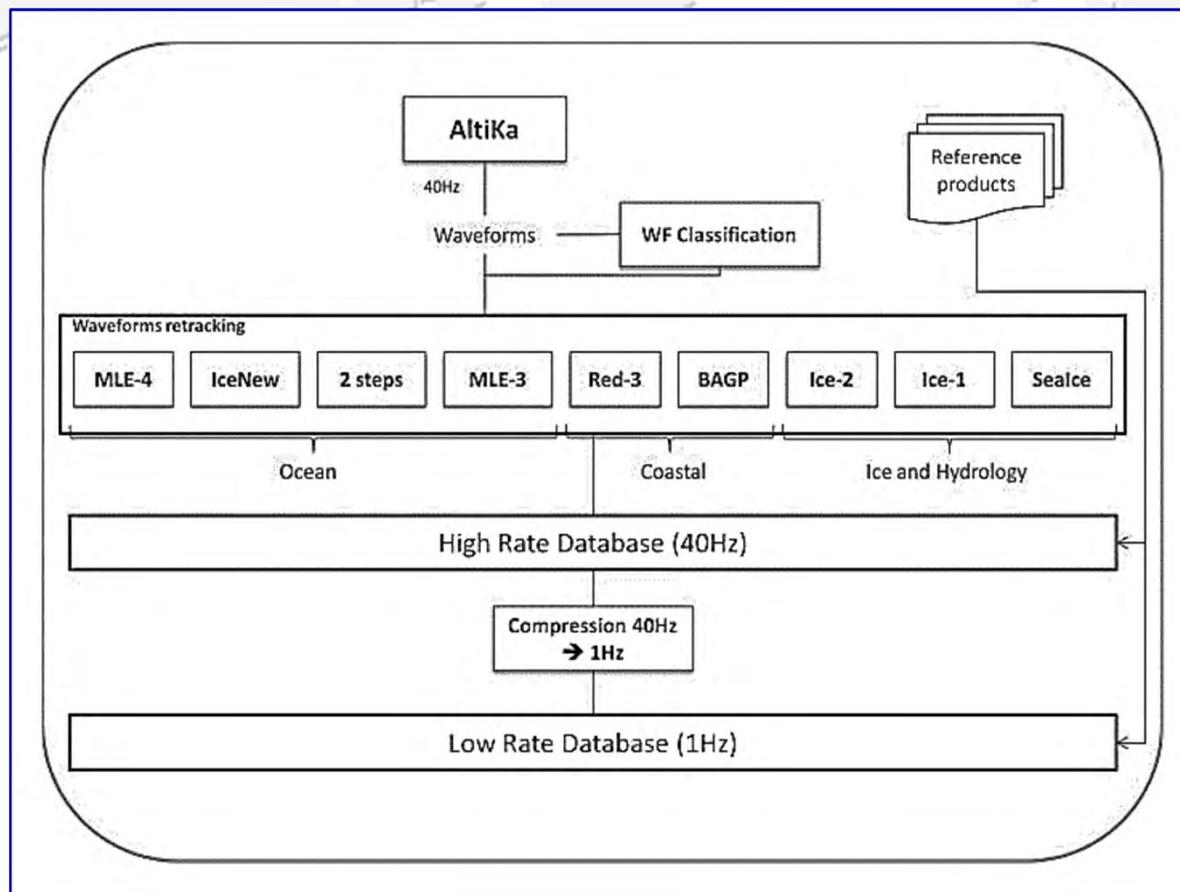


Двенадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 21–25 марта 2024 г.

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев, Д.А. Хвощевский



# Алгоритмы ретрекинга и классификация форм отраженного импульса



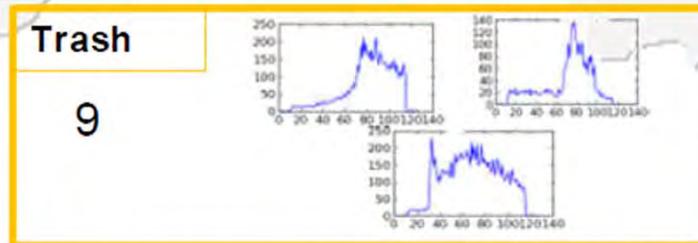
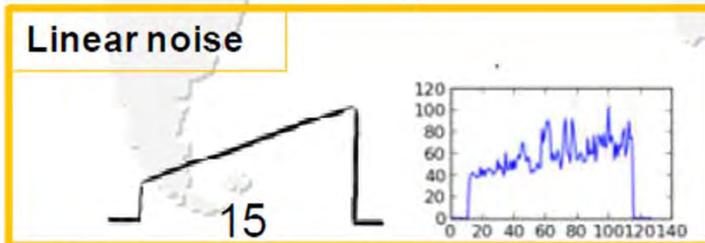
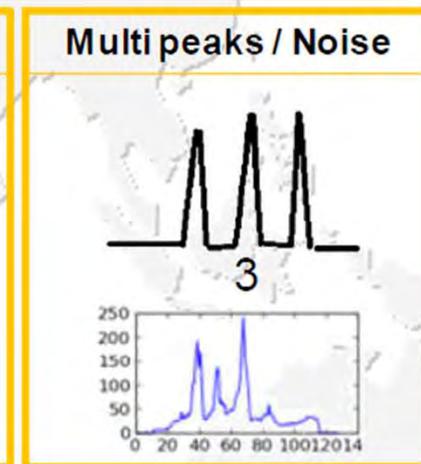
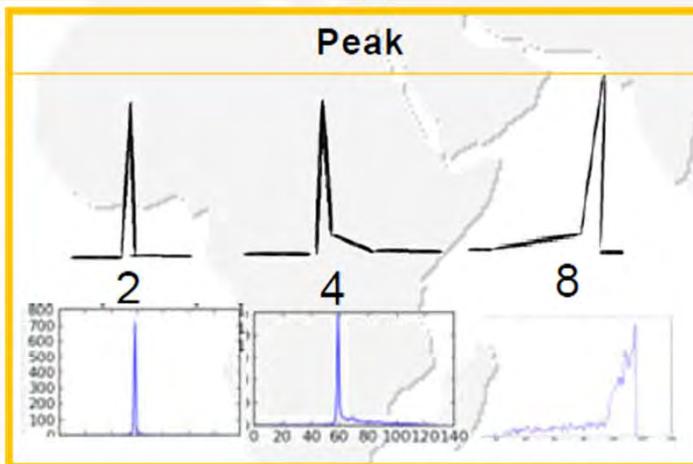
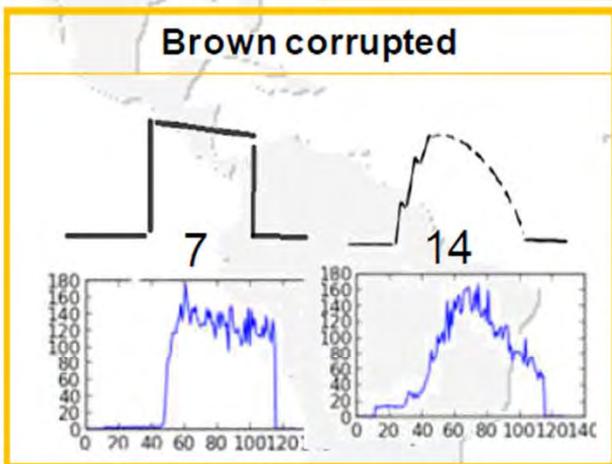
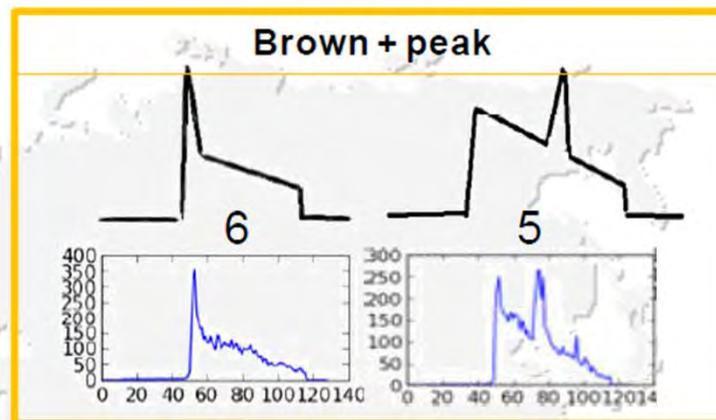
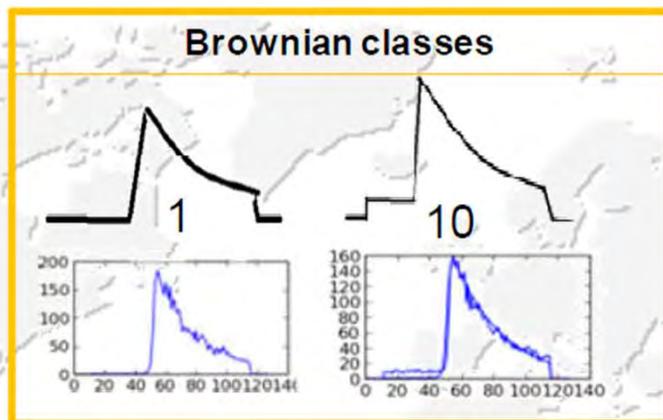
Алгоритмы ретрекинга разделяются:

