

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ
ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ
ОКЕАНА И СКОРОСТИ ВЕТРА ПО
РАДИОМЕТРИЧЕСКИМ
ИЗМЕРЕНИЯМ В
КЭ «КОНВЕРГЕНЦИЯ»**



Сазонов Д.С., Садовский И.Н., Кузьмин А.В.

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Sazonov_33m7@mail.ru

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

- Одними из важных задач, которые будут решаться с помощью прибора МИРС, являются задачи определения **температуры поверхности океана (ТПО)** и **скорости приводного ветра**, по данным измерений собственного радиотеплового излучения водной поверхности.
- Температура поверхности океана и скорость приводного ветра являются базовыми параметрами для любой из физических моделей формирования собственного излучения океана, а также крайне важны при решении обратных задач дистанционного зондирования. В практике дистанционного зондирования наиболее перспективным для восстановления ТПО и скорости ветра является диапазон углов падения от ~ 50 до $\sim 60^\circ$ и частотный диапазон от 4 до 40 ГГц.

РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ В РАМКАХ КЭ «КОНВЕРГЕНЦИЯ»

- Измерение температуры поверхности океана (ТПО) с абсолютной точностью **не хуже 1 К.**
- Измерение скорости ветра над морской поверхностью с точностью **не хуже 2 м/с.**

ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

- **Итерационный подход** основан на решение прямой задачи с перебором исходных параметров, которые обеспечивают минимальную разницу между расчетной и измеренной радиояркостной температурой. Минусы данного подхода – длительность и неточности моделей.
- **Нейронные сети** достаточно часто применяются при решении задач дистанционного зондирования. Однако, достаточно сложно подобрать ее конфигурацию и требуется время для переобучения при поступлении новых данных.
- **Построение регрессий** достаточно простой, широко используемый метод, позволяющий быстро вычислять необходимые параметры на основе измерений и корректировать коэффициенты регрессии при получении новых данных.

Таким образом, для определения ТПО и скорости ветра будет применен метод **построения регрессий**.

РЕГРЕССИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ

- Используемые частоты: 10,65, 18,7, 23,8 и 36,5 ГГц.
- Используемые поляризации – вертикальная (**V**) и горизонтальная (**H**).

Регрессия № 1 (ТПО и скорость ветра):

$$F = A_1 + A_2 \cdot T_{10.65V} + A_3 \cdot T_{18.7V} + A_4 \cdot T_{36.5V} + A_5 \cdot T_{10.65H} + A_6 \cdot T_{18.7H} + A_7 \cdot T_{36.5H}$$

Регрессия № 2 (ТПО и скорость ветра):

$$F = A_1 + A_2 \cdot T_{10.65V} + A_3 \cdot T_{18.7V} + A_4 \cdot T_{36.5V} + A_5 \cdot T_{10.65H} + A_6 \cdot T_{18.7H} + A_7 \cdot T_{36.5H} + \\ + A_8 \cdot (T_{10.65V})^2 + A_9 \cdot (T_{18.7V})^2 + A_{10} \cdot (T_{36.5V})^2 + A_{11} \cdot (T_{10.65H})^2 + A_{12} \cdot (T_{18.7H})^2 + A_{13} \cdot (T_{36.5H})^2.$$

Регрессия № 3 (ТПО и скорость ветра):

$$F = A_1 + A_2 \cdot T_{10.65V} + A_3 \cdot T_{18.7V} + A_4 \cdot T_{36.5V} + A_5 \cdot T_{10.65H} + A_6 \cdot T_{18.7H} + A_7 \cdot T_{36.5H} + \\ + A_8 \cdot (T_{10.65V})^2 + A_9 \cdot (T_{18.7V})^2 + A_{10} \cdot (T_{36.5V})^2 + A_{11} \cdot (T_{10.65H})^2 + A_{12} \cdot (T_{18.7H})^2 + A_{13} \cdot (T_{36.5H})^2 + \\ + A_{14} \cdot (T_{10.65V})^3 + A_{15} \cdot (T_{18.7V})^3 + A_{16} \cdot (T_{36.5V})^3 + A_{17} \cdot (T_{10.65H})^3 + A_{18} \cdot (T_{18.7H})^3 + A_{19} \cdot (T_{36.5H})^3.$$

Регрессия № 4 (скорость ветра):

$$F = A_0 + A_1 T_{10.65V} + A_2 T_{10.65H} + A_3 \ln[280 - T_{18.7V}] + A_4 \ln[280 - T_{18.7H}] + \\ + A_5 \ln[280 - T_{23.8V}] + A_6 \ln[280 - T_{23.8V}].$$

Коэффициенты множественной регрессии

- Регрессии для функций 1-4 строятся по модельному расчету радиоярких температур, выполненных на основе реанализа.
- С помощью матричного способа были вычислены коэффициенты регрессий.

