

## Определение приповерхностной температуры воздуха над сушей по данным микроволнового зондирования с ИСЗ «Метеор-М» № 1

Е.К. Крамчанинова, А.Б. Успенский

ФГБУ «НИЦ космической гидрометеорологии «Планета»,  
123242, Москва, Большой Предтеченский пер., 7,  
e-mail: alexpr11@yandex.ru

Исследована пригодность информации микроволнового сканера-зондировщика МТВЗА-ГЯ, установленного на КА «Метеор-М» № 1 (запуск 17.09.2011), для дистанционного определения приповерхностной температуры воздуха  $T_a$  над сушей. Восстановление  $T_a$  по данным МТВЗА-ГЯ было выполнено для большей части территории Европы с помощью метода множественной линейной регрессии. В качестве предикторов использовались значения яркостных температур  $T_s$ , измеренных в каналах 18,7Н, 23,8V, 36,7V, 91,65V (число — частота центрирования канала в гигагерцах, Н и V — горизонтальная и вертикальная поляризации соответственно). Для расчетов использовались данные МТВЗА-ГЯ за апрель 2010 г. и апрель – сентябрь 2011 г. Значения излучательной способности суши и распределение типов поверхности суши взяты из общедоступных баз данных. Среднее отклонение спутниковых оценок  $T_a$  от приповерхностных температур воздуха по данным объективного анализа (разрешение —  $2,5^\circ$ ) составило 0,4 К при среднеквадратическом отклонении 2,9 К. Аналогичные величины при сравнении с данными синоптических станций равны 0,2 и 3,8 К соответственно.

**Ключевые слова:** микроволновой сканер-зондировщик, классификация типов поверхности суши, приповерхностная температура воздуха, яркостная температура, множественная линейная регрессия.

### Введение

В статье представлены результаты разработки методики дистанционного определения приповерхностной температуры воздуха  $T_a$  (над сушей) по данным измерений сканера-зондировщика МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» № 1. Исследования проводились в период опытной эксплуатации КА «Метеор-М» № 1 (2010–2011). Раздел 1 содержит описание исходных спутниковых данных и привлекаемой дополнительной информации. В разд. 2 анализируется качество измерений МТВЗА-ГЯ в каналах сканера, непосредственно используемых для дистанционного определения  $T_a$ . Методика дистанционного определения  $T_a$  по данным МТВЗА-ГЯ и результаты ее испытаний рассмотрены в разд. 3. В заключении кратко суммированы результаты и выводы.

### 1. Исходные данные

Для экспериментальной отработки методики восстановления приповерхностной температуры воздуха  $T_a$  по данным МТВЗА-ГЯ был выбран район «Европа» ( $10^\circ$  з.д. –  $55^\circ$  в.д.,  $35$ – $70^\circ$  с.ш.). С этой целью из архива данных МТВЗА-ГЯ были отобраны полувитки за апрель 2010 г. и апрель – сентябрь 2011 г. Кроме того, для разработки методики и валидации результатов привлекалась дополнительная информация.

При моделировании измерений МТВЗА-ГЯ и для контроля результатов восстановления  $T_a$  использованы данные объективного анализа метеополей (разрешение  $2,5^\circ$ ) и наблюдения  $T_a$  на синоптических станциях в стандартные сроки 00:00 и 12:00 UTC из базы данных Гидрометцентра России. В тексте данные объективного анализа обозначаются индексом «oa2», данные синоптических станций — индексом «син». Поскольку профили влажности имеются только до уровня 500 гПа, они были экстраполированы на уровни 400–10 гПа

посредством кубического сплайна. Для пространственно-временного совмещения данных МТВЗА-ГЯ с привлеченными дополнительными данными были сформированы выборки пикселей, попадающих в выбранный район и отличающихся по времени спутникового измерения от стандартных синоптических сроков не более чем на 1,5 ч. Для совмещения данных МТВЗА-ГЯ с данными объективного анализа по пространству применялись две процедуры:

- усреднение данных МТВЗА-ГЯ по ячейкам сетки объективного анализа, при этом результат приписывался центру ячейки (обозначение в тексте индексом «ср1»);
- усреднение данных МТВЗА-ГЯ по малой окрестности ( $0,2 \times 0,2^\circ$ ) некоторой точки поверхности Земли, при этом результат приписывался этой точке (обозначение в тексте индексом «ср2»).

Для моделирования данных МТВЗА-ГЯ, т. е. расчета яркостных температур  $T_y$  по известным профилям температуры и влажности атмосферы и излучательной способности подстилающей поверхности  $e$  (решения прямой задачи переноса микроволнового излучения в системе «атмосфера-поверхность»), использована радиационная модель, разработанная в СПбГУ, см., например, (Черный и др., 2003). Моделированные данные обозначены в тексте индексом «мод». Значения излучательной способности  $e$  для суши с пространственным разрешением  $1^\circ$  взяты из базы данных Atmospheric and Environmental Research (<http://ftp.aer.com/emis>). Для определения типа поверхности суши использована база данных ISLSCP II MODIS (Collection 4) IGPB Land Cover, 2000–2001, с пространственным разрешением  $0.25^\circ$  (<http://daac.ornl.gov>).

