

---

---

**КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ,  
СИСТЕМЫ И ПРОГРАММЫ ИЗК**

---

---

**КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ “КОНВЕРГЕНЦИЯ”.  
ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКЕАНА  
ПО РАДИОИЗМЕРЕНИЯМ НА ЧАСТОТАХ 10.65, 18.7 И 36.5 ГГц**

© 2020 г. Д. С. Сазонов<sup>а</sup>, \*, И. Н. Садовский<sup>а</sup>, А. В. Кузьмин<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

*\*e-mail: sazonov\_33m7@mail.ru*

Поступила в редакцию 01.11.2019 г.

В настоящей работе представлен регрессионный подход к задаче восстановления температуры поверхности океана (ТПО) по радиометрическим измерениям микроволнового радиометра-спектрометра (МИРС) в космическом эксперименте (КЭ) “Конвергенция” на частотах 10.65, 18.7 и 36.5 ГГц. Отличительной особенностью предлагаемого регрессионного подхода является использование ограниченного набора частот – 10.65, 18.7 и 36.5 ГГц с вертикальной и горизонтальной поляризацией на каждой частоте. В работе приведено обоснование выбора регрессионного соотношения с квадратичными членами, а также проведено моделирование задачи по восстановлению ТПО на основе реальных измерений из космоса с помощью прибора WindSat и выполнено сравнение с реанализом. Оценка точности определения ТПО показала, что возможно добиться погрешности порядка 1К, и это подтверждается теоретическим расчетом погрешностей измерений.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, радиояркостьная температура, температура поверхности океана, микроволновой радиометр, микроволновое излучение, моделирование, регрессионное соотношение, космический эксперимент “Конвергенция”

**DOI:** 10.31857/S0205961420010108

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование системы “океан–атмосфера” является очень важным, так как в ней происходит множество процессов оказывающих большое влияние на природу нашей планеты. Например, это энергообмен между океаном и атмосферой, перенос тепла и влаги, зарождение и эволюция циклонов (Шарков, 2010) и другие процессы. Наиболее эффективным методом глобального наблюдения данной системы является дистанционное зондирование Земли из космоса.

За последние годы было запущено большое количество искусственных спутников Земли с разнообразным оборудованием дистанционного зондирования. Эффективность использования получаемых с помощью них данных в области мониторинга состояния поверхности нашей планеты и в исследованиях процессов ее взаимодействия с атмосферой непрерывно растет. Глобальные измерения геофизических параметров посредством микроволновых радиометров предоставляют основную информацию для исследователей в различных областях науки. Ежедневные измерения восходящего излучения океана и последующее определение таких основных параметров, как температура поверхности океана, скорость приводного ветра,

паросодержание в атмосфере, водозапас облаков, интенсивность осадков и солёность поверхности, используется учеными для изучения и понимания процессов Земной системы.

Сейчас существует большое количество микроволновых приборов дистанционного зондирования Земли. Например, SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) (Kunee et al., 2008), TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) – TMI (TRMM Microwave Imager), WindSat (Gaiser et al., 2004), ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder), GMI (Global Precipitation Measurement Microwave Imager) (Draper et al., 2015) и другие. К сожалению, эти приборы являются иностранными. Российские приборы дистанционного зондирования ограничены серией МТВЗА (модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы) (Барсуков и др., 2011; Успенский и др., 2016). С 5 июля 2019 г. функционирует новый прибор серии МТВЗА на спутнике Метеор-М. Предшествующие варианты этого прибора, к сожалению, уже не работают. Кроме того, особенностью приборов МТВЗА является угол падения в 65°, в отличие от (в среднем) 53° для зарубежных приборов. Такой угол наблюдения не позволяет решать некоторые важные задачи и является недостатком этих приборов (Болдырев и др., 2008). Оче-

видно, что надо разрабатывать собственные системы дистанционного зондирования, как минимум, аналогичные и не уступающие по своим характеристикам зарубежным аналогам.

Одна из систем дистанционного зондирования разрабатывается в рамках космического эксперимента (КЭ) “Конвергенция”. Целью КЭ “Конвергенция” является исследование механизмов генезиса и эволюции крупномасштабных кризисных атмосферных процессов типа тропических циклонов и среднеширотных ураганов как одних из основных элементов в формировании глобального массо- и влагообмена в системе океан–атмосфера, измерение абсолютных радиояркостных температур системы атмосфера–океан тропиков в диапазоне 6...220 ГГц, определение детальных профилей температуры и влажности атмосферы, проведение исследований по круглосуточному обнаружению вспышек молний, определение зон грозовой деятельности (Шарков, 2017; Шарков и др., 2018).

Среди перечня работ в КЭ “Конвергенция”, планируемого на российском сегменте международной космической станции (РС МКС), есть задача восстановления ТПО по данным измерения собственного радиотеплового излучения водной поверхности с помощью прибора МИРС. Задача восстановления ТПО не является новой, однако остается важной (Шарков, Покровская, 2010). Этому вопросу посвящено много работ, и в последнее время исследования в данном направлении сосредоточены на повышении точности определения данного параметра (Gentemann et al., 2010; Wentz, 1992). Проведение КЭ позволит отработать оптимальные алгоритмы восстановления ТПО и создать соответствующие программное обеспечение, а так же провести валидацию результатов измерений путем сопоставления с независимыми метеорологическими данными и данными других датчиков.

Таким образом, основной целью данной работы является разработка регрессионного алгоритма восстановления ТПО по радиометрическим измерениям прибора МИРС на частотах 10.65, 18.7 и 36.5 ГГц и оценка его точности.

#### ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА ПО РАДИОИЗМЕРЕНИЯМ

В практике дистанционного зондирования наиболее перспективным для восстановления ТПО является диапазон углов падения от  $\sim 50^\circ$  до  $\sim 60^\circ$ . При соответствующем наборе частот, поляризаций и способов комплексирования использование таких углов наблюдения позволяет получить достаточно полную информацию о ТПО (Кутуза и др., 2016). Сама задача восстановления ТПО является частным случаем обобщенной обратной задачи

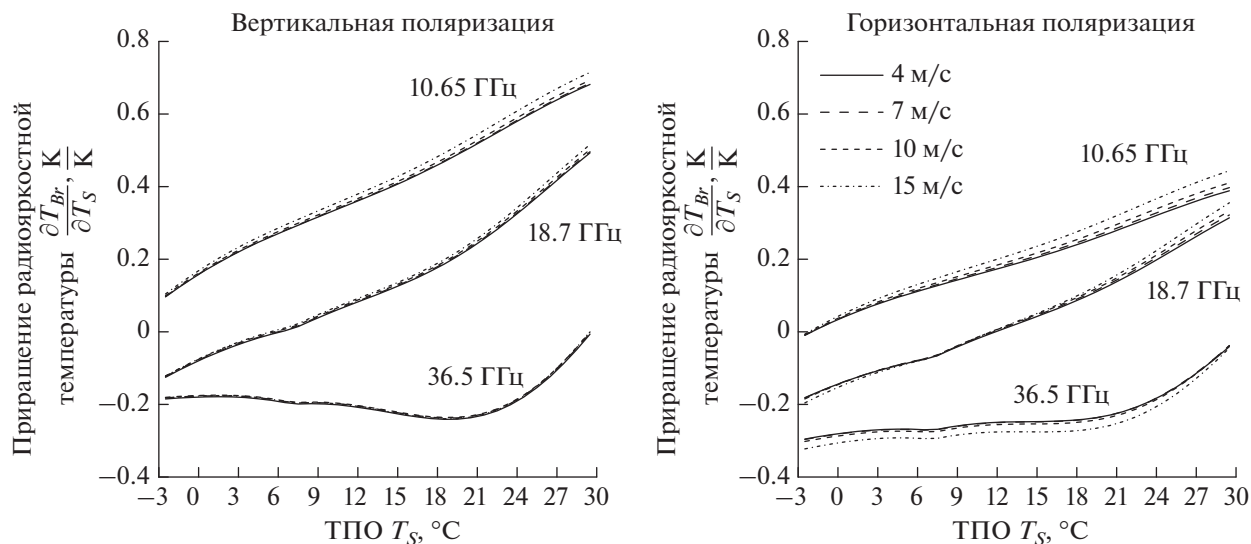
дистанционного зондирования. С точки зрения математики задача определения различных геофизических параметров системы “океан–атмосфера” по измерениям характеристик радиотеплового излучения сводится к решению так называемой фундаментальной системы уравнений (Степаненко и др., 1987):

$$T_{Br}^i = F_{Br}^i(x_1, x_2, \dots, x_n) + e_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