- на эмпирические или параметрические (алгоритм центра тяжести или алгоритм Ice-1,  $\beta$  — ретрекинг и т.д.),
- аналитические (по формуле Брауна, по формуле Брауна – Хайне, алгоритмы Ocean-1 и -2, алгоритм Ice-2 и т.д.)
- статистические (метод оценки максимального правдоподобия и т.д.),
- региональные.



# Классификация форм отраженного импульса

Instrumental error?  
0



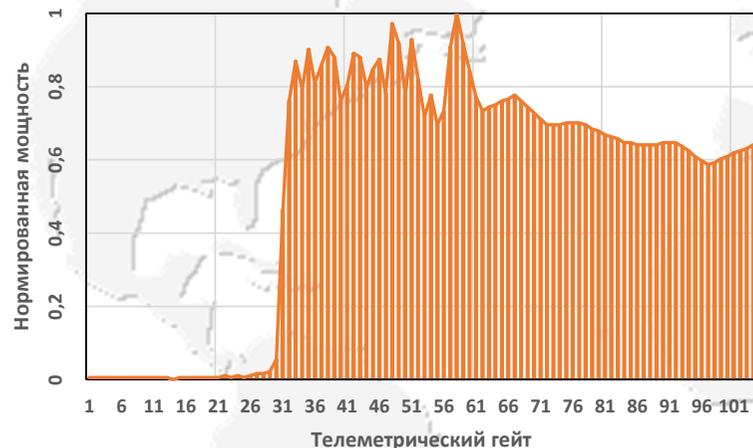
Двенадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 21–25 марта 2024 г.

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев, Д.А. Хвощевский

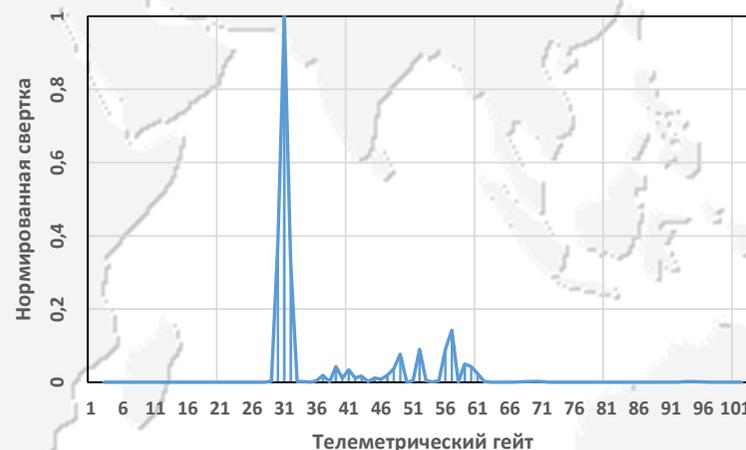


# Параметры классификации форм отраженного импульса (1 группа)

В качестве параметров для классификации форм отражённого импульса были выбраны: интеграл нормированной мощности ( $B$ ) и интеграл свёртки нормированной мощности ( $S$ )



$$B = \sqrt{\sum_{i=1}^N P_i} / P_{\max}$$



$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^N s_i} / s_{\max}$$

$$s_i(x_i) = \left| \sum_{j=i-k}^{i+k} P(x_i - x_k) f(x_i) \right| \left| \sum_{j=i-k}^{i+k} (P_{j+1} - P_j) f'(x_i) \right| \quad f(x_i) = -x_i \exp(-x_i^2 / 2\sigma_0^2)$$



