

**Дополнительный алгоритм
корректировки недоверенных решений
при восстановлении направления ветра
со спутника (РФФИ 18-02-01009-а)**

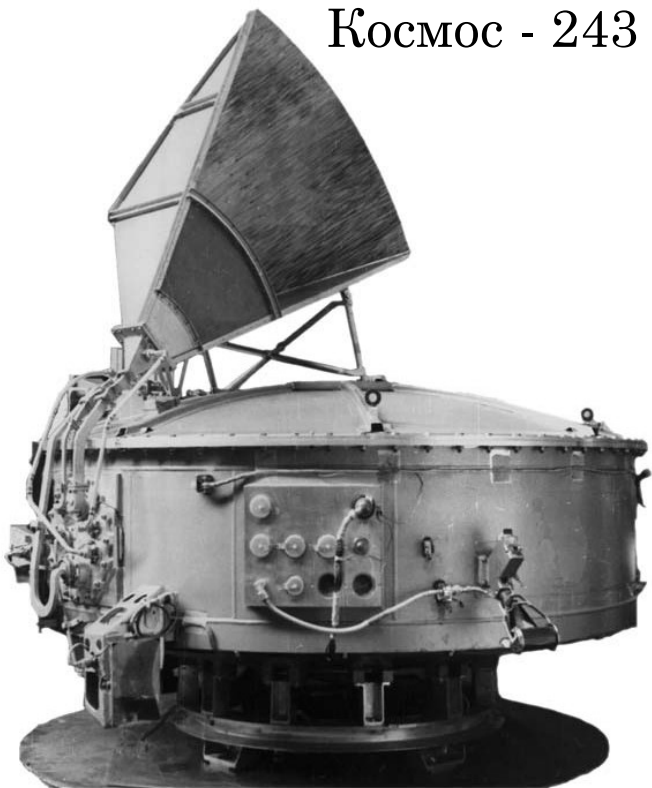


Сазонов Д.С.
Институт космических исследований (ИКИ РАН)

e-mail: sazonov_33m7@mail.ru

ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Космос - 243



Развитие методов дистанционного зондирования Земли из космоса началось во второй половине XX века. Первым прибором стал «Космос-243».

С помощью его радиометров были впервые определены геофизические характеристики:

- атмосферы,
- морской поверхности,
- земных покровов.

Наиболее значимые результаты в данной области были получены в:

- Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН;
- Институте космических исследований РАН;
- Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН;
- Институте прикладной физики РАН.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

В настоящее время данные, получаемые посредством дистанционного зондирования земли из космоса стали незаменимой частью большого количества научных и практических задач.

Дистанционные измерения выполняются в разных частотных диапазонах с помощью активных и/или пассивных методов наблюдения.

- Научные задачи ДЗЗ:
 - Экологические исследования;
 - Климатологические исследования;
 - Фундаментальные исследования;
 - и др.
- Практические задачи ДЗЗ:
 - Прогнозирование погоды;
 - Предупреждение стихийных бедствий;
 - Картирование поверхности;
 - и др.
- Измерения проводятся в следующих диапазонах электромагнитных волн:
 - Видимый;
 - Инфракрасный;
 - Микроволновый.
- Методы измерений:
 - Активные (локаторы);
 - Пассивные (фото- и видеосъемка, радиоизмерения)

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Для глобального исследования и мониторинга системы океан-атмосфера хорошо зарекомендовала себя **микроволновая радиометрия**.

Среди всех используемых для дистанционного зондирования микроволновых частот, именно на частотах от **10** до **40 ГГц** наблюдается сильная взаимосвязь измеренного восходящего радиоизлучения с полем приводного ветра.

Несмотря на большое количество существующих алгоритмов определения поля приводного ветра, Наши зарубежные коллеги ими не делятся и в публикациях они не описаны.

А также остается много вопросов, связанных с точностью предлагаемых алгоритмов.

Микроволновая радиометрия – это измерение собственного восходящего излучения поверхности и атмосферы в диапазоне длин волн от нескольких **миллиметров** до нескольких **метров**.

Достоинства радиометрии:

- возможно проводить круглосуточные измерения;
- относительно низкое поглощение электромагнитного излучения в атмосфере (на некоторых частотах)
- высокая информативность

Точности существующих алгоритмов восстановления поля ветра:

- точность восстановления скорости приводного ветра по радиометрическим измерениям составляет $\sim 1-1,5$ м/с;
- точность определения направление ветра – порядка $\pm 20^\circ$.

АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

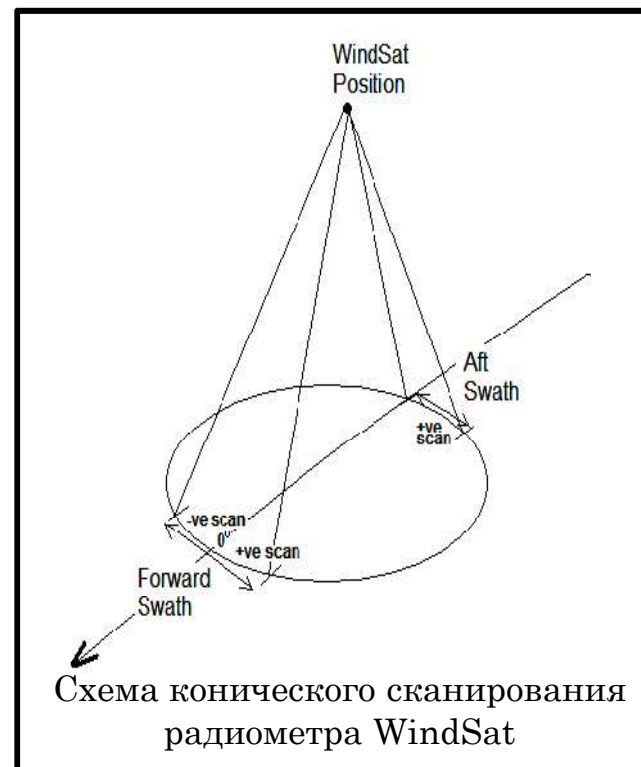
В ИКИ был разработан собственный алгоритм восстановления направления ветра*.