где  $T_{Br}^i$  – радиояркостная температура или другая измеряемая характеристика потока радиоизлучения, принимаемого на  $i$ -ом канале,  $m$  – число каналов. Набор переменных  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – совокупность искомым геофизических параметров, а  $e_i$  – общая погрешность метода на  $i$ -ом канале, включающая погрешность как используемой модели, так и самих радиометрических наблюдений. В зависимости от специфики задачи набор геофизических параметров может меняться. Однако, получение для такой системы аналитического решения во всем диапазоне изменения геофизических параметров не представляется возможным потому что, радиояркостная температура системы “океан–атмосфера” является довольно сложной нелинейной функцией от многих параметров.

Наиболее часто для восстановления ТПО применяются способы, основанные на линеаризации соответствующих зависимостей для радиояркостной температуры. При наличии нескольких переменных для однозначного устойчивого решения требуется соответствующее число линейных независимых уравнений. Обычно их получают при обработке данных одновременных измерений радиояркостной температуры на нескольких специально подобранных по длине волны и поляризации каналах. Также широко применяются итерационные методы решения систем нелинейных уравнений и различные комбинации корреляционно-статистических и физических (детерминистских) подходов.

На данном этапе достартовой подготовки целесообразно использовать именно корреляционно-статистический подход для демонстрации возможности выбранного оборудования к восстановлению поля ТПО. Для восстановления ТПО необходимо знать поведение функций радиационно-температурной чувствительности  $(\partial T_{Br} / \partial T_s)$  для выбранных частот и поляризаций. Поскольку для радиометрических частот в диапазоне 10–40 ГГц, находящихся в “окнах прозрачности”, влияние атмосферных параметров становится значительным по сравнению с диапазоном 4–10 ГГц, то для учета влияния атмосферы необходимо использовать современные сложные модели, с помощью которых можно оценить влияние интегральных характеристик атмосферы на измеренную со спутника радиояркостную температуру.



**Рис. 1.** Модельный расчет радиационно-температурной чувствительности поверхности океана на частотах 10.65, 18.7 и 36.5 ГГц при угле зондирования 49.2°, 48.7° и 48.8° соответственно. Соленость воды 35‰, интегральное паросодержание 41.4 мм, безоблачная атмосфера.

Для восстановления поля ТПО используются радиометрические каналы с вертикальной и горизонтальной поляризацией на частотах 10.65, 18.7 и 36.5 ГГц. На рис. 1 представлен модельный расчет радиационно-температурной чувствительности поверхности океана на указанных частотах по модели (Meissner, Wentz, 2012). По данным графикам стоит отметить, что на частотах 10.65 и 18.7 ГГц для обеих поляризаций чувствительность велика в области температур более 20°C, однако на частоте в 36.5 ГГц чувствительность падает с повышением ТПО и к 30°C становится практически нулевой. С другой стороны, в области температур от -3 до 20°C  $\partial T_{Br}/\partial T_S$  для 36.5 ГГц сравнима с чувствительностью радиометра (0.315K) на горизонтальной и несколько хуже на вертикальной поляризации. В области 6°C на вертикальной поляризации (18.7 ГГц) и в области 12°C на горизонтальной поляризации  $\partial T_{Br}/\partial T_S = 0$ , однако на двух других частотах имеет уровни порядка 0.3 и 0.2K.

При использовании трех радиометрических частот с двумя поляризациями во всем диапазоне ТПО всегда есть две частоты, на которых радиационно-температурная чувствительность  $\partial T_{Br}/\partial T_S$  соизмерима с чувствительностью радиометрических приемников. Таким образом, можно сделать вывод, что совместное использование частот 10.65, 18.7 и 36.5 ГГц позволяет в определенной мере учесть вклад атмосферы и уменьшить погрешность восстановления параметров поверхности.

#### ВЫБОР РЕГРЕССИОННОГО СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА

Как было указано ранее, на данном этапе целесообразно использовать корреляционно-статистический подход, основанный на составлении регрессионного соотношения для восстановления поля ТПО. Одно из таких соотношений предложено в работе (Mitnik, Mitnik, 2003) для восстановления температуры поверхности Океана при обработке данных AMSR. Соответствующее регрессионное соотношение имеет вид:

$$T_S = A_0 + A_1 T_{Br}^{6.9H} + A_2 T_{Br}^{6.9V} + A_3 T_{Br}^{10.7V} + A_4 (T_{Br}^{6.9V})^2. \quad (2)$$

Как видно из представленного соотношения, для восстановления ТПО используются результаты измерений яркостных температур на частотах 6.9 ГГц (вертикальная и горизонтальная поляризация) и 10.7 ГГц (вертикальная поляризация). По оценкам авторов, включение квадратичного члена  $(T_{Br}^{6.9V})^2$  в итоговое выражение позволяет повысить точность алгоритма в пределах нескольких процентов. Используемые в представленном выражении коэффициенты разделены по региональному признаку (полярные районы, тропические широты и обобщенные значения). По оценкам авторов точность предложенного алгоритма варьируется в пределах от 0.56°C для тропических широт до 1.01°C для полярных районов.

