# Алгоритм восстановления температуры поверхности океана, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания по данным МТВЗА-ГЯ

# Д.С. Сазонов

### Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: sazonov\_33m7@mail.ru

В настоящей работе представлен регрессионный подход к задаче восстановления температуры поверхности океана, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания по радиометрическим измерениям микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ. Особенность предлагаемого подхода — использование перекрёстных членов в уравнении регрессии. В работе приведено обоснование выбора регрессионного соотношения, используемого набора радиометрических каналов и дополнительной телеметрии, а также проведено восстановление геопараметров на основе реальных измерений из космоса и выполнено сравнение с реанализом. Результаты работы показали, что геопараметры могут быть восстановлены со следующей точностью: паросодержание — <2,6 мм в диапазоне 0-60 мм; скорость ветра — <1-2,5 м/с в диапазоне 0-20 м/с и температура поверхности океана — <1,5-2,2 К во всём диапазоне температур. Результаты восстановления указанных параметров представлены в соответствующем разделе (функционирующем в тестовом режиме) ресурса «Вега».

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, МТВЗА-ГЯ, геопараметры, температура поверхности океана, скорость ветра, паросодержание, алгоритм восстановления

Одобрена к печати: 13.01.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64

### Введение

Дистанционное зондирование земли (ДЗЗ) из космоса — мощный инструмент исследования окружающего нас мира. В первую очередь это относится к экологическим, климатологическим задачам, а также к прогнозированию погоды и предупреждению стихийных бедствий. Методы микроволновой радиометрии наилучшим образом подходят для глобальных исследований, например для изучения атмосферных катастроф (Шарков, 2010), зондирования атмосферы (Стерлядкин, Шарков, 2014), исследования полярных регионов (Репина и др., 2012) и многих других задач.

Несмотря на то, что именно в СССР было впервые проведено дистанционное измерение параметров подстилающей поверхности и атмосферы со спутника «Космос-243», до недавнего времени все космические микроволновые радиометры были зарубежными. И только в 2000-х гг. появились уже российские спутниковые микроволновые радиометры серии МТВЗА (модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы) (Болдырев и др., 2008; Чернявский и др., 2018).

Приборы серии МТВЗА похожи на свои зарубежные аналоги. Основным отличием МТВЗА стал необычный для приборов с коническим сканированием угол визирования (53,3°) и, соответственно, угол падения в 65°. Для большинства зарубежных аналогов угол падения составляет порядка 53°. Такое отличие приводит к необходимости разрабатывать новые (или переделывать уже имеющиеся) алгоритмы обработки данных, для того чтобы конечный пользователь мог получить качественную информацию из нового независимого источника (Ермаков и др., 2021).

Результаты обработки спутниковых радиометрических данных обычно представляют в виде наборов измеренной радиояркостной температуры и/или восстановленных геофизических параметров системы «подстилающая поверхность – атмосфера». Наиболее интересными и востребованными оказываются именно геопараметры. К основным геопараметрам, как на ресурсе http://www.remss.com/, относятся: температура поверхности океана (ТПО, *англ.* sea surface temperature —SST), скорость приводного ветра ( $U_{10}$ ), интегральное паросодержание (V), водозапас облачности (L) и интенсивность осадков (R). Таким образом, необходимо разработать алгоритмы восстановления указанных геопараметров по имеющемуся набору данных прибора МТВЗА, что и становится целью настоящей работы.

### Принципы дистанционного восстановления геопараметров системы «океан – атмосфера»

Восстановление геопараметров системы «океан – атмосфера» относится к классу обратных некорректных задач. В общем виде задача восстановления какого-либо геопараметра — частный случай обобщённой обратной задачи дистанционного зондирования. С точки зрения математики задача определения различных параметров системы «океан – атмосфера» по измерениям характеристик радиотеплового излучения сводится к решению так называемой фундаментальной системы уравнений (Степаненко и др., 1987):

$$T_{Br}^{i} = F_{Br}^{i}(x_{1}, x_{2}, ..., x_{n}) + e_{i}, \quad i = 1, 2, ..., m,$$
(1)

где  $T_{Br}^{i}$  — радиояркостная температура или другая измеряемая характеристика потока радиоизлучения, принимаемого на *i*-м канале; *m* — число каналов. Набор переменных  $(x_1, x_2, ..., x_n)$  — совокупность искомых геофизических параметров, а  $e_i$  — общая погрешность метода на *i*-м канале, включающая погрешность как используемой модели, так и самих радиометрических наблюдений. Смысл формулы (1) очевиден: измеренное радиоизлучение  $T_{Br}^{i}$  зависит от набора параметров  $(x_1, x_2, ..., x_n)$  измеряемой среды, которых может быть достаточно много. Для дистанционного зондирования это значит, что по набору измеренной радиояркостной температуры может быть определён некоторый набор параметров измеряемой среды.

Наиболее полный обзор восстанавливаемых параметров и используемых для этого радиометрических частот можно найти в работах (Кутуза и др., 2016; Рис, 2006). В данной статье рассматриваются следующие параметры: температура поверхности океана, скорость приводного ветра и интегральное паросодержание.

В настоящее время применяются три способа/подхода восстановления геопараметров.