Данный алгоритм основан на измерении третьего параметра Стокса с борта ИСЗ в двух полосах обзора сканирующего радиометра. Тестирование проведено на данных прибора WindSat.

Направление ветра восстанавливается по двум измерениям поверхности, в прямом и обратном направлении зондирования.

Третий параметр Стокса S_3 равен разнице радиояркостных температур измеренных на линейных поляризациях $+45^\circ$ и -45° .

$$S_3 = T_{Br}^{+45} - T_{Br}^{-45}$$



*Сазонов Д.С., Стерлядкин В.В., Кузьмин А.В. Тестирование алгоритма определения поля направления приводного ветра по спутниковым радиополяриметрическим измерениям // Исслед. Земли из космоса., 2018, №6. С.3-12

РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

Для оценки точности разработанного алгоритма были проведены и модельные расчеты и обработка реальных спутниковых измерений.

При решении модельной задачи, даже в условиях зашумленного сигнала, направление ветра восстановлено с высокой точностью:

- корреляция между исходным и восстановленным средним направлением ветра составила практически 1;
- СКО только в ~20% случаев превышает уровень 10° , а это значит, что в 80% случаев направление ветра восстанавливается с точностью $\pm 10^\circ$.

Однако при переходе к анализу реальных измерений, результат восстановления направления ветра ухудшился:

- корреляция между исходным и восстановленным средним направлением ветра составила ~0,65;
- направление ветра только в ~50% случаев восстанавливается с точностью $< \pm 20^\circ$

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

**Разработка дополнительного алгоритма
корректировки восстановленного
направления ветра.**

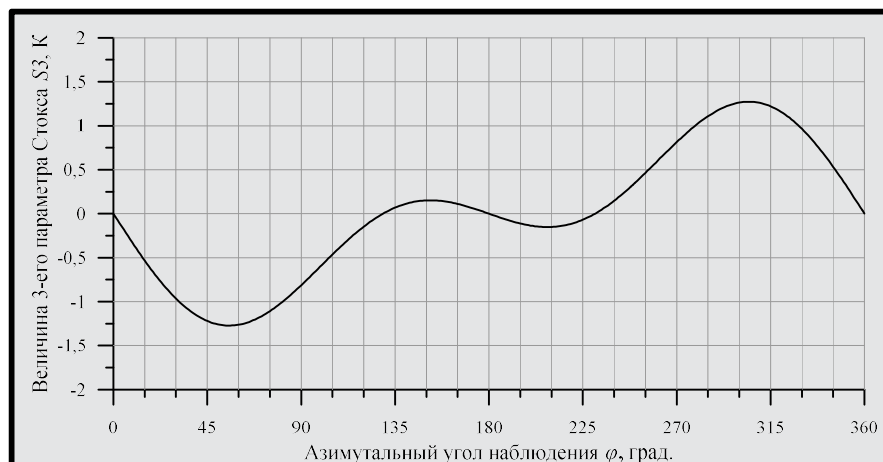
ПРИНЦИП РАБОТЫ АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

Известно, что микроволновое излучение взволнованной водной поверхности обладает некоторой анизотропией. (представленной на данном слайде)

Простыми словами это значит, что при измерении в направлении волнения и поперек излучение несколько отличается и описывается такой квазигармонической зависимостью.

Амплитуда данных азимутальных вариаций мала и составляет порядка полутора градусов, что соизмеримо с погрешностями измерений и калибровок, уровнем помех.

Поэтому решение данной задачи достаточно сложное и требует глубокого понимания физики исследуемого явления.



Типичная зависимость третьего параметра Стокса S_3 от угла между направлением ветра и направлением зондирования для скорости ветра $U_{10} = 10$ м/с и частоты наблюдения 36,5 ГГц.

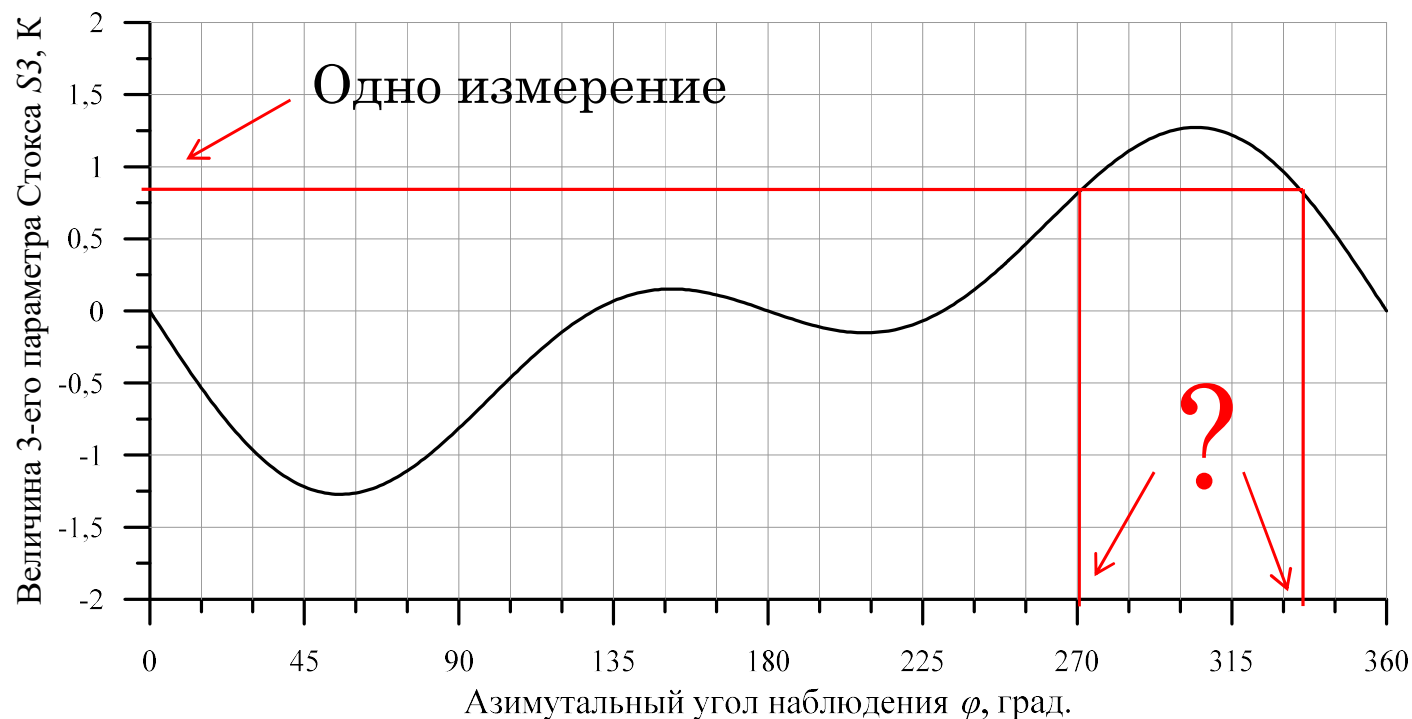
Отметим, что масштаб сигнала $\pm 1,5$ К сравним с чувствительностью измерений $\sigma(S_3) = 0,4 - 0,7$ К.