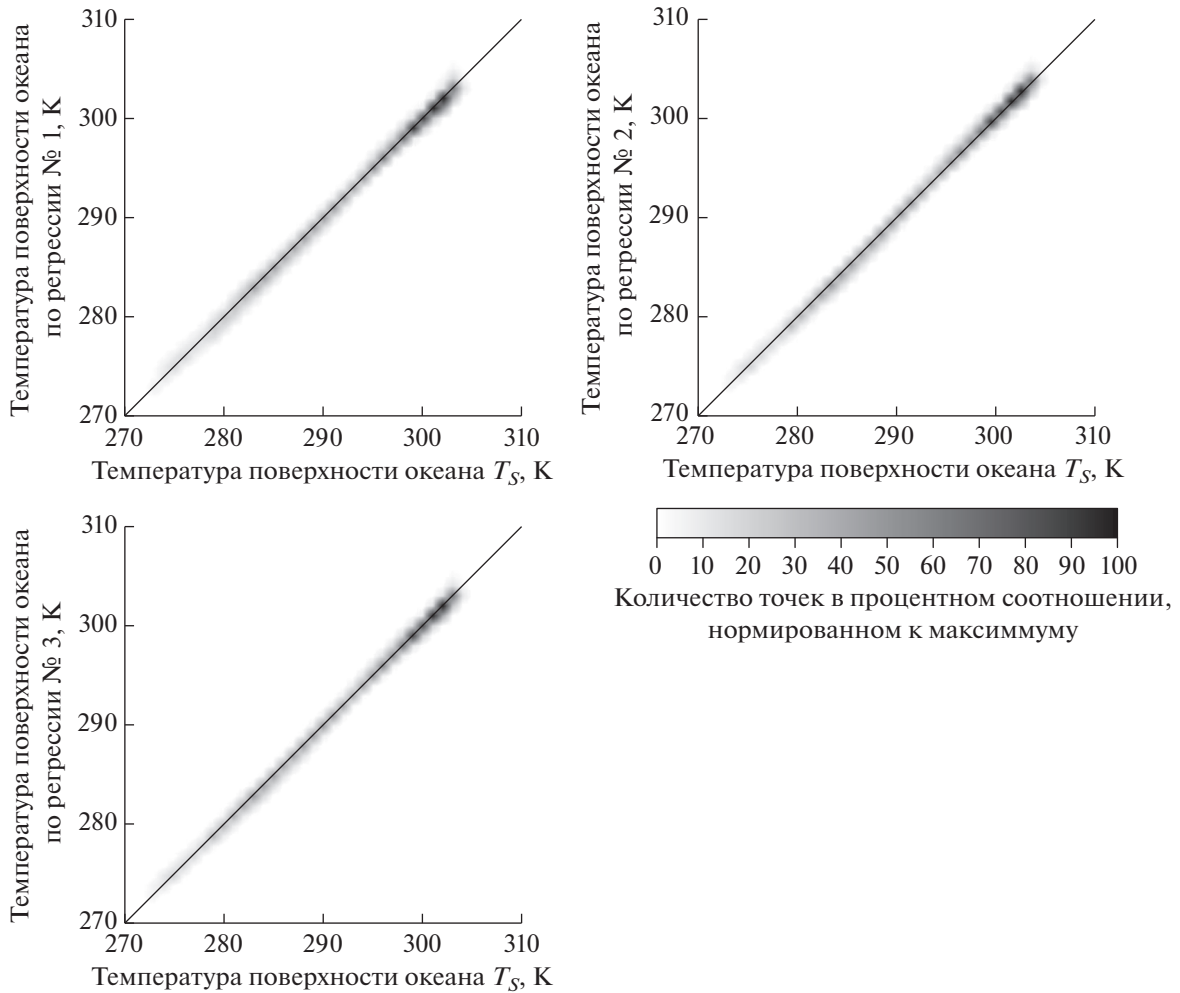


Рис. 2. Корреляция между расчетом по регрессионным функциям №№ 1–3 и данными по ТПО из реанализа.

МИРС не имеет в своем составе радиометра с рабочей частотой 6.9 ГГц и, следовательно, предложенная функция (2) не применима для восстановления ТПО. В связи с этим предложено разработать регрессионное соотношение, которое обеспечит восстановление указанного параметра, используя доступные радиометрические каналы (частоты), а именно: 10.65, 18.7 и 36.5 ГГц (вертикальная и горизонтальная поляризация).

Для того чтобы определить какой результирующий вид примет функция регрессии, целесообразно рассмотреть несколько ее вариантов, в которых присутствуют все указанные радиометрические каналы. Таких вариантов будет три, а используемые функции будут иметь вид (3):

Регрессия № 1:

$$T_S = A_1 + A_2 T_{Br}^{10.65V} + A_3 T_{Br}^{18.7V} + A_4 T_{Br}^{36.5V} + A_5 T_{Br}^{10.65H} + A_6 T_{Br}^{18.7H} + A_7 T_{Br}^{36.5H}. \quad (3.1)$$

Регрессия № 2:

$$T_S = A_1 + A_2 T_{Br}^{10.65V} + A_3 T_{Br}^{18.7V} + A_4 T_{Br}^{36.5V} + A_5 T_{Br}^{10.65H} + A_6 T_{Br}^{18.7H} + A_7 T_{Br}^{36.5H} + A_8 (T_{Br}^{10.65V})^2 + A_9 (T_{Br}^{18.7V})^2 + A_{10} (T_{Br}^{36.5V})^2 + A_{11} (T_{Br}^{10.65H})^2 + A_{12} (T_{Br}^{18.7H})^2 + A_{13} (T_{Br}^{36.5H})^2. \quad (3.2)$$

Регрессия № 3:

$$T_S = A_1 + A_2 T_{Br}^{10.65V} + A_3 T_{Br}^{18.7V} + A_4 T_{Br}^{36.5V} + A_5 T_{Br}^{10.65H} + A_6 T_{Br}^{18.7H} + A_7 T_{Br}^{36.5H} + A_8 (T_{Br}^{10.65V})^2 + A_9 (T_{Br}^{18.7V})^2 + A_{10} (T_{Br}^{36.5V})^2 + A_{11} (T_{Br}^{10.65H})^2 + A_{12} (T_{Br}^{18.7H})^2 + A_{13} (T_{Br}^{36.5H})^2 + A_{14} (T_{Br}^{10.65V})^3 + A_{15} (T_{Br}^{18.7V})^3 + A_{16} (T_{Br}^{36.5V})^3 + A_{17} (T_{Br}^{10.65H})^3 + A_{18} (T_{Br}^{18.7H})^3 + A_{19} (T_{Br}^{36.5H})^3. \quad (3.3)$$

### Результат составления регрессионных соотношений

Все объясняющие переменные заводятся в матрицу  $X$  (см. приложение) и вычисляются коэффициенты регрессии (табл. 1). Результаты расчета по составленным регрессиям приведены на рис. 2. На рисунке представлена корреляция между расчетом по регрессионным функциям №№ 1–3 и данными по ТПО из реанализа. По представленным графикам очевидно наличие сильной взаимосвязи между ТПО и расчетом по регрессионным соотношениям. Так как корреляция для всех функций  $\sim 1$ , то для выбора регрессии используется оценка среднеквадратичного отклонения (рис. 3).

Из графика на рис. 3 можно сделать вывод, что, во-первых, все предложенные регрессии адекватно описывают связь радиотеплового излучения поверхности океана с ТПО. Во-вторых, СКО для ТПО в регрессиях по функциям №№ 2 и 3 практически не отличаются и составляют уровень  $\sim 0.5K$  во всем интервале температур, и следовательно нет смысла усложнять модель регрессии и использовать объясняющие переменные в третьей степени. Общим выводом по данному пункту будет то, что можно составить регрессионное соотношение, используя частоты 10.65, 18.7 и 36.5 ГГц, для восстановления ТПО, при этом адекватный результат дает регрессия № 2 в которой объясняющие переменные имеют показатели степени 1 и 2. Следующим шагом является проверка статистической значимости параметров множественной линейной регрессии.

### ПРОВЕРКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ МНОЖЕСТВЕННОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

Как было описано в предыдущем разделе, уравнение № 2 адекватно связывает радиояркие температуры с ТПО и имеет достаточно простой вид. Далее выполняется проверка коэффициентов регрессии по уровню значимости с целью убрать из уравнения № 2 факторы, влияние которых незначительно либо полностью отсутствует, что еще упростит вид регрессионного уравнения.

Параметры для расчета  $t$ -критерия (см. приложение):  $n = 1474539$  экспериментальных значений,  $p = 12$  факторов переменных, следовательно  $k = n-p-1$ , при такой большой выборке равно 1474526. Выберем из таблицы критических точек распределения Стьюдента значение  $t(k, a = 0.001) = 3.29$ .

Проведем расчет статистических параметров для регрессионного соотношения № 2 (табл. 2):  $S^2 = 53.93$  для коэффициентов  $A_i$ .

