



Применение алгоритмов автоматического обнаружения ледяного покрова внутренних водоемов по данным двухчастотного дождевого радиолокатора на примере р. Волга

**Караев В.Ю., Сорокин Е.С., Титченко Ю.А., Панфилова М.А.,
Мешков Е.М., Ковалдов Д.А.**

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

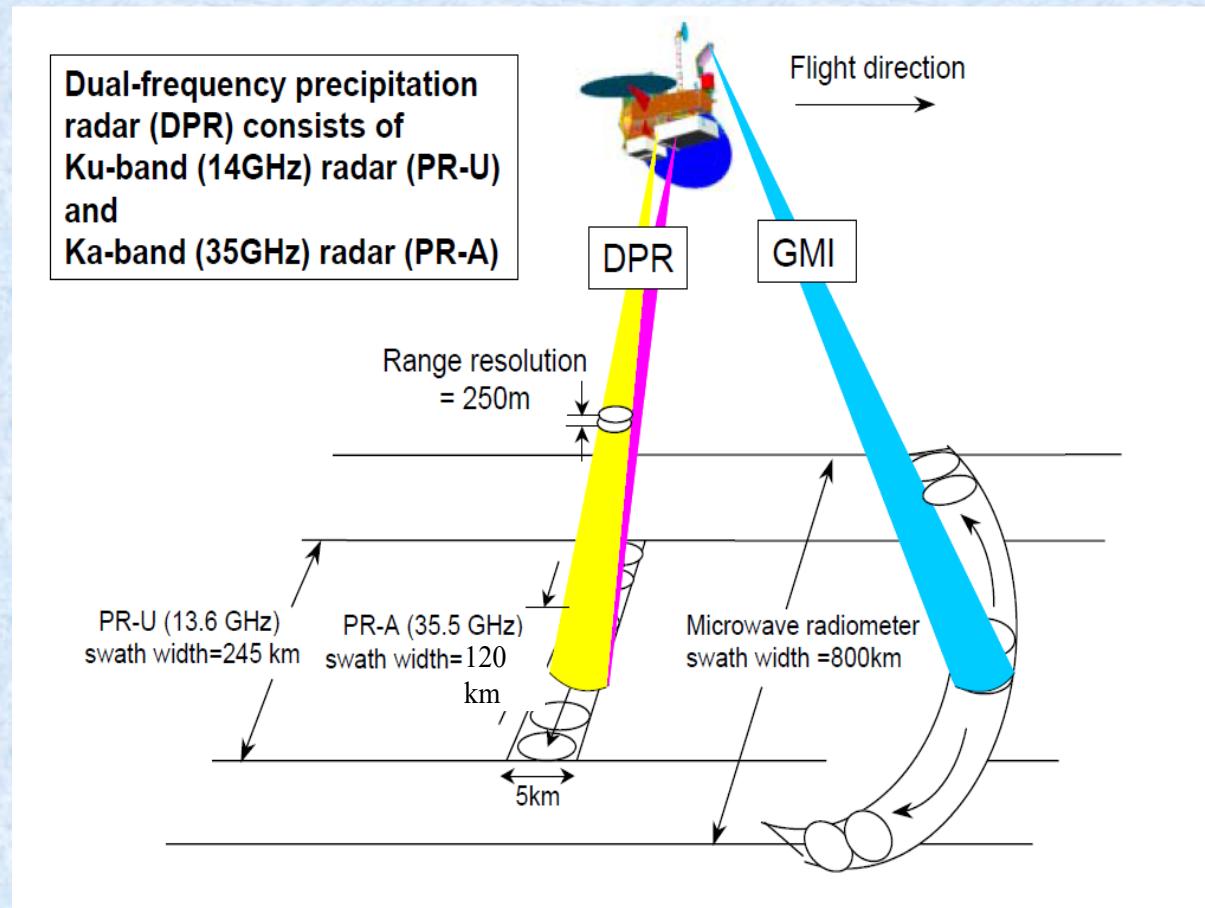
Аннотация

Дистанционное зондирование становится важным источником информации о земной поверхности и его значение постоянно возрастает. В ходе предыдущих исследований было показано, что двухчастотный дождевой радиолокатор (Dual-frequency Precipitation Radar - DPR), установленный на спутнике GPM (Global Precipitation Mission), является эффективным инструментом для исследования внутренних водоемов. Проведенные исследования показали, что во всем диапазоне углов падения (за исключением диапазона $+/- 2.6^\circ$) радиолокационный контраст «вода/суша» является высоким и нет контраста для случая «лед/суша». В ходе проведенного исследования были разработаны два алгоритма для автоматического определения присутствия льда на внутренних водоемах. В алгоритмах анализируются разрезы радиолокационного изображения по углу падения, для всех углов падения вычисляется контраст в окрестности русла реки и определяются «пороговые» значения для каждого угла падения. В первом алгоритме превышение порогового значения говорит об отражении от водной поверхности. Во втором алгоритме критерием наличия ледяного покрова является не превышение порогов, вычисляемых для каждого угла падения. Обработка данных показала, что второй алгоритм оказался более «устойчивым» к флюктуациям мощности отраженного сигнала.

Введение

Двухчастотный дождевой радиолокатор (Dual-frequency Precipitation Radar - DPR) (длина волны 2,1 см и 0,8 см) был выведен на орбиту 28 февраля 2014 в рамках первой Глобальной миссии по измерению осадков (Global Precipitation Mission - GPM).