ПРИНЦИП РАБОТЫ АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

Пример:

По одному измеренному значению определить направление ветра невозможно.

В показанном случае есть два возможных решения, соответствующих одной величине, полученной при измерении.



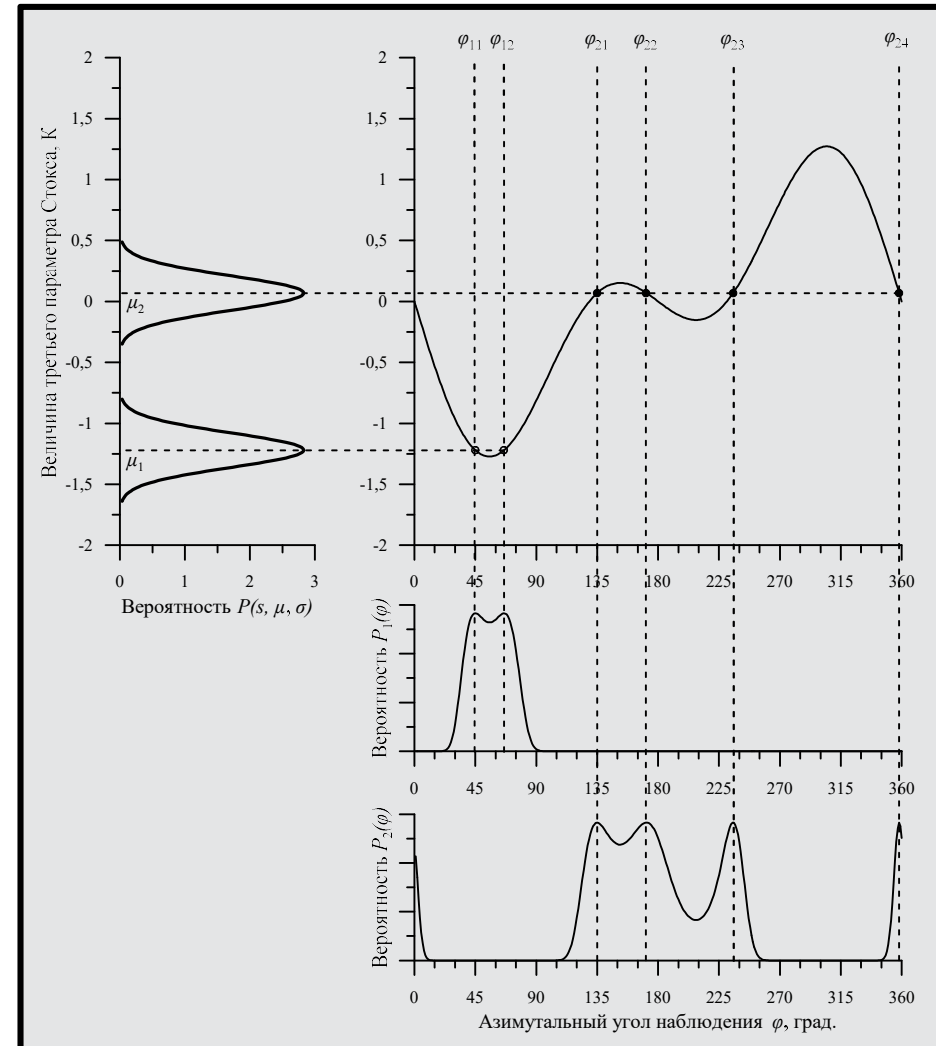
АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

А вот если есть два измерения с одной поверхности, но под разными азимутальными углами наблюдения, то определить направление ветра вполне возможно.

Например:

Возьмем два измерения **S3** и представляет их в виде некоторой функции вероятности, ширина которой определяется всеми имеющимися погрешностями.

Тогда для каждого из измерений мы будем иметь функции возможных направлений ветра.