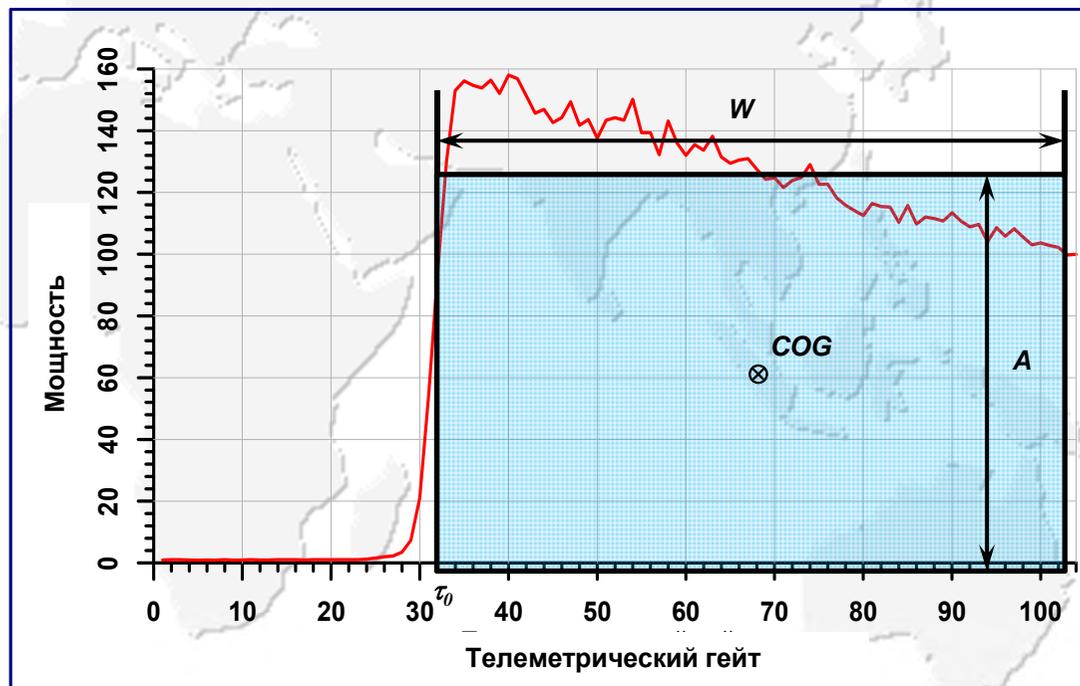
# Параметры классификации форм отраженного импульса (2 группа)

В качестве параметров для классификации форм отражённого импульса были выбраны параметры алгоритма центра тяжести по амплитуде ( $A$ ), ширине ( $W$ ), положению центра тяжести волны ( $COG$ )

$$A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N P_i^4}{\sum_{i=1}^N P_i^2}}$$

$$W = \left( \frac{\sum_{i=1}^N P_i^2}{\sum_{i=1}^N P_i^4} \right)^2$$

$$COG = \frac{\sum_{i=1}^N iP_i^2}{\sum_{i=1}^N P_i^2}$$



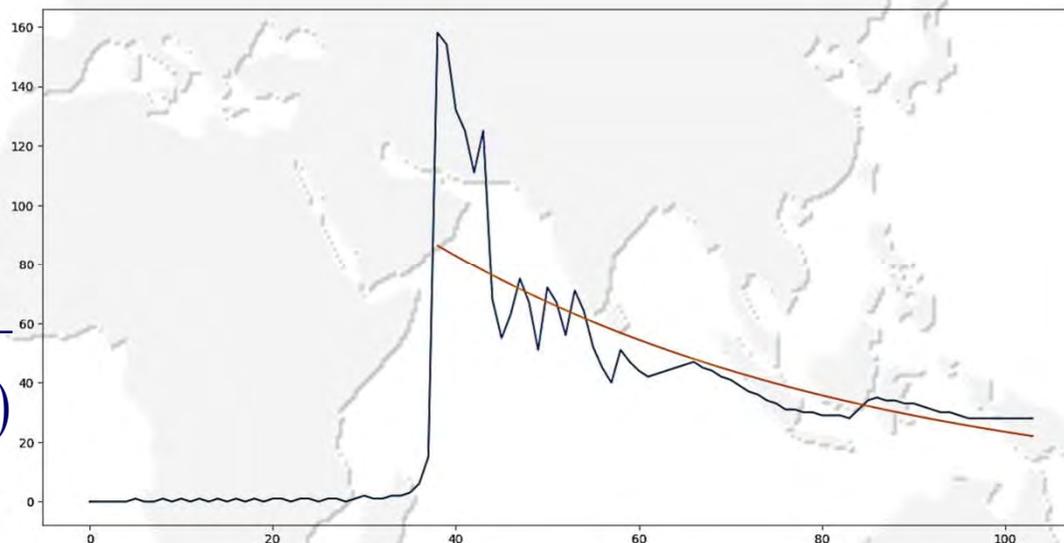
# Параметры классификации форм отраженного импульса (3 группа)

В качестве параметров для классификации форм отражённого импульса были выбраны статистические характеристики отклонения заднего фронта от экспоненты, построенной методом наименьших квадратов: средняя разность ( $\bar{E}$ ), среднеквадратичное отклонение (СКО) ( $\sigma_E$ ).

$$\bar{P} = \frac{1}{N - i_0} \sqrt{\sum_{i=i_0}^N P_i}$$

$$\bar{E} = \frac{1}{N - i_0} \sqrt{\sum_{i=i_0}^N (P_i - \exp(A \cdot i + B))^2}$$

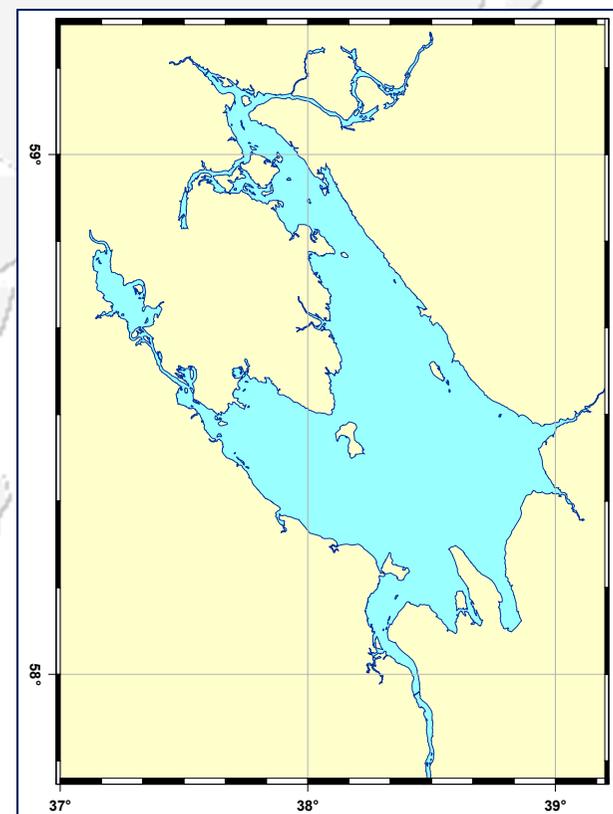
$$\sigma_E = \sqrt{\frac{1}{N - i_0} \sum_{i=i_0}^N (P_i - \exp(A \cdot i + B - E))^2}$$



# Рыбинское водохранилище – объект исследования

Для классификации форм отражённых импульсов было выбрано Рыбинское водохранилище на реке Волге и её притоках Шексне и Мологе. Расположено в основном в Ярославской области, на северо-западе, частично также в Тверской и Вологодской областях.