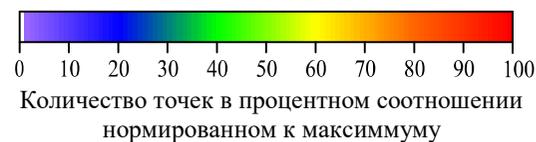
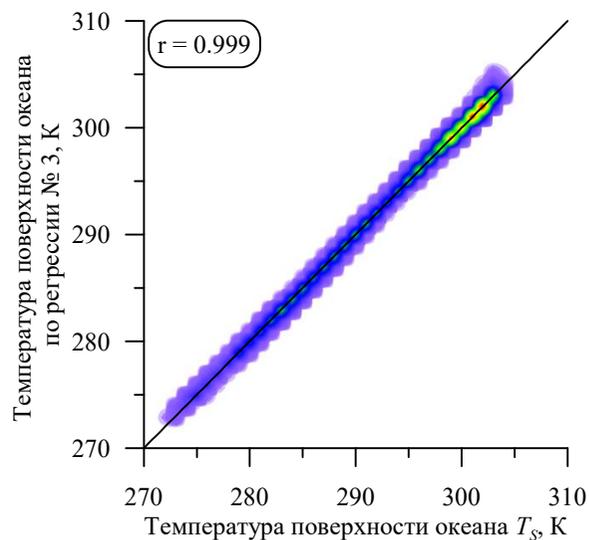
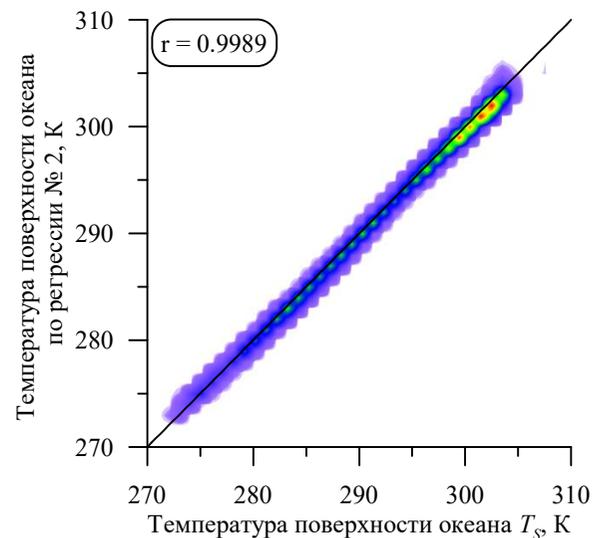
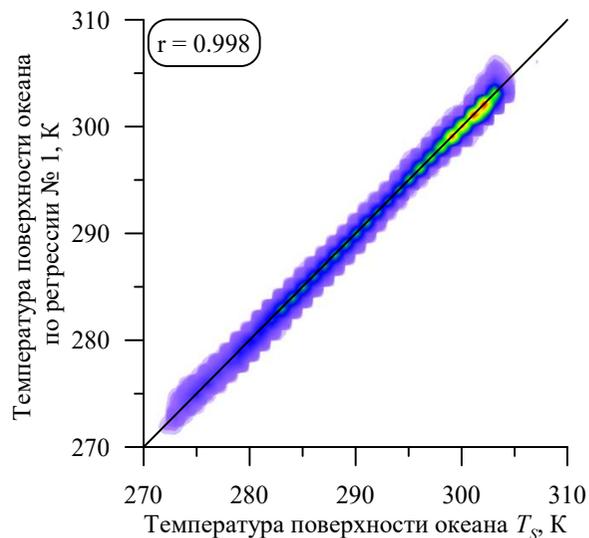
Коэффициенты множественной регрессии для ТПО.