1. Использование физических моделей (детерминистский подход). Данный подход основан на многократном вычислении радиояркостной температуры с использованием физических моделей излучения подстилающей поверхности и атмосферы, а также с расчётом уравнения переноса излучения. Входными параметрами для моделирования становятся искомые геофизические параметры, и после каждого расчёта проводится сравнение полученного результата с измеренными на спутнике значениями радиояркостной температуры. Из большого набора расчётных значений выбирается самое близкое к измеренному, а входные геопараметры, при которых получено данное решение, становятся результатом восстановления.

Наиболее очевидное преимущество данного метода — это физическая обоснованность связи параметров физической системы с её излучением. Однако это и его недостаток, так как до сих пор нет одной единой модели излучения как подстилающей поверхности, так и атмосферы. Также итерационные методы достаточно медленные и для работы с большим количеством измерений, например спутниковых, требуют серьёзных вычислительных мощностей.

2. Использование нейронных сетей стало достаточно популярным в последнее время. Благодаря их особенностям можно связать большое количество искомых параметров с измеренными значениями радиояркостной температуры, а также подобрать структуру сети, которая будет наилучшим образом устанавливать эту взаимосвязь. Явным недостатком нейронных сетей оказывается полная «непрозрачность» их работы, т. е. невозможно проанализировать работу сети с точки зрения физики. Также недостатком нейронных сетей стала сложность их реализации без специального программного пакета.

3. Корреляционно-статистический подход (а именно составление регрессионного соотношения) занимает некоторое промежуточное место между физическим моделированием и нейронными сетями. Как и при использовании нейронных сетей, с помощью регрессии можно связать любое количество искомых параметров с измеренными значениями. Составление такого соотношения похоже на физическое моделирование, когда искомые параметры связаны с результатом измерений некоторыми логичными зависимостями. Кроме того, регрессия выступает формулой, которую можно реализовать в виде программной функции на любом языке программирования, что делает такой подход очень гибким при интеграции в различные сервисы обработки данных (например, в онлайн-сервисы).

Прибор МТВЗА-ГЯ обладает необычным углом зондирования. Это накладывает определённые ограничения на использование физических моделей, которые при угле встречи с землёй в 65° дают большие погрешности и не могут быть использованы для прямого моделирования. Использование нейронных сетей не даёт физической прозрачности устанавливаемых взаимосвязей между измеряемыми и искомыми величинами. Поэтому для восстановления ТПО, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания будет использован метод построения регрессий.

# Модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы (МТВЗА-ГЯ)

Микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ (ГЯ в аббревиатуре добавлены в честь Геннадия Яковлевича Гуськова) был разработан для космических аппаратов серии «Метеор-М» (Чернявский и др., 2018) и предназначен для температурно-влажностного профилирования атмосферы, зондирования океана и суши. МТВЗА-ГЯ — это модификация приборов МТВЗА космического аппарата (КА) «Метеор-ЗМ» и МТВЗА-ОК (оптико-микроволновый сканер) КА «Сич-1М» и соответствует зарубежным аналогам — зондировщикам AMSU-A, -В (англ. Advanced Microwave Sounding Unit), установленным на спутниках серии NOAA (англ. National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США), и сканеру/зондировщику SSMIS (англ. Special Sensor Microwave Imager/Sounder) спутника DMSP-F16 (англ. Defence Ministry Satellite Program) (Болдырев и др., 2008). В настоящее время на спутнике «Метеор» № 2-2 работает прибор МТВЗА-ГЯ. Идёт разработка перспективного сверхвысокочастотного (СВЧ) радиометра МТВЗА-ГЯ-МП (параметры морского волнения) для КА «Метеор-МП», запуск которого запланирован на 2024 г. (Cherny et al., 2017). Радиометрические каналы сканера МТВЗА-ГЯ включают рабочие частоты в окнах прозрачности атмосферы 10,6 ГГц; 18,7; 23,8; 31,5; 36,7; 42; 48 и 91 ГГц, а зондировщика — в линиях поглощения кислорода 52-58 ГГц и водяного пара 183 ГГц. Подробное описание можно найти в работах (Болдырев и др., 2008; Чернявский идр., 2018).

Спутниковые данные МТВЗА-ГЯ поступают в ЦКП (Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений ИКИ РАН) «ИКИ-Мониторинг» в виде сформированных потоков данных и сопутствующей информации звёздных датчиков (Ермаков и др., 2021). Результаты сохраняются в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) (http://ckp.geosmis.ru/), что обеспечивает автоматическое формирование наборов данных для дальнейшей обработки и отображения в картографическом веб-интерфейсе системы «Bera-Science» (http://sci-vega.ru/).

Для выполнения анализа были взяты данные за период с февраля по декабрь 2020 г. Внутреннее содержание данных состоит из времени, даты, координат широты и долготы, углов засвета солнца, типа поверхности и радиометрических измерений на каждом частотном канале и поляризации (Барсуков и др., 2011; Успенский и др., 2016).

# Подбор регрессионного соотношения

Для восстановления ТПО, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания предлагается использовать регрессионный алгоритм, включающий в себя все доступные радиометрические каналы прибора МТВЗА-ГЯ. Под радиометрическим каналом прибора понимается информация, полученная на одной частоте и на одной поляризации. Например, канал  $T_{18,7}^{\rm H}$  — это измерения на частоте 18,7 ГГц и на горизонтальной поляризации. Первоначально необходимо, чтобы все радиометрические каналы имели информацию. Если хотя бы один из каналов не имеет данных, результат восстановления будет неверным. Также алгоритм применим только над поверхностью океана.