В классификации, принятой в IGBP (International Geosphere-Biosphere Program), выделяется 17 типов поверхности суши. Восемь из них представляют особый интерес для данного исследования — кустарники, саванны, луга, пахотные земли, пустоши и некоторые другие. Высота растительного покрова для этих типов не превышает 2 м, что делает возможным восстановление  $T_a$  с приемлемой погрешностью по данным МТВЗА-ГЯ. В центральной Европе наиболее распространены пахотные земли, значительные площади заняты лугами и смешанными лесами. В северной Европе наибольшие площади заняты вечнозелеными хвойными лесами. Прочие типы поверхности суши занимают в Европе сравнительно небольшие участки. Таким образом, центральная Европа, большая часть которой покрыта пахотными землями, является наиболее подходящим районом для экспериментов по восстановлению приповерхностной температуры  $T_a$ .

Для снижения уровня инструментального шума, содержащегося в данных измерений МТВЗА-ГЯ, применялась процедура сглаживания методом скользящего среднего, размер окна  $3 \times 3$  пиксела.

В прибрежной полосе суши шириной до 300 км данные измерений  $T_y$  сканером МТВЗА-ГЯ имеют существенно заниженные значения — разница со значениями в глубине материка достигает величин порядка 100–150 К, в особенности для горизонтально поляризованных каналов, что выходит за границы естественной изменчивости  $T_y$ . Из представленных на рис. 1 примеров данных для восходящего и нисходящего полувитков МТВЗА-ГЯ видно, что наиболее значительное занижение сигнала происходит при перемещении спутника в направлении от суши к воде.

Чтобы исключить из рассмотрения прибрежную полосу, в районе «Европа» была выделена область, именуемая далее в тексте «область анализа», обозначенная на рис. 2 желтым цветом, в пределах которой выполнялось сравнение измеренных и модельных яркостных температур, а также оценка погрешности восстановленных по данным МТВЗА-ГЯ значений  $T_a$ .

## 2. Оценка качества измерений МТВЗА-ГЯ в каналах сканера

Для оценки качества измерений сканера МТВЗА-ГЯ выполнено их сопоставление с модельными расчетами. В табл. 1 представлены результаты сравнения данных МТВЗА-ГЯ с результатами моделирования для района «Европа» за апрель 2010 г.:  $b$  — среднее отклонение;  $\sigma$  — стандартное отклонение; СКО — среднеквадратическое отклонение;  $N$  — объем выборки для сравнений. Наименования каналов здесь и далее в тексте отражают частоту центрирования в гигагерцах и поляризацию (H — горизонтальная, V — вертикальная). Большой диапазон изменения систематических смещений  $b$  в различных каналах (от  $-0,3$  до  $-4,6$  К) свидетельствует о наличии внешних влияний и помех, возникающих при регистрации и передаче сигнала. Стандартные отклонения  $\sigma$  для всех каналов достаточно велики (от 4,4 до 8,6 К), что можно объяснить высоким уровнем инструментального шума. Необходимо отметить аномально большие значения  $b$  и  $\sigma$  в канале 10,6V, что может быть следствием больших погрешностей калибровки.

**Таблица 1.** Сравнение измеренных ( $T_{я\text{ср2}}$ ) и расчетных ( $T_{я\text{мод}}$ ) яркостных температур для района «Европа», данные за апрель 2010 г.,  $N = 1363$

| Наименование канала | $b$ , К | $\sigma$ , К | СКО, К |
|---------------------|---------|--------------|--------|
| 10,6V               | 19,7    | 7,1          | 21,0   |
| 10,6H               | -0,3    | 8,6          | 8,6    |
| 18,7V               | -0,6    | 4,8          | 4,9    |
| 18,7H               | -2,5    | 5,7          | 6,2    |
| 23,8V               | -1,1    | 4,2          | 4,4    |
| 23,8H               | -4,6    | 4,9          | 6,8    |
| 36,7V               | -0,4    | 4,7          | 4,7    |
| 36,7H               | 3,3     | 5,2          | 6,2    |
| 91,65V              | 0,6     | 6,0          | 6,0    |

В табл. 2 представлены аналогичные данные за период с июля по сентябрь 2011 г., за исключением канала 91,65 ГГц, так как в указанный период в этом канале полезный сигнал практически отсутствовал. Для каналов сканера результаты сравнения измеренных и модельных яркостных температур 2011 г. подобны результатам 2010 г., что позволяет применять регрессионные алгоритмы для тематической обработки данных МТВЗА-ГЯ.

