

Сергей А. Лебедев



Геофизический Центр РАН



Национальный исследовательский университет «МИЭТ»



Майкопский государственный технологический университет

Дмитрий А. Хвощевский



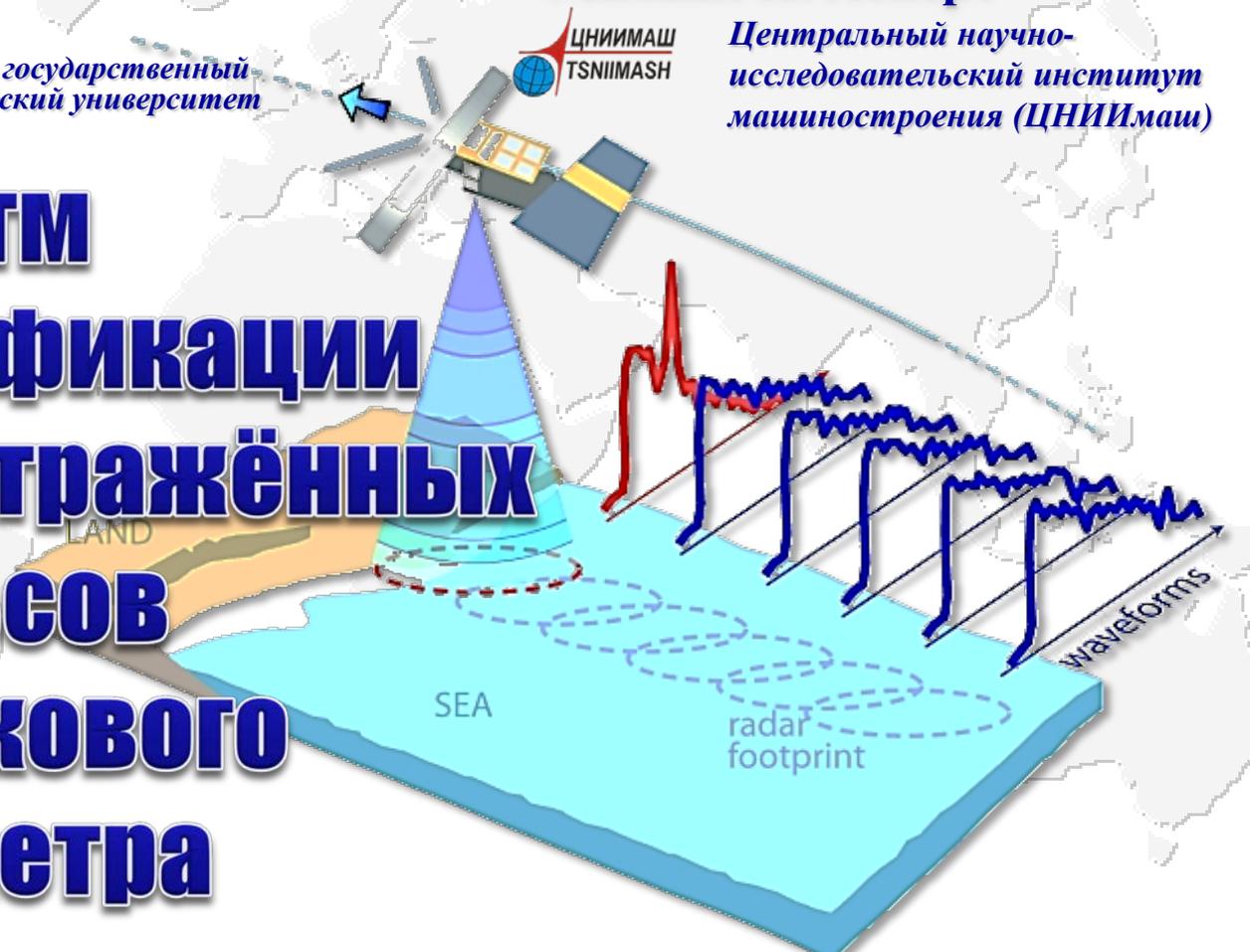
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Михаил П. Леперт

Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИМаш)



Алгоритм классификации форм отражённых импульсов спутникового альтиметра

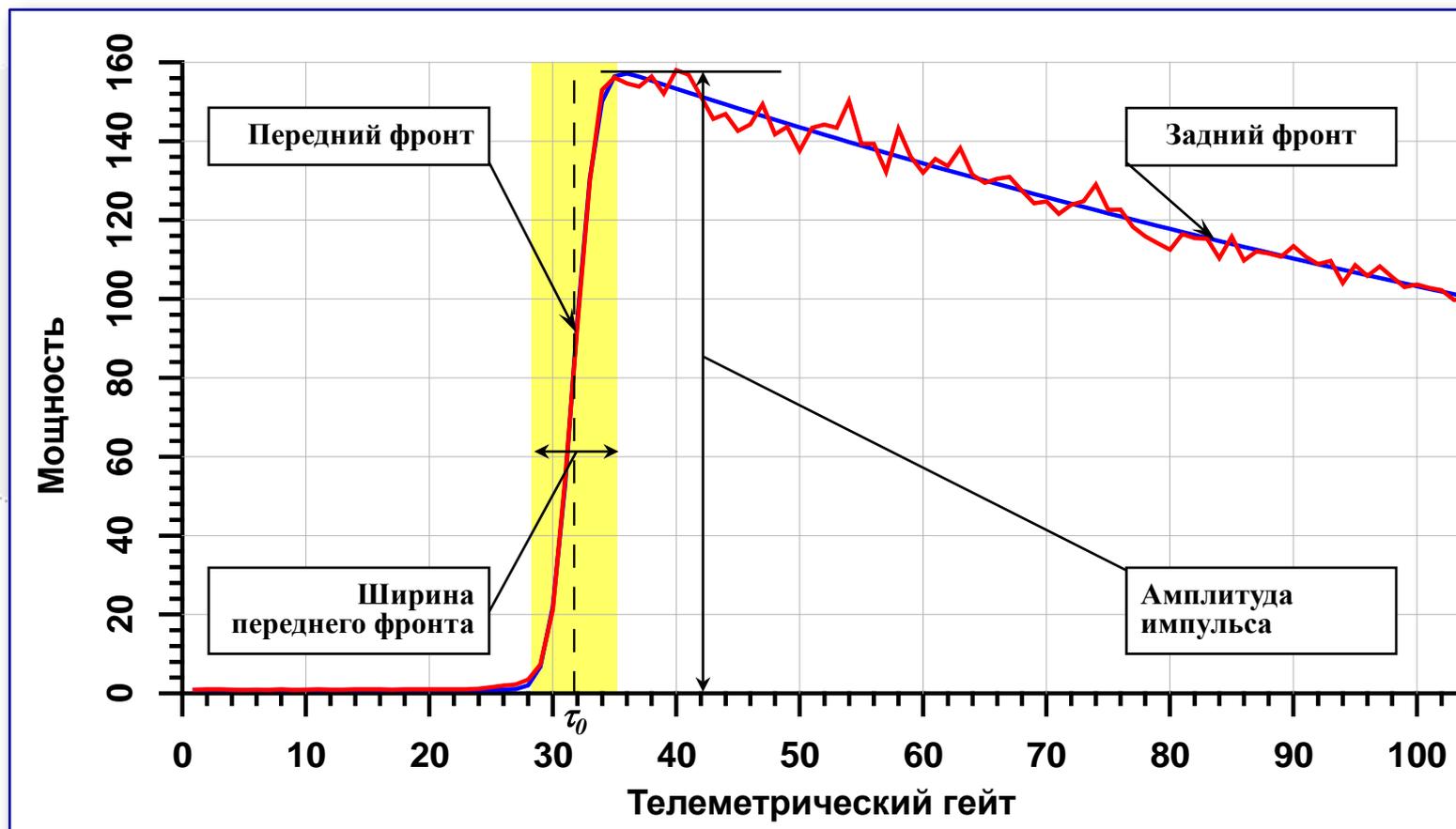


Двадцать вторая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса»
11-15 ноября 2024, Москва, Институт космических исследований РАН

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, ЦНИИМаш, С.А. Лебедев, Д.А. Хвощевский, М.П. Леперт