Наиболее очевидным соотношением для регрессионного анализа данных может быть соотношение вида:

$$Y = T_1 v_1 + T_2 v_2 + \ldots + T_n v_n + T_1^2 w_1 + T_2^2 w_2 + \ldots + T_n^2 w_n,$$
(2)

где: Y — искомый геопараметр;  $T_n$  — радиояркостная температура на соответствующем радиометрическом канале;  $w_n$  и  $v_n$  — коэффициенты, определяемые в ходе обучения; n — количество радиометрических каналов. Такая формула применялась при анализе данных SSM/I (*англ*. Special Sensor Microwave Imager), и как было показано ранее в работе (Сазонов и др., 2020), при добавлении слагаемых со степенью больше чем 2 коэффициент корреляции увеличивается незначительно.

При подборе регрессионного соотношения для прибора МТВЗА-ГЯ было выявлено, что уравнения в виде полиномов (2), составленных из набора доступных радиометрических каналов, не описывают в полной мере связь радиояркостной температуры с физическими параметрами (коэффициент корреляции порядка 0,6). Поэтому было принято решение использовать многочлен, составленный по аналогии с формулой:

$$(a+b)+(a+b)^{2}+c = (a+b)+(a^{2}+2ab+b^{2})+c,$$
(3)

где *с* — свободный или дополнительный член уравнения.

У прибора МТВЗА-ГЯ всего доступно 24(!) радиометрических канала, поэтому получается достаточно много членов вида (2*ab*), а именно 276. Однако, как было установлено в ходе пробного построения регрессии, каналы в линиях поглощения водяного пара и кислорода не оказывают влияния на восстановление ТПО и скорости ветра, а на восстановление интегрального параосодержания не оказывают значительного улучшения точности. Также на некоторых каналах есть сбои и высокий уровень шумов, они не используются (это каналы  $T_{91,6}^{H}$ ,  $T_{42}^{V,H}$ ,  $T_{48}^{V,H}$  (V — вертикальная поляризация)). Поэтому для восстановления указанных параметров будет использовано всего 11 каналов данных. Это каналы  $T_{10,6}^{V,H}$ ,  $T_{23,8}^{V,H}$ ,  $T_{31,5}^{V,H}$ ,  $T_{36,7}^{V,H}$  и  $T_{91,6}^{V}$ .

Для набора из 11 каналов таких перекрёстных членов уравнения получилось 55, а также 11 обычных членов вида (a и b) и 11 членов вида ( $a^2$  и  $b^2$ ). С помощью такого вида регрессии удалось получить связь физического геопараметра с радиояркостной температурой с коэффициентом корреляции >0,9.

Регрессионная формула состоит из 78 слагаемых (77 относятся к регрессии и 1 — к зависимости от широты). В общем виде формулу можно записать так:

$$\begin{array}{c} \text{SST} \\ U_{10} \\ V \end{array} = a_0 \cdot \cos(lat) + \sum_{i=1}^{11} a_i T_i + 2 \sum_{j=1}^{55} b_j T_j^* + \sum_{i=1}^{11} c_i T_i^2,$$
(4)

где: *a*, *b*, *c* — наборы коэффициентов регрессии;  $T_i$ ,  $T_j^*$  — наборы радиометрических каналов; *lat* — широта точки наблюдения. Набор  $T_i$  соответствует слагаемым из радиометрических каналов (например,  $T_{10,6}^V$ ). Набор  $T_j^*$  соответствует слагаемым из перекрёстных радиометрических каналов вида (2*ab*) (например,  $2T_{10,6}^H T_{91,6}^V$ ). Регрессионное уравнение (4) очень усложнено введением перекрёстных слагаемых, однако именно они позволяют существенно повысить точность восстановления физических геопараметров. Например, для скорости приводного ветра коэффициент корреляции стал 0,92 вместо 0,58 и среднеквадратическое отклонение (СКО), соответственно, 2,5 вместо 4,7 м/с.

С целью упрощения моделирования и введения безразмерных переменных выполняется нормирование объясняющих переменных (радиояркостной температуры) и искомых параметров (SST,  $U_{10}$ , V). Нормирование необходимо для облегчения анализа коэффициентов регрессии по уровню значимости, а также позволяет выполнить сложение коэффициентов при анализе новой информации. Формулы для преобразования имеют следующий вид:  $x^0 = (x_{\min} + x_{\max})/2$  и  $\Delta x = (x_{\max} - x_{\min})/2$ , где  $\Delta x$  — интервал варьирования;  $x^0$  — центр новой системы. Переход от координат  $x_1, x_2, ..., x_n$  к новой безразмерной системе координат  $\hat{x}_1, \hat{x}_2, ..., \hat{x}_n$  осуществляется линейным преобразованием координат  $\hat{x}_i = (x_i - x^0)$ , (i = 1, ..., n), где n — количество значений переменной x. В нормированном виде верхний уровень равен +1, нижний уровень равен —1 ( $-1 \leq \hat{x}_i \leq 1$ ), координаты центра равны нулю и совпадают с началом координат безразмерной системы. Обратный переход выполняется по формуле  $x_i = \hat{x}_i \cdot \Delta x + x^0$ .