**Таблица 2.** Сравнение измеренных ( $T_{я\text{ср2}}$ ) и расчетных ( $T_{я\text{мод}}$ ) яркостных температур для района «Европа», данные за июль, август, сентябрь 2011 г.

| Наименование канала | Июль, N = 485 |              |        | Август, N = 794 |              |        | Сентябрь, N = 659 |              |        |
|---------------------|---------------|--------------|--------|-----------------|--------------|--------|-------------------|--------------|--------|
|                     | $b$ , К       | $\sigma$ , К | СКО, К | $b$ , К         | $\sigma$ , К | СКО, К | $b$ , К           | $\sigma$ , К | СКО, К |
| 10,6V               | 24,9          | 8,9          | 26,5   | 22,6            | 9,3          | 24,4   | 21,9              | 8,7          | 23,6   |
| 10,6H               | 7,5           | 7,9          | 10,9   | 4,3             | 8,2          | 9,3    | 6,4               | 8,2          | 10,4   |
| 18,7V               | 1,0           | 5,3          | 5,4    | -0,1            | 5,9          | 5,9    | -0,3              | 5,3          | 5,3    |
| 18,7H               | 2,4           | 5,5          | 6,0    | 1,0             | 6,0          | 6,1    | 0,4               | 5,6          | 5,6    |
| 23,8V               | 0,5           | 4,4          | 4,4    | -0,3            | 4,6          | 4,6    | -0,6              | 4,3          | 4,3    |
| 23,8H               | -0,4          | 4,5          | 4,5    | -1,5            | 4,9          | 5,1    | -2,1              | 4,7          | 5,1    |
| 36,7V               | 0,4           | 5,3          | 5,3    | -0,2            | 5,5          | 5,5    | -0,8              | 4,7          | 4,7    |
| 36,7H               | 5,5           | 5,8          | 8,0    | 4,3             | 5,7          | 7,1    | 3,9               | 5,4          | 6,7    |

### 3. Регрессионные оценки приповерхностной температуры воздуха по данным МТВЗА-ГЯ

#### 3.1. Алгоритм восстановления $T_a$

Восстановление приповерхностной температуры воздуха  $T_a$  по данным МТВЗА-ГЯ было выполнено методом множественной линейной регрессии. Из отобранных данных формировались выборки: «обучающие» — по ним вычислялась матрица коэффициентов регрессии, и «контрольные» — они использовались для восстановления  $T_a$ . Исползованный алгоритм предложен и обоснован в (McFarland et al., 1990) применительно к данным микроволнового сканера SSM/I спутника DMSP (США). Частоты центрирования каналов сканера SSM/I — 19,53; 22,235; 37 и 85,5 ГГц. Основные положения обоснования алгоритма и выбора подходящих каналов состоят в следующем.

Излучение участков поверхности суши, покрытых плотной растительностью с высокой постоянной излучательной способностью, мало поляризовано — в терминах яркостной температуры поляризационная разность обычно составляет несколько Кельвинов. Уменьшение плотности растительности будет проявляться в увеличении поляризации излучения поверхности почвы, причем вертикально поляризованное излучение варьирует в наименьшей степени. В этом случае связь между температурой излучающего слоя и яркостной температурой микроволнового излучения в отсутствии атмосферных эффектов имеет вид:

$$T_a = C_1 T_{яV} \quad (1)$$

Здесь  $T_a$  — температура воздуха вблизи поверхности (К);  $C_1$  — величина, обратная к излучательной способности (для плотной растительности полагаем излучательную способность  $\sigma = 0,92$ ,  $C_1 = 1/\sigma = 1,09$ ),  $T_{яV}$  — яркостная температура, измеренная в любом вертикально поляризованном канале.

При отсутствии эффектов атмосферного рассеяния и поглощения водяным паром, облачными гидрометеорами и дождевыми каплями данные в вертикально поляризованных каналах более высокой частоты обеспечивали бы лучшую точность определения  $T_a$  благодаря низкой диэлектрической постоянной воды, улучшенному пространственному разрешению и более тонкому излучающему слою, в сравнении с данными в каналах более низких частот. С другой стороны, низкочастотные каналы, как менее подверженные влиянию со стороны указанных эффектов, всегда наблюдающихся в реальной атмосфере, теоретически являются наиболее подходящими для оценки приповерхностной температуры воздуха.

Для определения приповерхностной температуры, с учетом наличия в атмосфере и на поверхности суши влаги, в уравнение (1) необходимо ввести слагаемые, учитывающие ее влияние на излучение:

$$T_a = A_1 T_{я37V} + A_2 (T_{я37V} - T_{я22,235V}) + A_3 (T_{я37V} - T_{я19,53H}) + A_4 T_{я85,5V} \quad (2)$$

Здесь через  $T_{я19,53H}$ ,  $T_{я22,235V}$ ,  $T_{я37V}$  и  $T_{я85,5V}$  обозначены яркостные температуры, измеренные в каналах 19,53H; 22,235V; 37V и 85,5V. В уравнении (2) наиболее информативный предиктор для восстановления  $T_a$  — измерения в канале 37V. Разность измерений яркостных температур в каналах 37V и 22,235V учитывает влияние атмосферного водяного пара. Разность между яркостными температурами в каналах 37V и 19,53H описывает влияние воды, присутствующей на излучающем участке поверхности суши. Последнее слагаемое отражает влияние атмосферных гидрометеоров. Среднее атмосферное ослабление может быть включено в константу регрессии, а отклонение от среднего — в коэффициент при 85,5V.

