

Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности, приземной температуры воздуха и эффективной температуры по спутниковым данным для юга Европейской территории России

Е.В. Волкова, С.А. Успенский

НИЦ космической гидрометеорологии «Планета»
Москва, 123242, Россия
E-mails: quantocosa@bk.ru, uspenskys@planet.iitp.ru

На основе Комплексной Пороговой Методики (КПМ) (Волкова, 2013; Волкова, Успенский, 2010), позволяющей детектировать облачность и определять её параметры автоматически в круглосуточном режиме по данным радиометров AVHRR/NOAA и SEVIRI/Meteosat-10 для Европейской территории России, разработан достаточно простой с вычислительной точки зрения алгоритм расчёта значений температуры приземного воздуха (T_a), эффективной радиационной температуры подстилающей поверхности (T_e) и температуры подстилающей поверхности (T_s) по данным спутниковых измерений радиационной температуры в ИК-каналах ($\lambda=11$ и 12 мкм) радиометров AVHRR/NOAA и SEVIRI/Meteosat-10 для безоблачных пикселей. Предложено два варианта методики. В «климатическом» варианте коэффициенты-константы для предикторов T_{11} , $(T_{11}-T_{12})$ и $(T_{11}-T_{12})^2$ рассчитываются для каждого месяца и года по методу наименьших квадратов при использовании данных наземных измерений T_a и T_s на метеостанциях для информации AVHRR/NOAA отдельно для светлого и тёмного времени суток, а для информации SEVIRI/Meteosat-10 – отдельно для каждого срока спутникового наблюдения по той же самой выборке. Основным недостатком использования этого метода является необходимость наличия синхронного архива спутниковых данных и наземных метеонаблюдений за T_a и T_s и необходимость ожидания конца периода времени (обычно 1 месяц), для которого выполняются спутниковые оценки. «Оперативный» вариант использует «динамические» коэффициенты, зависящие с помощью эмпирических формул от высоты солнца (h_0) и номера календарного дня от начала года (dat). При этом точность оценок несколько падает по сравнению с «климатическим» вариантом. Наибольшие ошибки отмечаются в конце зимы – начале весны при наличии снежного покрова и оттепели или ночью зимой при сильном выхолаживании (спутниковые оценки существенно выше наземных измерений), а также летом во второй половине дня по местному времени (из-за дневного перегрева поверхности земли спутниковые оценки ниже наземных). Аппаратура на отечественных спутниках серии Метеор (сканер МСУ-МР) и Электро (сканер МСУ-ГС) аналогична соответственно радиометрам AVHRR и SEVIRI. Поэтому рассматриваемые в работе методы спутниковых оценок T_a , T_e и T_s для информации AVHRR и SEVIRI могут быть легко перенесены на данные МСУ-МР и МСУ-ГС.

Ключевые слова: SEVIRI, Meteosat-10, AVHRR, NOAA, приземная температура воздуха, эффективная температура, температура подстилающей поверхности

Одобрена к печати: 27.07.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-291-303

Введение

Сеть агрометеорологических станций, на которой ведутся регулярные наблюдения за температурой поверхности почвы, достаточно редка. В то же время для целого ряда климатических, агрометеорологических, гидрологических и других задач мониторинга и моделирования различных ситуаций, таких как засухи, наводнения и пожары (Музылев и др., 2013), необходим регулярный мониторинг температуры приземного воздуха (T_a), эффективной радиационной температуры подстилающей поверхности (T_e) и температуры подстилающей поверхности (T_s) с достаточным пространственным и временным разрешением. Спутниковые данные в таких случаях – единственное средство получения долгосрочных и крупномасштабных данных о температуре.

Значения T_s и T_a обычно рассчитывают для безоблачных условий по данным радиационной температуры в диапазоне 10,5–11,5 мкм и/или 11,5–12,5 мкм (например, кана-

лы 4 и 5 радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) полярно-орбитального метеоспутника серии NOAA или каналы 9 и 10 радиометра SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) геостационарного метеоспутника Meteosat-10). Вследствие неоднородности поверхности Земли спутниковые измерения обычно соответствуют смешанным пикселям, в которых присутствуют разные типы поверхности. Получаемые спутниковые оценки T_a , T_e и T_s часто отличаются от измеренных на метеостанциях, т.к. являются средними для всего пикселя спутникового изображения, т.е. их пространственный масштаб во много раз больше, чем у наземных.

В настоящее время разработано много разных методов и методик определения значений T_s по спутниковым данным (LSA SAF, 2010). Некоторые из них используют, например, зависимость T_s от излучательной способности поверхности ϵ (Соловьев, Успенский, 2009). Однако их точность сильно зависит от адекватности задания ϵ (моделирования или оценки по спутниковым данным). Другие методы используют рассчитанный по спутниковым данным индекс вегетации NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), только радиационную температуру и др. Так, в рамках проекта LSA (Land Surface Analysis) SAF (Satellite Application Facility) EUMETSAT (<http://www.eumetsat.int>) осуществляется непрерывный мониторинг T_s при использовании достаточно простой эмпирической формулы (Lavanant, 2002) для двух ИК-каналов. Приемлемой точностью восстановления значений T_s считается 2 К, оптимальной – 1 К (LSA SAF, 2010).

Получение оценок T_a и T_e является более сложной задачей, чем T_s , т.к. на них влияют не только радиационная температура подстилающей поверхности, но и другие параметры (Соловьев, Успенский, 2009). Существуют два принципиально разных подхода к их оценкам – параметризация через T_s или расчёт независимым способом аналогично T_s (Sun et al., 2005).

В данной работе рассмотрено два варианта определения значений T_a , T_e и T_s , в т.ч. проведено сопоставление с методикой MAIA (Lavanant, 2002). Проанализированы достоинства и недостатки каждого метода и оценена работоспособность при сопоставлении с наземными оценками T_a , T_e и T_s на метеостанциях для юга Европейской территории России (ЕТР). Рассматриваемый регион лесостепной и относительно однородный в пределах пикселя спутникового изображения. Для этого региона построена модель для расчёта водного баланса территории, в которой используются рассчитанные авторами по спутниковым данным значения T_a , T_e и T_s (Музылёв и др., 2013).