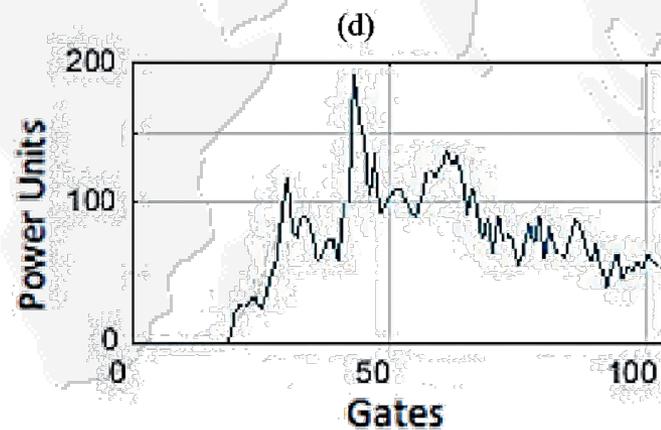
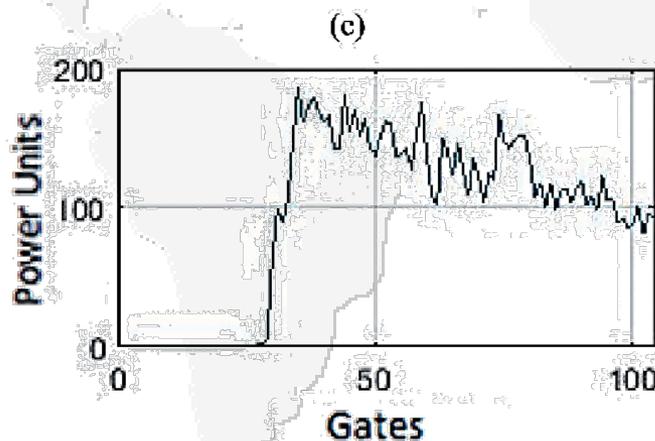
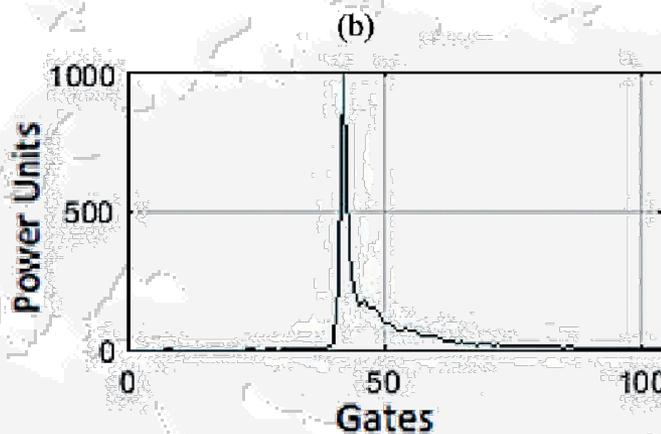
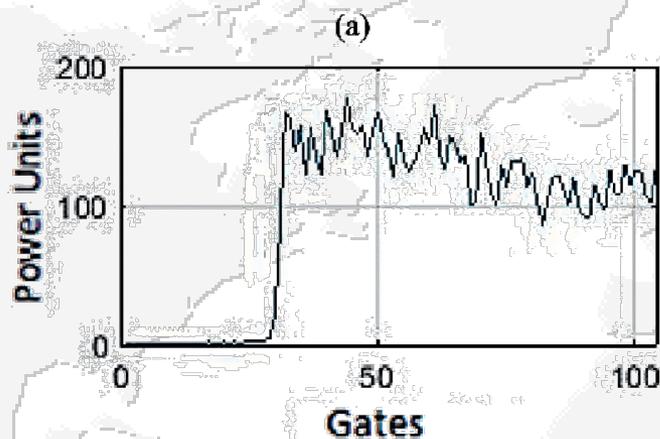
Форма отражённого импульса



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 τ_0 – середина переднего фронта или «эпоха». Жёлтой областью выделена ширина переднего фронта, зависящая от значимой высоты волн (h_{swh})



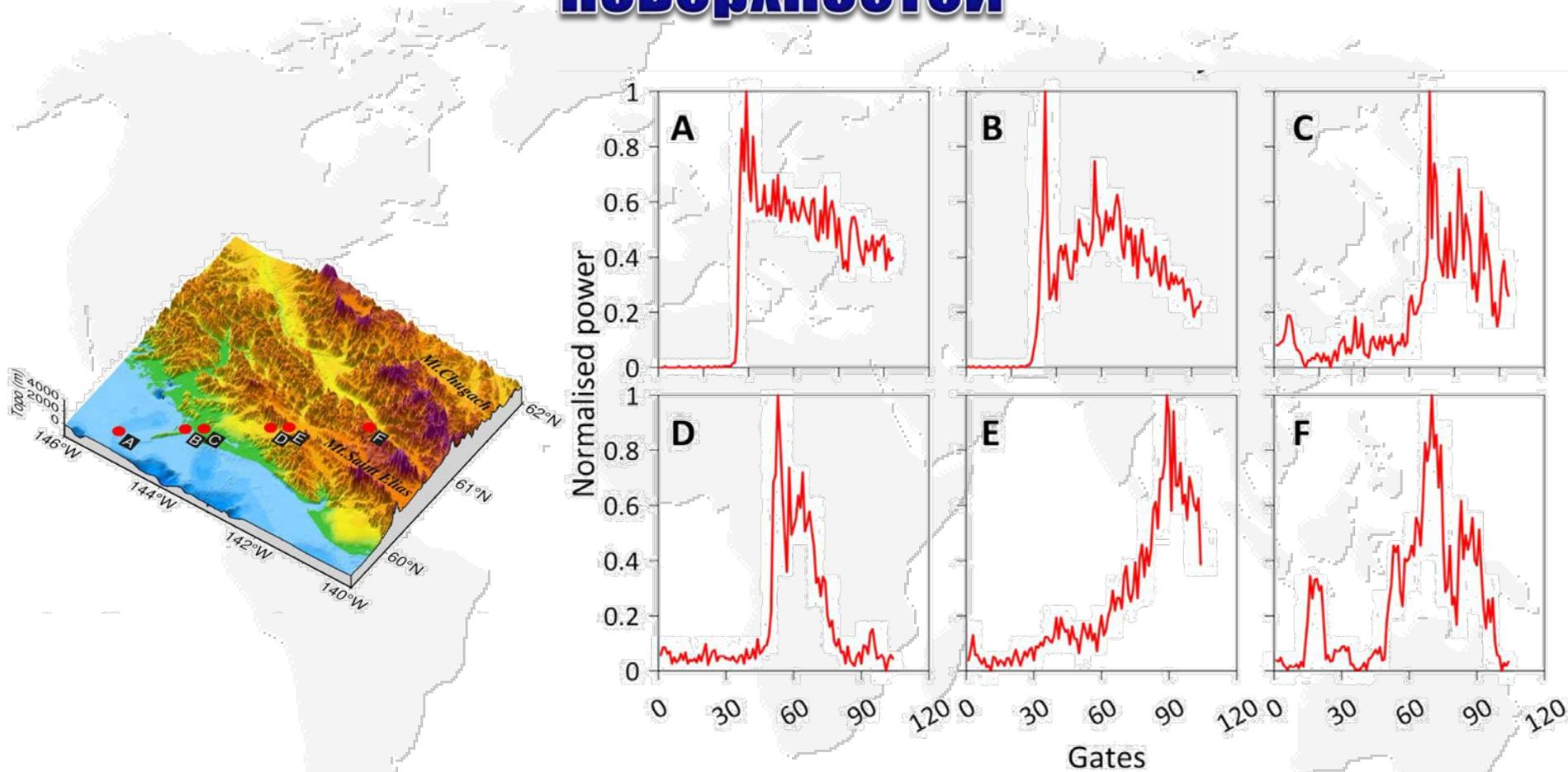
Форма отражённого импульса от различных поверхностей



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, D – лёд, на суше,
Е – неровная поверхность суши, F – смесь камней и льда.