### Используемые радиометрические и вспомогательные данные

В качестве исходных данных для расчёта величин ТПО, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания могут быть взяты данные реанализа или данные измерений буев. Данные реанализа взяты из хранилища климатических данных (*англ*. Climate Data Store) Европейского центра среднесрочного прогноза погоды (*англ*. European Centre for Medium-Range Wether Forecasts — ECMWF) (https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home) (Hersbach et al., 2018), данные буев — с сайта Национального центра буев для сбора данных (*англ*. National Data Buoy Center — NDBC) Национального управления океанических и атмосферных исследований США (https://www.ndbc.noaa.gov/). Эти данные были собраны NOAA/NDBC и предоставлены в свободный доступ. За 2020 г. размещены данные с 768 буев, расположенных по всей акватории Мирового океана.

Сравнение между реанализом и данными буев приведено на *рис.* 1. Из графиков видно, что корреляция между данными высокая (для ТПО — практически 1), поэтому ожидается схожесть результатов: обучение регрессии данными реанализа и буев. Однако данные буев не содержат информации по интегральному паросодержанию. Также количество измерений буев много меньше, чем данных реанализа (которые имеют глобальный охват). Поэтому было принято решение использовать в качестве обучающей выборки данные реанализа.



*Рис. 1.* Сравнение данных измерений буев с данными реанализа. Количество точек — порядка 3000 для каждого графика. Показаны только данные за май 2020 г.

Полученный архив спутниковых данных состоит из записей восходящих и нисходящих полувитков. По отдельности работать с этими файлами достаточно сложно. Поэтому полученные данные были преобразованы, записи за 1 день собраны в один массив с разделением на восходящие и нисходящие витки. Таким образом, одна карта (*puc. 2*, см. с. 55) отображает данные за 1 день.



Рис. 2. Пример глобальной карты записей радиояркостной температуры для восходящих витков. 1 мая 2020 г.



Рис. 3. Пример совмещённой глобальной карты данных реанализа для параметра ТПО. 1 мая 2020 г.





*Рис.* 4. Пример совмещённых по времени данных реанализа для параметра ТПО. Интервал совмещения — ±5 мин. 1 мая 2020 г.

Данные реанализа предоставляются на регулярной сетке в  $0,25^{\circ}$  за каждый час дня. Поэтому полученные массивы были интерполированы на нерегулярную сетку данных МТВЗА-ГЯ и привязаны по времени, т.е. для каждого измерения МТВЗА выбирались данные из реанализа, отстающие по времени не более чем на заданное значение. Для получения максимального количества совмещённых данных был установлен временной интервал привязки в 30 мин. (Для дальнейшего анализа данные берутся для меньшего временного расхождения.) На *рис. 3* (см. с. 55) показан пример интерполированных данных данных данных реанализа при временном интервале  $\pm 30$  мин.

Для анализа и построения регрессии все данные с радиометров и совмещённые данные из реанализа были собраны в один общий массив за весь год (с февраля по ноябрь) и обработаны разом. На данном этапе возникла проблема недостаточности вычислительной мощности персонального компьютера для проведения расчётов по общему массиву данных за интересуемый период. Поэтому было принято решение уменьшить временное совмещение между данными прибора MTB3A и реанализом до значения  $\pm 1$  мин, что позволило сократить размер общего массива и обработать его на персональном компьютере. На *рис.* 4 (см. с. 55) приведены области при совмещении  $\pm 5$  мин. То есть области для обучения регрессий были в 5 раз уже.

Одной из проблем стало завышение яркостной температуры вблизи берега (это связано с некоторыми неточностями в геопривязке радиоизмерений), что сказывается на качестве регрессии. На *рис. 2* можно наблюдать этот эффект. Поэтому было принято решение увеличить отступ от береговой линии в сторону воды на 1°, чтобы выбранные данные относились только к измерениям над поверхностью океана.

### Вычисление коэффициентов регрессии. Матричный метод

Коэффициенты регрессии вычисляются методом наименьших квадратов при сравнении данных МТВЗА-ГЯ с реанализом. Все объясняющие переменные заводятся в матрицу **X** (приложение в статье (Сазонов и др., 2020)) и вычисляются коэффициенты регрессии (*таблица*). Выполнена проверка вычисленных коэффициентов регрессии (4) по уровню значимости с целью убрать из уравнения факторы, влияние которых незначительно либо полностью отсутствует, что упростит вид регрессионного уравнения (Сазонов и др., 2020). В *таблице* коэффициенты при не влияющих на результат переменных установлены в значение нуль, а остальные коэффициенты пересчитаны с учётом убранных. Результаты расчёта по составленным регрессиям и найденным коэффициентам приведены на *рис.* 5-7 (см. с. 57).



*Рис. 5.* Обучение регрессии для ТПО по реанализу и среднеквадратичное отклонение. Цветом указано количество измерений, попавших в диапазон  $\Delta = 0,1$  К



*Рис. 6.* Обучение регрессии для скорости ветра по реанализу и среднеквадратичное отклонение. Цветом указано количество измерений, попавших в диапазон Δ = 0,1 м/с



*Puc.* 7. Обучение регрессии для интегрального паросодержания по реанализу и среднеквадратичное отклонение. Цветом указано количество измерений, попавших в диапазон Δ = 0,1 мм

В результате обучения регрессии были получены следующие статистические оценки качества восстановления ТПО, скорости приводного ветра и интегрального парососдержания.