Аппаратура на отечественных спутниках серии Метеор-М (сканер МСУ-МР) и Электро (сканер МСУ-ГС) аналогична по характеристикам радиометрам AVHRR/NOAA и SEVIRI/Meteosat-10. Поэтому рассматриваемые в работе методы спутниковых оценок T_a , T_e и T_s для информации AVHRR и SEVIRI могут быть в дальнейшем перенесены на данные МСУ-МР и МСУ-ГС для той же территории.

Исходные данные и описание методики

При расчёте значений T_a , T_e и T_s безоблачные пиксели отделяются от облачных с помощью Комплексной пороговой методики – КПМ (Волкова, Успенский, 2010; Волкова, 2013), разработанной для двух видов спутниковых данных: AVHRR/NOAA и SEVIRI/Meteosat. Точность КПМ по выделению облачной маски рассмотрена в работе (Волкова, Успенский, 2015) и вполне удовлетворяет требованиям ВМО.

Для настройки и валидации методики использовались значения T_a и T_s , полученные в результате измерений на 48 метеостанциях, расположенных на юге ЕТР (территория 49° – 54° с.ш. и 31° – 43° в.д., выборка 2010–2014 гг., сроки наземных наблюдений 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 и 21 ч ВСВ). Значения T_e рассчитывались: в светлое время суток – $T_e = T_a \cdot b + (1-b) \cdot T_s$, в тёмное время – $T_e = (T_a + T_s) : 2$, где $b = 2 \cdot (NDVI - 0,1)$, $NDVI = (A_{08} - A_{06}) : (A_{06} + A_{08})$, A_{06} и A_{08} – спутниковые измерения альбедо в каналах 1 и 2 ($\lambda = 0,6$ и $0,8$ мкм).

Спутниковые данные для каждой метеостанции были доступны: по информации SEVIRI с Meteosat-9 и Meteosat-10 – в среднем 8 наблюдений в сутки (через 3 ч); по информации AVHRR с NOAA-18 и NOAA-19 – от 2 до 8 (обычно 2–4) наблюдений в сутки в период с 22 ч до 15 ч ВСВ. При сопоставлении спутниковых и наземных оценок T_a , T_e и T_s рассматривались фрагменты изображения размером 3×3 пиксела для информации AVHRR (размеры пиксела $1'$ по широте и $1,5'$ по долготе (~ 1 – 2 км), оценки температуры средние для фрагмента) и 1×1 пиксел для информации SEVIRI (линейные размеры пиксела ~ 6 – 8 км) с центром в районе метеостанции.

Восстановление значений T_a и T_s по спутниковым ИК-измерениям происходило по методу GSW (Generalised Split-Window) (LSA SAF..., 2010), который заключается в следующем. Чтобы оценить T_a и T_s по спутниковым измерениям T_{11} , необходимо учесть влияние таких параметров, как собственное излучение подстилающей поверхности (зависит от типа поверхности, степени её увлажнения, температуры и др.), а также поглощение и встречное излучение атмосферы (зависит от вертикального распределения температуры, влажности, содержания аэрозоля и др.). Косвенно влияние этих параметров можно оценить через предиктор $(T_{11} - T_{12})$, который описывает комплексное влияние атмосферы и подстилающей поверхности (разное поглощение-излучение атмосферой и подстилающей поверхностью длинноволновой радиации в соседних ИК-каналах в зависимости от степени увлажнения, температуры и др. условий). Этот метод был предложен Wan и Dozier в 1996 г. (LSA SAF..., 2010). В полной версии метода для расчёта значений T_a и T_s помимо $(T_{11} - T_{12})$ используются также сведения о спектральных свойствах подстилающей поверхности в виде коэффициентов излучения, индексов вегетации и т.п. Однако в случае с достаточно однородными условиями (тип подстилающей поверхности, в т.ч. рельеф и растительность, температурный и влажностный режим и др.) спектральные характеристики можно условно считать константами для рассматриваемой территории и описывать в виде комплексных коэффициентов. Этот метод на протяжении многих лет достаточно успешно используется в методике MAIA (Lavanant, 2002).

Так как территория рассматриваемого региона (юг ЕТР) достаточно однородна по типу рельефа и растительности, а также температурно-влажностному режиму, решено было воспользоваться описанным выше методом, т.е. в качестве предикторов использовать значения T_{11} и $(T_{11}-T_{12})$, а коэффициенты, учитывающие влияние атмосферы и подстилающей поверхности, подбирать эмпирически. Для небольших периодов времени (до месяца), на протяжении которых температурно-влажностные и вегетационные условия для рассматриваемой территории можно считать условно неизменными, коэффициенты задавались в виде констант. Для больших периодов времени (несколько месяцев) использовалось несколько констант в разные подпериоды времени или коэффициенты описывались формулами, учитывающими их изменение во времени. В результате, спутниковые оценки T_a и T_s рассчитывались по формулам:

$$T = a_1 \cdot T_{11} + a_2 \cdot (T_{11} - T_{12}) + a_3 \cdot (T_{11} - T_{12})^2 + a_4, \quad (1)$$

$$T = a_5 \cdot T_{11} + a_6 \cdot (T_{11} - T_{12}) + a_7, \quad (2)$$

где $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ и a_7 – эмпирические коэффициенты (разные для T_a и T_s), T – T_a или T_s .

В методике MAIA используется формула (1) для расчёта значений T_s с коэффициентами-константами $a_1=1,0$, $a_2=1,31$, $a_3=0,27$, $a_4=1,16$ (Lavanant, 2002) для любой суши, кроме пустынь.

При валидации спутниковых оценок T_a , T_e и T_s результатами наземных наблюдений рассчитывались: $dev = T_{назем.} - T_{спут.}$ – среднее отклонение спутниковой оценки от наземной; СКО – среднее квадратичное отклонение спутниковой оценки от наземной; $stdev = \sqrt{(\sum СКО^2 - \Sigma dev^2)}$ – стандартное отклонение.

Определение T_a , T_e , T_s по информации AVHRR/NOAA

При использовании коэффициентов-констант a_1, a_2, a_3 и a_4 , рассчитанных по методу наименьших квадратов для каждого месяца каждого года отдельно для светлого и тёмного времени суток по той же самой выборке, для которой определялись значения T_a , T_e и T_s , значения dev , СКО и $stdev$ получались минимальными: $|dev| \sim 0$ К, $СКО \approx stdev$.