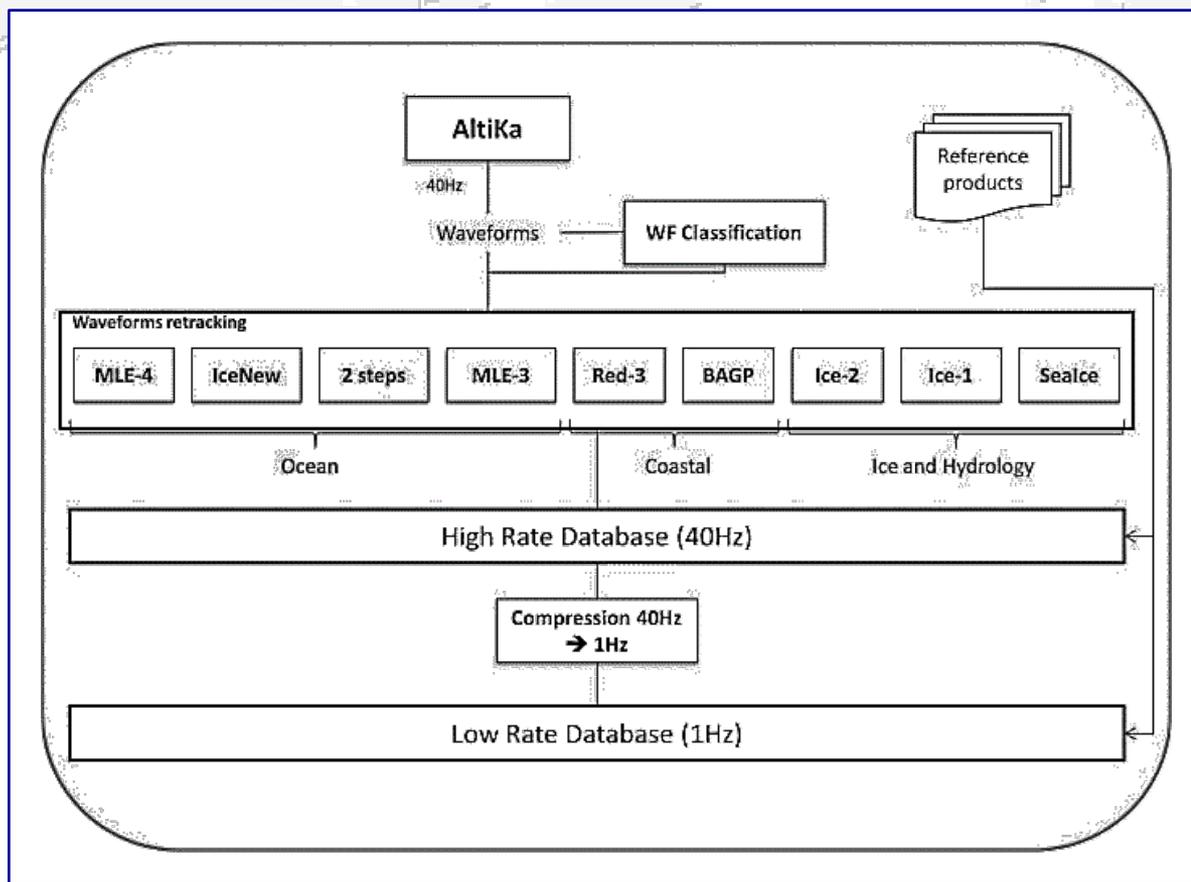


Двадцать вторая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса»
11-15 ноября 2024, Москва, Институт космических исследований РАН

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, ЦНИИМаш, С.А. Лебедев, Д.А. Хвощевский, М.П. Лерет



Алгоритмы ретрекинга и классификация форм отраженного импульса



Алгоритмы ретрекинга разделяются:

- на эмпирические или параметрические (алгоритм центра тяжести или алгоритм Ice-1, β — 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.



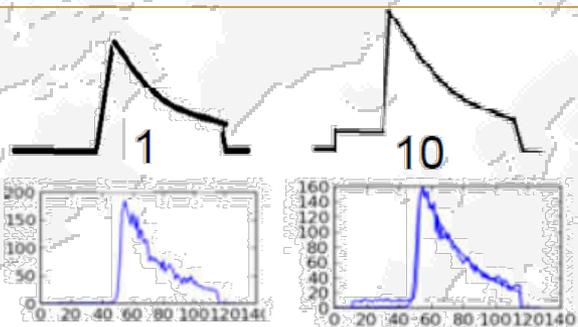
Классификация форм отраженного импульса

Instrumental error ?

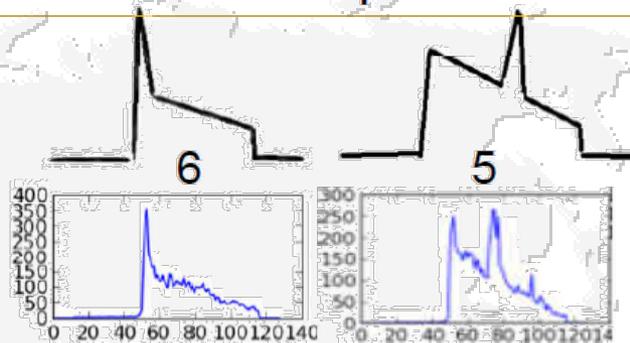
0



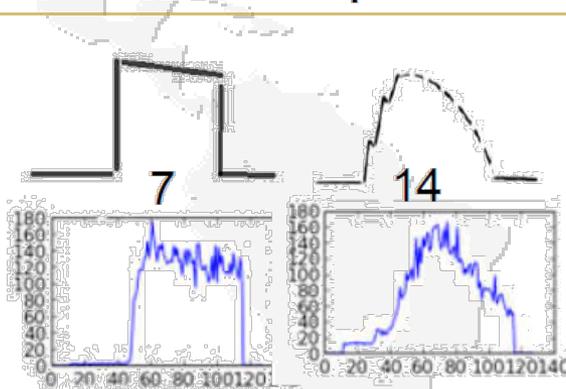
Brownian classes



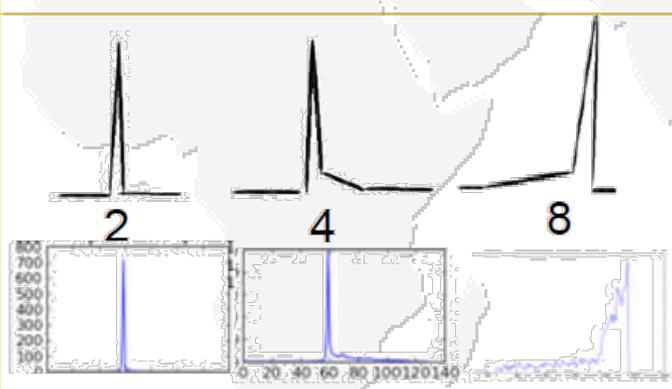
Brown + peak



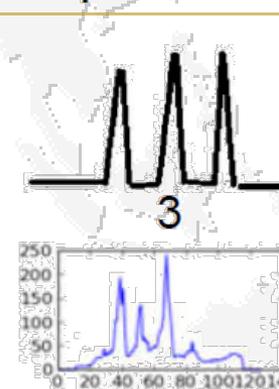
Brown corrupted



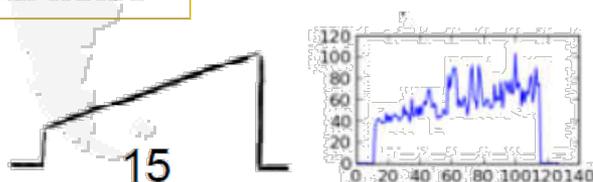
Peak



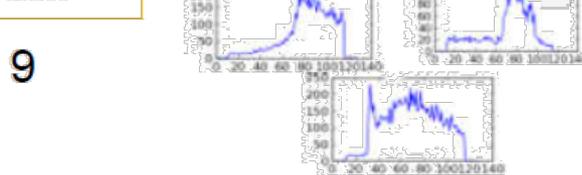
Multi peaks / Noise



Linear noise



Trash



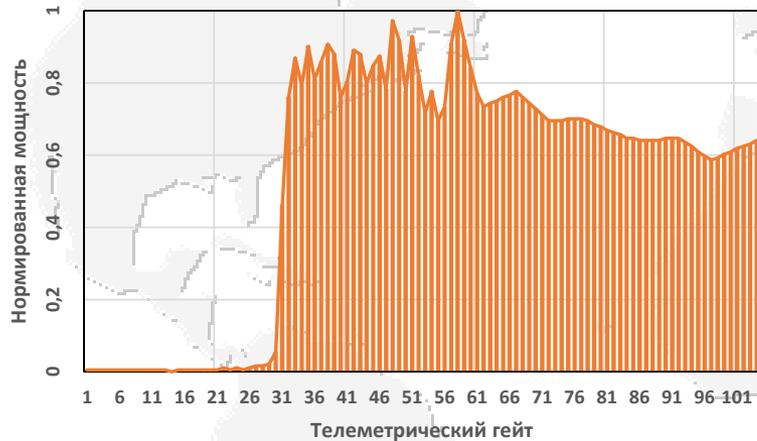
Двадцать вторая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса»
11-15 ноября 2024, Москва, Институт космических исследований РАН