Для ТПО (см. *puc. 5*) коэффициент корреляции составляет 0,98. СКО в диапазоне температуры от 273 до 305 К достаточно стабильно и находится в пределах 1,5–2,2 К. Для скорости ветра (см. *puc. 6*) коэффициент корреляции составляет 0,92. Разную величину СКО при разных скоростях ветра можно объяснить тем, что наибольшее количество данных соответствует скоростям ветра порядка 6–7 м/с. Известно, какие скорости ветра наиболее часто встречаются в океане. Поэтому для указанного диапазона больше всего данных для анализа и наилучшие показатели и по корреляции, и по СКО. Таким образом, на данном этапе восстановить скорость ветра можно с точностью 1-2,5 м/с в диапазоне от 0 до ~20 м/с.

Для интегрального паросодержания (см. *рис.* 7) результаты следующие: коэффициент корреляции составляет 0,99, что оказывается отличным показателем; СКО не превышает 2,6 мм в диапазоне паросодержания от 0 до 60 мм. При большом количестве паросодержания (>60 мм) накоплено мало данных, и поэтому оценки для этого диапазона условные.

# Коэффициенты регрессии (4) для восстановления ТПО, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания

Слагаемое в регрессии (4)		Коэффициенты регрессии			
		ТПО	Скорость ветра	Интегральное паросодержание	
1	cos( <i>lat</i> )	0,427302	0,045105	-0,00532	
2	$T_{10,6}^{ m H}$	-28,5267	-5,59864	-8,50787	
3	$T_{10,6}^{V}$	41,41522	-42,8578	-11,3719	
4	$T_{18,7}^{ m H}$	10,08186	-21,3952	34,73046	
5	$T_{18,7}^{V}$	113,7947	103,94	-25,9751	
6	$T_{23,8}^{ m H}$	-38,0257	-25,6429	12,02619	
7	$T_{23,8}^{V}$	0	13,53909	-15,5038	
8	T <sup>H</sup> <sub>31,5</sub>	-69,9544	-34,6088	9,294098	
9	$T_{31,5}^{V}$	-56,7298	-27,5018	-4,5491	
10	$T_{36,7}^{ m H}$	63,02794	45,57125	-26,5497	
11	$T_{36,7}^{\rm V}$	14,01536	-28,5699	9,076284	
12	$T_{91,6}^V$	-1,00871	6,50392	8,475795	
13	$2T_{10,6}^{\rm H}T_{10,6}^{\rm V}$	-40,7057	16,14943	-9,07904	
14	$2T_{10,6}^{\rm H}T_{18,7}^{\rm H}$	27,86863	9,880273	-3,22931	
15	$2T_{10,6}^{\rm H}T_{18,7}^{\rm V}$	-142,695	-32,5651	14,66006	
16	$2T_{10,6}^{\rm V}T_{18,7}^{\rm H}$	-122,469	-54,7557	-18,414	
17	$2T_{10,6}^{\rm V}T_{18,7}^{\rm V}$	500,2892	129,5131	-22,0903	
18	$2T_{10,6}^{\rm H}T_{23,8}^{\rm H}$	34,51614	-12,005	8,254083	
19	$2T_{10,6}^{\rm H}T_{23,8}^{\rm V}$	-88,0419	26,90299	-31,2626	
20	$2T_{10,6}^{\rm V}T_{23,8}^{\rm H}$	-155,634	15,51514	-42,5399	
21	$2T_{10,6}^{\rm V}T_{23,8}^{\rm V}$	328,5585	-63,7605	102,2169	
22	$2T_{18,7}^{\rm H}T_{18,7}^{\rm V}$	285,1841	213,8566	24,56578	
22	$2T_{10,6}^{\rm H}T_{31,5}^{\rm H}$	215,6636	68,25326	6,220859	
24	$2T_{18,7}^{\rm H}T_{23,8}^{\rm H}$	68,00224	17,7274	36,10851	
25	$2T_{10,6}^{\rm H}T_{31,5}^{\rm V}$	-231,581	-130,014	0	
26	$2T_{10,6}^{\rm V}T_{31,5}^{\rm H}$	-774,85	-74,6588	47,63444	
27	$2T_{18,7}^{\rm H}T_{23,8}^{\rm V}$	-232,025	-45,237	-64,4167	
28	$2T_{18,7}^{\rm V}T_{23,8}^{\rm H}$	18,56812	-21,9453	-50,9483	
29	$2T_{10,6}^{V}T_{31,5}^{V}$	364,7983	-27,5566	-20,6913	
30	$2T_{18,7}^{V}T_{23,8}^{V}$	108,21	126,9197	42,34163	
31	$2\overline{T_{10,6}^{\rm H}T_{36,7}^{\rm H}}$	-283,137	-65,14	-18,9376	
32	$2T_{10,6}^{\rm H}T_{36,7}^{\rm V}$	509,0595	132,0884	39,35467	