Исследования показывают (см. *рис. 1*), что среднемесячные $СКО_{T_a} \approx СКО_{T_e} = 2-4$ К, $СКО_{T_s} = 2-5$ К, хотя для отдельных сроков спутниковых наблюдений и метеостанций значения dev для T_a , T_e и T_s днём могут достигать 10 К, ночью летом – до 5 К, а зимой – до 15 К (для T_s до 20 К)). При этом летом в светлое время суток среднемесячные $СКО_{T_a} \leq СКО_{T_e} \leq СКО_{T_s}$: $СКО_{T_a} = 2,7-3,0$ К, $СКО_{T_e} = 3,5-3,7$ К, $СКО_{T_s} \approx 5$ К. Ночью летом среднемесячные $СКО_{T_a} \approx СКО_{T_e} \approx СКО_{T_s} \approx 2,3-2,6$ К ($СКО_{T_e} \leq СКО_{T_a} \leq СКО_{T_s}$). Зимой днём $СКО_{T_a} \approx СКО_{T_e} \approx СКО_{T_s} \approx 2,0-5,5$ К, а ночью $СКО_{T_a} \approx СКО_{T_e} \approx СКО_{T_s} \approx 3,0-4,5$ К. В целом за год днём $СКО_{T_a} = 2,6-3,1$ К, $СКО_{T_e} = 3,3-3,5$ К, $СКО_{T_s} = 4,2-4,4$ К (для разных лет), а ночью $СКО_{T_a} \approx СКО_{T_e} = 2,7-2,8$ К, $СКО_{T_s} = 3,0-3,1$ К.

Среднемесячные значения $СКО_{T_a}$ для дневных и ночных условий мало меняются на протяжении года: слабый рост в обоих случаях отмечается в холодный период года,

а минимум приходится на середину вегетационного периода. Среднемесячные значения SKO_{Te} растут ночью зимой и днём летом, а соответственно минимумы наблюдаются ночью летом и днём зимой (последний выражен менее заметно). Амплитуда годового хода среднемесячных значений SKO_{Ta} и SKO_{Te} не превышает 2 К. У среднемесячных значений SKO_{Ts} годовой ход, как у SKO_{Te} , а годовая и суточная амплитуда – до 3 К (см. *рис. 1*).

Использование для расчёта значений T_s формулы (1) с коэффициентами из МАИА показывает (см. *рис. 1*), что спутниковые оценки T_s практически всегда ниже измеренных: ночью всегда и зимой днём на 1–2 К, а днём летом среднемесячные $|dev_{Ts}|$ могут достигать 8 К (для отдельных спутниковых сроков наблюдения и метеостанций до 20 К, а летом днём – до 25 К). Среднемесячные $stdev_{Ts}=2-5$ К, $SKO_{Ts}=2-9$ К (днём максимальны летом и минимальны зимой, а ночью – наоборот). В целом за год днём $SKO_{Ts}=5,9-6,7$ К (зимой – 2,6–7,2 К, летом – 7,0–8,3 К), а ночью $SKO_{Ts}=3,2-3,5$ К (зимой – 4–7 К, летом – 2,7–2,9 К). Таким образом, вариант расчёта значений T_s по формуле (1) с коэффициентами из МАИА оказывается заметно хуже, чем при использовании коэффициентов-констант, рассчитанных по той же самой месячной выборке.

В ходе исследований для формулы (2) были подобраны эмпирические функции («динамические» коэффициенты), описывающие поведение коэффициентов a_5 , a_6 и a_7 круглосуточно и круглогодично в зависимости от параметров h_0 и dat :

$$\begin{aligned} Ta &= T11 \cdot (1 + datd \cdot 0.01) + (T11 - T12) \cdot datd + (1 - datd) \cdot (1 - hsol) \cdot 7 - 7 \cdot hsol, \\ Ts &= T11 \cdot (1 + (datd + 2 \cdot shda) : 100) + (T11 - T12) \cdot (datd + 2 \cdot shda) + (1 - datd) \cdot 3 \cdot (1 - hsol), \\ shda &= hsol \cdot datd, \quad datd = 0,1 + (183 - |183 - (dat - 10)|) : 180, \\ hsol &= h_0 \text{ при } h_0 > 0^\circ \text{ и } hsol = 0^\circ - \text{ при } h_0 < 0^\circ. \end{aligned}$$

Из *рис. 1* видно, что результаты оценок T_s при использовании «динамических» коэффициентов получаются хуже, чем при использовании коэффициентов-констант, рассчитанных для каждого месяца и года, но заметно лучше, чем при использовании коэффициентов из МАИА. Значения dev колеблются около 0 К, но с большей амплитудой (среднемесячные $|dev| \leq 2$ К, для отдельных спутниковых сроков наблюдения и метеостанций до 20 К), чем при использовании коэффициентов-констант.

Днём летом высокие значения dev (до 30 К) наблюдаются при аномально высоких значениях $T_{s_{наземн.}}$ на фоне соседних метеостанций (отличие от фона 15–25 К). Иногда днём летом спутниковые оценки T_s могут оказаться на 10–15 К выше наземных: если значения $T_{s_{спутн.}}$ аномально высокие на фоне окрестностей по спутниковым данным (это связано с методикой измерения T_s на метеостанции, преобладающим типом почвы, а также с эффектом локального «перегрева» в пределах пиксела спутникового наблюдения); если значения $T_{s_{наземн.}}$ отличны от фона соседних станций на 10–15 К в сторону похолодания (возможно, на метеостанцию попала тень от облака).

Значения $dev < -10$ К могут наблюдаться в ночное время в холодный период года, в т.ч. весной и осенью, и связаны с оттепелью или сильным приземным выхолаживанием. В этом случае $T_{s_{спутн.}}$ выше $T_{s_{наземн.}}$, которые близки к 0°C или очень низки (-20°C и ниже).

Днём зимой при наличии снежного покрова в оттепель также могут отмечаться $dev < -10$ К. В этом случае при неизменной $T_{s_{наземн.}} = 0^{\circ}\text{C}$ (снег не может иметь температуру выше 0°C) спутниковые измерения T_{11} и T_{12} дают достаточно высокие положительные значения (10°C и более), т.к. прогреваются попадающие в поле зрения спутниковой аппаратуры свободные от снега поверхности.