Высота орбиты GPM составляет около 400 км. Радиолокатор сканирует в направлении, перпендикулярном направлению полёта и угол зондирования в К- и Ка-диапазонах меняется в пределах $\pm 17^\circ$. Ширина полосы обзора составляет 245 км с разрешением 5 км. В ходе исследования данные в интервале углов падения $+/- 2.6^\circ$ не использовались.



Введение

При такой схеме измерения формируется «сплошное» радиолокационное изображение подстилающей поверхности, т.к. размер « пятна» на поверхности составляет около 5 км, а смещение радиолокатора за время скана – около 4 км.

Благодаря наклонения орбиты 65° , двухчастотный дождевой радиолокатор выполняет измерения над территорией с долговременным снежным покровом и ледяным покровом внутренних водоемов.



Введение

Для зондирования «протяженных» водных объектов, например, рек потребуется несколько пролетов. В результате полное измерение (на всем протяжении внутреннего водоема) может потребовать нескольких дней / нескольких пролетов. Частота измерений исследуемого объекта с увеличивается широты.

Формирование и разрушение ледяного покрова внутренних водоемов являются достаточно длительными по времени процессами, поэтому могут наблюдаться дождевым радиолокатором.

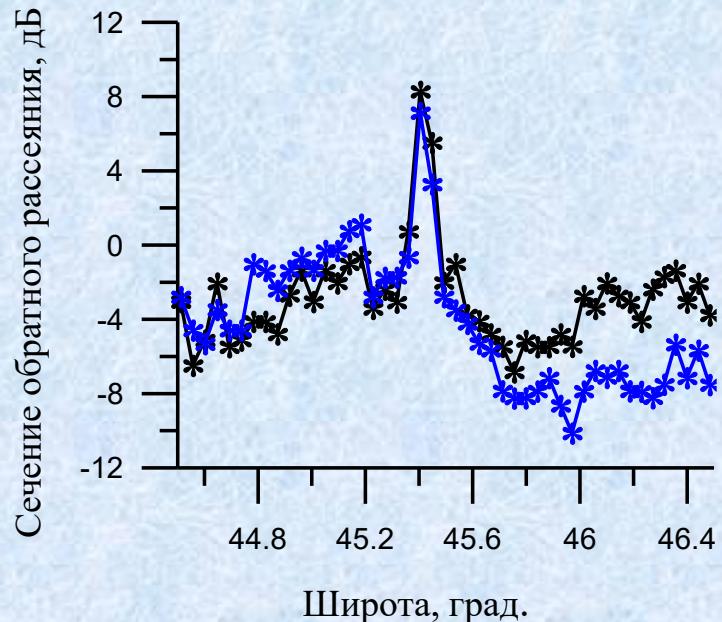
Гидрологические посты размещены по реке редко и измерения являются «точечными», поэтому источником дополнительной информации о ледяном покрове являются снимки Terra/Modis. Недостаток оптических изображений связан с наличием облачности, поэтому осенью, зимой и весной, когда формируется и разрушается ледяной покров, частота наблюдения резко снижается, например, с 1 по 31 декабря 2021 река Волга на участке от г. Волгоград до г. Саратов была видна 5 дней и еще 2 дня облака закрывали часть реки.

Благодаря достаточно широкой полосе обзора DPR (245 км), наблюдения повторяются каждый день, т.е. информация является достаточно оперативной.

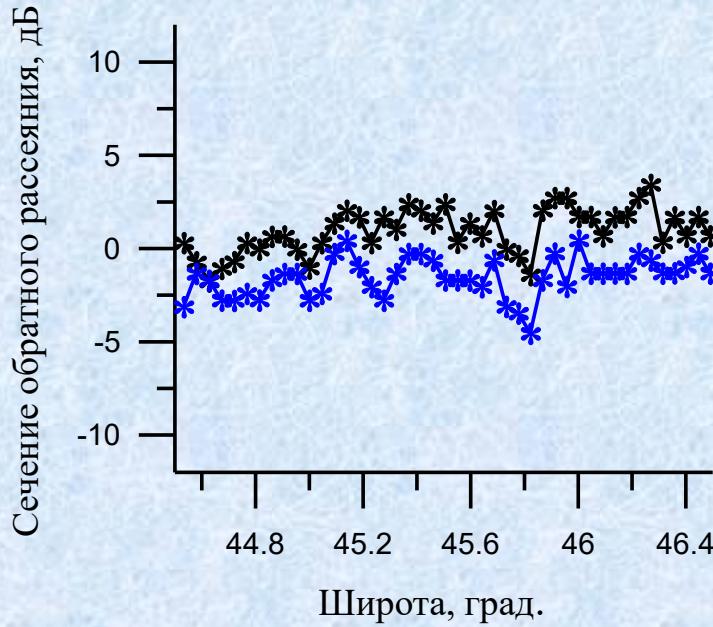
Введение

В разработанных алгоритмах для классификации типа отражающей поверхности (лед/вода) применяются «пороги». Для нахождения значения порогов для каждого угла падения использовалась информация о состоянии водоема по данным Terra/Modis.

Пример разреза радиолокационного изображения для угла падения -8° показан на рисунке: слева – для водной поверхности, справа – для реки, покрытой льдом. Под порогом понимается превышение максимума над средним уровнем.