Из табл. 2 можно показать, что в случае построения регрессии для ТПО  $t$ -критерий ( $t_a$ ) для 7, 8, 9

Таблица 1. Коэффициенты множественной регрессии

Номер коэффициента	№ 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

и 12-го коэффициента меньше  $t(k, a = 0.001) = 3.29$ , следовательно, данные объясняющие переменные статистически незначимы и могут быть убраны из уравнения регрессии без потери каче-

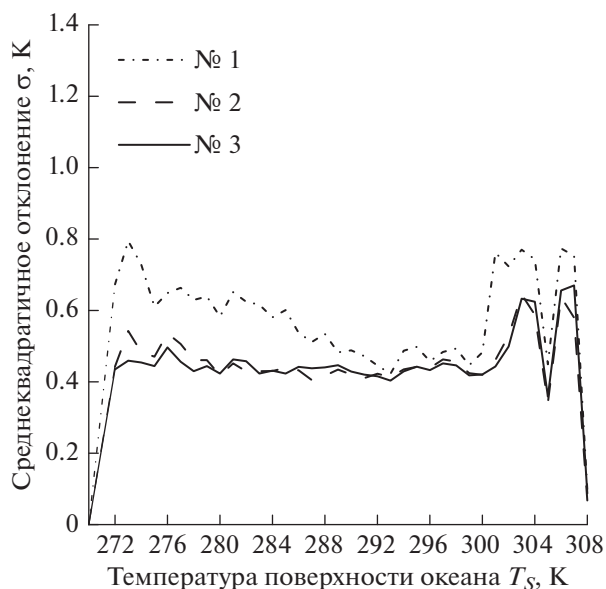


Рис. 3. Среднеквадратичное отклонение ТПО, рассчитанной по регрессионным соотношениям №№ 1–3.

**Таблица 2.** Параметры  $t$ -статистики для регрессионного уравнения № 2

№ коэф.	$A_i$	$z$	$m_a$	$t_a$
1	394.137	3.616	13.966	28.221
2	5.936	0.000805	0.2084	28.674
3	-5.075	0.000803	0.20818	-24.803
4	-1.104	0.000511	0.16607	-6.539
5	-4.57	0.000113	0.07837	-58.084
6	2.584	7.553e-05	0.06383	40.353
7	0.097	3.553e-05	0.04378	2.149
8	-0.002	7.407e-09	0.00063	-2.826
9	0.0014	4.697e-09	0.0005	2.594
10	0.0035	2.623e-09	0.00038	9.406
11	0.0048	2.988e-09	0.0004	11.984
12	0.00021	7.620e-10	0.0002	1.034
13	-0.00083	2.851e-10	0.00012	-6.753

**Таблица 3.** Окончательные коэффициенты множественной регрессии

№ коэф.	$A_i$	№ коэф.	$A_i$
1	415.9443	6	2.668471
2	5.280652	7	0.004221
3	-4.54835	8	0.004214
4	-1.32923	9	-0.0007
5	-4.43357		

ства модели. Результирующие уравнения будут иметь следующий вид:

$$T_S = A_1 + A_2 T_{Br}^{10.65V} + A_3 T_{Br}^{18.7V} + A_4 T_{Br}^{36.5V} + A_5 T_{Br}^{10.65H} + A_6 T_{Br}^{18.7H} + A_7 (T_{Br}^{36.5V})^2 + A_8 (T_{Br}^{10.65H})^2 + A_9 (T_{Br}^{36.5H})^2. \quad (4)$$

**Таблица 4.** Коэффициенты регрессии для восстановления поля ТПО

№ коэфф.	$A_i$	№ коэфф.	$A_i$	№ коэфф.	$A_i$
1	45.3085	4	-0.1921	7	-0.0021
2	3.6227	5	-2.2167	8	-0.0015
3	-0.2894	6	0.3942	9	0.0013

### ПРИМЕР ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕГРЕССИИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЯ ТПО ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО РАДИОМЕТРА WINDSAT

Вычисление коэффициентов регрессионного соотношений (4) и его применение для восстановления поля ТПО произведено по реальным спутниковым измерениям прибором WindSat за 27 апреля 2007 года. Используемые данные были взяты с интернет ресурса <http://www.ifremer.fr/opendap/cerdap1/oceanflux/satellite/11/coriolis/windsat> в виде полей, предварительно откалиброванных радиоярких температур для восходящих и нисходящих частей полета спутника Coriolis. В качестве известного (обучающего) поля температуры поверхности были взяты данные реанализа (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=pl/>) за тот же день.

Для обучения регрессии (4) использовались данные WindSat измеренные при восходящих витках. В результате обучения были получены коэффициенты регрессии (табл. 4). Корреляция между полем ТПО и результатом обучения приведена на рис. 4 слева. Коэффициент корреляции составил 0.98.

Используя полученные коэффициенты (табл. 4) для данных с прибора WindSat измеренных при нисходящих витках было проведено восстановление поля ТПО. Корреляция между полем ТПО из реанализа и результатом восстановления ТПО по тестовой выборке приведена на рис. 4 справа. Коэффициент корреляции составил 0.96.

На рис. 5 приведены значения среднеквадратичного отклонения ТПО для обучающей и тестовой выборки. По данному графику видно, что значения СКО для диапазона температур 270...290 К составляют в среднем около 2К, а для диапазона 290...305 К—1.5 К. Высокий уровень СКО температуры можно объяснить тем, что данные реанализа получены для фиксированного времени 12:00 по Гринвичу, в то время как экспериментальные измерения выполняются в течение всего дня (24 ч). Это приводит к тому, что реальная ТПО отличается от данных реанализа и при увеличении временной разницы — отличие увеличивается.

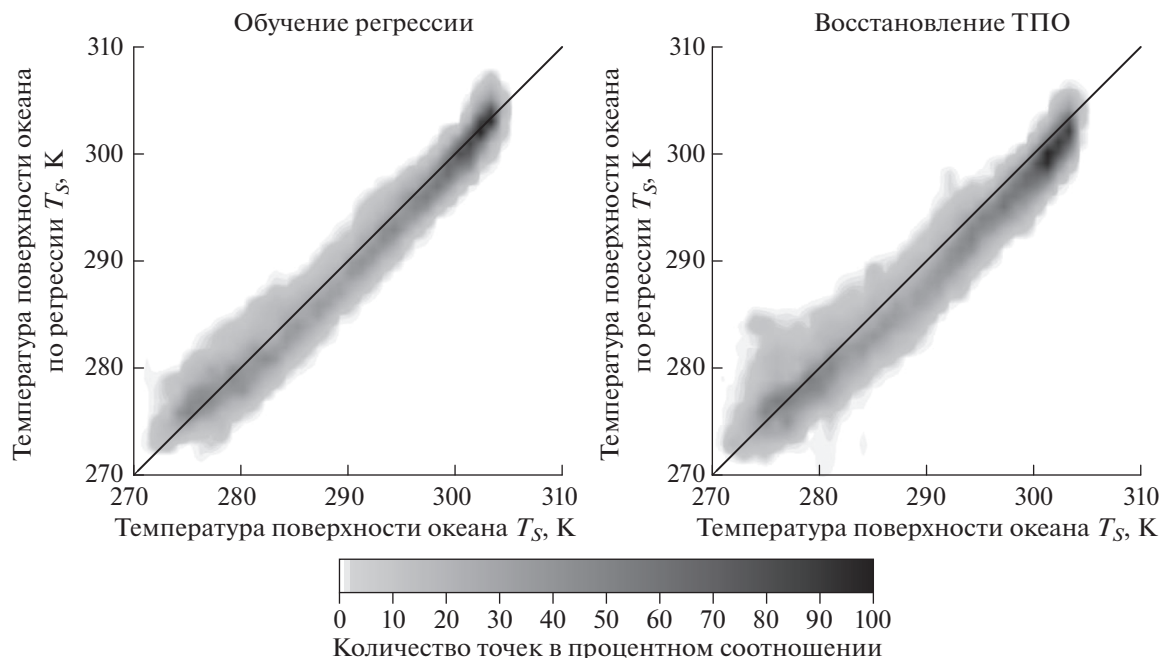


Рис. 4. Слева – корреляция между полем ТПО из реанализа и расчетом по регрессии (3.2) – обучающая выборка. Справа – корреляция между полем ТПО из реанализа и результатом восстановления ТПО по тестовой выборке.

Способов повышения точности восстановления поля ТПО может быть несколько. К ним относятся: восстановление ТПО в различных климатических зонах (тропические, умеренные и полярные широты), предварительное разделение наблюдений на сцены с различным уровнем осадков и применение отдельного набора коэффициен-

тов регрессии (3.2) для этих сцен. Кроме этого можно применить итерационные алгоритмы с уточнением и корректировкой восстанавливаемых параметров. Восстановленное поле ТПО представлено на рис. 6.

#### ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЯ ТПО

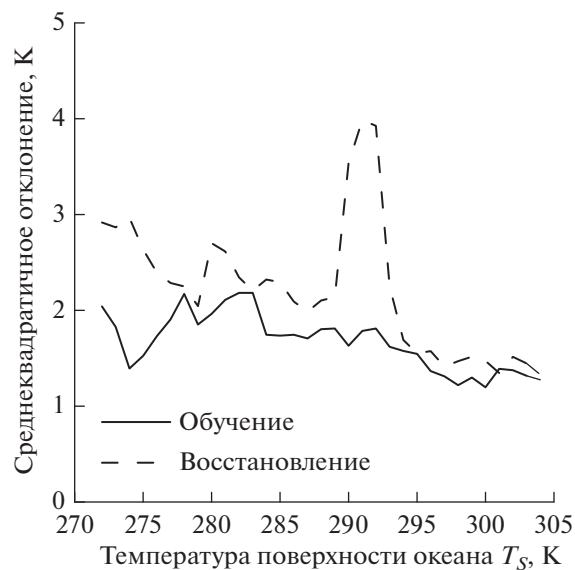


Рис. 5. Оценка среднеквадратичного отклонения ТПО для обучающей и тестовой выборок.

Погрешности в данной задаче можно разделить на погрешности измерений, связанные с чувствительностью радиометров, и погрешности методические, связанные с выбором регрессионного соотношения. Погрешности измерений мы можем оценить по минимуму с обеспеченностью 67% с помощью выражения 5. Необходимо отметить, что чувствительности  $\tau_i$  радиометрических приемников МИРС составляют 0.375, 0.495 и 0.315 К для частот 10.65, 18.7 и 36.5 ГГц соответственно, а чувствительность радиометрических приемников WindSat составляет 0.25 К для аналогичных частот (Gaiser et al., 2004). Так как чувствительность обоих приборов практически одинаковая, то можно провести оценку погрешностей измерений с помощью регрессии построенной по данным прибора WindSat, но чувствительность приборов взять от интересующего комплекса МИРС.

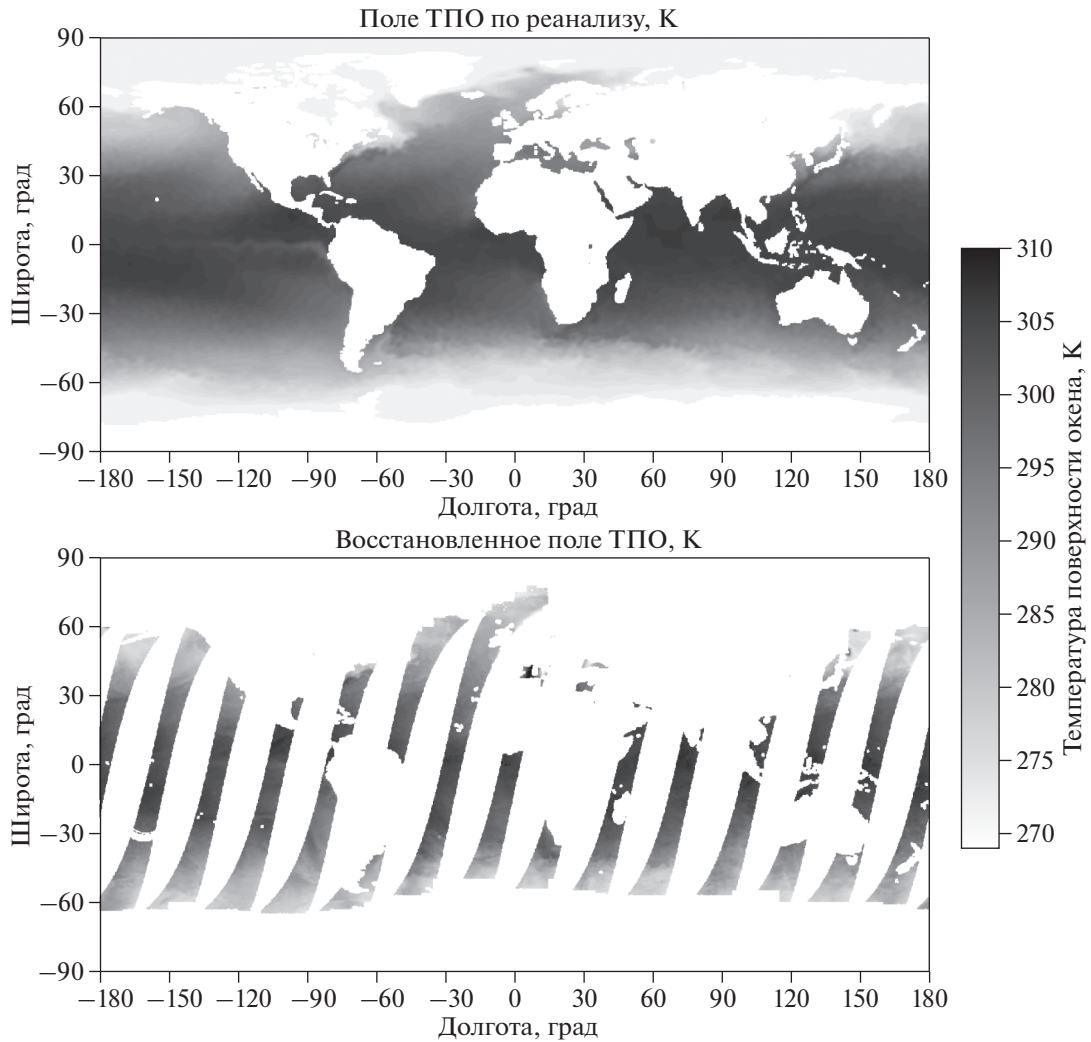


Рис. 6. Сравнение поля температуры океана по реанализу и результат восстановления.

$$\delta T_S = \left[ \left( \frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{10.65V}} \right)^2 \tau_{10.65}^2 + \left( \frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{10.65H}} \right)^2 \tau_{10.65}^2 + \left( \frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{18.7V}} \right)^2 \tau_{18.7}^2 + \left( \frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{18.7H}} \right)^2 \tau_{18.7}^2 + \left( \frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{36.5V}} \right)^2 \tau_{36.5}^2 + \left( \frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{36.5H}} \right)^2 \tau_{36.5}^2 \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Для определения ТПО океана используется регрессионное соотношение (4), которое представляет собой функцию переменных  $T_S = f(T_{Br}^{10.65V}, T_{Br}^{10.65H}, T_{Br}^{18.7V}, T_{Br}^{18.7H}, T_{Br}^{36.5V}, T_{Br}^{36.5H})$ . Для оценки влияния входных параметров на погрешность определения ТПО необходимо взять производную по каждому входному параметру  $\partial T_S / \partial T_{Br}$ .

Функция (4) является аналитической, поэтому вычислить частные производные не составляет труда (6).

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{10.65V}} &= A_2; & \frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{10.65H}} &= A_5 + 2A_8 T_{Br}^{10.65H}; \\ \frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{18.7V}} &= A_3; & \frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{18.7H}} &= A_6; \\ \frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{36.5V}} &= A_4 + 2A_7 T_{Br}^{36.5V}; & \frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{36.5H}} &= 2A_9 T_{Br}^{36.5H}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для расчета производных (6) из карты восстановленного поля ТПО (рис. 6, нижний) были взяты 28 точек температур и соответствующие им радиояркостные температуры на каждом частотном канале (табл. 5). Производные (6), зависящие от радиояркостных температур, приведены на рис. 7.