После приведения подобных членов уравнение (2) приобретает следующий вид:

$$T_a = B_0 + B_1 T_{я37V} - B_2 T_{я22,235V} - B_3 T_{я19,53H} + B_4 T_{я85,5V}$$

Заменяя каналы SSM/I соответствующими (близкими к ним) каналами МТВЗА-ГЯ, получаем следующий регрессионный алгоритм для восстановления приповерхностной температуры ( $C_0, \dots, C_4$  — коэффициенты регрессии):

$$T_a = C_0 + C_1 T_{я36,7V} - C_2 T_{я23,8V} - C_3 T_{я18,7H} + C_4 T_{я91,65V} \quad (3)$$

Поскольку в 2011 г. данные измерений в канале 91,65V практически отсутствовали, для оценивания  $T_a$ , наряду с алгоритмом (3), использовался модифицированный алгоритм, в котором эти данные не участвуют:

$$T_a = D_0 + D_1 T_{я36,7V} - D_2 T_{я23,8V} - D_3 T_{я18,7H} \quad (4)$$

### 3.2. Эксперименты с данными МТВЗА-ГЯ 2010 г.

Для расчетов использованы данные МТВЗА-ГЯ за апрель 2010 г., значения  $T_a$  по данным объективного анализа (разрешение  $2,5^\circ$ ) и база данных ISLSCP II MODIS (Collection 4) IGBP Land Cover, 2000–2001 (разрешение  $0,5^\circ$ ).

В табл. 3 представлены результаты сравнения оценок  $T_a$ , восстановленных по усредненным (вариант усреднения «ср2») измерениям МТВЗА-ГЯ по формулам (3) и (4) соответственно, со значениями  $T_a$  по данным синоптических станций ( $T_{a\text{син}}$ ) и объективного анализа на сетке  $2,5^\circ$  ( $T_{a\text{oa2}}$ ) для различных типов поверхности суши (по классификации IGBP), наиболее распространенных в области анализа: 01 — вечнозеленые хвойные леса, 04 — листопадные широколиственные леса, 05 — смешанные леса, 12 — пахотные земли, 14 — мозаика из пахотных земель и естественной растительности.

**Таблица 3.** Сравнение восстановленной по данным МТВЗА-ГЯ приповерхностной температуры  $T_a$  с данными синоптических станций  $T_{a\text{син}}$  и объективного анализа  $T_{a\text{oa2}}$ , апрель 2010 г.

| Алгоритм    | IGBP тип поверхности | $T_a - T_{a\text{син}}$ |              |        |      | $T_a - T_{a\text{oa2}}$ |              |        |     |
|-------------|----------------------|-------------------------|--------------|--------|------|-------------------------|--------------|--------|-----|
|             |                      | b, К                    | $\sigma$ , К | СКО, К | N    | b, К                    | $\sigma$ , К | СКО, К | N   |
| Формула (3) | 01                   | 1,9                     | 4,2          | 4,6    | 239  | 0,8                     | 2,4          | 2,6    | 41  |
|             | 04                   | -3,7                    | 4,4          | 5,7    | 180  | -1,8                    | 1,7          | 2,4    | 6   |
|             | 05                   | 0,2                     | 4,7          | 4,7    | 515  | -0,8                    | 2,0          | 2,2    | 40  |
|             | 12                   | 0,2                     | 2,0          | 2,0    | 2273 | 1,0                     | 1,7          | 1,9    | 182 |
|             | 14                   | -1,1                    | 3,0          | 3,2    | 1884 | -0,6                    | 1,5          | 1,6    | 110 |
| Формула (4) | 01                   | 0,9                     | 4,2          | 4,2    | 239  | -0,4                    | 1,8          | 1,9    | 41  |
|             | 04                   | 2,2                     | 4,0          | 4,6    | 180  | 4,0                     | 1,4          | 4,2    | 6   |
|             | 05                   | 2,3                     | 4,5          | 5,0    | 515  | 1,3                     | 1,9          | 2,3    | 40  |
|             | 12                   | 0,4                     | 1,9          | 2,0    | 2273 | 1,1                     | 1,7          | 2,0    | 182 |
|             | 14                   | -0,1                    | 3,0          | 3,0    | 1884 | 0,3                     | 1,5          | 1,6    | 110 |

Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- для участков поверхности суши, покрытых низкорослой растительностью (типы 12 и 14), качество восстановления  $T_a$  соответствует результатам (McFarland et al., 1990);

- среднеквадратическое отклонение в случае сравнения оценок  $T_a$  с данными синоптических станций несколько больше, чем при сравнении с данными объективного анализа; возрастание СКО можно объяснить тем, что данные синоптических станций, являясь первичными данными, могут содержать ошибки различной природы, в то время как данные объективного анализа, полученные в результате обработки большого количества проконтролированных данных, сглажены;
- погрешность восстановления  $T_a$  (СКО) для участков, покрытых лесами (типы 01, 04, 05), в 2–2,5 раза выше, чем для участков с низкорослой растительностью. Возможной причиной может быть отсутствие адекватных данных для расчета коэффициентов регрессии;
- отказ от использования в алгоритме восстановления  $T_a$  измерений в канале 91,65V сказался незначительно на точности восстановления, что позволяет применять формулу (4) вместо формулы (3).