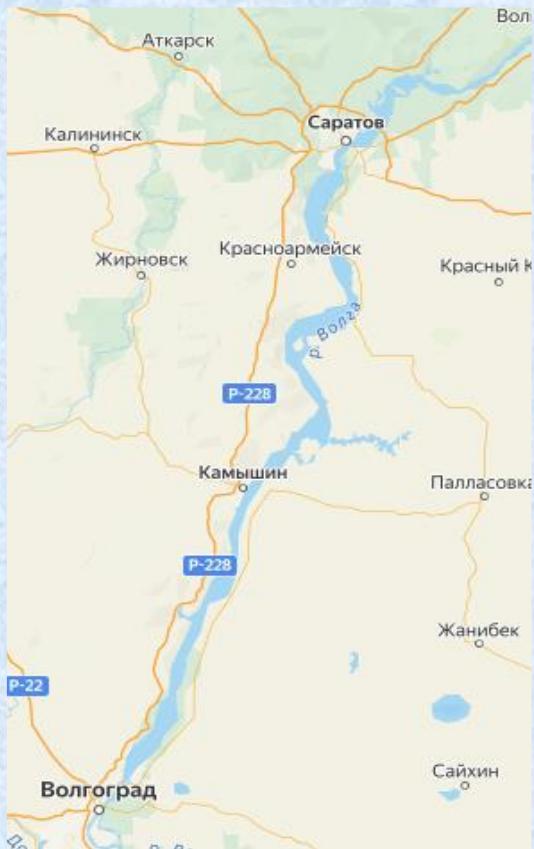


Разрез радиолокационного изображения для углов падения -8° . Чёрным цветом показан Ки-диапазон, синим – Ка-диапазон. По вертикальной оси отложено сечение обратного рассеяния, дБ



Тестовый полигон

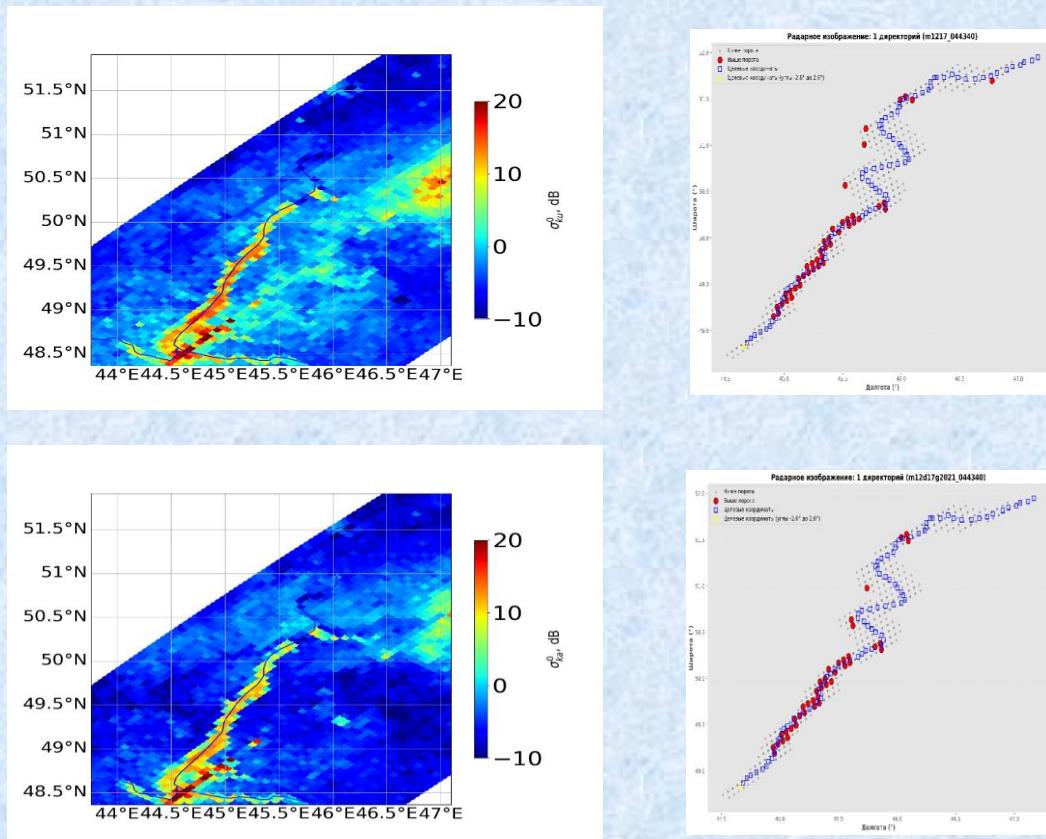
В качестве тестового полигона для исследования была выбрана область, содержащая участок реки Волги между городами Саратов и Волгоград, и использовались данные с 01.11.2021 по 01.09.2022.



Тестовый полигон на Yandex карте (слева) и снимок MODIS (справа).

Обратное рассеяние при малых углах падения

Пример радиолокационных изображений в Ки- и Ка-диапазонах (сверху и снизу соответственно) приведен на следующем рисунке. Измерения были выполнены 17 декабря 2021 года, когда река не замерзла, и это хорошо видно на радиолокационном изображении и результатах обработки.