Слагаемое в регрессии (4)		Коэффициенты регрессии			
		ТПО	Скорость ветра	Интегральное паросодержание	
33	$2T_{10,6}^{\rm V}T_{36,7}^{\rm H}$	1024,426	56,58885	-16,3575	
34	$2T_{23,8}^{\rm H}T_{23,8}^{\rm V}$	156,7749	63,08412	-48,1004	
35	$2T_{10,6}^{\rm V}T_{36,7}^{\rm V}$	-1190,81	50,66642	-27,3618	
36	$2T_{18,7}^{\rm H}T_{31,5}^{\rm H}$	-104,938	-5,94651	6,888709	
37	$2T_{18,7}^{\rm H}T_{31,5}^{\rm V}$	48,00954	-86,5211	14,83346	
38	$2T_{18,7}^{\rm V}T_{31,5}^{\rm H}$	398,2455	-46,031	-135,575	
39	$2T_{18,7}^{\rm V}T_{31,5}^{\rm V}$	63,06218	412,6854	12,05271	
40	$2T_{23,8}^{\rm H}T_{31,5}^{\rm H}$	-40,5134	9,069473	5,656426	
41	$2T_{18,7}^{\rm H}T_{36,7}^{\rm H}$	76,44147	13,27681	-10,8674	
42	$2T_{23,8}^{\rm H}T_{31,5}^{\rm V}$	-124,684	-47,2251	23,37973	
43	$2T_{23,8}^{\rm V}T_{31,5}^{\rm H}$	90,29446	-9,87217	23,85319	
44	$2T_{18,7}^{\rm H}T_{36,7}^{\rm V}$	0	55,38937	-26,946	
45	$2T_{18,7}^{\rm V}T_{36,7}^{\rm H}$	-378,763	69,06986	145,1184	
46	$2T_{23,8}^{\rm V}T_{31,5}^{\rm V}$	207,4665	32,72616	-64,6144	
47	$2T_{18,7}^{\rm V}T_{36,7}^{\rm V}$	0	-401,676	-110,486	
48	$2T_{23,8}^{\rm H}T_{36,7}^{\rm H}$	0	-9,39919	-38,8998	
49	$2T_{23,8}^{\rm H}T_{36,7}^{\rm V}$	153,4632	46,06968	64,21315	
50	$2T_{23,8}^{\rm V}T_{36,7}^{\rm H}$	46,59441	7,47342	50,80425	
51	$2T_{23,8}^{\rm V}T_{36,7}^{\rm V}$	-307,075	-34,5842	-53,0166	
52	$2T_{31,5}^{\rm H}T_{31,5}^{\rm V}$	201,7317	97,41538	24,32747	
52	$2T_{31,5}^{\rm H}T_{36,7}^{\rm H}$	34,04494	21,46163	0	
54	$2T_{31,5}^{\rm H}T_{36,7}^{\rm V}$	93,81066	58,69938	27,42984	
55	$2T_{31,5}^{\rm V}T_{36,7}^{\rm H}$	-89,2587	-66,454	-62,2656	
56	$2T_{31,5}^{V}T_{36,7}^{V}$	208,5783	30,46302	65,60586	
57	$2T_{36,7}^{\rm H}T_{36,7}^{\rm V}$	-521,978	-132,1	-52,8771	
58	$2T_{10,6}^{\rm H}T_{91,6}^{\rm V}$	10,83623	1,596488	-0,22562	
59	$2T_{10,6}^{\rm V}T_{91,6}^{\rm V}$	-32,737	23,1937	-7,51624	
60	$2T_{18,7}^{\rm H}T_{91,6}^{\rm V}$	0	-15,1572	5,041863	
61	$2T_{18,7}^{\rm V}T_{91,6}^{\rm V}$	-21,3816	-15,9033	17,18644	
62	$2T_{23,8}^{\rm H}T_{91,6}^{\rm V}$	-5,0877	-2,85897	7,181201	
63	$2T_{23,8}^{\rm V}T_{91,6}^{\rm V}$	20,01216	30,28169	-30,8592	
64	$2T_{31,5}^{\rm H}T_{91,6}^{\rm V}$	17,36087	-6,86467	-14,5932	

Продолжение таблицы

Слагаемое в регрессии (4)	Коэффициенты регрессии			
	ТПО	Скорость ветра	Интегральное паросодержание	
$65  2T_{31,5}^{\rm V}T_{91,6}^{\rm V}$	31,43094	19,16597	8,321469	
$66  2T_{36,7}^{\rm H}T_{91,6}^{\rm V}$	-26,3194	27,09472	12,04585	
$67  2T_{36,7}^{\rm V}T_{91,6}^{\rm V}$	0	-62,8968	-7,42589	
$\overline{68  \left(T_{10,6}^{\rm H}\right)^2}$	-0,79719	-7,31274	0,930182	
$69 \left(T_{10,6}^{V}\right)^2$	61,29943	-2,82259	10,34243	
$70 \left(T_{18,7}^{\rm H}\right)^2$	-31,2608	-44,9523	-3,41823	
$71 \left(T_{18,7}^{V}\right)^{2}$	-469,328	-273,902	65,50331	
$72 \left(T_{23,8}^{i}\right)^{2}$	-42,5441	-16,7621	9,447515	
$73 \left(T_{23,8}^{V}\right)^2$	-121,236	-67,7202	49,97445	
$74 \left(T_{31,5}^{\rm H}\right)^2$	-71,545	-28,3042	1,067297	
$75 (T_{31,5}^{V})^2$	-294,518	-138,34	0	
$76 \left(T_{36,7}^{\mathrm{H}}\right)^{2}$	89,97258	6,271416	8,781336	
$77 \left(T_{36,7}^{V}\right)^2$	401,9796	177,8147	30,93312	
$78 \left(T_{91,6}^{\rm V}\right)^2$	-0,52461	0,547726	0,093877	

Окончание таблицы

### Результаты восстановления геопараметров

При построении и обучении регрессий использовались данные только с февраля по ноябрь (включительно). Для тестирования используются данные за декабрь 2020 г. На *рис.* 8–10 (см. с. 60) представлены восстановленные карты ТПО, скорости ветра и паросодержания.