Морфометрия	
Высота над уровнем моря	101,81 м
Размеры	172 × 56 км
Площадь	4580 км <sup>2</sup>
Объём	
полный	25,4 км <sup>3</sup>
полезный	16,7 км <sup>3</sup>
Береговая линия	1724 км
Наибольшая глубина	30 м
Средняя глубина	5,6 м

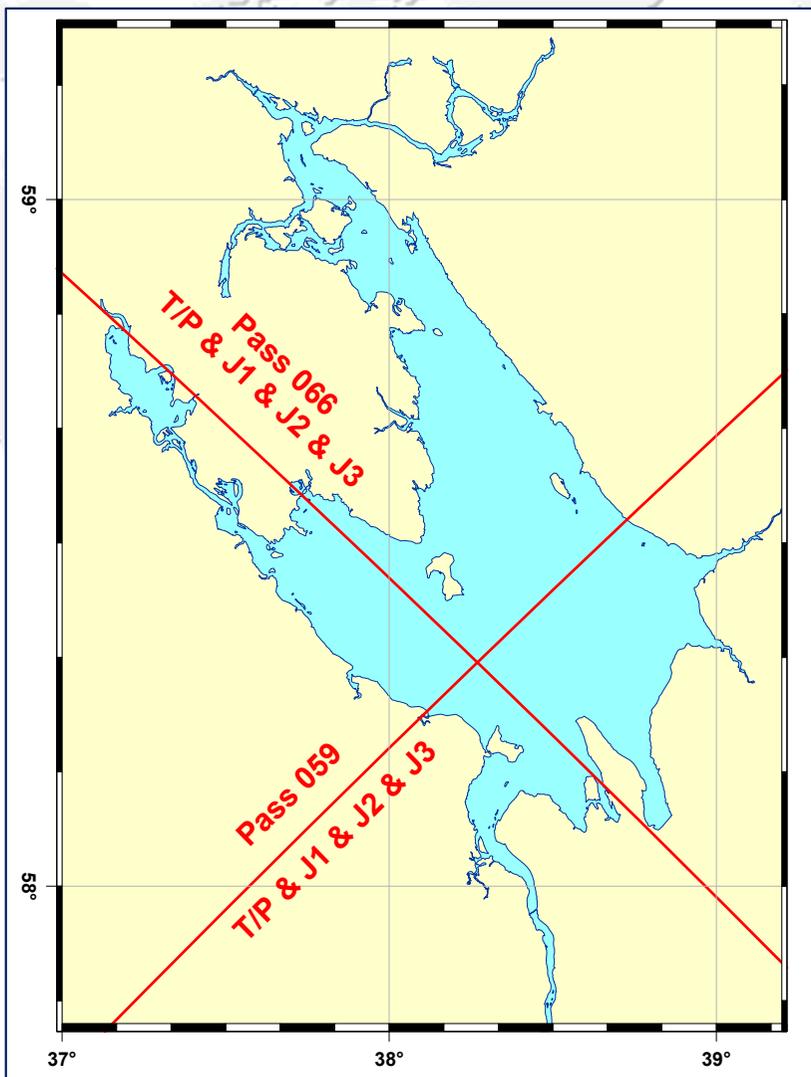


Двенадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 21–25 марта 2024 г.

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев, Д.А. Хвощевский



# Рыбинское водохранилище – объект исследования



Для классификации форм отражённых импульсов на акватории Рыбинского водохранилища анализировались данные 059 и 066 треков спутников TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3.

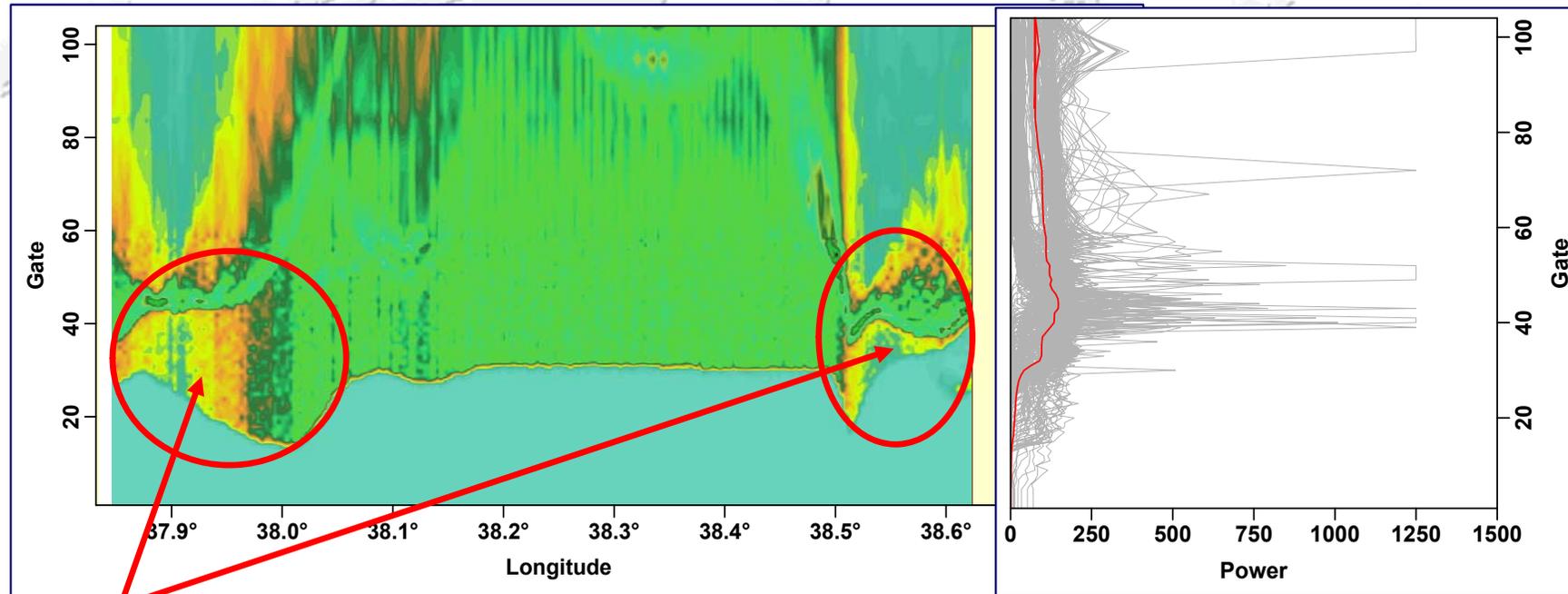


Двенадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 21–25 марта 2024 г.