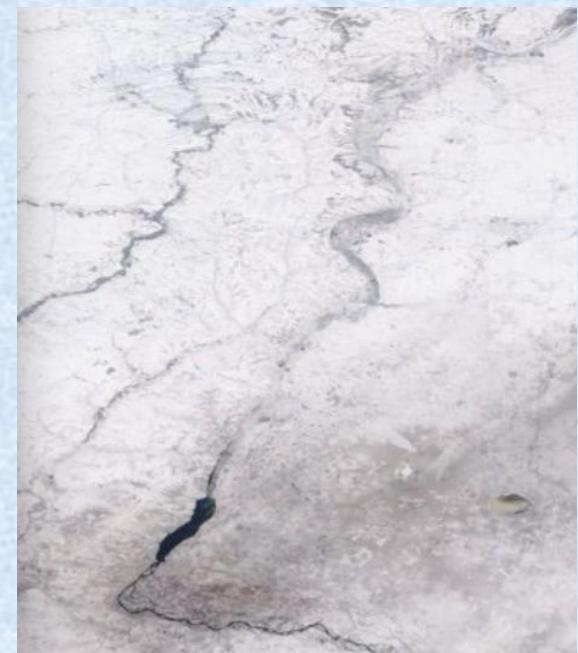
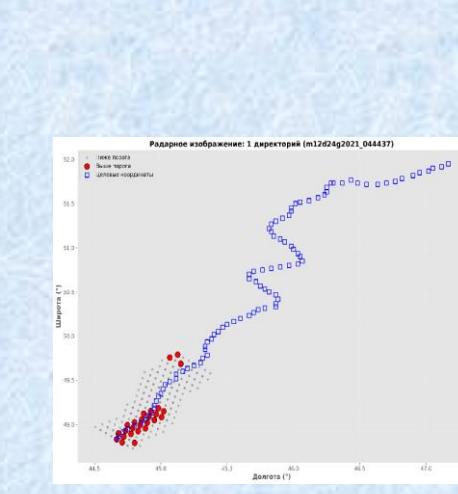
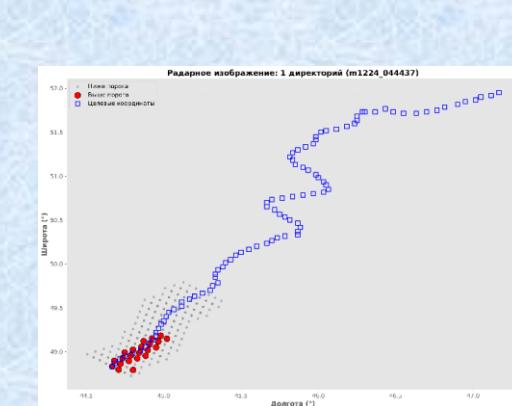
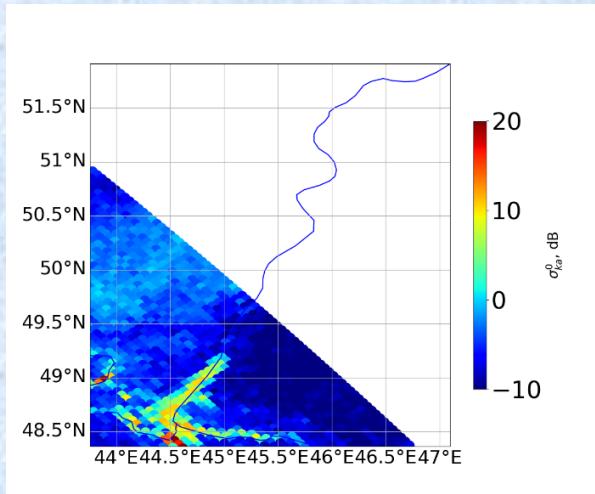
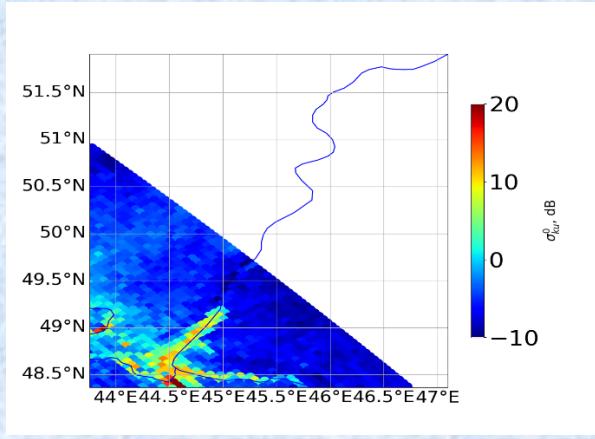
Радиолокационные изображения 17 декабря 2021 г. в Ки- (сверху) и в Ка-диапазоне (снизу) - слева и обработка данных (справа)

Красными точками на русле реки показана «открытая» вода.

Несколько красных точек находятся за пределами «руслы», могут являться следствием неточности алгоритма или говорят о наличии других водных объектов. Использование двух частот позволит повысить точность.

Формирование ледяного покрова

На радиолокационных изображениях в Ки- и Ка-диапазонах (сверху и снизу соответственно) от 24 декабря 2021 г. видно, что река вблизи г. Волгоград не замерзла (Волгоградское водохранилище) – красные точки. В этот день была безоблачная погода и на снимке Modis видно, что в нижней части Волгоградского водохранилища льда нет.