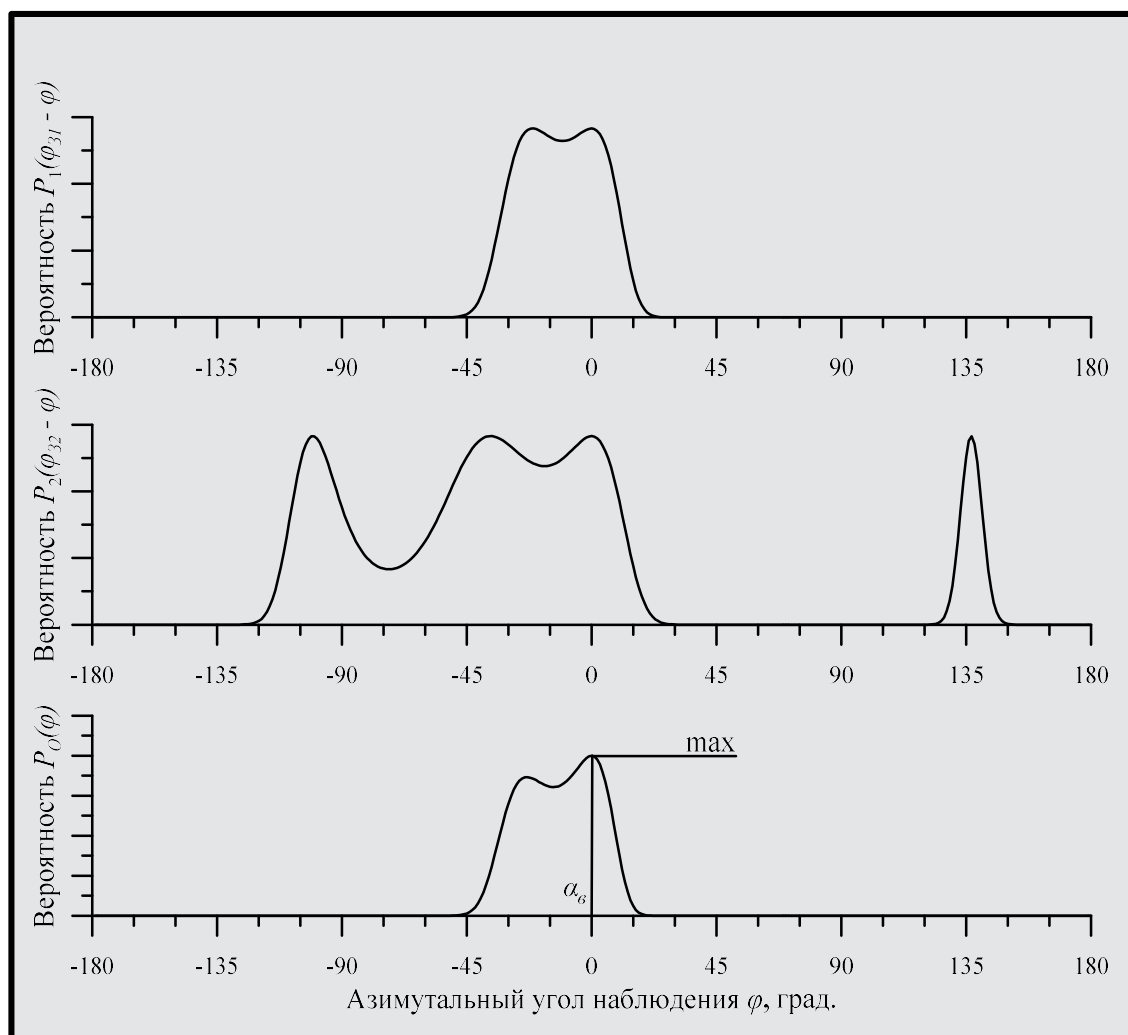
1. Проводим расчет для первого и второго измерения функций вероятности $P_1(s, S31, \sigma)$ и $P_2(s, S32, \sigma)$.

$$P(x, x_{cp}, \delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\delta x)^2}} \exp \left[-\frac{(x - x_{cp})^2}{2\delta x^2} \right]$$

Возможные направления ветра нормируются.

Имея данные об угле наблюдения (φ_{31} и φ_{32}) мы можем привести вероятные направления ветра к нулевому углу зондирования.

И затем перемножив их, по максимуму определим наиболее вероятное направление ветра и оно уже будет одно.



2. Выполняем нормировку вероятностей $P_1(\varphi)$ и $P_2(\varphi)$.

3. Приводим графики к нулевому углу зондирования. Смещаем графики вероятностей $P_1(\varphi)$ на φ_{31} , а $P_2(\varphi)$ на φ_{32} и получаем зависимости $P_1(\varphi_{31} - \varphi)$ и $P_2(\varphi_{32} - \varphi)$.

4. Вычисляем пересечение вероятностей:

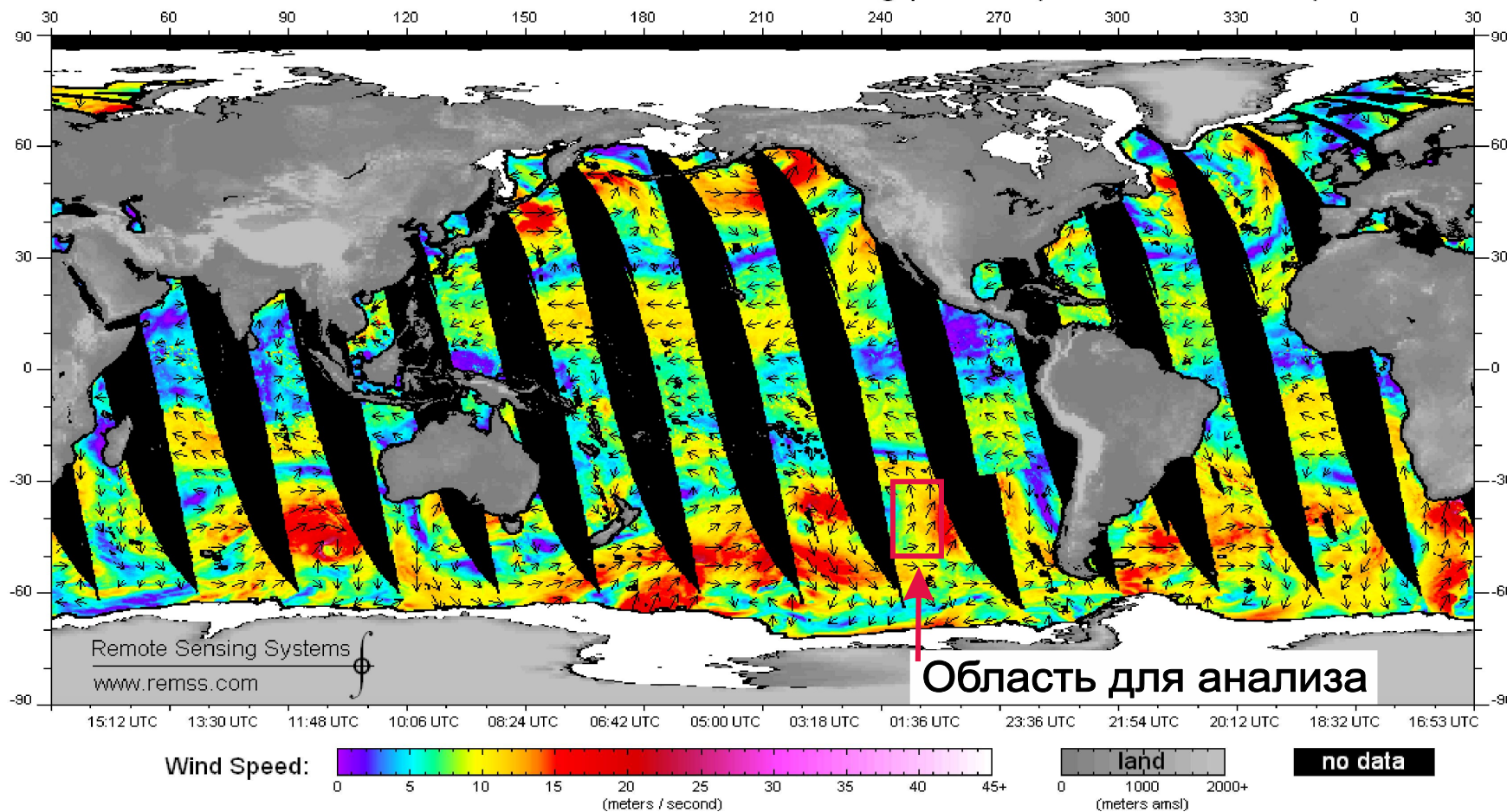
$$P_0(\varphi) = P_1(\varphi_{31} - \varphi) \cdot P_2(\varphi_{32} - \varphi)$$