Таблица 5. ТПО и соответствующие ей радиояркие температуры

ТПО, К	Радиояркие температуры на соответствующих частотах и поляризациях, К					
	$T_{Br}^{10.65V}$	$T_{Br}^{10.65H}$	$T_{Br}^{18.7V}$	$T_{Br}^{18.7H}$	$T_{Br}^{36.5V}$	$T_{Br}^{36.5H}$
273	153.6096	88.03779	188.8403	111.3434	216.6548	156.323
274	152.6008	87.16859	184.9427	105.957	208.3233	141.2483
275	153.2708	87.11365	185.8954	106.3452	211.2658	146.0907
276	153.4457	86.21507	185.3217	102.9224	210.857	143.0022
277	156.7225	93.02478	188.2482	114.4845	213.1187	155.9141
278	165.6981	106.8067	203.3064	144.8339	234.4402	200.6129
279	155.9291	90.63013	190.1663	116.2913	214.4289	156.3639
280	161.4227	99.70067	192.9514	125.3036	218.5277	170.1703
281	156.2572	90.52259	186.5018	109.7665	209.3929	147.3257
284	163.521	101.129	191.5183	120.5364	212.7212	158.1459
284	161.6131	97.70071	188.5645	113.6234	209.776	150.2152
288	157.2947	85.55213	187.4897	99.73448	209.9292	135.277
289	161.0228	94.26986	190.5764	114.3783	210.5654	149.3203
290	161.8527	94.71875	193.7168	118.4565	212.2355	149.9803
291	160.7767	92.08002	194.5164	118.0701	213.324	149.6365
292	161.1441	91.42736	193.1176	113.3617	213.0038	147.3346
293	161.6744	92.85186	197.7818	124.2308	215.4861	153.7799
294	165.0143	97.2383	193.896	116.7317	213.1127	151.4884
295	172.7306	109.5346	222.7899	172.2439	253.167	230.7006
296	163.6641	94.06398	201.7293	128.8735	218.1011	156.4928
297	163.3165	92.09516	202.2713	126.8498	218.634	153.6437
298	164.0219	92.20984	205.0545	130.3068	221.6795	157.7612
299	164.4165	93.67931	199.8129	124.0043	216.044	152.3253
300	166.4992	96.80635	206.907	137.5079	222.6856	166.0702
301	173.4462	107.3273	225.6997	172.75	242.8854	204.4401
302	167.4295	95.97698	210.1107	139.4337	225.944	167.1572
303	169.7863	99.6082	217.7527	154.3145	233.0732	181.4731
304	168.3859	96.46004	215.0795	147.3498	229.4885	172.2733

Из представленного рис. 7 видно, что зависимость  $\partial T_S / \partial T_{Br}$  в разных температурных диапазонах практически не изменяется, поэтому решено использовать для дальнейших расчетов среднее значение  $\partial T_S / \partial T_{Br}$  для указанных на рис. 7 измерительных каналов (табл. 6).

Результаты расчетов по формулам (5, 6) показали, что с обеспеченностью в 67% погрешность определения ТПО составит  $\delta T_S = 1.7\text{К}$ , что соот-

ветствует средним значениям СКО представленным на рис. 5. Конечно, это предварительная оценка и точность восстановления поля ТПО может быть улучшена применением способов, описанных выше.

Например, если разделить данные по климатическим зонам, на экваториальную ( $\pm 30^\circ$  широты) и умеренную (от  $\pm 30^\circ$  до  $\pm 60^\circ$  широты), результат по СКО обучения и восстановления поля

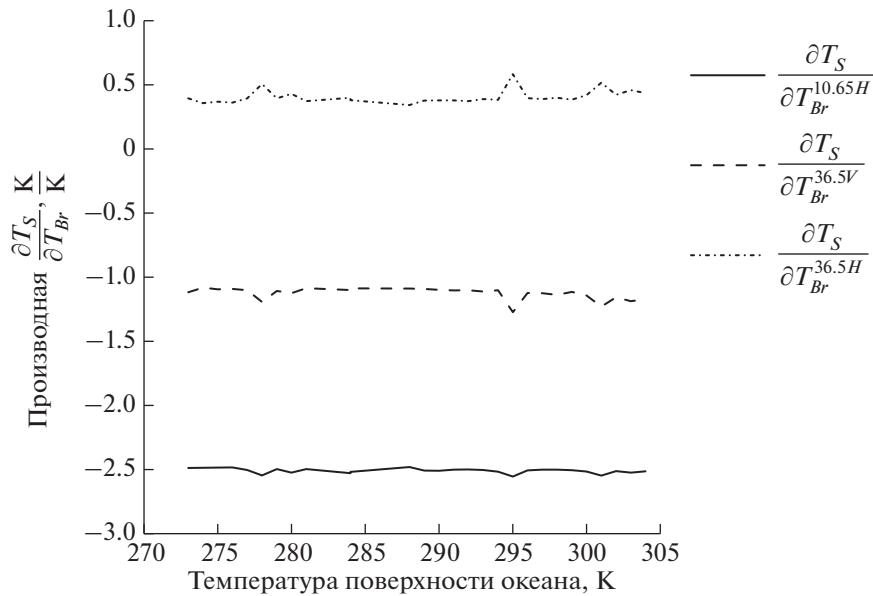


Рис. 7. Обратная радиационно-температурная зависимость ТПО.

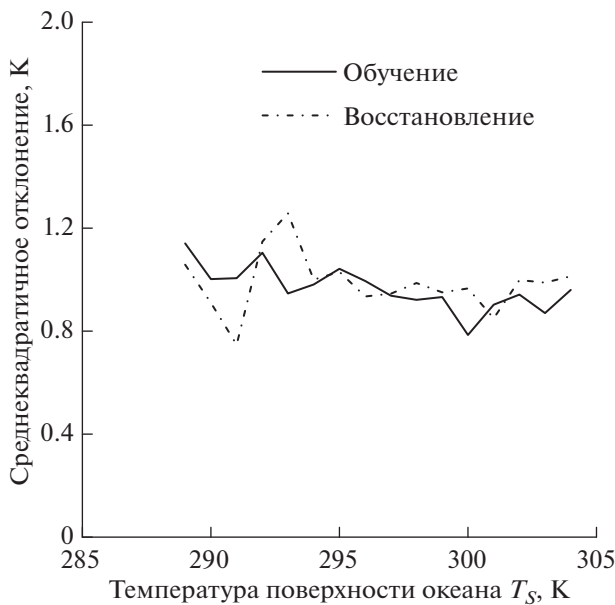


Рис. 8. Оценка среднеквадратичного отклонения ТПО для обучающей и тестовой выборки в экваториальной зоне.

ТПО по регрессии (4) будет иметь вид, представленный на рис. 8. Уже при таком разделении удастся на тестовой задаче добиться погрешности определения поля ТПО порядка 1К.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение ТПО является одной из основных задач КЭ “Конвергенция”, без которой крайне проблематично решить определенный набор других важных задач. Представленные в настоящей работе результаты демонстрируют возможность восстановления ТПО по микроволновым радиоизмерениям без использования частоты порядка 6.9 ГГц. Использование линейаризованных регрессий, являясь основным подходом к интерпретации данных дистанционного зондирования из космоса, позволяет применить данный подход к другим приборам (например: WindSat), для которых определение ТПО не предусмотрено изначально. Тестирование полученной регрессии проведено на реальных измерениях из космоса и демонстрирует адекватный результат. Полученные в

Таблица 6. Чувствительность ТПО к вариациям радиоярких температур. Размерность [K/K]

Частная производная	$\frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{10.65V}}$	$\frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{10.65H}}$	$\frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{18.7V}}$	$\frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{18.7H}}$	$\frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{36.5V}}$	$\frac{\partial T_S}{\partial T_{Br}^{36.5H}}$
По температуре $\Delta T_{я} = 1$ К	3.6227	-2.5*	-0.2894	0.3942	-1.13*	0.4*

\* Среднее значение в диапазоне ТПО 270...305 К.