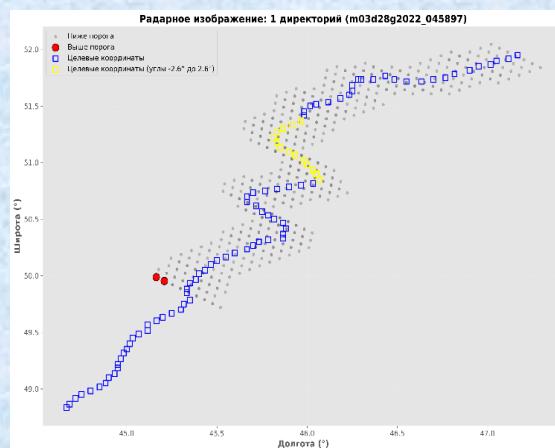
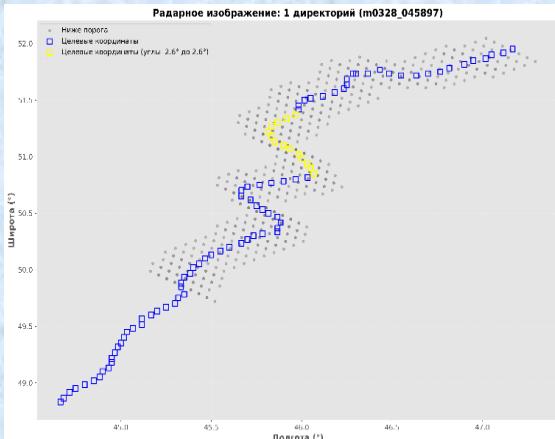
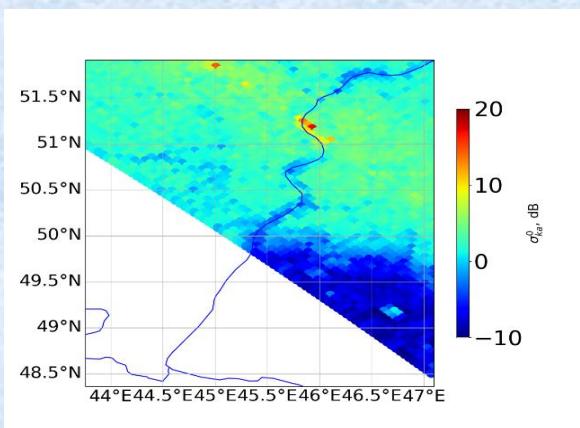
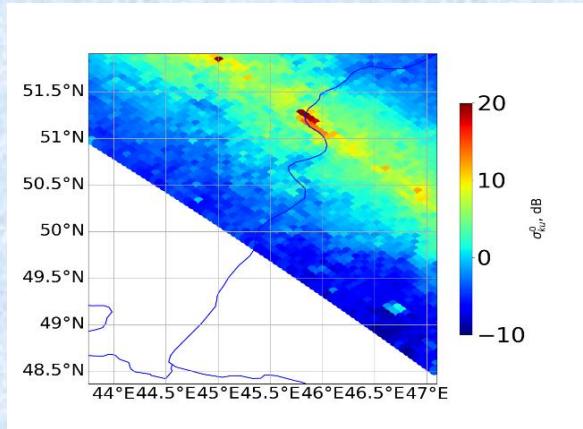


Оптическое изображение 24.12.2025

Радиолокационные изображения 24 декабря 2021 г. (слева) и обработка данных (справа)

Формирование ледяного покрова

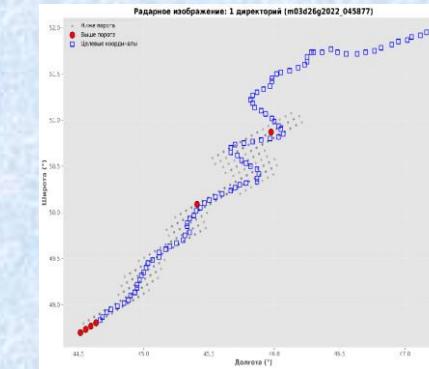
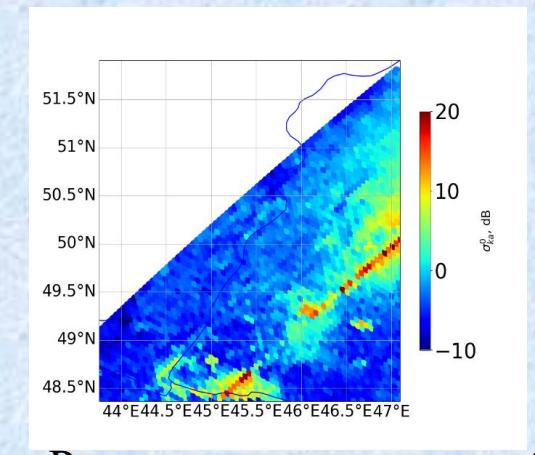
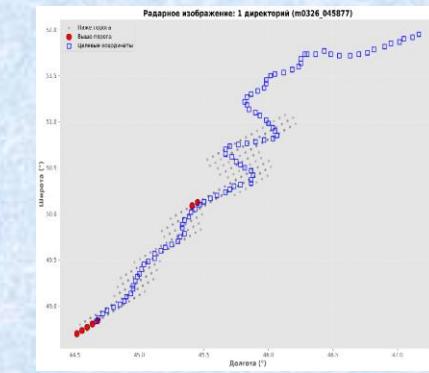
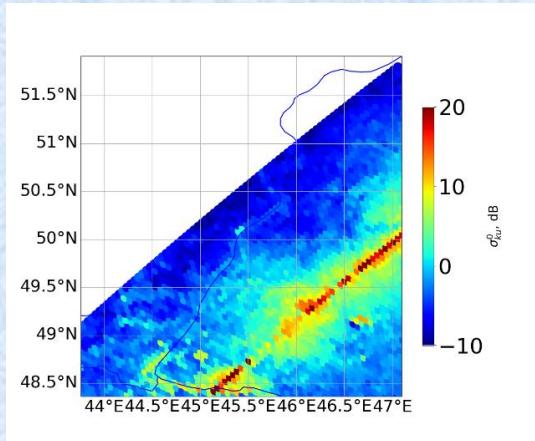
В марте река еще остается покрытой льдом, что видно радиолокационных изображениях и на результатах обработки. Желтыми точками показан участок вблизи надира, где обработка не выполняется. Отсутствие красных точек говорит, что река покрыта льдом.