и по максимальному значению определяем направление ветра:

$$\alpha_0 = \varphi = \max(P_0(\varphi)).$$

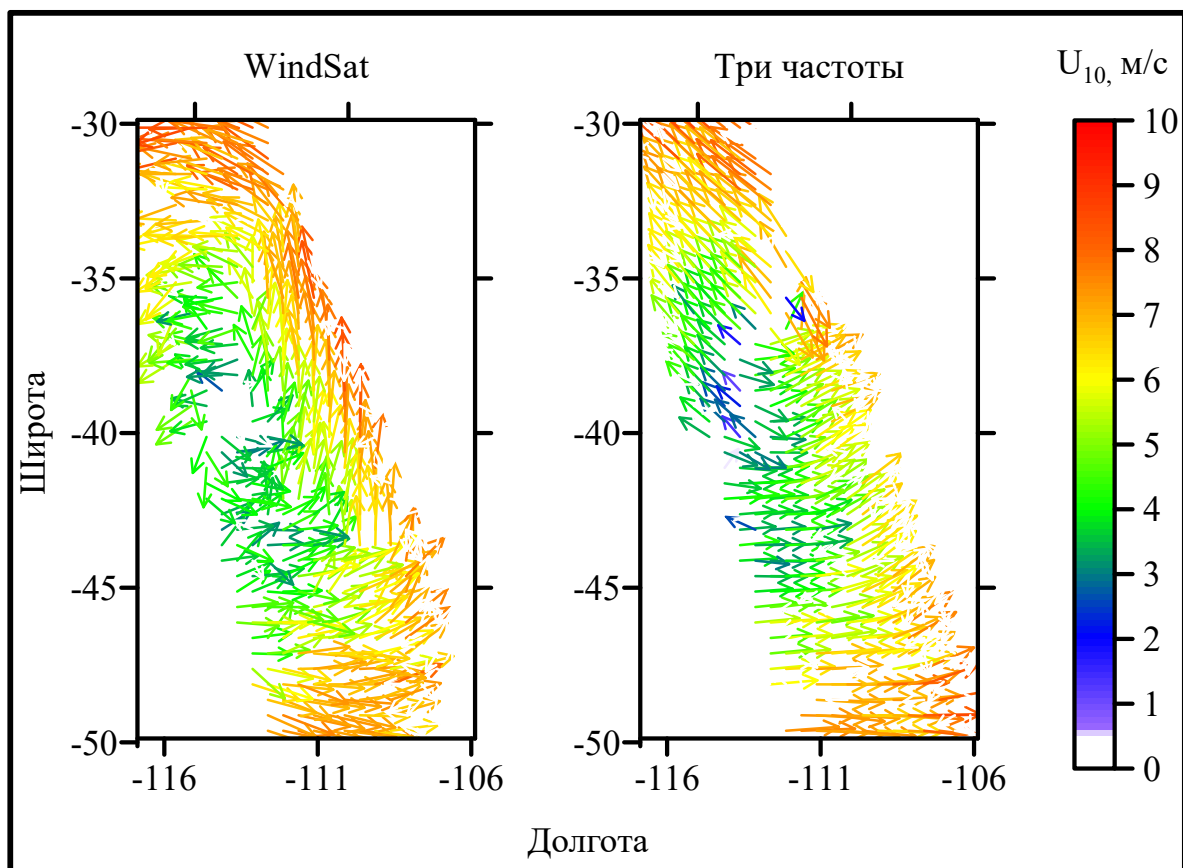
ВЫБОР ОБЛАСТИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМА

WindSat v7.0.1 wind vectors: 2007/04/27 - ascending passes (~18:00 local time) - Global



- Для тестирования алгоритма определения направления ветра были взяты данные за 27 апреля 2007 года.
- На данном слайде показана небольшая область, выбранная для анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ WINDSAT



Результаты восстановления направления ветра представлены на данном слайде в виде цветных векторных карт, цвет соответствует скорости ветра.

Здесь первая карта это результат работы американского алгоритма, вторая – разработанного в ИКИ РАН.

По представленным картам видно, что есть области, где определенное направление ветра коррелировано с данными взятыми с ресурса remss.com, однако есть области где расхождение достаточно сильное.

ПРИЧИНА ОШИБОК ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

Причина возникающих ошибок заключена в виде результирующей функции вероятных направлений ветра.