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, ЦНИИМаш, С.А. Лебедев, Д.А. Хвощевский, М.П. Лерет

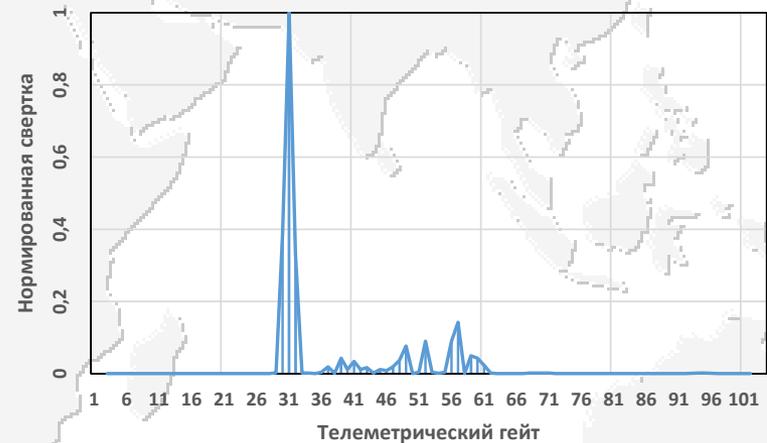


Параметры классификации форм отраженного импульса (1 группа)

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



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



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

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



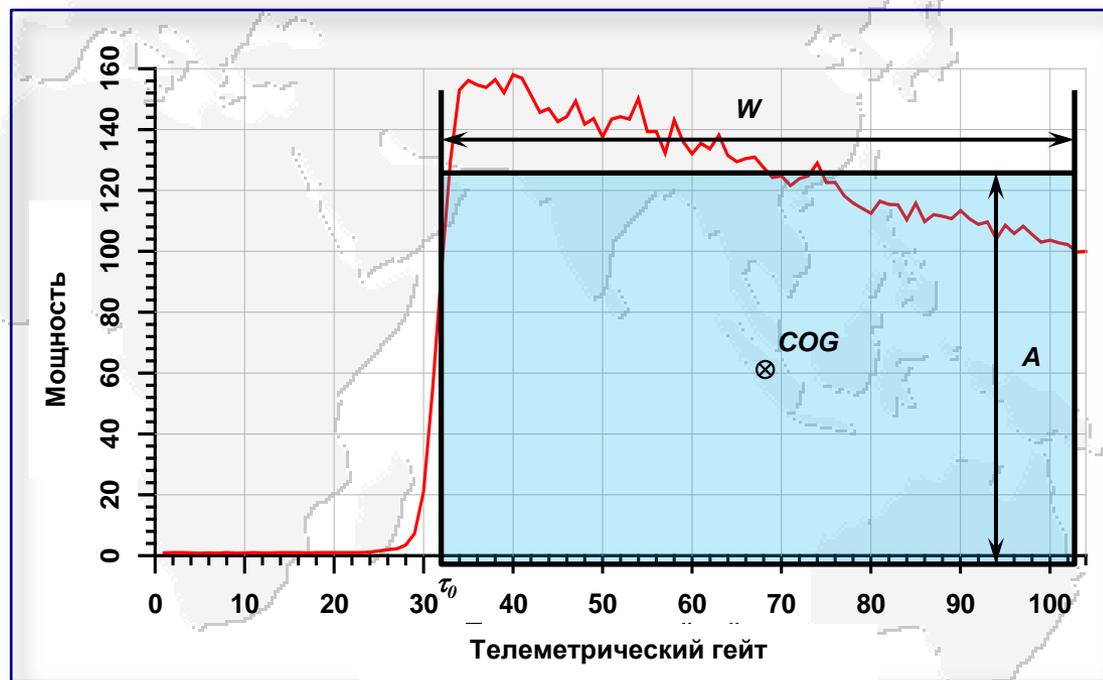
Параметры классификации форм отраженного импульса (2 группа)

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

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

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

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



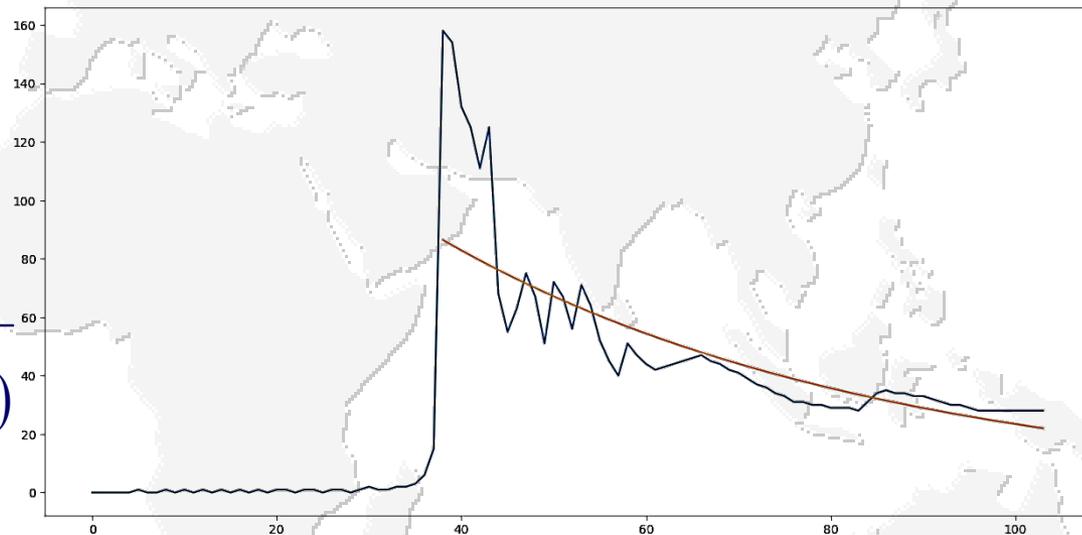
Параметры классификации форм отраженного импульса (3 группа)

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) (σ_E).

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

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

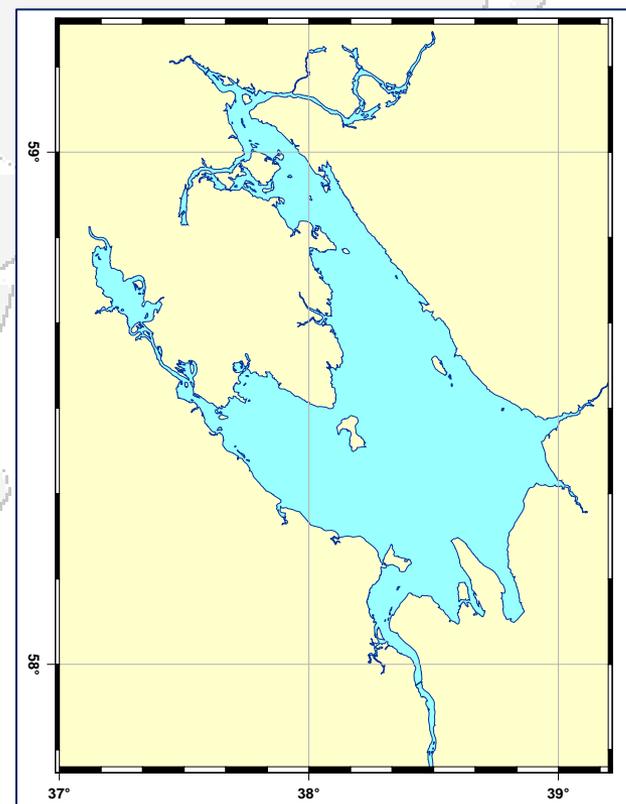
$$\sigma_E = \sqrt{\frac{1}{N - i_0} \sum_{i=i_0}^N (P_i - \exp(A \cdot i + B - E))^2}$$