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев, Д.А. Хвощевский



# Рыбинское водохранилище – объект исследования



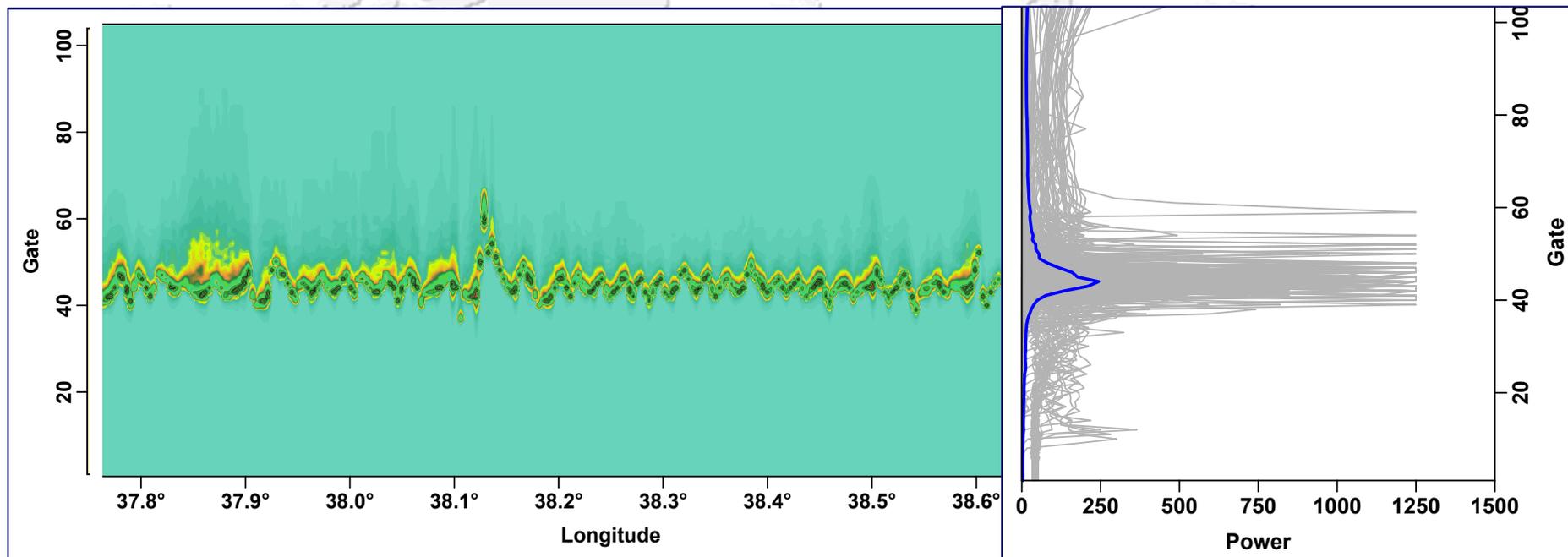
суша + вода



Изменчивость мощности отражённого импульса в  $Ku$  диапазоне вдоль 066 трека спутника Jason-1 (56 цикл 17 июля 2003) (слева).  
Формы отражённого импульса (справа)  
Красной линией показан средняя форма.



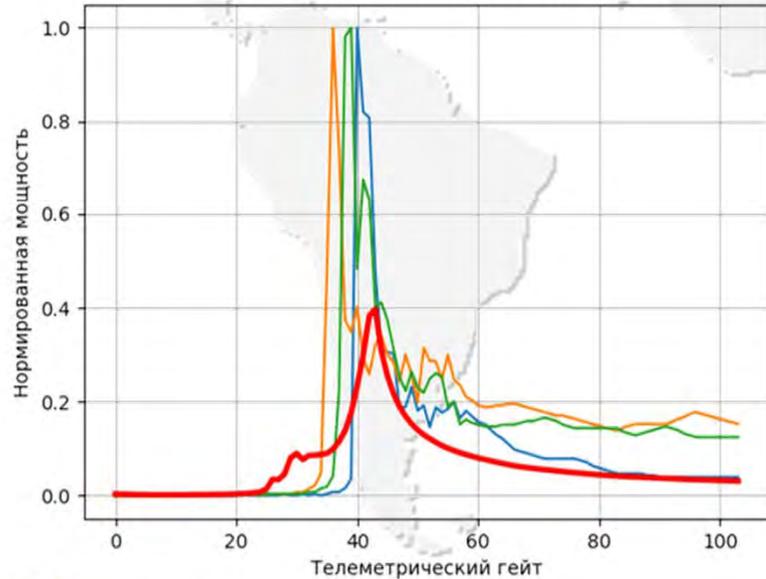
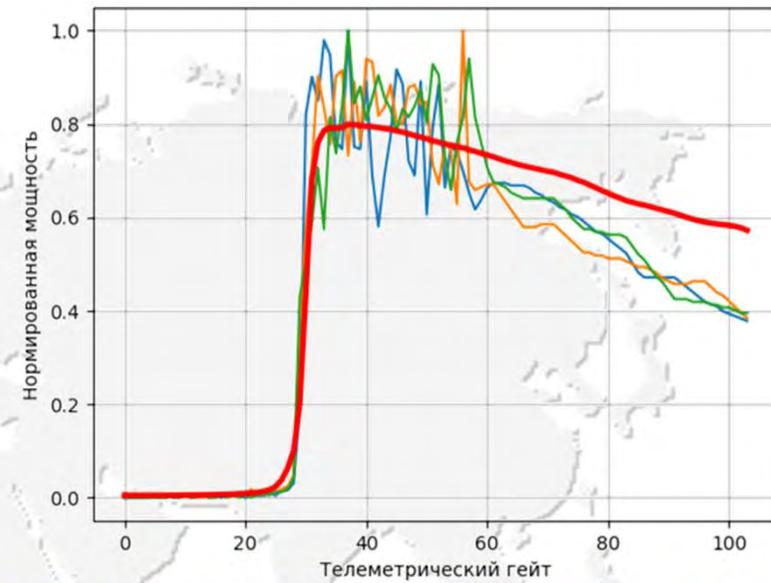
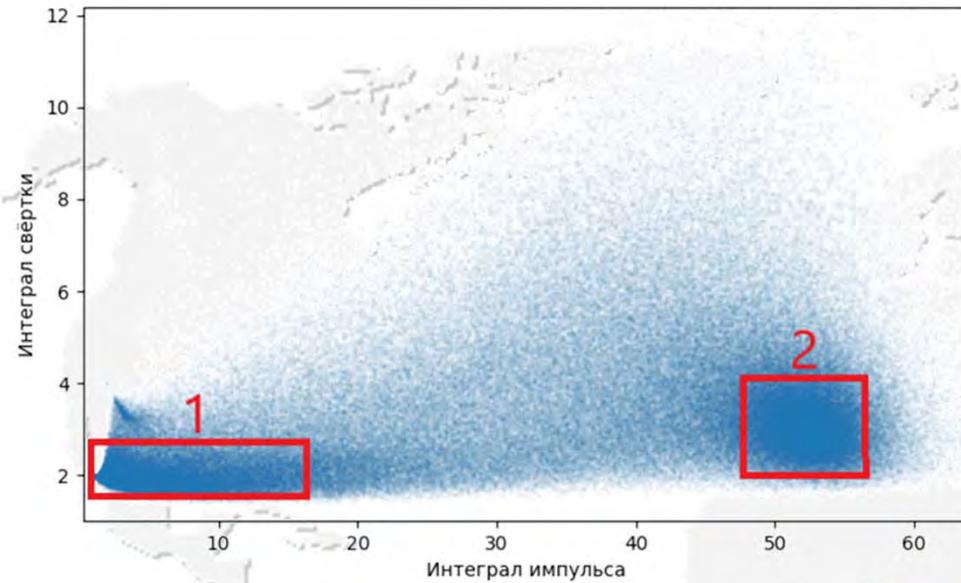
# Рыбинское водохранилище – объект исследования



Изменчивость мощности отражённого импульса в  $Ku$  диапазоне вдоль 066 трека спутника Jason-1 (66 цикл 12 декабря 2003) (слева).  
Формы отражённого импульса (справа)  
Синей линией показан средняя форма.