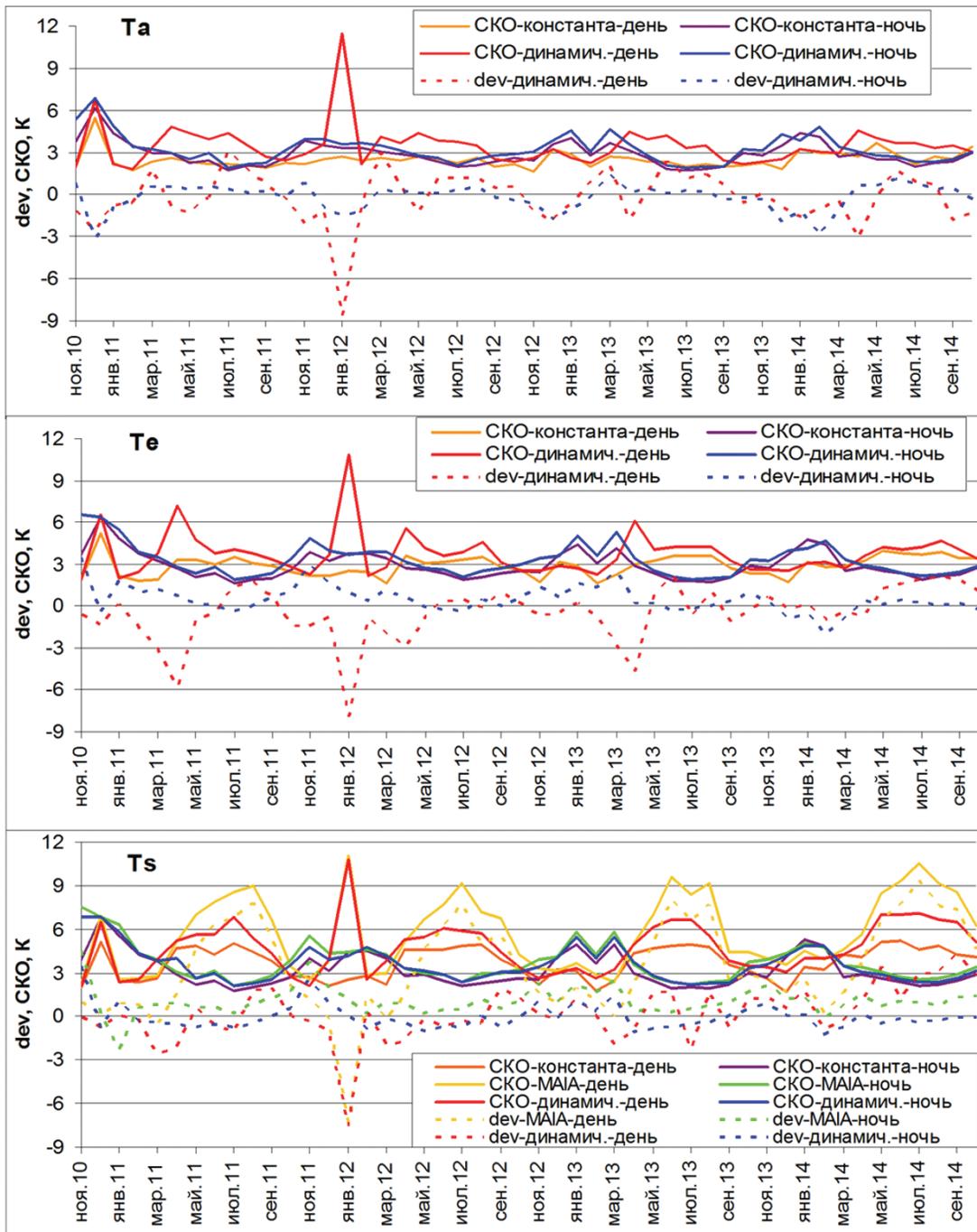


Рис. 1. Годовой ход среднемесячных значений dev и SKO (К) отдельно для светлого и тёмного времени суток, полученных при сопоставлении спутниковых (по данным радиометра AVHRR/NOAA) оценок T_a , T_e и T_s с результатами наземных наблюдений. Значения T_a , T_e и T_s получены по формуле (1) с эмпирическими коэффициентами-константами (рассчитаны по той же самой выборке для каждого месяца и года отдельно для дня и ночи) и коэффициентами из методики MAIA, а также по формуле (2) с «динамическими» коэффициентами (зависят от календарного дня и высоты солнца)

В целом же за год значения dev_{T_s} колеблются около 0 К (среднегодовые $|\text{dev}_{T_s}| \leq 0,7$ К днём и $|\text{dev}_{T_s}| \leq 0,4$ К – ночью). Среднегодовые $\text{СКО}_{T_s} = 4,9-5,6$ К днём, и $\text{СКО}_{T_s} \sim 3,4$ К ночью. Среднемесячные значения СКО_{T_s} (см. *рис. 1*) при использовании «динамических» коэффициентов днём существенно меньше, чем при использовании коэффициентов из МАИА, но выше, чем при использовании коэффициентов-констант для каждого месяца и года. Они достигают максимума летом (4–5 К) и минимума – зимой (2–3 К). Ночью значения СКО_{T_s} при использовании «динамических» коэффициентов почти не отличаются от варианта с коэффициентами из МАИА и лишь немного хуже, чем при использовании коэффициентов-констант. Максимум СКО_{T_s} ночью, наоборот, приходится на лето (4–6 К), а минимум – на зиму (2–3 К); $\text{stdev}_{T_s} \approx \text{СКО}_{T_s}$ и испытывают такой же годовой ход.