На рис. 3 показано удовлетворительное соответствие восстановленного поля  $T_a$  (а) с полями приповерхностной температуры по данными объективного анализа (б) и синоптических станций (в). В пределах области сравнения среднее отклонение восстановленной  $T_a$  от  $T_{a\text{ син}}$  (г) составило 0,2 К при среднеквадратическом отклонении 3,6 К (объем выборки для сравнений — 586). Сильно заниженные значения  $T_a$  в прибрежной полосе Скандинавского п-ова (отличие от  $T_a$  в середине полуострова доходит до 30 К) объясняются заниженными значениями измеренной  $T_a$  (см. разд. 1).

### 3.3. Эксперименты с данными МТВЗА-ГЯ 2011 г.

Для расчетов использованы данные МТВЗА-ГЯ за апрель – сентябрь 2011 г., поля  $T_a$  по данным объективного анализа (разрешение 2,5°) и база данных ISLSCP II MODIS (Collection 4) IGBP Land Cover, 2000-2001 (разрешение 0,5°).

В табл. 4 представлены результаты сравнения приповерхностной температуры  $T_a$ , восстановленной по усредненным (вариант усреднения «ср2») измерениям МТВЗА-ГЯ по формуле (3), с приповерхностной температурой по данным синоптических станций ( $T_{a\text{ син}}$ ) и объективного анализа на сетке 2,5° ( $T_{a\text{ оа2}}$ ) для различных типов поверхности суши по месяцам.

**Таблица 4.** Сравнение восстановленной по данным МТВЗА-ГЯ приповерхностной температуры  $T_a$  с данными синоптических станций  $T_{a\text{ син}}$  и объективного анализа  $T_{a\text{ оа2}}$ , апрель – сентябрь 2011 г., расчет по формуле (4)

| Месяц  | IGBP тип поверхности | $T_a - T_{a\text{ син}}$ |      |        |      | $T_a - T_{a\text{ оа2}}$ |      |        |     |
|--------|----------------------|--------------------------|------|--------|------|--------------------------|------|--------|-----|
|        |                      | б, К                     | σ, К | СКО, К | N    | б, К                     | σ, К | СКО, К | N   |
| Апрель | 01                   | 2,1                      | 3,1  | 3,7    | 236  | 2,1                      | 2,1  | 2,9    | 53  |
|        | 04                   | 5,7                      | 3,6  | 6,7    | 229  | 5,8                      | 2,2  | 6,2    | 9   |
|        | 05                   | 1,5                      | 3,9  | 4,2    | 661  | 1,1                      | 2,9  | 3,0    | 50  |
|        | 12                   | -0,4                     | 2,8  | 2,8    | 2915 | 0,4                      | 2,5  | 2,5    | 238 |
|        | 14                   | -2,2                     | 3,6  | 4,2    | 1265 | -2,2                     | 3,3  | 4,0    | 93  |
| Май    | 01                   | -3,0                     | 4,3  | 5,2    | 334  | -2,6                     | 3,8  | 4,6    | 84  |
|        | 05                   | -0,8                     | 7,8  | 7,8    | 1004 | -1,3                     | 2,6  | 2,8    | 84  |
|        | 12                   | -1,6                     | 2,4  | 2,9    | 4218 | -0,6                     | 2,2  | 2,2    | 359 |
|        | 14                   | 0,7                      | 3,2  | 3,2    | 1880 | 1,1                      | 2,3  | 2,6    | 143 |