# Результаты анализа



**Результат классификации по параметрам:**

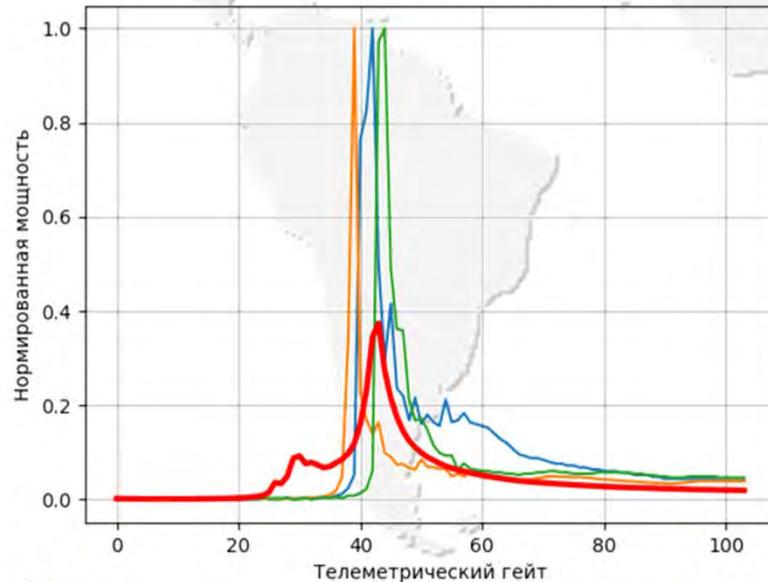
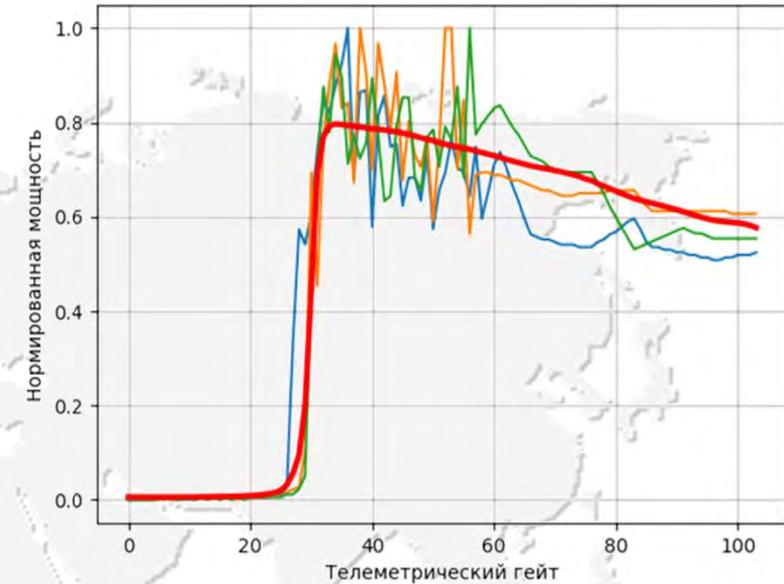
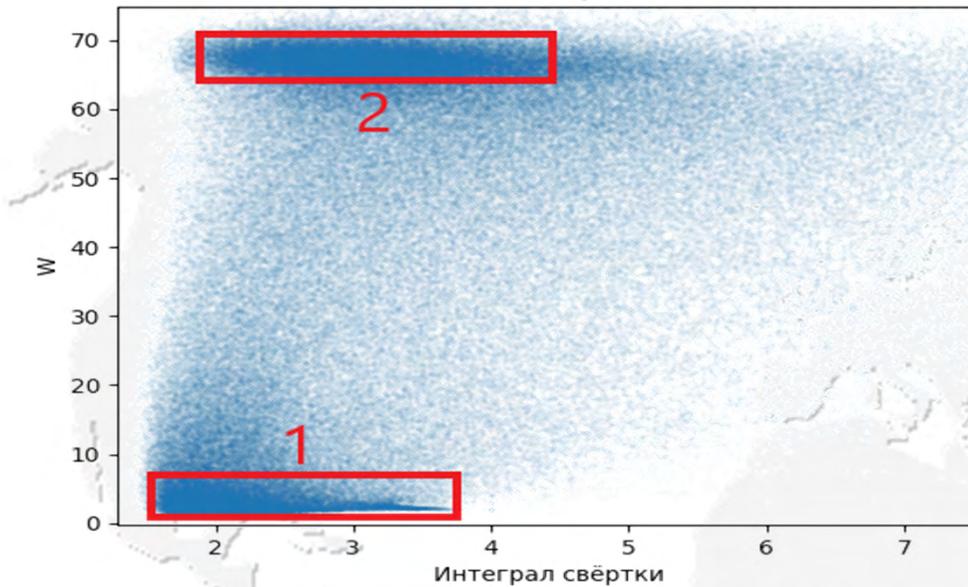
- интеграл нормированной мощности ( $B$ ),
- интеграл свёртки нормированной мощности ( $S$ ).

Слева – примеры форм импульса принадлежащих первому кластеру (лёд + суша/вода). Красным цветом показана средняя форма импульса.

Справа – второму кластеру (вода)



# Результаты анализа



**Результат классификации по параметрам:**

- интеграл свёртки нормированной мощности ( $S$ ),
- ширин аппроксимации по алгоритму центра тяжести ( $W$ ).