№ коэф.	№ 1	№ 2	№ 3
1	153,638	394,137	0
2	5.386	5,936	0
3	-4.803	-5,075	0
4	0.918	-1,104	-0,234
5	-3.564	-4,57	4,279
6	2.774	2,584	0,897
7	-0.438	0,097	0,738
8	-	-0,002	0,0297
9	-	0,0014	-0,0242
10	-	0,0035	0,0061
11	-	0,0048	-0,077
12	-	0,00021	0,0133
13	-	-0,00083	-0,00705
14	-	-	-5,380e-05
15	-	-	4,002e-05
16	-	-	-1,157e-05
17	-	-	0,000250
18	-	-	-2,979e-05
19	-	-	1,477e-05

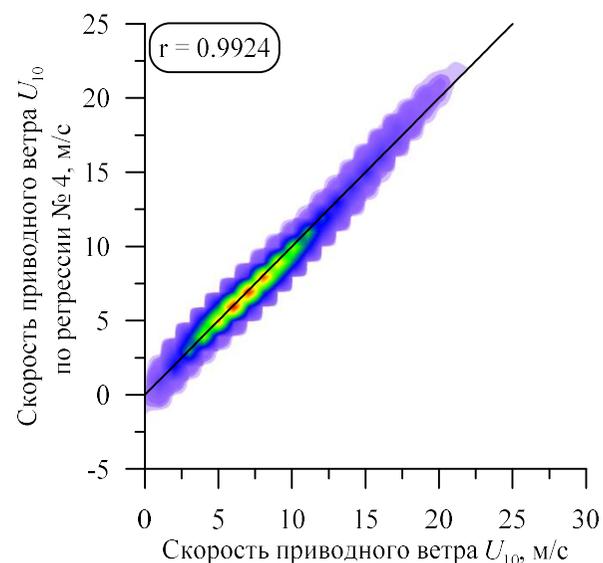
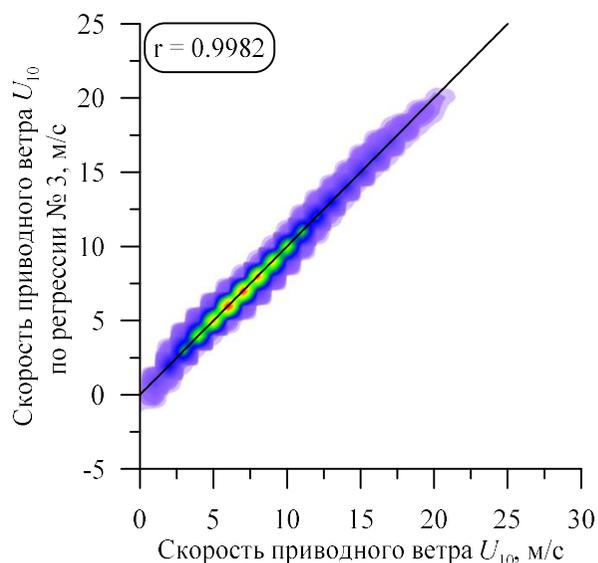
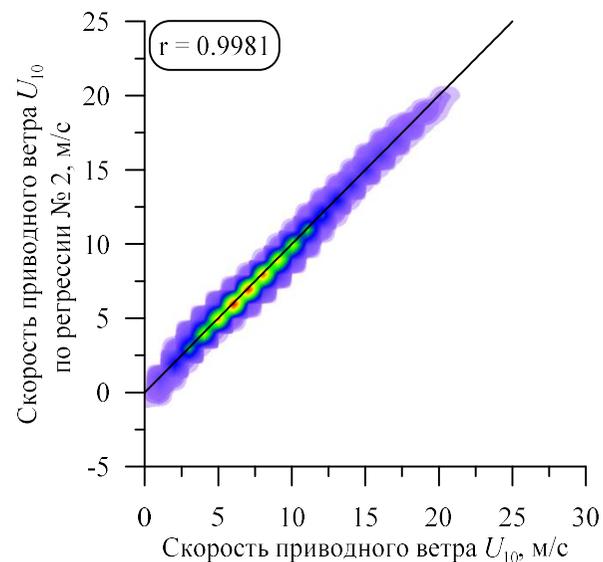
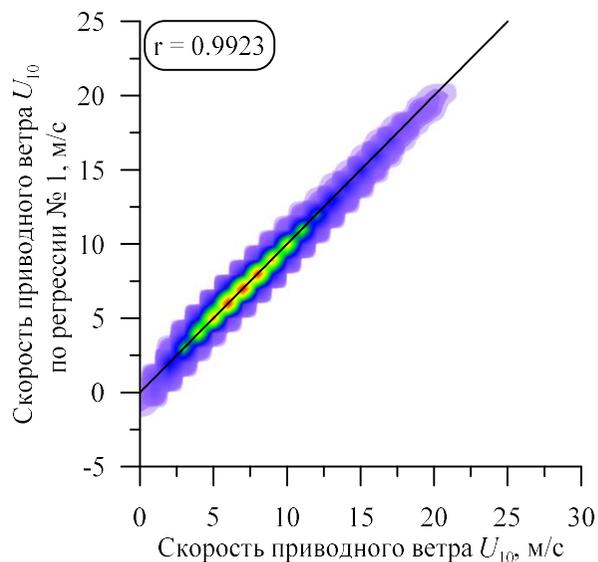
Коэффициенты множественной регрессии для скорости ветра.