| Месяц    | IGBP тип поверхности | $T_a - T_{a \text{ син}}$ |              |        |      | $T_a - T_{a \text{ оа2}}$ |              |        |     |
|----------|----------------------|---------------------------|--------------|--------|------|---------------------------|--------------|--------|-----|
|          |                      | b, К                      | $\sigma$ , К | СКО, К | N    | b, К                      | $\sigma$ , К | СКО, К | N   |
| Июнь     | 01                   | 1,28                      | 3,3          | 3,54   | 317  | 1,5                       | 2,7          | 3,1    | 90  |
|          | 05                   | -0,3                      | 4,0          | 4,0    | 951  | 0,2                       | 2,4          | 2,4    | 73  |
|          | 12                   | 0,5                       | 2,4          | 2,5    | 3861 | 1,5                       | 2,1          | 2,5    | 339 |
|          | 14                   | 0,5                       | 2,7          | 2,7    | 1720 | 1,5                       | 2,0          | 2,5    | 105 |
| Июль     | 01                   | 0,2                       | 3,5          | 3,5    | 114  | -0,7                      | 2,1          | 2,2    | 28  |
|          | 05                   | 2,1                       | 3,6          | 4,1    | 358  | 1,5                       | 2,7          | 3,1    | 25  |
|          | 12                   | -0,8                      | 2,3          | 2,5    | 1386 | -0,6                      | 2,1          | 2,2    | 122 |
|          | 14                   | 0,2                       | 2,4          | 2,4    | 547  | 0,6                       | 1,5          | 1,6    | 41  |
| Август   | 01                   | -3,7                      | 4,5          | 5,8    | 217  | -3,9                      | 1,6          | 4,2    | 10  |
|          | 04                   | 0,0                       | 3,4          | 3,4    | 690  | 0,4                       | 2,3          | 2,4    | 46  |
|          | 12                   | 0,0                       | 2,1          | 2,1    | 3128 | 0,7                       | 2,0          | 2,1    | 264 |
|          | 14                   | 0,2                       | 2,5          | 2,5    | 1626 | 0,7                       | 1,7          | 1,8    | 92  |
| Сентябрь | 01                   | 1,7                       | 3,9          | 4,2    | 196  | 1,6                       | 2,4          | 2,8    | 52  |
|          | 05                   | -0,9                      | 3,8          | 3,9    | 562  | -0,8                      | 2,5          | 2,6    | 43  |
|          | 12                   | 2,0                       | 2,6          | 3,3    | 2342 | 2,7                       | 2,3          | 3,6    | 197 |
|          | 14                   | -0,8                      | 2,7          | 2,8    | 1029 | -0,3                      | 2,2          | 2,2    | 73  |

На рис. 4 приведен пример поля оценок  $T_a$  ( $a$ ) для нисходящего полувитка 15d за 14 сентября 2011 г. Соответствующие поля приповерхностной температуры по данным объективного анализа и синоптических станций представлены на рис. 4б, в соответственно. В пределах области сравнения среднее отклонение восстановленной  $T_a$  от  $T_{a \text{ син}}$  ( $z$ ) составляет  $-0,8$  К при среднеквадратическом отклонении  $3,0$  К (объем выборки для сравнений — 530). Хорошее согласование восстановленного поля  $T_a$  и измеренного нарушается только в прибрежной полосе — на северном побережье Европы значения занижены, а на южном — завышены, что является следствием возрастания измерительных погрешностей.

Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- среднеквадратическое отклонение для поверхности типов 12 и 14 в основном находится в тех же пределах ( $2 \dots 3$  К), что в экспериментах с данными 2010 г., демонстрируя пригодность алгоритма для решения поставленной задачи; отдельные значения СКО, выпадающие из этого интервала (для типа 14 в апреле и для типа 12 в сентябре), объясняются дефектами в спутниковых данных, которые не удалось устранить на этапе предварительной обработки;
- результаты восстановления  $T_a$  для поверхностей, покрытых лесами (типы 01, 04, 05) находятся в полном соответствии с результатами экспериментов с данными 2010 г.; среднеквадратичное отклонение для этих типов поверхности принимает более высокие значения и изменяется в более широком диапазоне ( $2,5 \dots 8$  К), чем для участков суши, покрытых низкорослой растительностью.

### Заключение

Результаты выполненной работы можно суммировать следующим образом:

- систематические смещения  $b$  и стандартные отклонения  $\sigma$  в каналах сканера для выборок за апрель 2010 г. и июль – сентябрь 2011 г. в каналах, используемых для оценки  $T_a$  (18,7H, 23,8V, 36,7V), меняются в диапазонах  $b = -2,5 \dots 2,4$  К,  $\sigma = 4,3 \dots 6,2$  К

соответственно; большие значения  $b$  и  $\sigma$  можно объяснить повышенным уровнем инструментального шума, наличием значительных помех при регистрации и передаче сигнала и погрешностями калибровки; вследствие помех с июля 2011 г. практически полностью отсутствует полезный сигнал в канале 91,65 ГГц;

- в прибрежной полосе суши шириной до 300 км измеренные значения яркостной температуры существенно занижены. Разница со значениями яркостной температуры в глубине материка достигает величин порядка 100...150 К, в особенности для горизонтально поляризованных каналов.
- множественная линейная регрессия, как метод восстановления  $T_a$  по данным сканера МТВЗА-ГЯ, позволяет решать поставленную задачу с приемлемой точностью (СКО порядка 2...3 К) для участков поверхности суши, покрытых низкорослой растительностью, например, для пахотных земель и мозаики из пахотных земель и естественной растительности; задача восстановления приповерхностной температуры на лесистых участках поверхности требует дальнейшего исследования.