Радиолокационное изображение в Ки- и Ка-диапазонах (слева) и обработка данных (справа)

Разрушение ледяного покрова

Если в верхней части изображения лед сохраняется, то в нижней части начинается разрушение ледяного покрова. За плотиной на изображении Modis (24.03.2022) видна вода. Это хорошо видно на обработанных данных (красные точки).

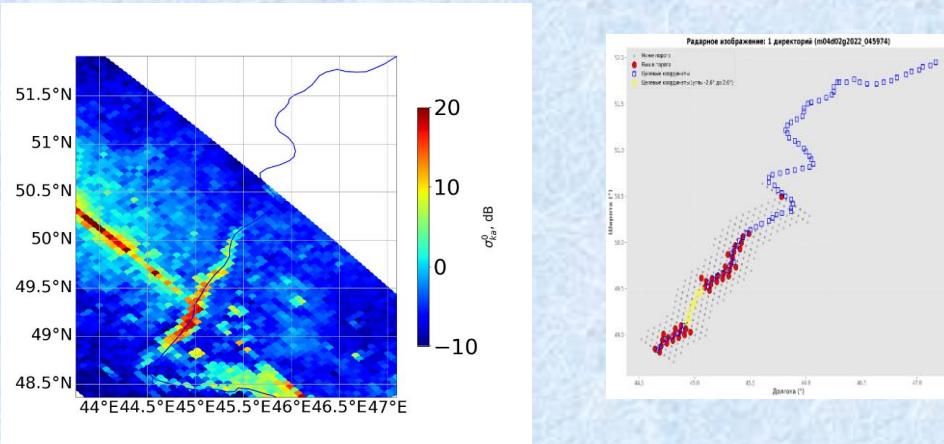
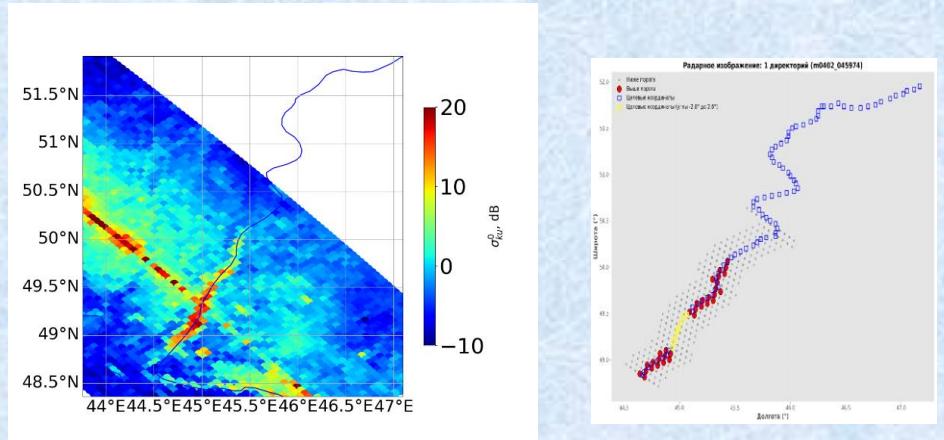


Оптическое изображение
Modis 24 марта 2022

Радиолокационное изображение 24 марта 2022 г. в К- и Ка-диапазонах (слева) и обработка данных (справа)

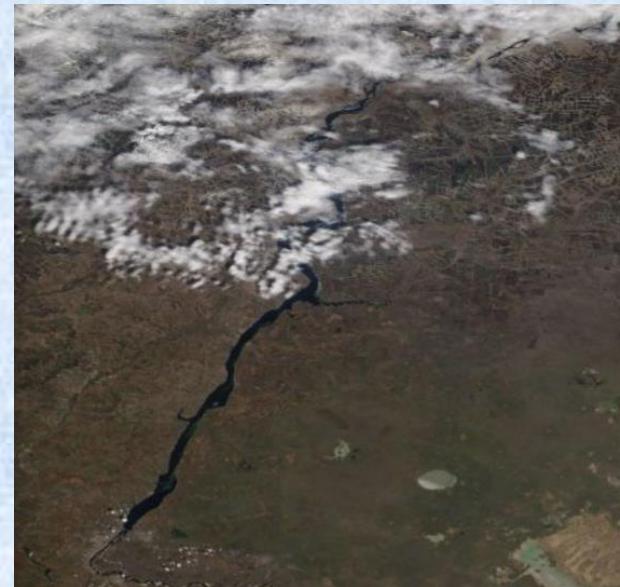
Разрушение ледяного покрова

Процесс разрушения в 2022 году идет быстро и на радиолокационных изображениях 2.04.2025 хорошо видна водная поверхность (красные точки). Лед остался выше по течению (синие точки, отмечают русло реки). Желтые точки показывают интервал углов падения, которые не используются.



Радиолокационное изображение 4 апреля 2022 г. в Ки- и Ка-диапазонах (слева) и обработка данных (справа)

Оптические данные есть только за 7.04.2022 и выше по руслу виден нерастаявший лед.