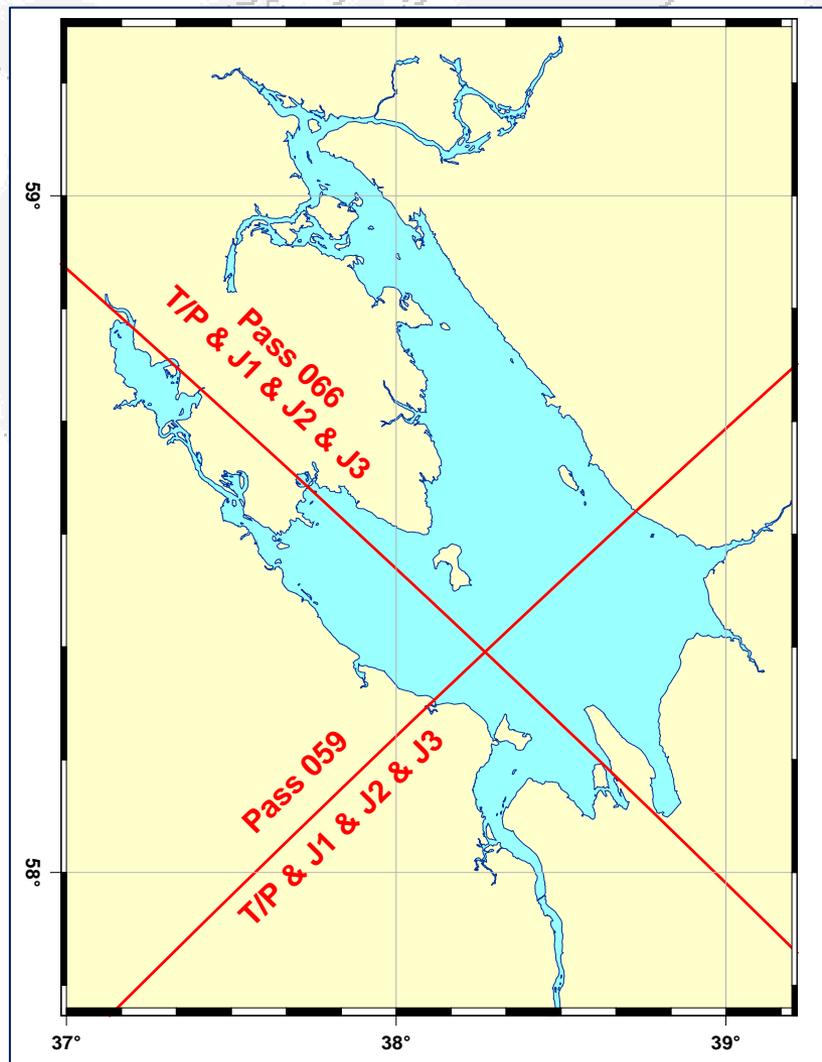
Рыбинское водохранилище – объект исследования

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 ²
Объём	
полный	25,4 км ³
полезный	16,7 км ³
Береговая линия	1724 км
Наибольшая глубина	30 м
Средняя глубина	5,6 м



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.

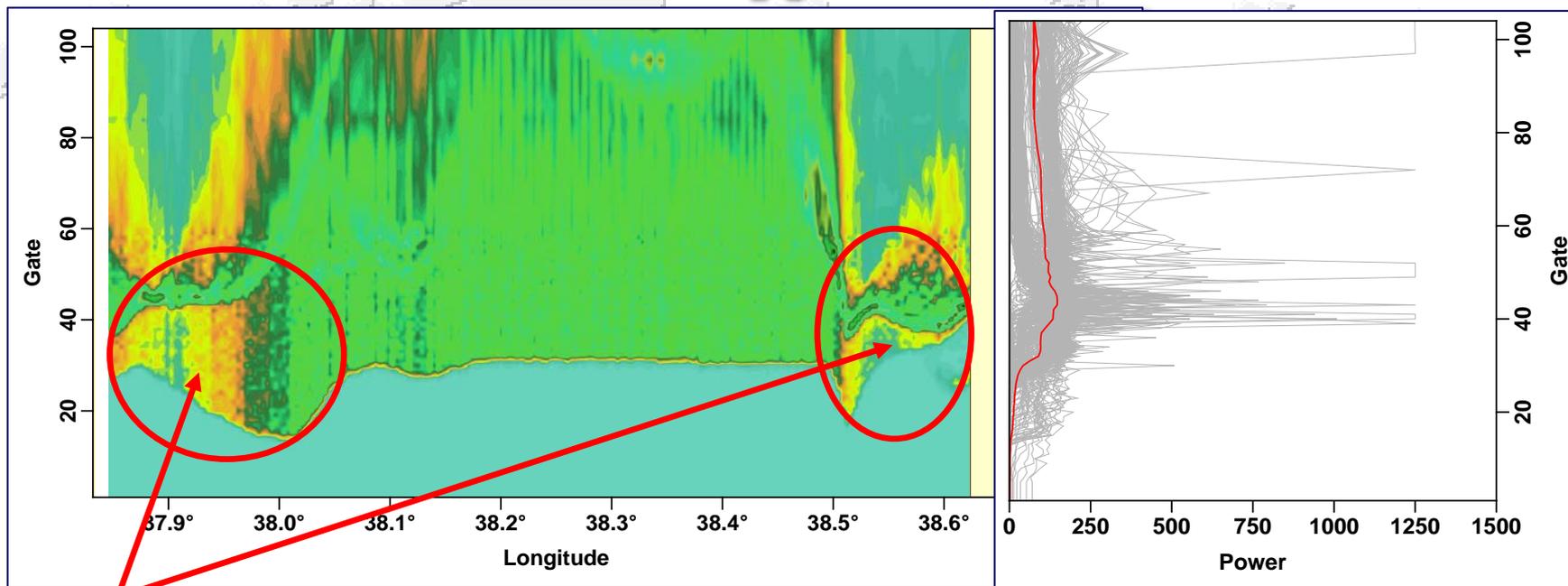


Двадцать вторая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса»
11-15 ноября 2024, Москва, Институт космических исследований РАН

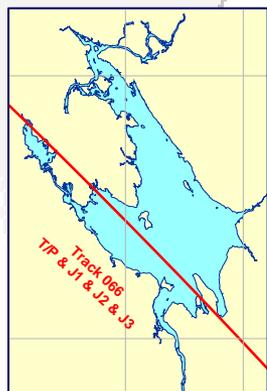
© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, ЦНИИМаш, С.А. Лебедев, Д.А. Хвощевский, М.П. Лерет



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).

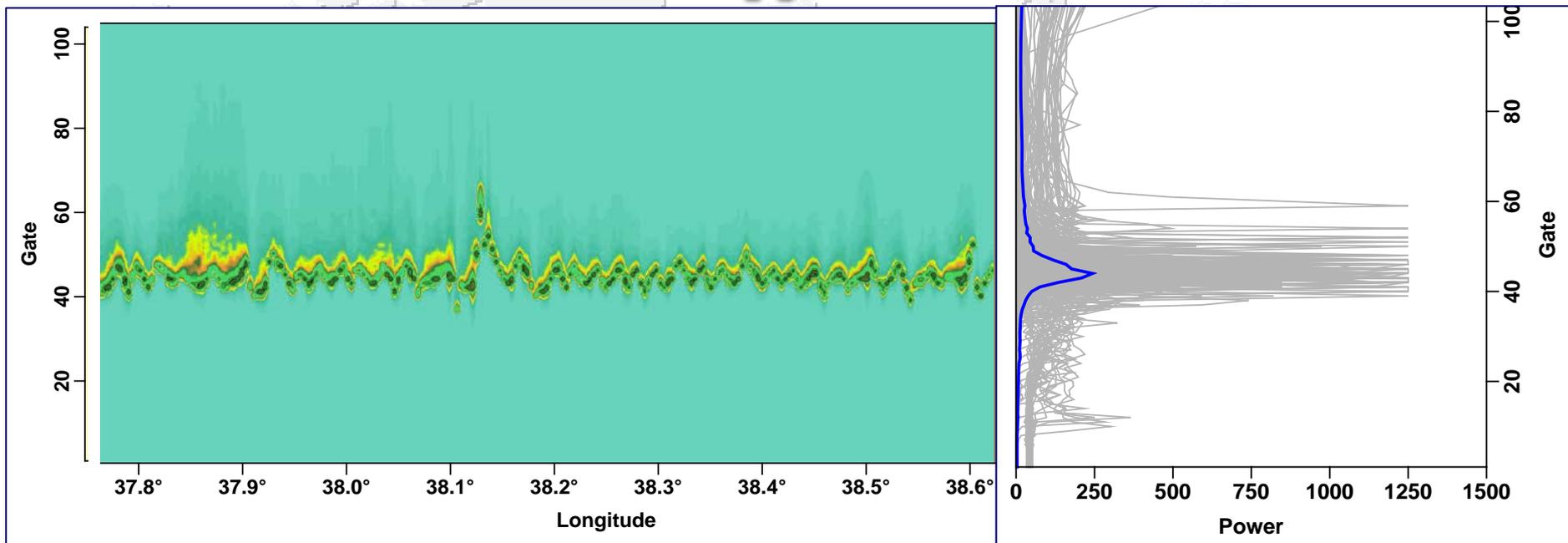
Формы отражённого импульса (справа)
Красной линией показан средняя форма.