№ коэф.	№ 1	№ 2	№ 3	№4
1	153,500	152,460	0	-467,289
2	-0,4047	-4,7238	0	0,0997
3	-0,4454	-0,4572	0	1,1373
4	-0,6713	1,4778	-1,5037	190,136
5	0,8318	3,6331	6,7586	-80,633
6	0,3488	0,5508	0,1060	-44,804
7	0,1930	-0,4025	-0,3270	-
8	-	0,0140	-0,0165	-
9	-	-0,0022	-0,0032	-
10	-	-0,0028	0,0101	-
11	-	-0,0149	-0,0454	-
12	-	0,0009	0,0041	-
13	-	0,0004	-0,0002	-
14	-	-	6,57E-05	-
15	-	-	-1,33E-06	-
16	-	-	-1,82E-05	-
17	-	-	9,86E-05	-
18	-	-	-7,00E-06	-
19	-	-	9,61E-07	-

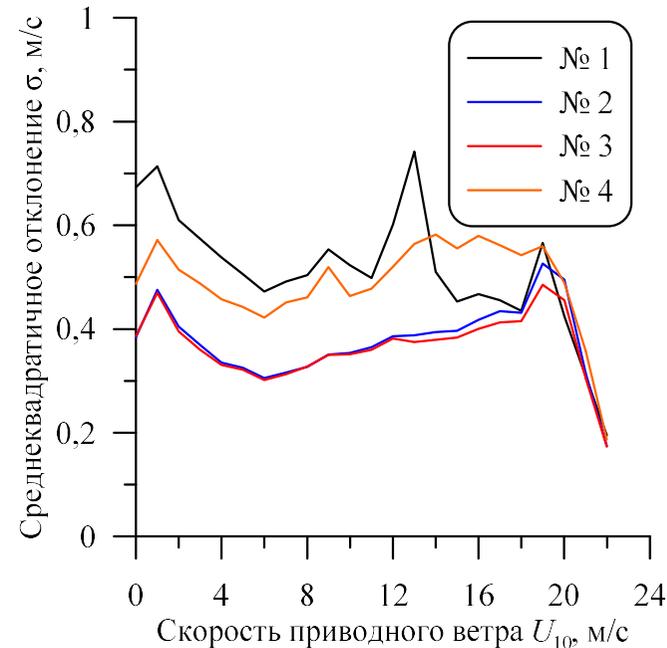
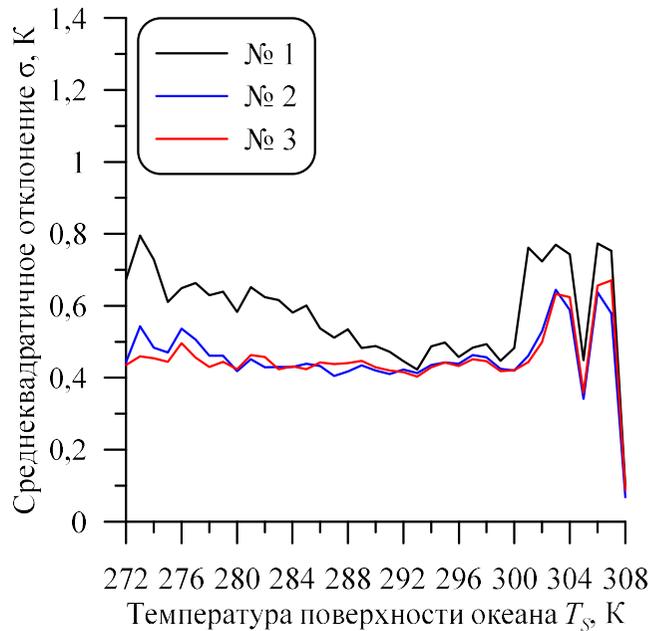
КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ РАСЧЕТОМ ПО РЕГРЕССИОННЫМ ФУНКЦИЯМ № 1-3 И ДАННЫМИ ПО ТПО ИЗ РЕАНАЛИЗА



КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ РАСЧЕТОМ ПО РЕГРЕССИОННЫМ ФУНКЦИЯМ № 1-4 И ДАННЫМИ ПО СКОРОСТИ ВЕТРА ИЗ РЕАНАЛИЗА



СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОЕ ОТКЛОНЕНИЕ ТПО И СКОРОСТИ ВЕТРА



- СКО для ТПО и U_{10} в регрессиях по функциям № 2 и 3 практически не отличаются и составляют уровень $\sim 0,5$ К и $\sim 0,4$ К, следовательно нет смысла усложнять модель регрессии и использовать объясняющие переменные в третьей степени.
- Таким образом, можно составить регрессионное соотношение, используя частоты 10,65, 18,7 и 36,5 ГГц, для восстановления ТПО и U_{10} , при этом адекватный результат дает регрессия № 2 в которой объясняющие переменные имеют показатели степени 1 и 2.

ПРОВЕРКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ МНОЖЕСТВЕННОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ.

- Уравнение № 2 адекватно связывает радиояркостные температуры с ТПО и U_{10} и имеет достаточно простой вид.
- Необходимо проверить коэффициенты регрессии по уровню значимости с целью убрать из уравнения № 2 факторы, влияние которых незначительно, либо полностью отсутствует. Это упростит вид регрессионного уравнения.
- Результаты проверки показали, что для скорости ветра результирующее уравнение не изменится, т.к. все коэффициенты обладают статистической значимостью:

$$U_{10} = A_1 + A_2 \cdot T_{10.65V} + A_3 \cdot T_{18.7V} + A_4 \cdot T_{36.5V} + A_5 \cdot T_{10.65H} + A_6 \cdot T_{18.7H} + A_7 \cdot T_{36.5H} + A_8 \cdot (T_{10.65V})^2 + A_9 \cdot (T_{18.7V})^2 + A_{10} \cdot (T_{36.5V})^2 + A_{11} \cdot (T_{10.65H})^2 + A_{12} \cdot (T_{18.7H})^2 + A_{13} \cdot (T_{36.5H})^2.$$

- Для ТПО 7, 8, 9 и 12-ый коэффициенты статистически незначимы и могут быть убраны из уравнения регрессии без потери качества модели:

$$T_S = A_1 + A_2 \cdot T_{10.65V} + A_3 \cdot T_{18.7V} + A_4 \cdot T_{36.5V} + A_5 \cdot T_{10.65H} + A_6 \cdot T_{18.7H} + A_7 \cdot (T_{36.5V})^2 + A_8 \cdot (T_{10.65H})^2 + A_9 \cdot (T_{36.5H})^2.$$

ПОГРЕШНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТПО И СКОРОСТИ ВЕТРА

- Погрешность восстановления поля ТПО и U_{10} с обеспеченностью в 67% будет определяться по формуле:

$$\delta F = \left[\left(\frac{\partial F}{\partial T_{10.65V}} \right)^2 \cdot \Delta \tau^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial T_{10.65H}} \right)^2 \cdot \Delta \tau^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial T_{18.7V}} \right)^2 \cdot \Delta \tau^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial T_{18.7H}} \right)^2 \cdot \Delta \tau^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial T_{36.5V}} \right)^2 \cdot \Delta \tau^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial T_{36.5H}} \right)^2 \cdot \Delta \tau^2 \right]^{1/2}.$$

где $\Delta \tau$ – чувствительность радиометра на соответствующей измерениям частоте (0,375, 0,495 и 0,315 соответственно для 10,65, 18,7 и 36,5 ГГц).

- Результаты расчетов показали, что с обеспеченностью в 67% погрешность определения скорости ветра по радиополяриметрическим измерениям составит в среднем $\delta U_{10} = 1,2$ м/с в диапазоне скоростей 1-20 м/с.
- Погрешность определения ТПО составит $\delta T_s \approx 2,5$ К. Конечно, это предварительная оценка и точность восстановления поля ТПО может быть улучшена. Например, если разделить данные по климатическим зонам, на экваториальную ($\pm 30^\circ$ широты) и умеренную (от $\pm 30^\circ$ до $\pm 60^\circ$ широты), то погрешности определения поля ТПО будут порядка 1 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- В ходе выполнения работы были построены и проверены регрессионные соотношения для дистанционного восстановления ТПО и скорости ветра.
- Была проверена статистическая значимость коэффициентов регрессии.
- Выполнен расчет погрешностей восстановления ТПО и скорости ветра на основе реальных измерений из космоса и с помощью модельных расчетов по реанализу.
- Полученные результаты свидетельствуют о том, что скорость ветра может быть восстановлена с точностью **не хуже 2 м/с** и ТПО с точностью **не хуже 1К**.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ



13