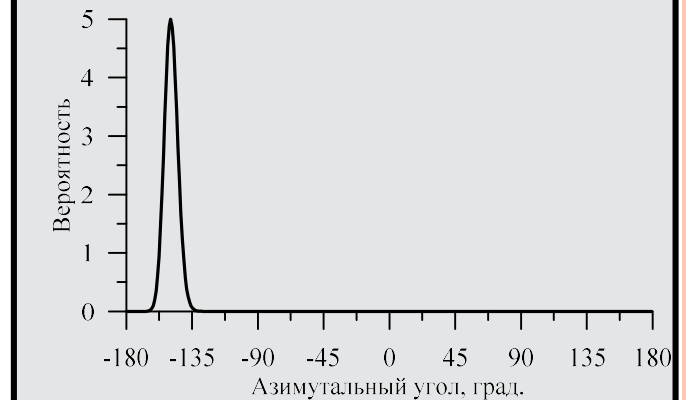
Рассмотрим два случая этих функций, а точнее результирующие вероятности. На графиках изображены вероятности: (1) ошибка по направлению ветра $\sim 3^\circ$ и (2) ошибка $\sim 180^\circ$.

В первом случае видно четкий максимум. Это типичный случай, когда направление ветра восстановлено адекватно и результат с такой функцией вероятности является достоверным.

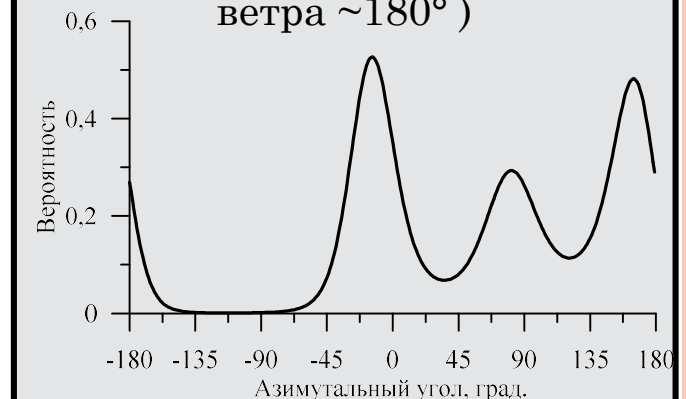
Во втором случае на графике есть три ярко выраженных максимума. Отличие между двумя главными максимумами составляет 180° по направлению, и они одинаковы по уровню. Такой вид тоже является типовым для неопределенности в 180° .

Есть и другие типовые виды, как достоверного решения, так и приводящего к ошибке, однако они похожи на представленные.

Случай 1. Достоверный (ошибка по направлению ветра $\sim 3^\circ$)



Случай 2. Недостоверный (ошибка по направлению ветра $\sim 180^\circ$)



ИЖИ ЗАВИСИМОСТЬ НОРМИРОВАННОЙ РАЗНИЦЫ МАКСИМУМОВ ОТ ОШИБКИ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ВЕТРА

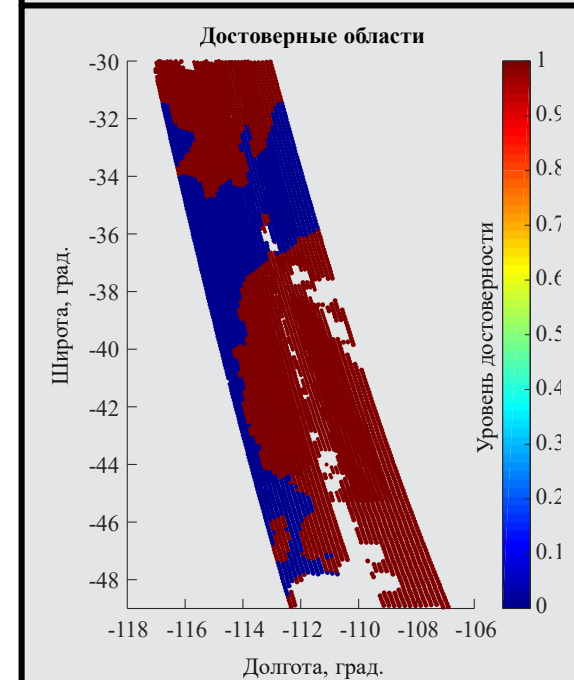
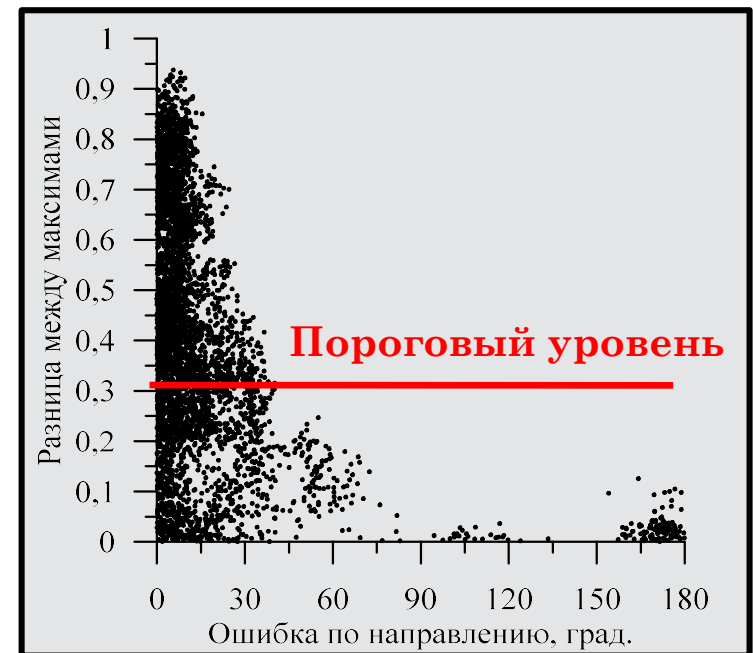
Анализ большого количества функций вероятных направлений ветра как на предыдущем слайде, позволил сделать важный вывод:

Устойчивое достоверное решение получается, когда есть один ярко выраженный максимум.