Значения T_a и T_e по спутниковым данным с помощью «динамических» коэффициентов восстанавливаются менее надёжно, чем значения T_s . Среднемесячные $|\text{dev}_{T_a}| \leq 3$ К, $|\text{dev}_{T_e}| \leq 3,5$ (см. *рис. 1*). При этом ночью среднемесячные значения dev_{T_a} и dev_{T_e} ближе к 0 К, чем в дневное. Наибольшие ошибки оценок T_a и T_e приходится на январь–апрель (среднемесячные $|\text{dev}| \leq 8-9$ К, для отдельных станций и спутниковых сроков наблюдения до 20–30 К) и связаны с проблемой таяния снега и др. (см. выше объяснение для T_s). Среднегодовые $|\text{dev}_{T_a}| \leq 0,6$ К днём и $|\text{dev}_{T_a}| \leq 0,2$ К ночью, $|\text{dev}_{T_e}| \leq 0,8$ К.

Значения СКО_{T_a} и СКО_{T_e} для варианта с «динамическими» коэффициентами выше, чем для варианта с коэффициентами-константами. Среднемесячные $\text{СКО}_{T_a} = 2-4$ К (максимумы отмечаются весной и летом днём, а зимой – ночью (в среднем 4–5 и до 11 К); минимумы – осенью (~2 К). Среднемесячные $\text{СКО}_{T_e} = 2-6$ К (максимумы в дневное время весной и летом, а ночью – зимой и весной (5–11 К); минимумы – в дневное время осенью, а в ночное – летом (~2 К). Годовой ход среднемесячных значений stdev_{T_a} и stdev_{T_e} более ровный (меньше годовая амплитуда) ночью. Среднегодовые $\text{СКО}_{T_a} = 3,5-4,6$ К днём (для разных лет), ночью $\text{СКО}_{T_a} \approx 3$ К (летом обычно ниже, чем зимой); среднегодовые $\text{СКО}_{T_e} = 4,0-4,6$ К днём и $\text{СКО}_{T_e} = 3,0-3,2$ К ночью (летом обычно ниже, чем зимой).

Таким образом, формула (1) с коэффициентами-константами для каждого месяца и года, рассчитанными по той же самой выборке, отличается наибольшей работоспособностью по сравнению с наземными измерениями T_a , T_e и T_s . В целом не намного хуже получаются оценки T_a , T_e и T_s по формуле (1) с «динамическими» коэффициентами. Использование формулы (2) с коэффициентами из МАИА относительно неплохо оценивает T_s в ночное время летом и днём зимой, хронически занижая оценки T_s в среднем на 1–2 К по сравнению с наземными измерениями. Ночью зимой занижение увеличивается до 2–5 К. И совсем не пригоден для оценок T_s для ЕТР в дневное время летом – среднее занижение оценок T_s достигает 4–8 К. Точность же варианта расчёта T_a , T_e и T_s с использованием коэффициентов-констант не сильно меняется в течение года: она несколько падает для T_a зимой и весной, для T_e и T_s – днём летом и ночью зимой.

Использование «динамических» коэффициентов позволяет не зависеть от данных наземных измерений T_a , T_e и T_s , необходимых для расчёта коэффициентов-констант.

Однако точность оценок может заметно упасть в ночное время зимой и днём зимой–весной для T_a , а днём весной–летом и ночью зимой – для T_e и T_s .

Определение T_a , T_e , T_s по информации SEVIRI/Meteosat

Для данных SEVIRI/Meteosat коэффициенты-константы a_1 , a_2 , a_3 и a_4 из формулы (1) рассчитывались по методу наименьших квадратов для каждого месяца каждого года отдельно для каждого срока спутникового наблюдения по той же самой выборке, для которой рассчитывались значения T_a , T_e и T_s .

Исследования показывают, что в среднем за год среднемесячные и среднесуточные $dev \sim 0$ К для T_a , T_e и T_s . Среднемесячные $SKO_{T_a} = 1,5-5$ К, минимум отмечается утром (3 ч и 6 ч ВСВ) и вечером (15 ч ВСВ), при этом ночной максимум обычно больше дневного. Влияние сезона неоднозначно, хотя в разгар лета значения SKO_{T_a} обычно несколько ниже. В среднем за год $SKO_{T_a} \approx 2$ К.

Среднемесячные $SKO_{T_s} = 2-6$ К, максимум приходится на день (9 ч и 12 ч ВСВ), минимум – на утро (3 ч ВСВ). В дневное время значения SKO_{T_s} обычно на 0,6–0,7 К выше, чем ночью. Весной значения SKO_{T_s} часто несколько выше, чем в другие сезоны. Летом максимум приходится на дневные часы, зимой – на ночные. В среднем за год $SKO_{T_s} \approx 3$ К.

Годовой ход SKO_{T_e} ближе к SKO_{T_a} , чем к SKO_{T_s} (см. *рис. 2*): в среднем за год $SKO_{T_e} \leq 2,5$ К.

Использование формулы (1) с коэффициентами из МАИА показывает (см. *рис. 2*), что спутниковые оценки T_s зимой и летом ночью оказываются практически всегда выше измеренных ($dev_{T_s} = -1$ К – -5 К). Летом в дневное время, наоборот, они ниже ($dev_{T_s} = 2-10$ К). Зимой $SKO_{T_s} = 3-7$ К, летом увеличивается до 11 К (максимум отмечается днём (9 ч и 12 ч ВСВ). В среднем за год $dev_{T_s} < 0$ К ($-0,5$ К – -1 К и ниже), $SKO_{T_s} \approx 5$ К. В среднем за вегетационный период $|dev_{T_s}| \leq 0,5-1$ К, вне его – $dev_{T_s} < -2,5$ К. Летом SKO_{T_s} немного больше, чем зимой. В светлое время суток $dev_{T_s} \approx 0$ К или больше, в тёмное – $dev_{T_s} < 0$ К. Днём SKO_{T_s} обычно немного больше, чем ночью.

Таким образом, при сопоставлении с результатами наземных измерений на метеостанциях использование формулы (1) с коэффициентами из МАИА даёт оценки T_s существенно хуже по сравнению с коэффициентами-константами для каждого срока, месяца и года, рассчитанными по той же самой выборке.