*Рис. 9.* Результат восстановления скорости ветра. Разница между восстановленными данными и реанализом



*Рис. 10.* Результат восстановления интегрального паросодержания. Разница между восстановленными данными и реанализом

Для того что бы показать достаточно большую область, данные для теста были совмещены с данными реанализа в диапазоне ±5 мин. Примеры сделаны для 3 декабря 2020 г.

#### Заключение

Стоит отметить, что приведённые в работе оценки точности восстановления геопараметров промежуточные, а сама работа находится на начальном этапе. Несмотря на это, полученные оценки точности восстанавливаемых параметров сравнимы с зарубежными. Например, для планируемого к запуску прибора AMSR-3 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer 3) ( $2^{nd}$  Research..., 2018) точности для восстановления геопараметров следующие: интегральное паросодержание — <3 мм (результат для MTB3A-ГЯ — 2,6 мм); скорость ветра — <7 м/с (для MTB3A-ГЯ — <2,5 м/с); ТПО — <0,8 К (для MTB3A-ГЯ — <2,2 К). В случае ТПО для прибора MTB3A-ГЯ точность хуже из-за отсутствия данных на частоте в 6 ГГц, измерения на которой наиболее чувствительны к температуре поверхности.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности восстановления геофизических параметров системы «океан – атмосфера» (ТПО, скорости приводного ветра и интегрального паросодержания). Работы в направлении улучшения качества получаемых продуктов ещё много, не решён огромный список вопросов, к которому относится и проблема геопривязки радиоизмерений. Именно эта проблема приводит к снижению точности восстановления скорости ветра и, возможно, окажет значительное влияние на восстановление интенсивности осадков. Также ещё нет результатов по восстановлению водозапаса облачности, но полученные данные свидетельствуют о возможности создавать геофизические продукты если не лучше, то на уровне зарубежных.

Работы продолжаются в целях разработки алгоритмов восстановления водозапаса облачности и интенсивности осадков, которые позволят разделять наблюдения на сцены и повысить точность восстановления других геопараметров в условиях осадков, свободной и малооблачной атмосферы. Также планируется разработать алгоритмы, которые обеспечат восстановление геопараметров над поверхностью суши.

Полученные на данном этапе продукты по интегральному паросодержанию можно найти в картографическом веб-интерфейсе системы «Bera-Science» (http://sci-vega.ru/).

Работа выполнена в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122012400187-6).

# Литература

- 1. 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. Т. 8. № 2. С. 257–263.
- 2. Болдырев В. В., Горобец Н. Н., Ильгасов П. А., Никитин О. В., Панцов В. Ю., Прохоров Ю. Н., Стрельников Н. И., Стрельцов А. М., Черный И. В., Чернявский Г. М., Яковлев В. В. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 1. № 5. С. 243–248.
- 3. Ермаков Д. М., Кузьмин А. В., Мазуров А. А., Пашинов Е. В., Садовский И. Н., Сазонов Д. С., Стерлядкин В. В., Чернушич А. П., Черный И. В., Стрельцов А. М., Шарков Е. А., Екимов Н. С. Концепция потоковой обработки данных российских спутниковых СВЧ-радиометров серии МТВЗА на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 298–303. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303.
- 4. *Кутуза Б. Г., Данилычев М. В., Яковлев О. И.* Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: Ленанд, 2016. 336 с.
- Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 6. Репина И.А., Тихонов В.В., Алексеева Т.А., Иванов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю. Электродинамическая модель излучения арктического ледяного покрова для решения задач спутниковой микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 5. С. 29–36.
- 7. Рис У.Г. Основы дистанционного зондирования. 2-е изд.: пер. с англ. М.: Техносфера, 2006. 336 с.
- 8. *Сазонов Д. С., Садовский И. Н., Кузьмин А. В.* Космический эксперимент «Конвергенция». Дистанционное определение температуры океана по радиоизмерениям на частотах 10.65, 18.7 и 36.5 ГГц // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 2. С. 82–94.
- 9. *Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю.* Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 283 с.
- 10. *Стерлядкин В. В., Шарков Е. А.* Дифференциальные радиотепловые методы определения вертикального профиля водяного пара в тропосфере и стратосфере Земли // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 5. С. 15–28.
- 11. 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.
- 12. Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П., Митник М. Л., Чёрный И. В. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 78–100.

- 13. *Шарков Е.А.* Дистанционные исследования атмосферных катастроф // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 52–68.
- 14. 2<sup>nd</sup> Research Announcement on the Earth Observations: JAXA Satellite Project Research. 2018. 59 p. URL: https://www.eorc.jaxa.jp/en/research/ra/2nd\_ra\_eo/material/2nd\_EO-RA\_guide\_E.pdf.
- Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L. Advanced Microwave Imager/ Sounder MTVZA-GY-MP for New Russian Meteorological Satellite // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2017. P. 1220–1223.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2018. DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.