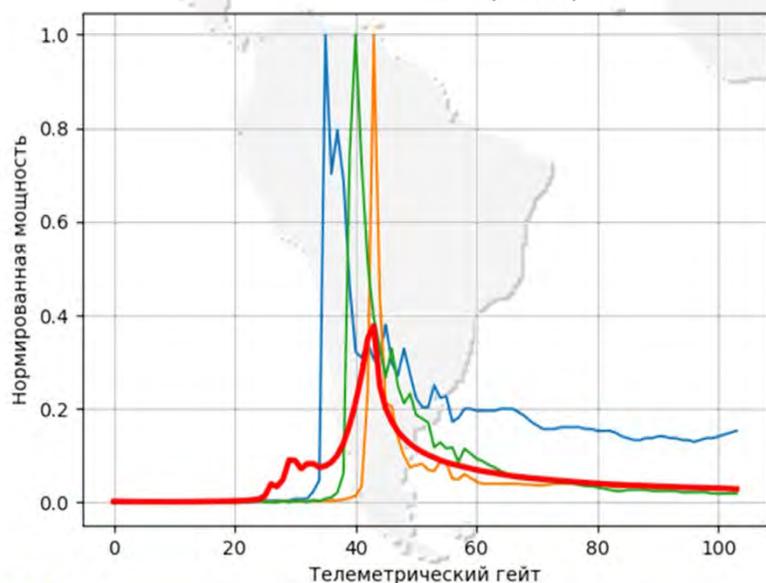
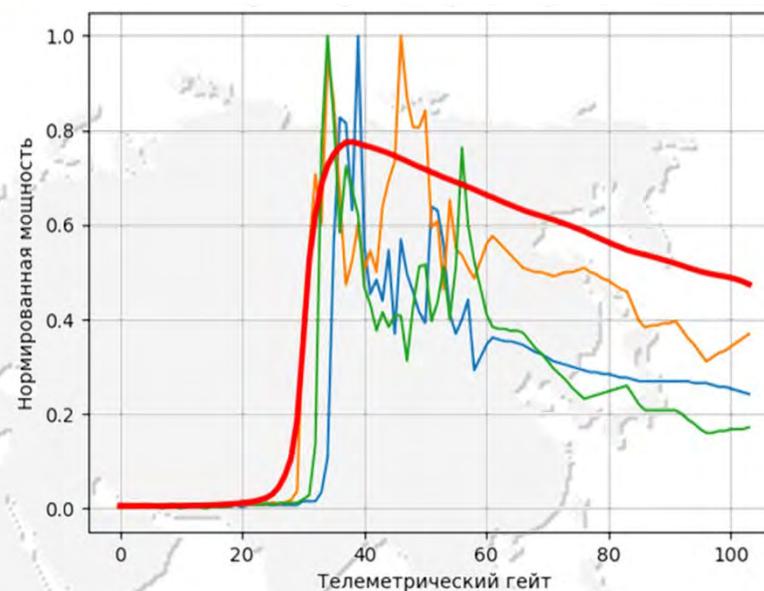
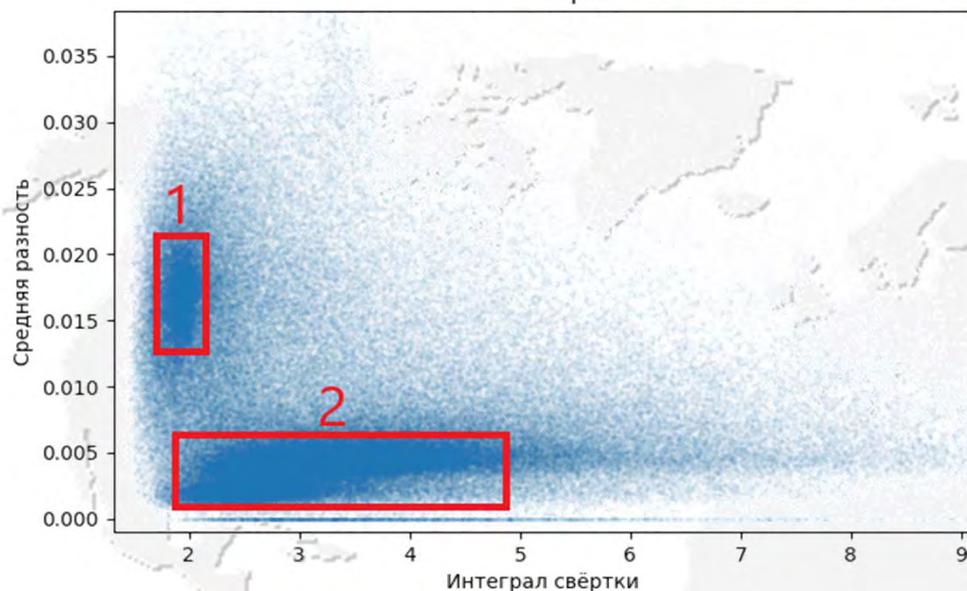
Слева – примеры форм импульса принадлежащих первому кластеру (лёд). Красным цветом показана средняя форма импульса.

Справа – второму кластеру (вода)



# Результаты анализа

Кластеры



**Результат классификации по параметрам:**

- интеграл свёртки нормированной мощности ( $S$ ),
- средняя разность отклонения заднего фронта от экспоненты ( $\bar{E}$ ).

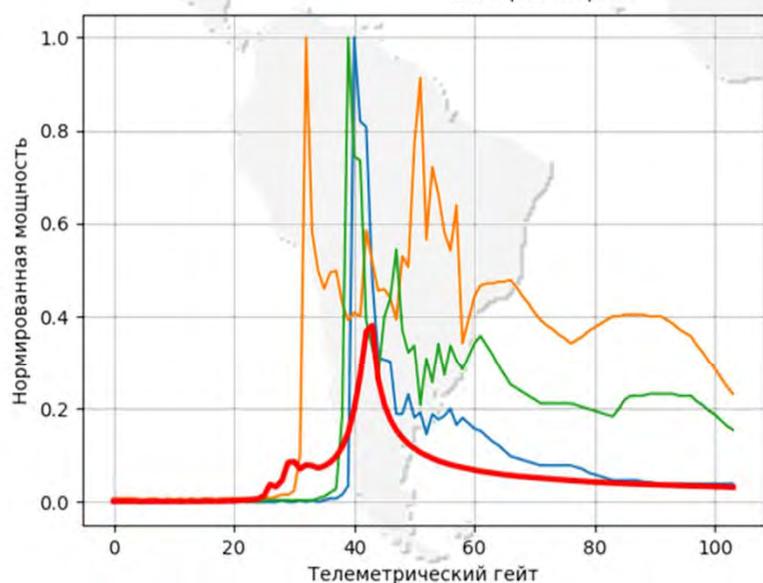
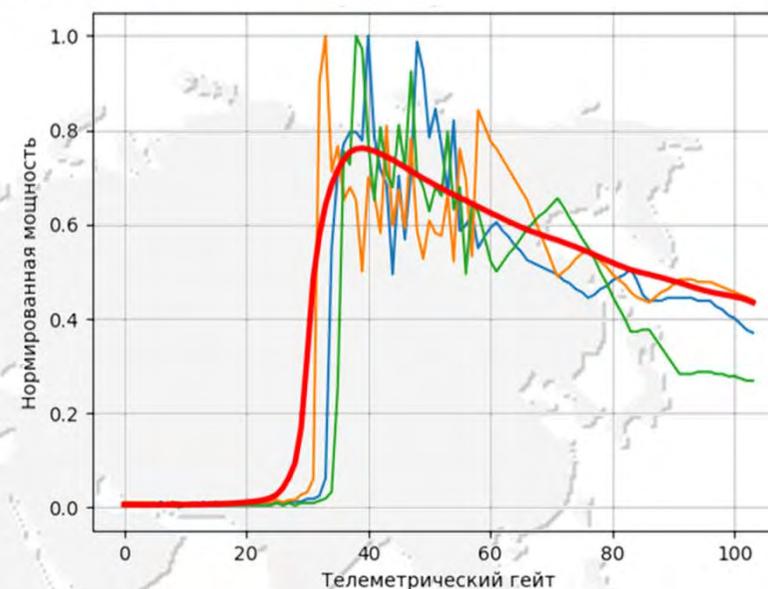
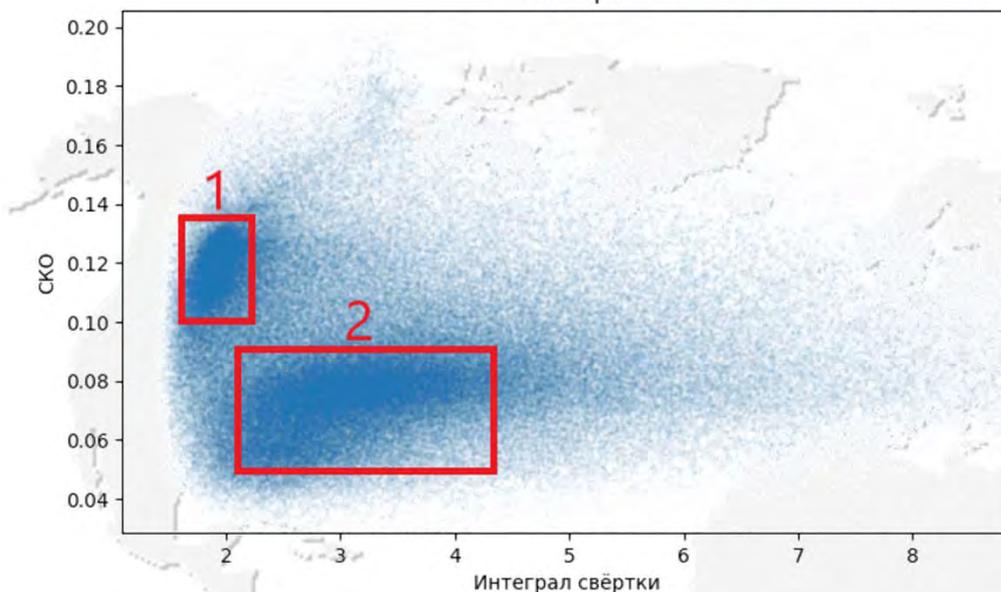
Слева – примеры форм импульса принадлежащих первому кластеру (лёд). Красным цветом показана средняя форма импульса.