В ходе исследований были подобраны эмпирические функции для «динамических» коэффициентов:

$$T_a = T_{11} + (T_{11} - T_{12}) \cdot (\text{datd} - \text{hsol}) - 0,5,$$
$$T_s = T_{11} + (T_{11} - T_{12}) \cdot 1,5 + (T_{11} - T_{12})^2 \cdot \text{shda} + \text{shda} \cdot 5 - (1 - \text{hsol}).$$

Анализ *рис. 2* и *3* показывает, что использование «динамических» коэффициентов лучше восстанавливает значения T_s (по сравнению с наземными наблюдениями), чем ис-

пользование коэффициентов из МАИА, но хуже, чем коэффициентов-констант для каждого срока наблюдения, месяца и года. Так, зимой $dev_{Ts} = -1 \text{ К} - -5 \text{ К}$ (в зависимости от срока наблюдения и месяца), т.е. спутниковые оценки T_s выше наземных. Возможно, это частично связано с тем, что элемент разрешения спутниковой информации составляет 30–60 км² и в него помимо снега попадают более тёплые здания, шоссе, деревья и др. Летом днём, наоборот, спутниковые оценки T_s оказываются ниже измеренных ($dev_{Ts} = 1-4 \text{ К}$) из-за существенного локального перегрева поверхности почвы в месте измерения на метеостанции, в то время как спутниковая оценка включает в себя и более холодные поверхности (например, водоёмы). Значения $СКО_{Ts}$ при использовании «динамических» коэффициентов больше, чем при использовании коэффициентов-констант, но меньше, особенно летом, чем при использовании коэффициентов из МАИА. В среднем для разных месяцев и сроков $СКО_{Ts} = 2-7 \text{ К}$.

В годовом ходе (средние за месяц по всем срокам наблюдения) значения dev_{Ts} имеют зимний минимум (до -3 К) и максимум в начале лета ($0-1 \text{ К}$); в среднем за период вегетации $dev_{Ts} \approx 0 \text{ К}$ или выше, в то время как вне его среднемесячные $dev_{Ts} < 0 \text{ К}$ (до -1 К в начале зимы и до -2 К в конце). Значения $СКО_{Ts}$ имеют растянутый максимум с зимы до середины лета и минимум осенью, в среднем за год $СКО_{Ts} = 3,7-4,0 \text{ К}$. В целом летом спутниковые оценки T_s ниже наземных измерений, а в конце зимы и весной – наоборот, выше; осенью T_s восстанавливается наиболее точно по спутниковым данным (см. *рис. 2*).

В суточном ходе значения dev_{Ts} (средние за год для каждого срока наблюдения) имеют минимум в 3 ч ВСВ ($-2 \text{ К} - -3 \text{ К}$), второй менее глубокий минимум приходится на 9–12 ч ВСВ (около -2 К), а максимум наблюдается в 15 ч ВСВ ($1-2 \text{ К}$) (при максимальных суточных T_s). Максимум $СКО_{Ts} = 4-5 \text{ К}$ приходится на 9–12 ч ВСВ, а минимум $СКО_{Ts} \approx 3 \text{ К}$ на 18 ч ВСВ. В целом днём значения dev_{Ts} меньше, чем ночью, а $СКО_{Ts}$, наоборот, больше. Таким образом, спутниковые оценки T_s в разгар дня (9–12 ч ВСВ) оказываются в среднем ниже наземных измерений, а утром (3 ч ВСВ) – обычно выше (см. *рис. 3*).

Спутниковые оценки T_a сильнее отличаются от измеренных на метеостанциях летом в 15–18 ч ВСВ (часто ниже измеренных) и зимой в 21–0 ч ВСВ (обычно выше измеренных). Для разных месяцев и сроков $dev_{Ta} = 4 \text{ К} - -6 \text{ К}$, $СКО_{Ta} = 2-7 \text{ К}$. Минимум $СКО_{Ta}$ обычно приходится на 3 ч ВСВ, а зимой и на 15–18 ч ВСВ. Днём среднее dev_{Ta} ниже, а среднее $СКО_{Ta}$ выше, чем ночью. В среднем за год $dev_{Ta} = -0,5 \text{ К}$, $СКО_{Ta} = 3-3,5 \text{ К}$, минимум dev_{Ta} наблюдается в 3 ч ВСВ, максимум – в 15 ч ВСВ, минимум $СКО_{Ta}$ в 18 ч ВСВ, максимум – в 9–12 ч ВСВ. В течение года минимум dev_{Ta} приходится на конец зимы – начало весны (спутниковые оценки превышают измеренные на $1-2 \text{ К}$), максимум – на разгар лета (спутниковые оценки ниже измеренных на $0,5-1 \text{ К}$). Годовой ход $СКО_{Ta}$ выражен плохо. Таким образом, летом и днём спутниковые оценки T_a в среднем ниже измеренных, а зимой и ночью – выше (см. *рис. 2 и 3*).

Оценки T_e по спутниковым данным при использовании «динамических» коэффициентов оказываются хуже по сравнению с наземными измерениями, чем при использовании коэффициентов-констант. Минимум значений dev_{Te} (спутниковые оценки выше на-

земных измерений на 1–2 К) приходится на конец зимы – начало весны, а максимум (спутниковые оценки ниже наземных на 0,5–1 К) – на лето – осень, в среднем за год $dev_{Te} \approx 0$ К.