Если в функции вероятности присутствуют два максимума, то параметром достоверности будет разница между ними. Все разницы были нормированы, таким образом, что их диапазон составляет от 0 до 1, где 1 соответствует самому достоверному случаю.

Из представленного графика видно, что чем больше разница между максимумами, тем меньше ошибка по направлению. Для первого этапа было выбрано пороговое значение 0,3. Если нормированная разница больше 0,3, то результат считается достоверным, если меньше – то недостоверным.

На данном рисунке приведен пример оценки достоверных точек для тестовой области.



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАБОТЫ ИТЕРАЦИОННОГО АЛГОРИТМА ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБОК

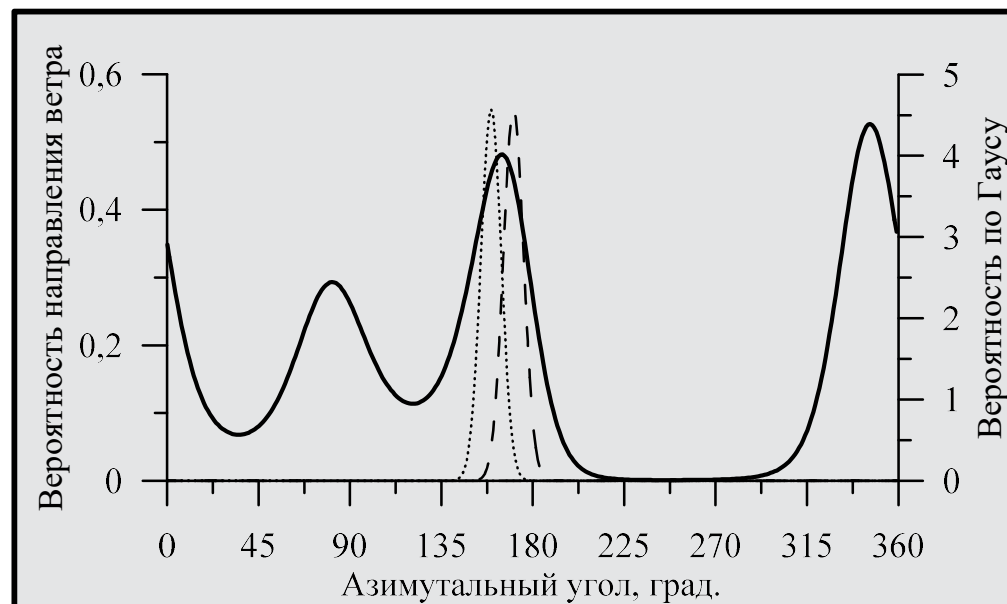
1. Выбор недоверной точки.

2. Поиск достоверных точек в радиусе $0,25^\circ$ по широте и долготе. Если таких точек нет, то на текущем шаге исправления не будет.

3. У найденных достоверных точек для направления ветра рассчитывается функция вероятности по нормальному закону распределения с дисперсией $\sigma = 5^\circ$. Дисперсия выбрана таким образом, чтобы диапазон по правилу 3σ был $\pm 15^\circ$.

4. Полученные функции вероятностей перемножаются. Затем функция нормируется и вычисляется направление ветра как в исходном алгоритме.

5. Повторение пунктов 1-4 пока не будут исправлены все недоверные точки.



ПОРЯДОК ИСПРАВЛЕНИЯ НЕДОСТОВЕРНЫХ РЕШЕНИЙ

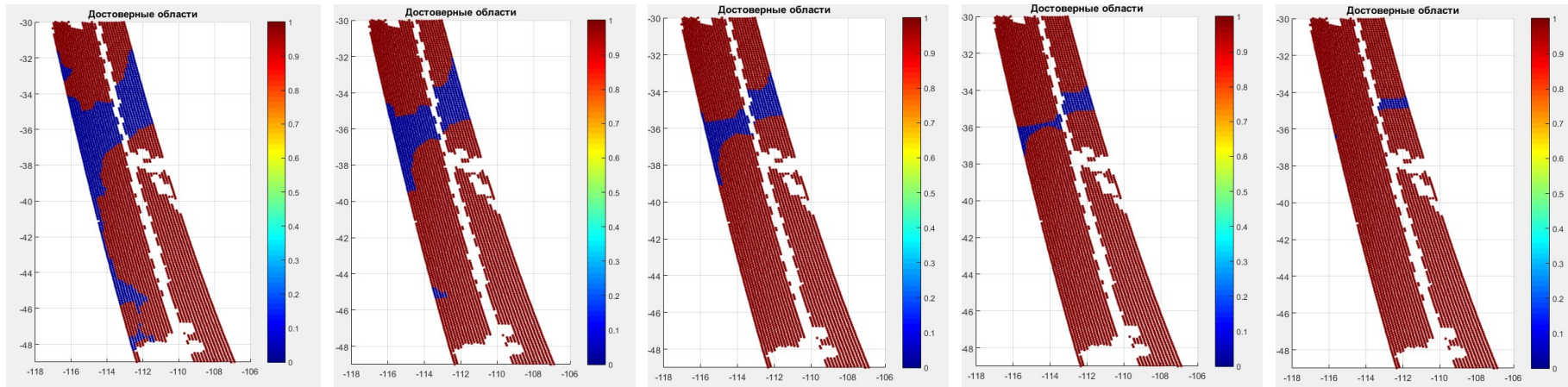
Шаг 1

Шаг 3

Шаг 5

Шаг 7

Шаг 9



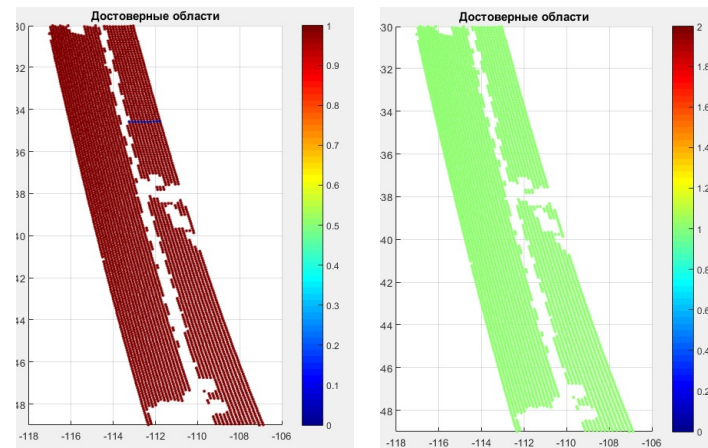
На данном слайде представлена визуальная демонстрация работы итерационного алгоритма по исправлению недостоверных решений.