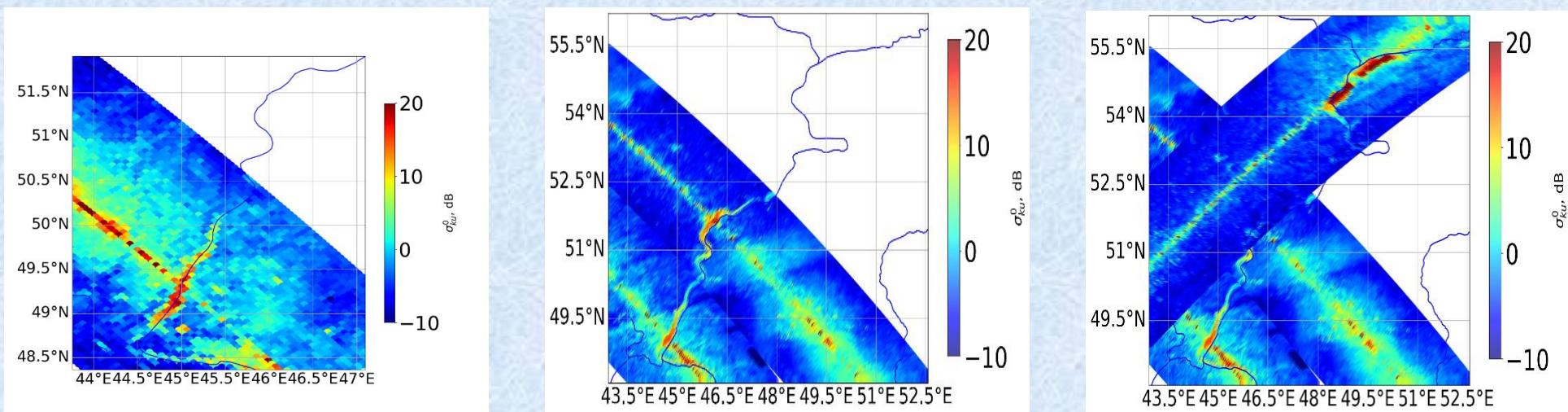
Оптическое изображение
Modis 7 апреля 2022

Последовательные радиолокационные изображения

Как уже отмечалось, для анализа протяжённых водных объектов недостаточно одного радиолокационного изображения. Предлагается использовать последовательные измерения (радиолокационные изображения) и формировать общее изображение.

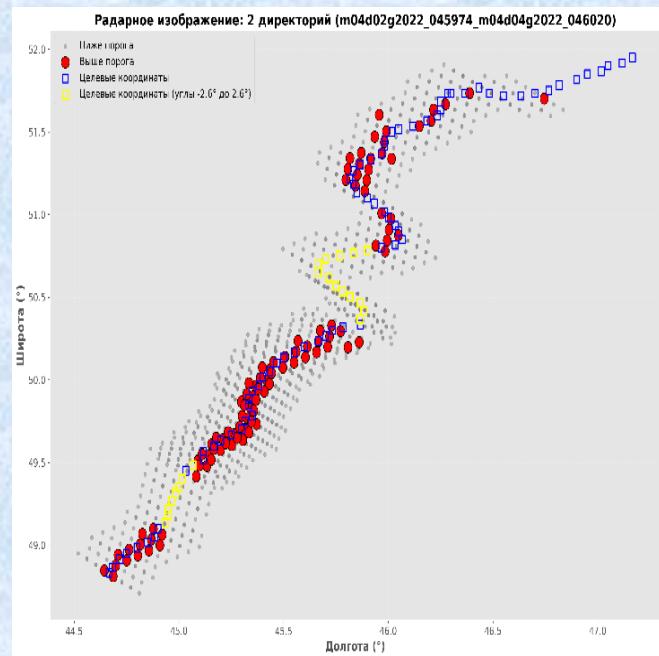
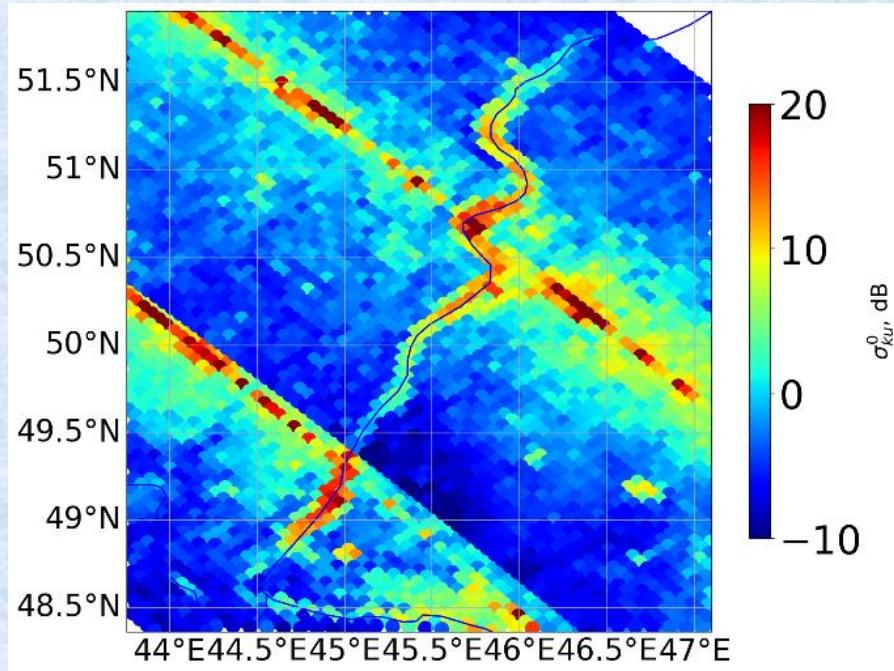
В случае наложения новых данных на старые данные, сохраняется последняя информация. В результате исследуемый объект вне зависимости от размера наблюдается полностью..