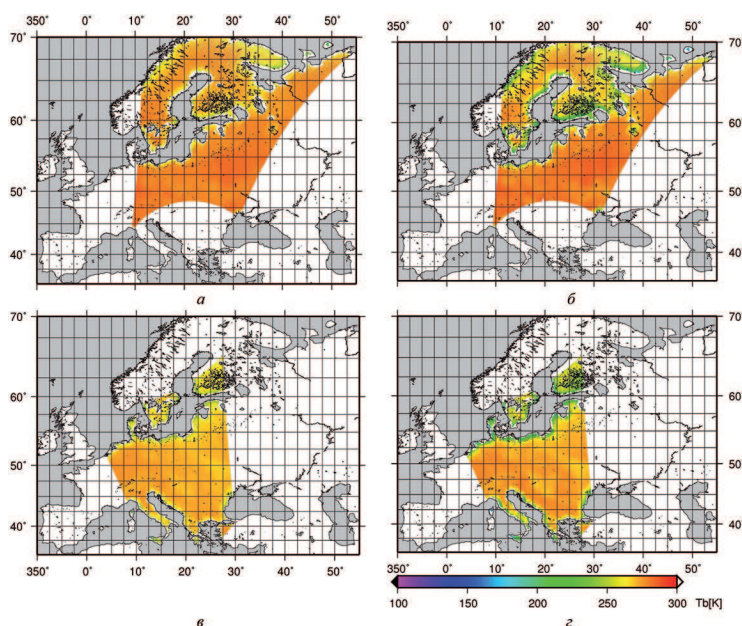


Рис. 1. Данные МТВЗА-ГЯ ( $T_a$ ) над сушей в канале 18,7 ГГц за 2 августа 2011 г. Нисходящий полувиток 02d: а — вертикальная поляризация; б — горизонтальная; восходящий полувиток 05a: в — вертикальная поляризация, г — горизонтальная

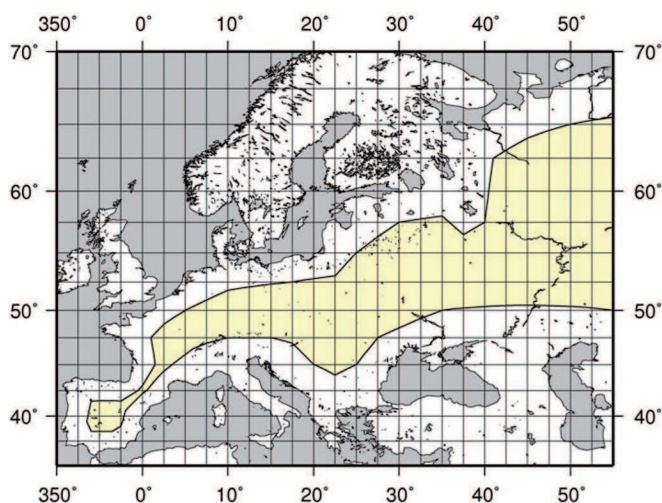


Рис. 2. Область Европы, выделенная для сравнения измеренного и моделированного излучения. Желтым цветом отмечена область, использованная для сравнения



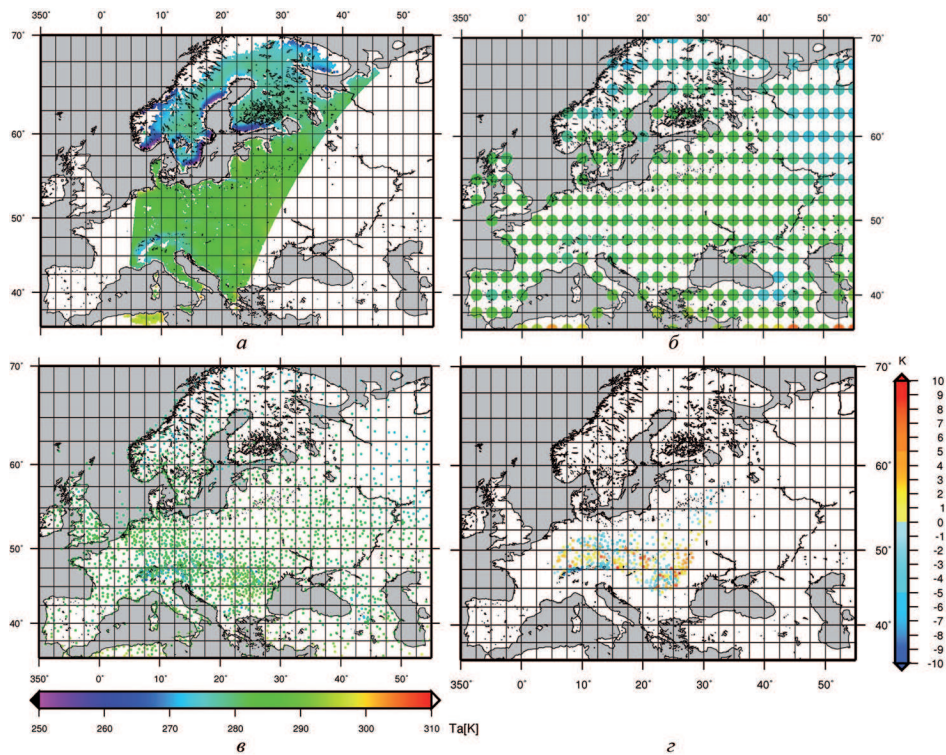


Рис. 3. Приповерхностная температура воздуха  $T_a$  для района «Европа»:  
*а* — восстановленная по данным МТВЗА-ГЯ (полувиток 15d за 13 апреля 2010 г., 11:16 UTC);  
*б* — по данным объективного анализа за 13 апреля 2010 г., 12:00 UTC;  
*в* — по данным синоптических станций за 13 апреля 2010 г., 12:00 UTC;  
*г* — отклонение  $T_a$  восстановленной от данным синоптических станций