Для выбранной области потребовалось всего 12 итераций исправления.

Видно, что на каждом шаге количество недостоверных точек уменьшается.

Шаг 11

Шаг 12



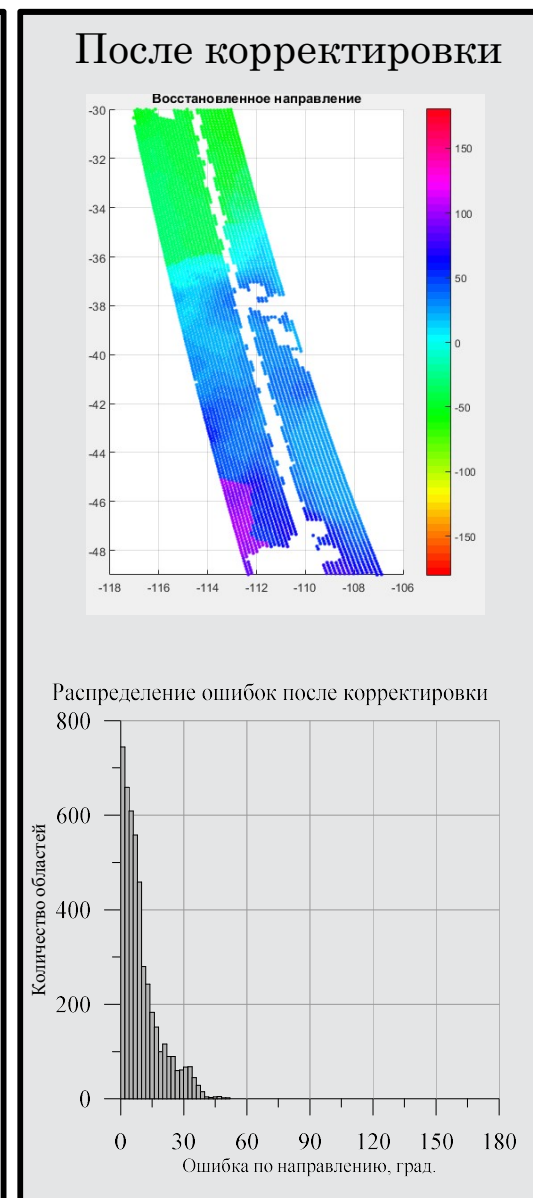
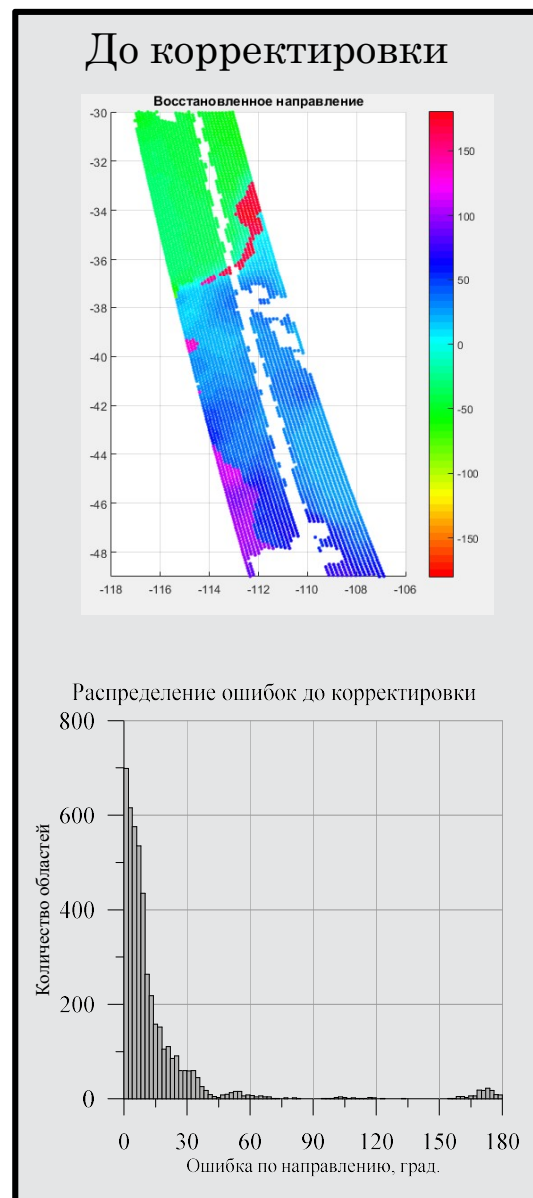
РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате исправлены ошибки, связанные с неопределенностью по направлению (ошибка в 180°), со случайными ошибками измерений третьего параметра Стокса, с чувствительностью радиометра.

На слайде представлены: поле ветра и гистограммы распределения ошибок направления ветра до и после корректировки.

Результатирующие расчеты показывают, что направление ветра восстанавливается адекватно.

После корректировки направление ветра восстанавливается с ошибкой $<10^\circ$ в 65,17% случаев, и с ошибкой $<20^\circ$ в 85,8% случаев.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует сказать, что:

- Нашему коллективу удалось создать реальный алгоритм, позволяющий определять направление ветра с высокой надежностью и точностью.
- Разработанный метод корректировки недостоверных результатов позволяет повысить точность восстановления направления ветра.
- Алгоритм учитывает реальные погрешности измерений яркостных температур, и проверен на численных моделях и реальных данных.
- После корректировки направление ветра восстанавливается с ошибкой $<10^\circ$ в 65,17% случаев, и с ошибкой $<20^\circ$ в 85,8% случаев.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ



ИРИ



20