Двадцать вторая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса»
11-15 ноября 2024, Москва, Институт космических исследований РАН

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, ЦНИИМаш, С.А. Лебедев, Д.А. Хвошевский, М.П. Лерет



Рыбинское водохранилище – объект исследования



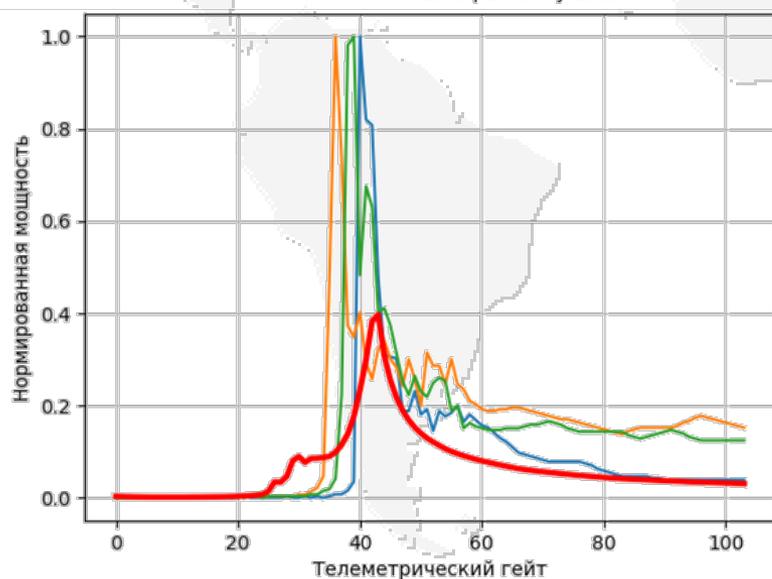
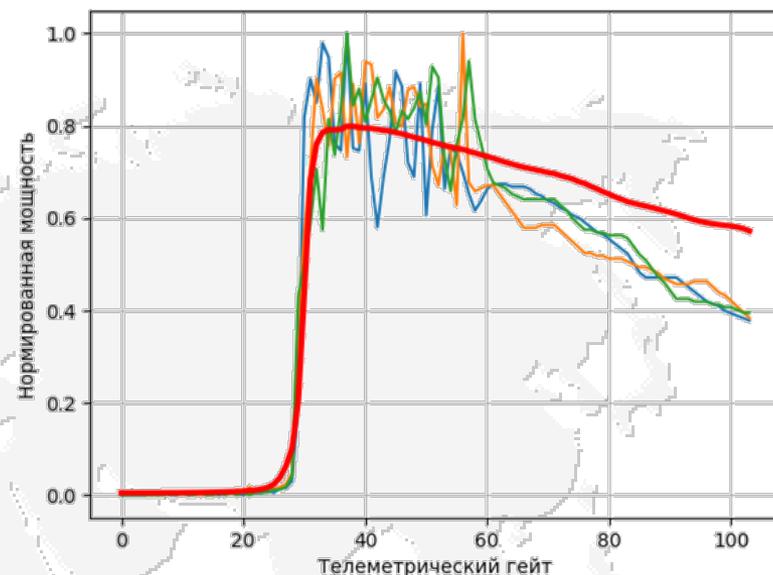
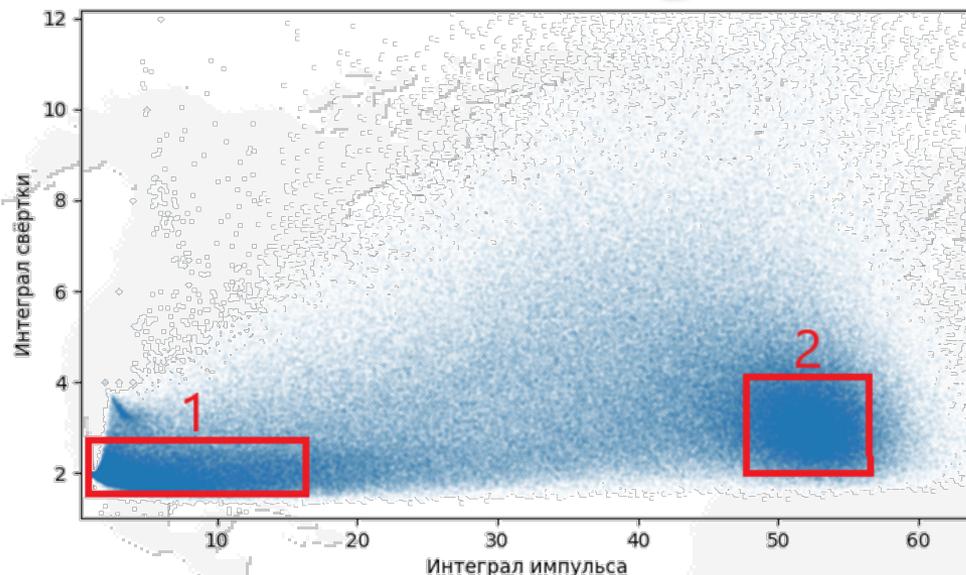
**Изменчивость мощности отражённого импульса в Ku диапазоне вдоль 066 трека спутника Jason-1 (66 цикл 12 декабря 2003) (слева).
Формы отражённого импульса (справа)
Синей линией показан средняя форма.**

Двадцать вторая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса»
11-15 ноября 2024, Москва, Институт космических исследований РАН

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, ЦНИИМаш, С.А. Лебедев, Д.А. Хвощевский, М.П. Лерет



Результаты анализа



Результат классификации по параметрам:

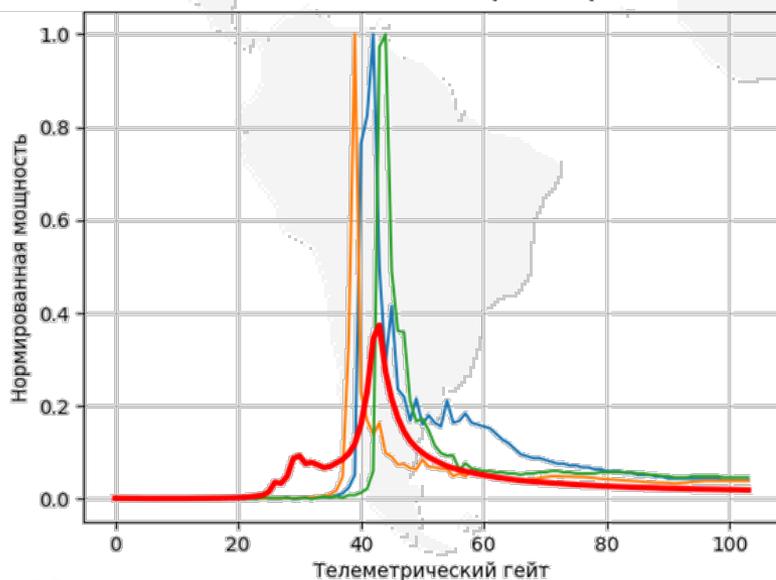
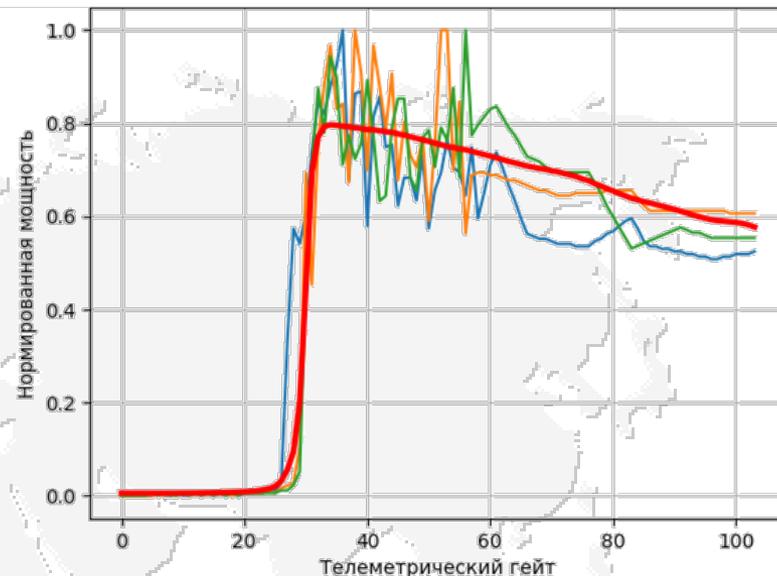
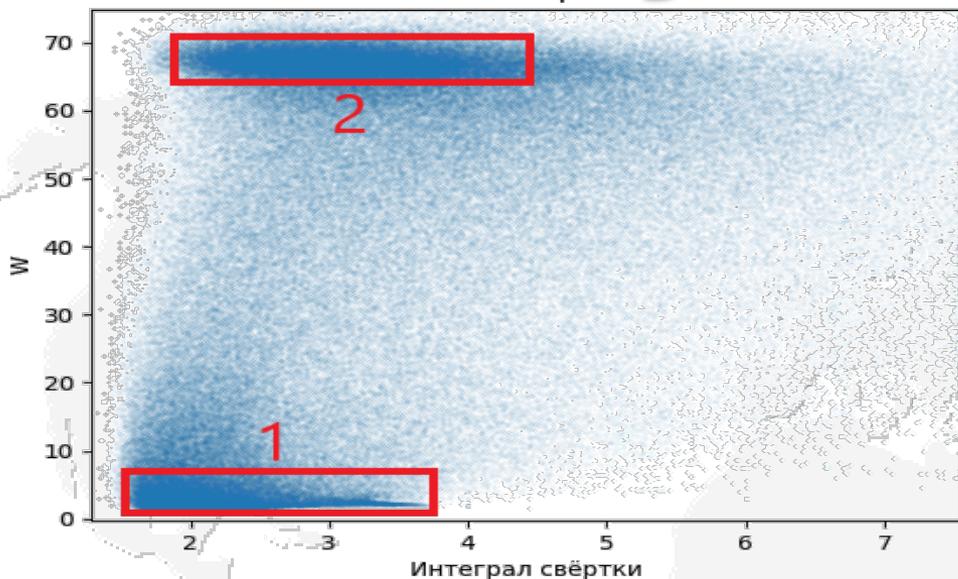
- интеграл нормированной мощности (B),
- интеграл свёртки нормированной мощности (S).

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)

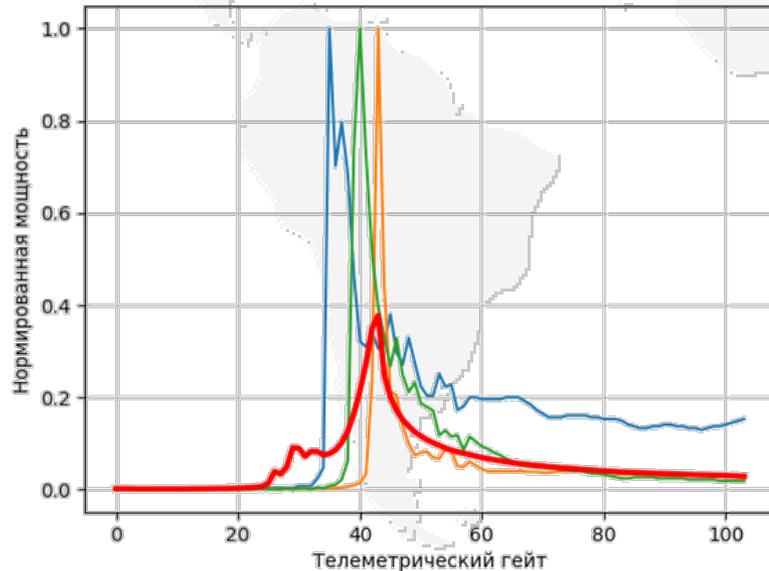
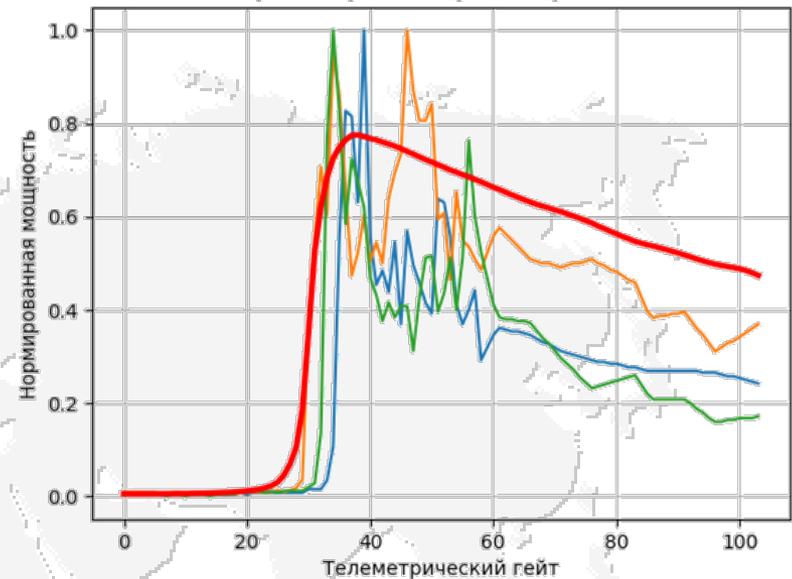
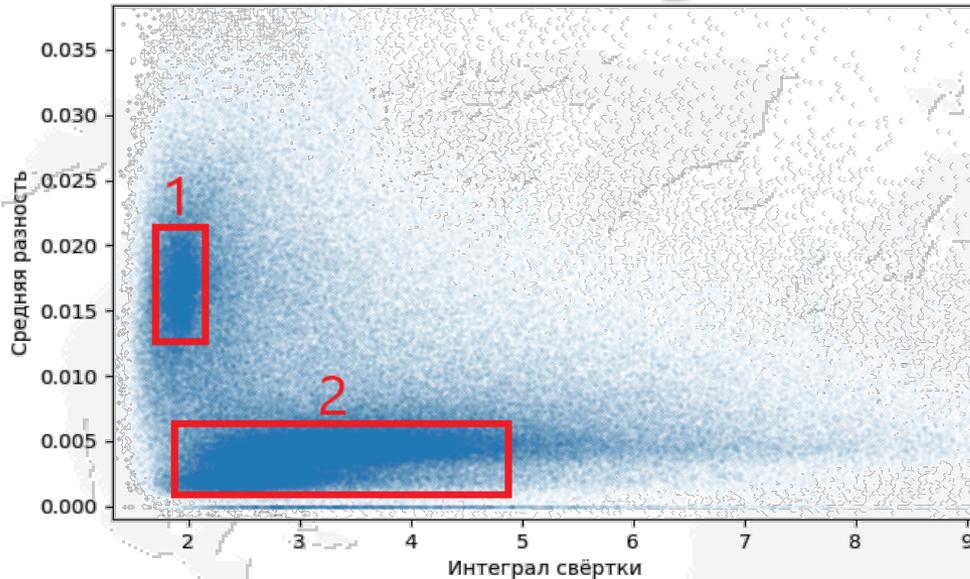
Двадцать вторая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса» 11-15 ноября 2024, Москва, Институт космических исследований РАН

© 2024, ГЦ РАН, МГТУ, МИЭТ, ЦНИИМаш, С.А. Лебедев, Д.А. Хвощевский, М.П. Лерет



Результаты анализа

Кластеры



Результат классификации по параметрам:

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

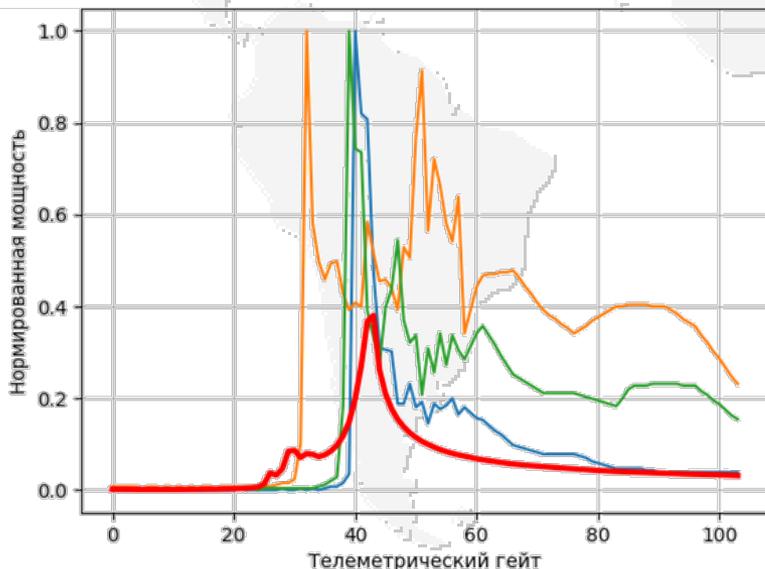
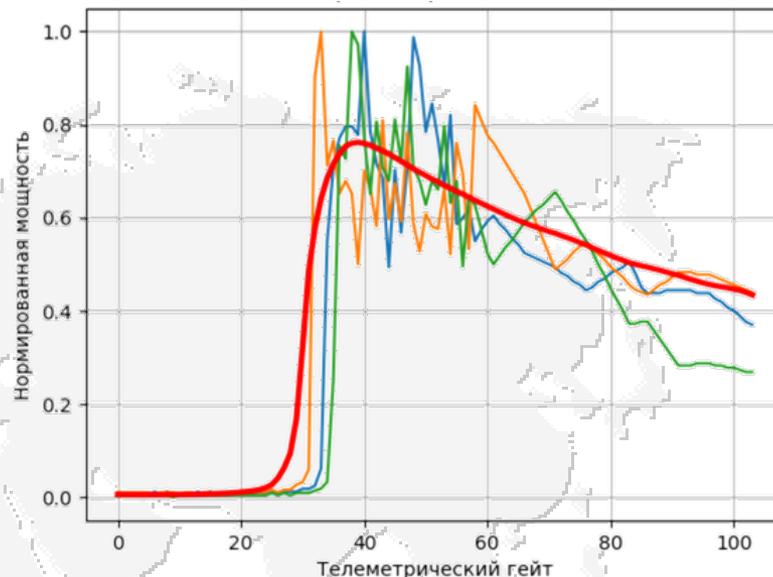
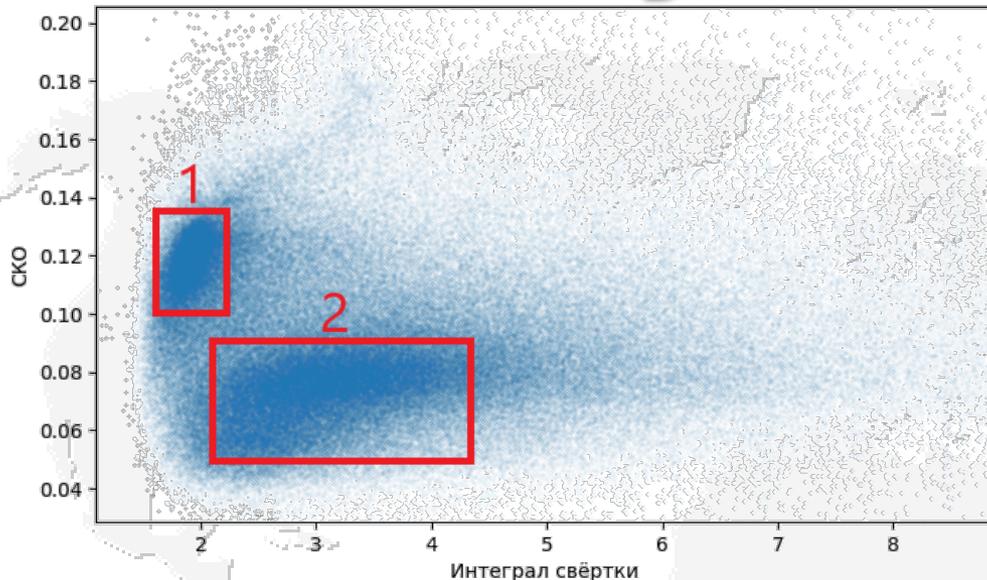
Слева – примеры форм импульса принадлежащих первому кластеру (лёд). Красным цветом показана средняя форма импульса.

Справа – второму кластеру (вода + суша)



Результаты анализа

Кластеры



Результат классификации по параметрам:

- интеграл свёртки нормированной мощности (S),
- среднеквадратичное отклонение заднего фронта от экспоненты (σ_E)

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

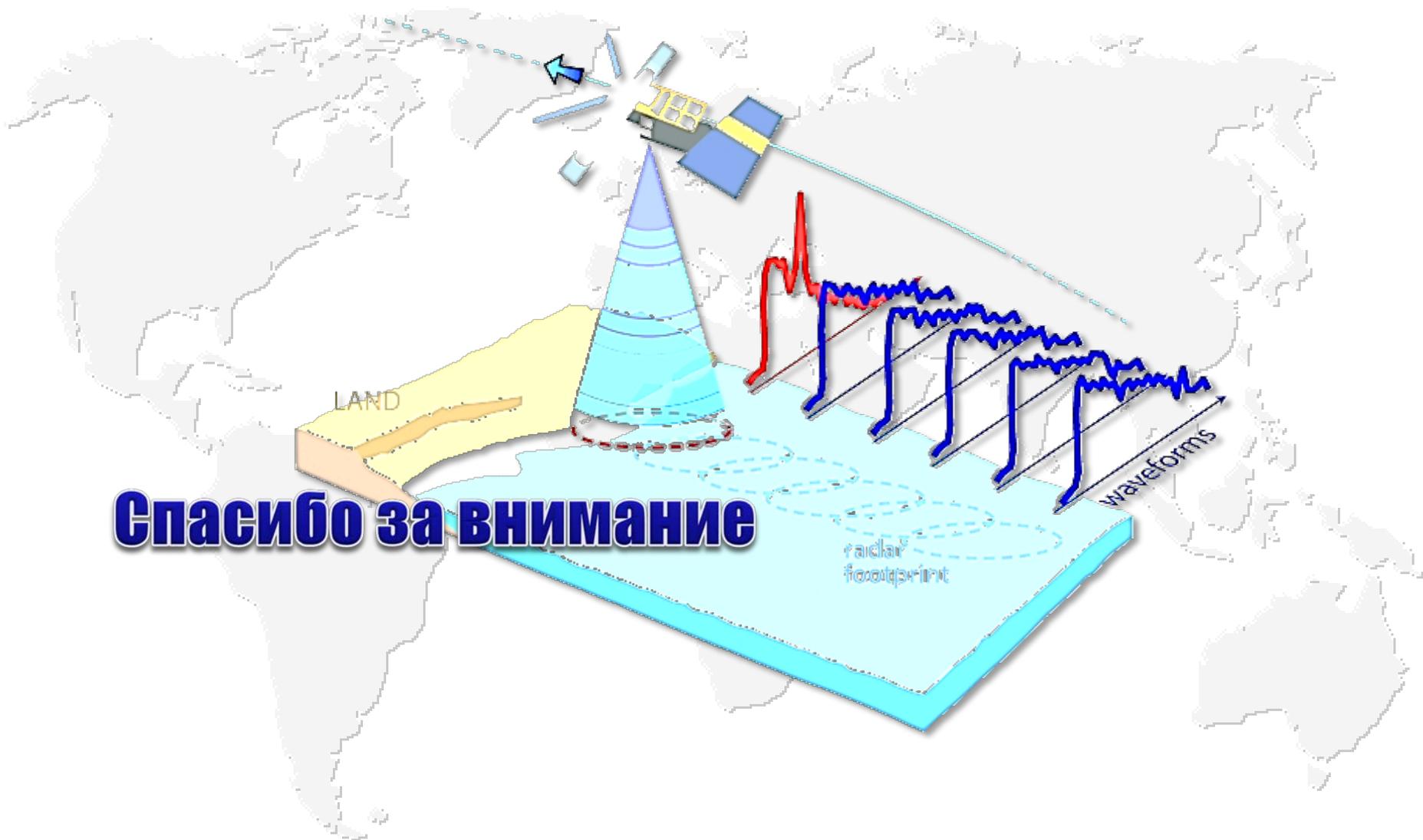
Справа – второму кластеру (вода + суша)



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