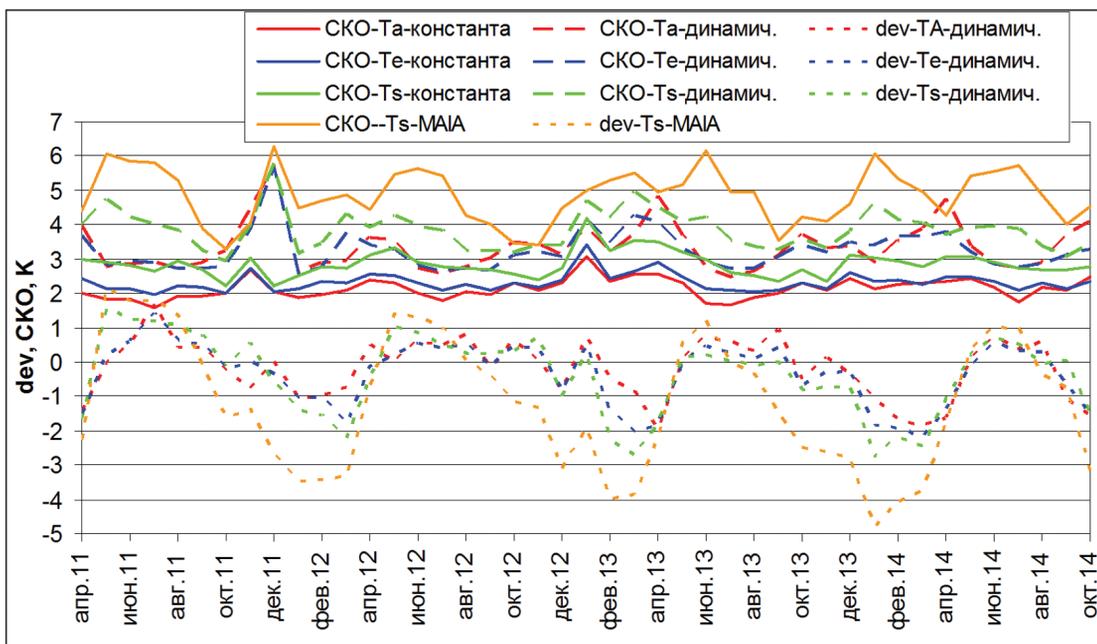


Рис. 2. Годовой ход среднемесячных (по всем срокам в течение суток) значений dev и SKO (К), полученных при сопоставлении спутниковых (по данным радиометра SEVIRI/Meteosat-10) оценок T_a , T_e и T_s с результатами наземных наблюдений. Значения T_a , T_e и T_s получены по формуле (1) с эмпирическими коэффициентами-константами (рассчитаны по той же самой выборке для каждого месяца и года отдельно для дня и ночи) и коэффициентами из методики MAIA, а также по формулам (1) и (2) с «динамическими» коэффициентами (зависят от календарного дня и высоты солнца)

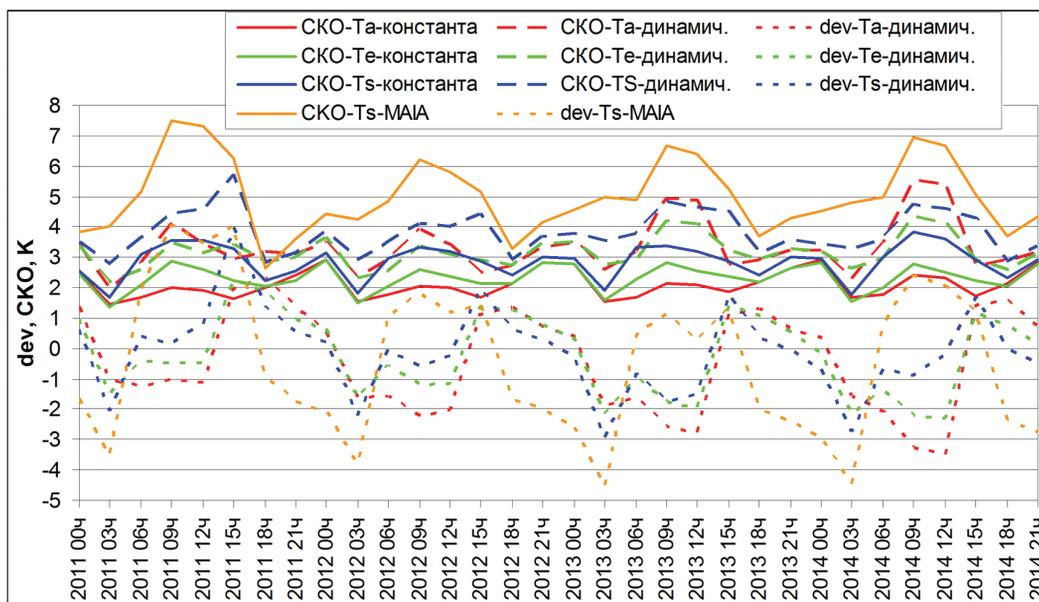


Рис. 3. Суточный ход среднегодовых значений dev и SKO (К), полученных при сопоставлении спутниковых (по данным радиометра SEVIRI/Meteosat-10) оценок T_a , T_e и T_s с результатами наземных наблюдений. Значения T_a , T_e и T_s получены по формуле (1) с эмпирическими коэффициентами-константами (рассчитаны по той же самой выборке для каждого месяца и года отдельно для дня и ночи) и коэффициентами из методики MAIA, а также по формулам (1) и (2) с «динамическими» коэффициентами (зависят от календарного дня и высоты солнца)

Максимум $СКО_{T_e} \approx 4$ К приходится на весну, в остальное время года $СКО_{T_e} = 2-3$ К (в среднем за год $СКО_{T_e} \approx 3$ К). В суточном ходе минимум dev_{T_e} приходится на 3–12 ч ВСВ (спутниковые оценки выше наземных на 2–3 К), а максимум (спутниковые оценки ниже наземных на ~1 К) – на 15–18 ч ВСВ. В светлое время суток значения dev_{T_e} ниже, а $СКО_{T_e}$ – выше, чем в ночное (см. рис. 2 и 3).

Таким образом, формула (1) с коэффициентами-константами для каждого срока, месяца и года, рассчитанными по той же самой выборке, отличается наибольшей работоспособностью. В целом, не сильно уступают им оценки T_a , T_e и T_s , полученные при использовании «динамических» коэффициентов. Оценки с коэффициентами из МАИА дают намного больше ошибок. Применение «динамических» коэффициентов позволяет не зависеть от данных наземных измерений T_a , T_e и T_s .

Заключение

Было проведено сравнение нескольких способов получения оценок T_a , T_e и T_s по спутниковым (AVHRR/NOAA и SEVIRI/Meteosat-10) данным. Наилучшим авторами признан вариант, использующий предикторы T_{11} , $(T_{11}-T_{12})$ и $(T_{11}-T_{12})^2$, с коэффициентами-константами (рассчитанные по методу наименьших квадратов для той же самой выборки, по которой оцениваются значения температуры) для каждого месяца и года: для информации AVHRR/NOAA отдельно для светлого и тёмного времени суток, а для информации SEVIRI/Meteosat-10 – отдельно для каждого срока спутникового наблюдения. Эта методика достаточно хорошо работает круглосуточно и круглогодично для юга ЕТР. Значения $dev \approx 0$ К, а значения СКО минимальны при сопоставлении с данными наземных измерений на метеостанциях (в зависимости от времени суток и сезона: для информации AVHRR/NOAA – $СКО_{T_a} = 2,6-3,1$ К, $СКО_{T_e} = 2,7-3,5$ К, $СКО_{T_s} = 3,0-4,4$ К; для информации SEVIRI/Meteosat-10 – $СКО_{T_a} = 1,9-2,4$ К, $СКО_{T_e} = 2,2-2,8$ К, $СКО_{T_s} = 2,6-3,6$). Основным недостатком использования этого метода является необходимость наличия синхронного архива спутниковых и наземных наблюдений за T_a , T_e и T_s и ожидания окончания периода времени (обычно размером 1 месяц), чтобы рассчитать коэффициенты, поэтому он подходит для климатических оценок температуры и непригоден для оперативного мониторинга.