# Algorithm for reconstructing ocean surface temperature, near-surface wind speed and integral vapor content from MTVZA-GYa data

# D.S. Sazonov

### Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: sazonov\_33m7@mail.ru

In this paper, we present a regression approach to the problem of reconstructing ocean surface temperature, surface wind speed, and integral vapor content from radiometric measurements of the MTVZA-GYa microwave radiometer. A feature of the proposed approach is the use of cross terms in the regression equation. The paper provides a rationale for the choice of the regression ratio, the used set of radiometric channels and additional telemetry, and also reconstructs geoparameters on the basis of real measurements from space and makes a comparison with reanalysis. The results of the work showed that the geoparameters can be retrieved with an accuracy: vapor content <2.6 mm in the range of 0-60 mm; wind speed <1-2.5 m/s in the range of 0-20 m/s and SST <1.5-2.5 K all cases. The specified geoparameters are presented in the corresponding section (operating in test mode) of the Vega resource.

**Keywords:** remote sensing, MTVZA-GYa, geoparameters, ocean surface temperature, wind speed, integral vapor content, reconstruction algorithm

Accepted: 13.01.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-50-64

# References

- 1. Barsukov I.A., Nikitin O.V., Streltsov A.M., Cherny I.V., Chernyavsky G.M., Preliminary data processing of microwave radiometer MTVZA-GY based on spacecraft "Meteor-M" No. 1, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No 2, pp. 257–263 (in Russian).
- Boldyrev V.V., Gorobets N.N., Il'gasov P.A., Nikitin O.V., Pantsov V.Yu., Prokhorov Yu.N., Strel'nikov N.I., Strel'tsov A. M., Chernyi I.V., Chernyavskii G. M., Yakovlev V.V., Satellite microwave scanner/ sounder MTVZA-GY, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 1, No. 5, pp. 243–248 (in Russian).
- Ermakov D. M., Kuzmin A. V., Mazurov A. A., Pashinov E. V., Sadovsky I. N., Sazonov D. S., Sterlyadkin V. V., Chernushich A. P., Cherny I. V., Streltsov A. M., Sharkov E. A., Ekimov N. S., The concept of streaming data processing of Russian satellite microwave radiometers of the MTVZA series based on IKI-Monitoring Center for Collective Use, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 298–303 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303.
- 4. Kutuza B.G., Danilychev M.V., Yakovlev O.I., Satellite Earth Monitoring: Microwave Radiometry of the Atmosphere and Surface, Moscow: Lenand, 2016, 336 p. (in Russian).

- Loupian E.A., Proshin A.A., Bourtsev M.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Mazurov A.A., Marchenkov V.V., Matveev A.M., Radchenko M.V., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 6. Repina I.A., Tikhonov V.V., Alekseeva T.A., Ivanov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N.Yu., Electrodynamics Model of Arctic Sea Ice Radiation to Solve the Problems of Satellite Microwave Radiometry, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 5, pp. 29–36 (in Russian).
- 7. Rees W.G., *Physical Principles of Remote Sensing*, 2<sup>nd</sup> ed., Cambridge University Press, 2001, 343 p.
- 8. Sazonov D. S., Sadovsky I. N., Kuzmin A. V., Space Experiment "Convergence", Remote Determination of the Ocean Temperature by Radio Measurements at a Frequency of 10.65, 18.7 and 36.5 GHz, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2020, No. 2, pp. 82–94 (in Russian).
- 9. Stepanenko V.D., Shchukin G.G., Bobylev L.P., Matrosov S.Yu., *Radioteplolokatsiya v meteorologii* (Radiolocation in meteorology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, 283 p. (in Russian).
- Sterlyadkin V.V., Sharkov E.A., Differential Radiometric Methods for Measurements of Vertical Profile of Water Vapor in Earth's Troposphere and Stratosphere, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 5, pp. 15– 28 (in Russian).
- 11. Asmus V.V., Uspensky A.B., Kozlov A.A., Kramchaninova E.K., Streltsov A.M., Chernyavsky G.M., Cherny I.V., Absolute calibration of Microwave Radiometer MTVZA-GY Atmospheric Sounding Channels, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 5, pp. 57–70 (in Russian).
- 12. Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Cherny I. V., Microwave sensing of the ocean, atmosphere and land surface from Meteor-M No. 2 data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zon-dirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018. Vol. 15, No. 4, pp. 78–100 (in Russian).
- 13. Sharkov E.A., Remote Sensing of Atmospheric Catastrophes, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2010, No. 1, pp. 52–68 (in Russian).
- 14. 2<sup>nd</sup> Research Announcement on the Earth Observations: JAXA Satellite Project Research, 2018, 59 p., available at: https://www.eorc.jaxa.jp/en/research/ra/2nd\_ra\_eo/material/2nd\_EO-RA\_guide\_E.pdf.
- 15. Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Advanced Microwave Imager/ Sounder MTVZA-GY-MP for New Russian Meteorological Satellite, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2017, pp. 1220–1223.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N., ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present, *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*, 2018, DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.