Для достаточно медленных процессов, например, формирование или разрушение ледяного покрова использование последовательных изображений не приведет в большим ошибкам.



Последовательные радиолокационные изображения

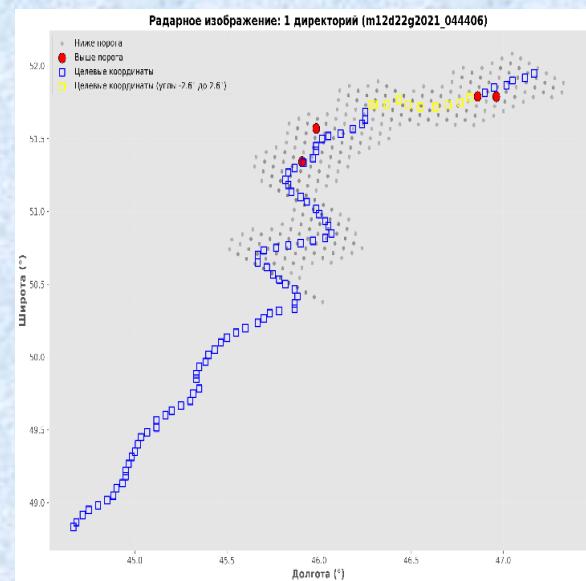
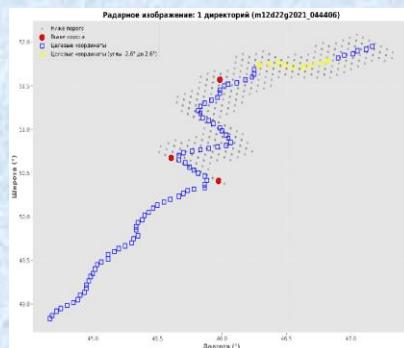
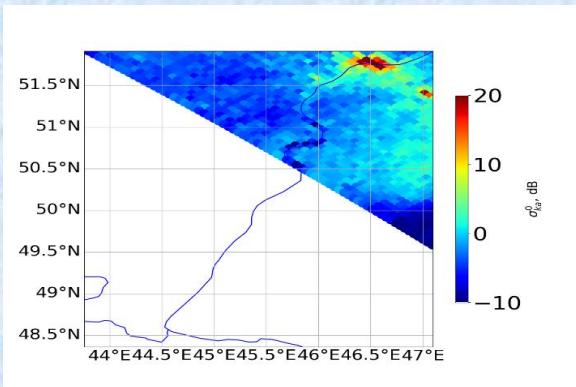
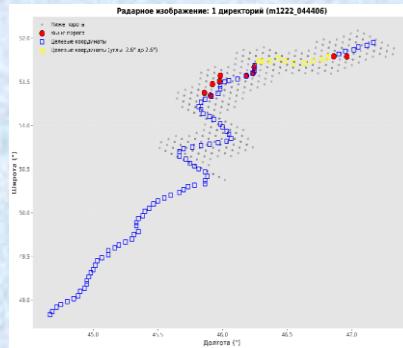
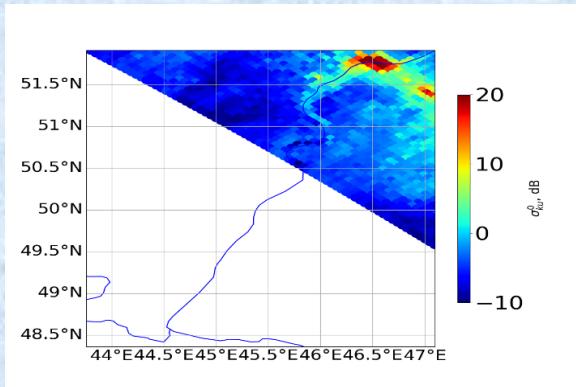
На рисунках приведен пример «наложения» последовательных радиолокационных изображений и обработки данных (формирование результирующих изображений)



На итоговых изображениях для каждого «пикселя» остаются более поздние по времени данные.

Двухчастотный подход

Отраженный сигнал сильно флюктуирует, что приводит к ошибкам в работе алгоритма. Измерения в Ku- и Ka-диапазонах выполняются в одной «точке», поэтому необходимо предложить процедуру «сложения» сигналов, для уменьшения флюктуаций и разработать двухчастотный алгоритм.



Радиолокационное изображение в Ku- и Ka-диапазонах (слева) и обработка данных (в центре) и обработка суммарного изображения $\text{RCS}_{\text{sum}} = (\text{RCS}_{\text{Ku}} + \text{RCS}_{\text{Ka}})/2$.

Заключение

Разработаны алгоритмы для автоматического определения наличия/отсутствия ледяного покрова на внутренних водоемах. В процессе обработки анализируются разрезы радиолокационного изображения по углу падения вдоль траектории полета и вычисляется радиолокационный контраст (вода/суша). В ходе проведенного анализа были определены пороговые значения для каждого угла падения.

Обработка данных для выбранного полигона на р. Волга (между г. Саратов и г. Волгоград) подтвердила работоспособность алгоритмов.

Для наблюдения протяженных объектов предложен способ накопления (объединения) информации от разных радиолокационных изображений и создание результирующего радиолокационного изображения и результатов обработки для всего внутреннего водоема.

В дальнейшем будет разработан двухчастотный алгоритм, что повысит точность алгоритма и позволит работать с внутренними водоемами меньших размеров.