результате моделирования оценки подтверждаются расчетом погрешностей восстановления ТПО.

Дальнейшая отработка представленного метода будет проводиться уже после запуска проекта. После получения экспериментальных данных планируется работы по повышению точности восстановления ТПО, по разработке/усовершенствованию модели радиоизлучения системы “океан–атмосфера”, проведение теоретических и практических исследований. Полученные в проекте экспериментальные данные позволят расширить существующие знания о процессах, происходящих на нашей планете.

### ПРИЛОЖЕНИЕ

*Оценка параметров линейного уравнения множественной регрессии*

#### МАТРИЧНЫЙ МЕТОД

Уравнение регрессии:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p + e.$$

Здесь  $a, b_1, b_2, \dots, b_p$  – эмпирические коэффициенты регрессии,  $e$  – оценка отклонения  $\varepsilon$ .

Представим данные наблюдений и параметры модели в матричной форме.

$Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]'$  –  $n$ -мерный вектор – столбец наблюдений зависимой переменной;

$B = [a, b_1, b_2, \dots, b_p]'$  –  $(p + 1)$ -мерный вектор – столбец параметров уравнения регрессии;

$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]'$  –  $n$ -мерный вектор – столбец отклонений выборочных значений  $y_i$  от значений  $\hat{y}_i$ .

Для удобства записи столбцы записаны как строки и поэтому снабжены штрихом для обозначения операции транспонирования.

Наконец, значения независимых переменных запишем в виде прямоугольной матрицы размерности  $n \times (p + 1)$ :

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{bmatrix}.$$

Каждому столбцу этой матрицы отвечает набор из  $n$  значений одного из факторов, а первый столбец состоит из единиц, которые соответствуют значениям переменной при свободном члене.

В этих обозначениях эмпирическое уравнение регрессии выглядит так:

$$Y = XB + e.$$

Отсюда вектор остатков регрессии можно выразить таким образом:

$$e = Y - XB.$$

Таким образом, функционал  $Q = \sum e_i^2$ , который, собственно, и минимизируется по МНК, можно записать как произведение вектора – строки  $e'$  на вектор – столбец  $e$ :

$$Q = e'e = (Y - XB)'(Y - XB).$$

В соответствии с МНК дифференцирование  $Q$  по вектору  $B$  приводит к выражению:

$$\frac{\partial Q}{\partial B} = -2X'Y + 2(X'X)B,$$

которое для нахождения экстремума следует приравнять к нулю. В результате преобразований получаем выражение для вектора параметров регрессии:

$$B = (X'X)^{-1}X'Y.$$

Здесь  $(X'X)^{-1}$  – матрица, обратная к  $X'X$ .

#### АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭМПИРИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ МНОЖЕСТВЕННОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

Проверка статистического качества оцененного уравнения регрессии проводится, с одной стороны, по статистической значимости параметров уравнения, а с другой стороны, по общему качеству уравнения регрессии. Кроме этого, проверяется выполнимость предпосылок МНК.

Как и в случае парной регрессии, статистическая значимость параметров множественной линейной регрессии с  $p$  факторами проверяется на основе  $t$ -статистики:

$$t_{b_j} = \frac{b_j}{m_{b_j}} \quad \left( \text{или } t_a = \frac{a}{m_a} \right), \quad (\text{П.1})$$

где величина  $m_{b_j}$  ( $m_a$ ) называется стандартной ошибкой параметра  $b_j$  ( $a$ ). Она определяется так. Обозначим матрицу:

$$Z^{-1} = (X'X)^{-1},$$

и в этой матрице обозначим  $j$ -й диагональный элемент как  $z'_{jj}$ . Тогда выборочная дисперсия эмпирического параметра регрессии равна:

$$m_{b_j}^2 = s^2 z'_{jj}, \quad j = \overline{1, p},$$

а для свободного члена выражение имеет вид:

$$m_a^2 = s^2 z'_{00},$$

если считать, что в матрице  $Z^{-1}$  индексы изменяются от 0 до  $p$ . Здесь  $s^2$  – несмещенная оценка дисперсии случайной ошибки  $\varepsilon$ :

$$s^2 = \frac{\sum e_i^2}{n - p - 1}.$$

Стандартные ошибки параметров регрессии равны

$$m_{b_j} = \sqrt{m_{b_j}^2} \quad (\text{или} \quad m_a = \sqrt{m_a^2}).$$

Полученная по выражению (П.1)  $t$ -статистика для соответствующего параметра имеет распределение Стьюдента с числом степеней свободы  $(n-p-1)$ . При требуемом уровне значимости  $\alpha$  эта статистика сравнивается с критической точкой распределения Стьюдента  $t(\alpha; n-p-1)$  (двухсторонней).

Если  $|t| > t(\alpha; n-p-1)$ , то соответствующий параметр считается статистически значимым, и нуль-гипотеза в виде  $H_0: b_j = 0$  или  $H_0: a = 0$  отвергается.

В противном случае ( $|t| < t(\alpha; n-p-1)$ ) параметр считается статистически незначимым, и нуль-гипотеза не может быть отвергнута. Поскольку  $b_j$  не отличается значимо от нуля, фактор  $x_j$  линейно не связан с результатом. Его наличие среди объясняющих переменных не оправдано со статистической точки зрения. Не оказывая какого-либо серьезного влияния на зависимую переменную, он лишь искажает реальную картину взаимосвязи. Поэтому после установления того факта, что коэффициент  $b_j$  статистически незначим, переменную  $x_j$  рекомендуется исключить из уравнения регрессии. Это не приведет к существенной потере качества модели, но сделает ее более конкретной.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-01009.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барсуков И.А., Никитин О.В., Стрельцов А.М., Черный И.В., Чернявский Г.М. Предварительная обработка данных СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ КА “Метеор-М” № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. № 2. С. 257–263.
- Болдырев В.В., Горобец Н.Н., Ильгасов П.А. и др. Спутниковый микроволновый сканер/зондирующий МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 1. Вып. 5. С. 243–248.
- Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД, 2016. 336 с.
- Степаненко В.Д., Шукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат. 1987. 283 с.
- Успенский А.Б., Асмус В.В., Козлов А.А., Крамчанинова Е.К., Стрельцов А.М., Чернявский Г.М., Черный И.В. Абсолютная калибровка каналов атмосферного зондирования спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 5. С. 57–70.
- Шарков Е.А. Дистанционные исследования атмосферных катастроф // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 52–68.
- Шарков Е.А. Научные задачи космического эксперимента “Конвергенция” на РС МКС // Пятнадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”: Тез. докл. М.: ИКИРАН, 2017. С. 230.
- Шарков Е.А., Кузьмин А.В., Веденькин Н.Н., Jeong S., Ермаков Д.М., Квитка В.Е., Козлова Т.О., Комарова Н.Ю., Минаев П.Ю., Park I.L.H., Пашинов Е.В., Позаненко А.С., Прасолов В.О., Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Стерлякин В.В., Хапун Ю.Б., Hong G., Черненко А.М. Космический эксперимент “Конвергенция”: научные задачи, бортовая аппаратура, методики решения обратных задач // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 4. С. 71–96.
- Шарков Е.А., Покровская И.В. Региональные тропические циклогенезы в поле поверхностной температуры мирового океана // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 2. С. 54–62.
- Draper D., Newell D., Wentz F., Krimchansky S., Skofronick-Jackson G. The Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager (GMI): Instrument overview and early on-orbit performance // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. V. 8. № 7. P. 3452–3462.
- Gaiser P.W., St Germain K.M., Twarog E.M., Poe G.A., Purdy W., Richardson D., Grossman W., Jones W.L., Spencer D., Golba G., Cleveland J., Choy L., Bevilacqua R.M., Chang P.S. The WindSat space borne polarimetric microwave radiometer: sensor description and early orbit performance // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2004. V. 42. № 11. P. 2347–2361.
- Gentemann C.L., Meissner T., Wentz F.J. Accuracy of Satellite Sea Surface Temperatures at 7 and 11 GHz // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2010. V. 48. № 3. P. 1009–1018. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2030322>
- Kunkee D.B., Poe G.A., Boucher D.J., Swadley S.D., Hong Y., Wessel J.E., Uliana E.A. Design and Evaluation of the First Special Sensor Microwave Imager/Sounder // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 2008. V. 46. № 4. P. 863–883.
- Meissner T., Wentz F.J. The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and earth incidence angles, // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2012. V. 50. № 8. P. 3004–3026.
- Mitnik L.M., Mitnik M.L. Retrieval of atmospheric and ocean surface parameters from ADEOS-II Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR) data: Comparison of errors of global and regional algorithms // Radio Sci., 2003. V. 38. № 4. XXXX. <https://doi.org/10.1029/2002RS002659>
- Rosenkranz P.W. Water vapor microwave continuum absorption: A comparison of measurements and models // Radio Sci. 1998. V. 33. P. 919–928.
- Wentz F.J. Measurements of oceanic wind vector using satellite microwave radiometers // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1992. V. 30. № 5. P. 960–972.