Справа – второму кластеру (вода + суша)



# Результаты анализа

Кластеры



**Результат классификации по параметрам:**

- интеграл свёртки нормированной мощности ( $S$ ),
- среднеквадратичное отклонение заднего фронта от экспоненты ( $\sigma_E$ )

Слева – примеры форм импульса принадлежащих первому кластеру (лёд + суша/вода). Красным цветом показана средняя форма импульса.

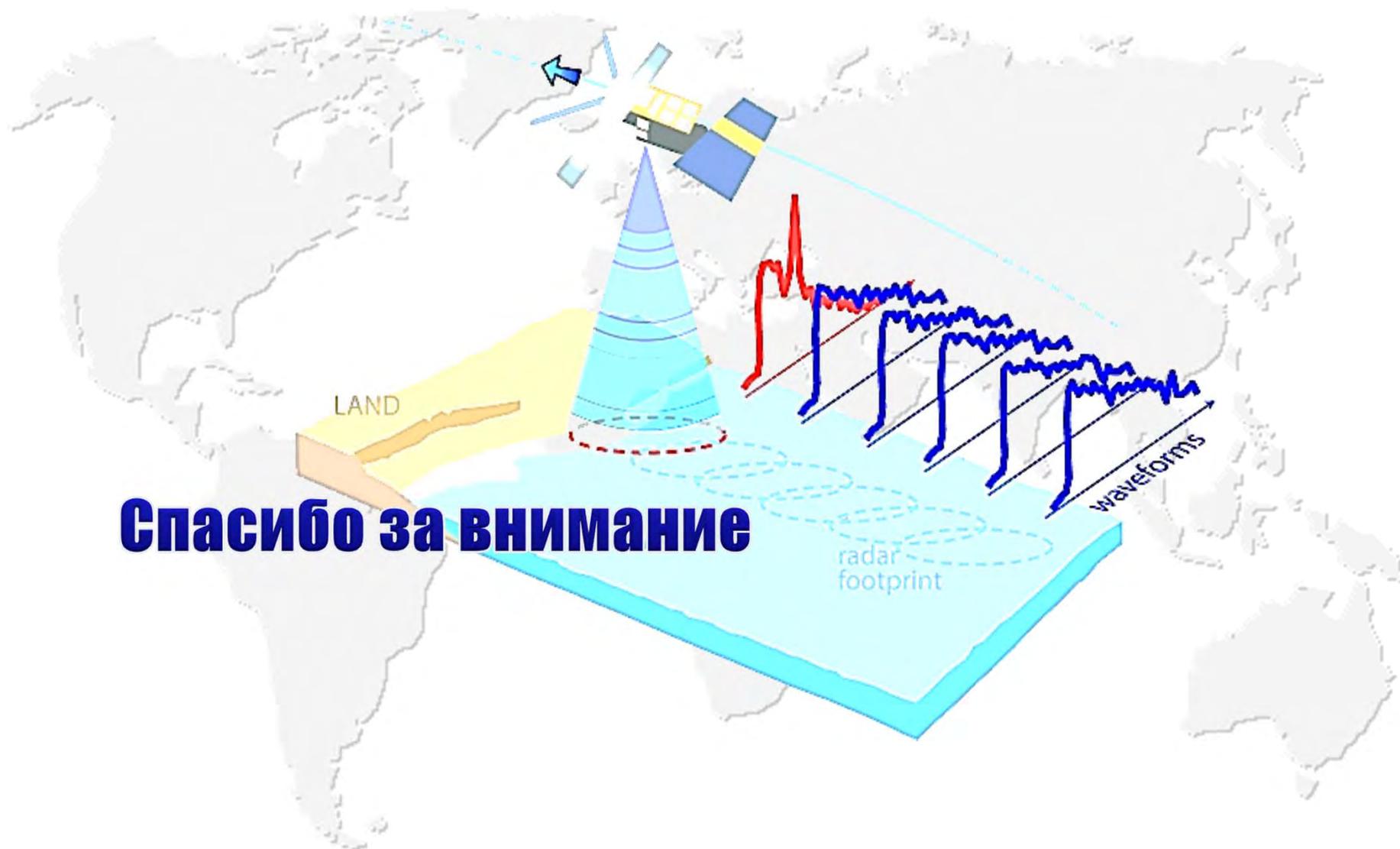
Справа – второму кластеру (вода + суша)



# Заключение

- Выбраны 7 предикторов для классификации форм отражённого импульса.
- Проанализировано 21 зависимость между ними по данным мощности отражённого импульса в  $Ku$  диапазоне вдоль 066 и 59 треков спутника Jason-1 на акватории Рыбинского водохранилища. Проведена простейшая кластеризация полученных зависимостей.
- Анализ полученных данных показал, что наиболее оптимальным для выделения льда является классификации по параметрам:
  - интеграл свёртки нормированной мощности (S),
  - ширин аппроксимации по алгоритму центра тяжести (W).а для воды:
  - интеграл нормированной мощности (B),
  - интеграл свёртки нормированной мощности (S).





**Спасибо за внимание**



Двенадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 21–25 марта 2024 г.

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, С.А. Лебедев, Д.А. Хвощевский