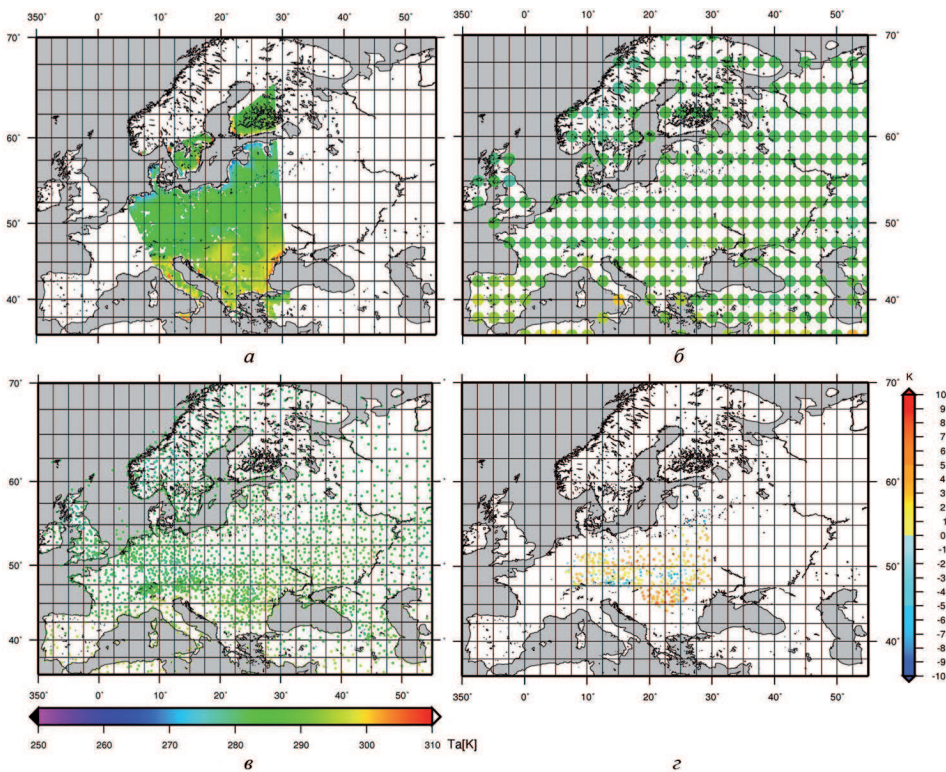


Рис. 4. Приповерхностная температура воздуха  $T_a$  для района «Европа»:  
*а* — восстановленная по данным МТВЗА-ГЯ (полувиток 15d за 14 сентября 2011 г., 22:30 UTC);  
*б* — по данным объективного анализа за 15 сентября 2011 г., 00:00 UTC;  
*в* — по данным синоптических станций за 15 сентября 2011 г., 00:00 UTC;  
*г* — отклонение  $T_a$  восстановленной от данным синоптических станций

## Литература

1. Черный И.В., Чернявский Г.М., Успенский А.Б., Пегасов В.М. СВЧ-радиометр МТВЗА спутника «Метеор-3М» № 1: предварительные результаты летных испытаний // Исследование Земли из космоса. 2003. № 6. С. 35–48.
2. McFarland M.J., Miller R.L., Neale C.M.U. Land Surface Temperature Derived From the SSM/I Passive Microwave Brightness Temperature // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. Sept., 1990. V. 28. N. 5. P. 839–845.

## Land air temperature retrieval from microwave Meteor-M N. 1 data

**E. Kramchaninova, A. Uspensky**

*SRC Planeta*

*123242, Moscow, B. Predtechensky, 7,*

*e-mail: alexpr11@yandex.ru*

A method has been developed and tested for the land air temperature  $T_a$  retrieval from microwave imager/sounder MTVZA/Meteor-M N. 1 data. A linear regression was used to derive  $T_a$  over the European region. Brightness temperatures in channels 18.7H, 23.8V, 36.7V, 91.65V were used as predictors, where V and H — vertical and horizontal polarization. The MTVZA measurements for the periods of April 2010 and April-September 2011 were taken for the case studies. The land surface emissivity values and surface types were extracted from public databases. Systematic bias of  $T_a$  retrieval and RMS error were 0.4 and 2.9 K when compared with numerical analysis. A comparison with synoptic observation gives values of 0.2 and 3.8 K respectively.

**Key words:** microwave imager/sounder, surface type classification, land air temperature, brightness temperature, multiple linear regression.