## Space Experiment “Convergence”. Remote Determination of the Ocean Temperature by Radio Measurements at a Frequency of 10.65, 18.7 and 36.5 GHz

D. S. Sazonov<sup>1</sup>, I. N. Sadovsky<sup>1</sup>, and A. V. Kuzmin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

This paper presents a regression approach to the problem of restoring the ocean surface temperature (SST) from radiometric measurements of a microwave radiometer spectrometer (MIRS) in the space experiment (SE) “Convergence” at frequencies of 10.65, 18.7 and 36.5 GHz. A distinctive feature of the proposed regression approach is the use of a limited set of frequencies – 10.65, 18.7 and 36.5 GHz with vertical and horizontal polarization at each frequency. The paper presents the rationale for choosing a regression relation with quadratic terms, and also simulated the problem of recovering SST based on real measurements from space using the WindSat instrument and compared it with the reanalysis. The evaluation of the accuracy of determining SST showed that it is possible to achieve an error of the order of 1K, and this is confirmed by a theoretical calculation of measurement errors.

**Keywords:** remote sensing, radio brightness temperature, sea surface temperature, microwave radiometer, microwave radiation, modeling, regression ratio, space experiment “Convergence”

### REFERENCES

- Barsukov I.A., Nikitin O.V., Strel'tsov A.M., Chernyi I.V., Chernyavskii G.M.* Predvaritel'naya obrabotka dannykh SVCh-radiometra MTVZA-GYa KA “Meteor-M” № 1 [Preliminary data processing of microwave radiometer MTVZA-GY based on spacecraft “Meteor-M” № 1] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2011. № 2. P. 257–263 (In Russian).
- Boldyrev V.V., Gorobets N.N., Il'gasov P.A. et al.* Sputnikovyi mikrovolnovyi skaner/zondirovshchik MTVZA-GYa [Satellite microwave scanner/sounder MTVZA-GY] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2008. T. 1. № 5. P. 243–248 (In Russian).
- Kutuza B.G., Danilychev M.V., Yakovlev O.I.* Sputnikovyi monitoring Zemli: Mikrovolnovaya radiometriya atmosfery i poverkh-nosti [Earth satellite monitoring: microwave radiometry of the atmosphere and surface]. M.: LENAND, 2016. 336 p. (In Russian).
- Stepanenko V.D., Shchukin G.G., Bobylev L.P., Matrosov S.Yu.* Radioteplolokatsiya v meteorologii. L.: Gidrometeoizdat [Radiolocation in meteorology]. 1987. 283 p. (In Russian).
- Uspenskii A.B., Asmus V.V., Kozlov A.A., Kramchaninova E.K., Strel'tsov A.M., Chernyavskii G.M., Chernyi I.V.* Absolyutnaya kalibrovka kanalov atmosfernogo zondirovaniya sputnikovogo mikrovolnovogo radiometra MTVZA-GYa [absolute calibration of atmospheric probing channels of MTVZA-GY satellite microwave radiometer] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2016. № 5. P. 57–70 (In Russian).
- Sharkov E.A.* Distantsionnye issledovaniya atmosferykh katastrof [Remote researches of atmospheric disasters] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2010. № 1. P. 52–68 (In Russian).
- Sharkov E.A.* Nauchnye zadachi kosmicheskogo eksperimenta “Konvergentsiya” na RS MKS [Scientific tasks of the space experiment “Convergence” on the ISS RS] // *Pyatnadsataya vserossiiskaya otkrytaya ezhegodnaya konferentsiya “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”*: Tez.dokl. M.: IKI RAN, 2017. P. 230 (In Russian).
- Sharkov E.A., Kuz'min A.V., Veden'kin N.N., Jeong S., Ermakov D.M., Kvitka V.E., Kozlova T.O., Komarova N.Yu., Minaev P.Yu., Park I.L.H., Pashinov E.V., Pozanenko A.S., Prasolov V.O., Sadovskii I.N., Sazonov D.S., Sterlyadkin V.V., Khapin Yu.B., Hong G., Chernenko A.M.* Kosmicheskii eksperiment “Konvergentsiya”: nauchnye zadachi, bortovaya apparatura, metodiki resheniya obratnykh zadach [Convergence space experiment: scientific objectives, onboard equipment, and methods of solving reverse problems] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2018. № 4. P. 71–96 (In Russian).
- Sharkov E.A., Pokrovskaya I.V.* Regional'nye tropicheskie tsiklogenezy v pole poverkhnostnoi temperatury mirovogo okeana [Regional tropical cyclogenesis in the field of the surface temperature of the world ocean] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2010. № 2. P. 54–62 (In Russian).
- Draper D., Newell D., Wentz F., Krimchansky S., Skofronick-Jackson G.* The Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager (GMI): Instrument overview and early on-orbit performance // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015. V. 8. № 7. P. 3452–3462.
- Gaiser P.W., St Germain K.M., Twarog E.M., Poe G.A., Purdy W., Richardson D., Grossman W., Jones W.L., Spencer D., Golba G., Cleveland J., Choy L., Bevilacqua R.M., Chang P.S.* The WindSat space borne polarimetric microwave radiometer: sensor description and early orbit performance // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. 2004. V. 42. № 11. P. 2347–2361.
- Gentemann C.L., Meissner T., Wentz F.J.* Accuracy of Satellite Sea Surface Temperatures at 7 and 11 GHz // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, V. 48. № 3. P. 1009–1018. 2010. doi: 10.1109/TGRS.2009.2030322
- Kunkee D.B., Poe G.A., Boucher D.J., Swadley S.D., Hong Y., Wessel J.E., Uliana E.A.* Design and Evaluation of the First Special Sensor Microwave Imager/Sounder // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* 2008. V. 46. № 4. P. 863–883.
- Meissner T., Wentz F.J.* The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and earth incidence angles // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2012. V. 50. № 8. P. 3004–3026.
- Mitnik L.M., Mitnik M.L.* Retrieval of atmospheric and ocean surface parameters from ADEOS-II Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR) data: Comparison of errors of global and regional algorithms // *Radio Sci.* 2003. V. 38. № 4. XXXX. doi: 10.1029/2002RS002659
- Rosenkranz P.W.* Water vapor microwave continuum absorption: A comparison of measurements and models // *Radio Sci.* 1998. V. 33. P. 919–928.
- Wentz F.J.* Measurements of oceanic wind vector using satellite microwave radiometers // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1992. V. 30. № 5. P. 960–972.