Для оперативных расчётов рекомендуется использовать вариант с «динамическими» коэффициентами, зависящими с помощью эмпирических формул от h_0 и dat . При этом точность оценок несколько падает: для информации AVHRR/NOAA среднегодовые $|dev| \leq 0,7$ К, среднемесячные $|dev| \leq 4$ К, для отдельных станций и сроков $|dev|$ – до 20–25 К, среднемесячные $СКО_{T_a} \approx СКО_{T_e} = 3,0-4,6$ К, $СКО_{T_s} = 3,3-5,6$ К; для информации SEVIRI/Meteosat-10 среднегодовые $|dev| \leq 1$ К, среднемесячные $|dev| \leq 2,5$ К, для отдельных станций и сроков $|dev|$ до 20–25 К, среднемесячные $СКО_{T_a} \approx СКО_{T_e} = 2,8-4,0$ К, $СКО_{T_s} = 3,4-4,7$ К. Наибольшие ошибки отмечаются в конце зимы – начале весны при наличии снежного покрова и оттепели или ночью зимой при сильном приземном выхолаживании (спутнико-

вые оценки существенно выше наземных), а также летом во второй половине дня (из-за перегрева поверхности почвы спутниковые оценки ниже наземных).

Предлагаемый зарубежными авторами из методики MAIA вариант расчёта T_s с коэффициентами-константами, не зависящими от времени года и суток, для предикторов T_{11} , $(T_{11}-T_{12})$ и $(T_{11}-T_{12})^2$, показывает плохие результаты в рассматриваемом регионе на протяжении большей части года (ошибки намного больше, чем при использовании «динамических» коэффициентов).

Литература

1. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра AVHRR с МИСЗ серии NOAA круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 66–74.
2. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова по данным геостационарного МИСЗ Meteosat-9 круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 16–22.
3. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным сканирующих радиометров полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутников // Исследование Земли из космоса. 2015. № 5. С. 30–43.
4. Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В., Кухарский А.В., Успенский С.А. Моделирование водного режима территории крупного сельскохозяйственного региона с использованием данных измерений геостационарных метеорологических спутников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 53–65.
5. Соловьев В.И., Успенский С.А. Мониторинг температуры поверхности суши по данным геостационарных метеорологических спутников нового поколения // Исследования Земли из космоса. 2009. № 3. С. 79–89.
6. Lavanant L. MAIA AVHRR cloud mask and classification // Scientific and validation document. Meteo-France. MF/DP/CMS/R&D/MAIA3, November 7, 2002. 37 pp.
7. Sun Y.J., Wang J.-F., Zhang R.-H., Gillies R.R., Xue Y., Bo Y.-C. Air temperature retrieval from remote sensing data based on thermodynamics // Theoret. and Appl. Climatology, 2005. Vol. 30 (1), P. 37–48.
8. LSA SAF. Product user manual. Land Surface Temperature (LST). SAF/LAND/IM/PUM_LST/2.5. Issue 2.5. 24/09/2010. 49 pp.

Land surface, land air and effective temperature estimation for territories of Southern European Russia based on satellite data

E.V. Volkova, S.A. Uspensky

State Research Center “Planeta”, Moscow 123242, Russia,
E-mail: quantocosa@bk.ru, uspenskys@planet.iitp.ru

An automated technique has been developed for land surface (T_s), land air (T_a) and effective (T_e) temperatures estimation for territories of Southern European Russia based on AVHRR/NOAA and SEVIRI/Meteosat-10 data. The computationally effective algorithm is based on Complex Threshold Method for cloud and cloud properties detection (Volkova, 2013, Volkova, Uspensky, 2010). It utilizes cloud clear measurements in channels 11 and 12 μm . Two approaches have been discussed: “climate” and “operational”. For the “climate” approach the coefficients for predictors T_{11} , $(T_{11}-T_{12})$ and $(T_{11}-T_{12})^2$ are calculated for each month with ground-based in-situ data of T_a and T_s (twice a day, i.e. day and night for AVHRR data and for each measurement in case SEVIRI data is used). The drawbacks here are that we need a synchronous archive of ground-based and satellite measurements, and also that it is only possible to update the coefficients at the end of each period (one month). In the “operational” approach it is suggested to use dynamic coefficients instead, those empirically depending on the height of the sun (h_s) and day number of the year (dat). Some minor accuracy decrease in temperature estimates is observed here, if compared to the “climate” approach. It is shown that biggest biases are observed under some of the following conditions: at the end of the winter – the beginning of the spring (while the snow cover is still present but thawing); extremely cold winter nights (satellite-based

estimates are much higher than ground-based measurements); hot summer afternoons (local overheating effects on the surface causes satellite estimates to be lower than the temperatures measured in-situ). While the scanning radiometers MSU-MR (Meteor-M series satellites) and MSU-GS (Electro-L series satellites) are in a way similar to the AVHRR and SEVIRI instruments respectively, it could be possible to use the same approach and adjust the developed technique for T_s , T_a and T_e estimates to use MSU-MR and MSU-GS data.

Keywords: SEVIRI, Meteosat-10, AVHRR, NOAA, Land Air Temperature, Effective Temperature, Land Surface Temperature

Accepted: 27.07.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-291-303

References

1. Volkova E.V., Otsenki parametrov oblachnogo pokrova, osadkov i opasnyh yavlenii pogody po dannym radiometra AVHRR s MISZ seriii NOAA kruglosutochno v avtomaticheskom rezhime (Automatic estimation of cloud cover and precipitation parameters obtained by AVHRR NOAA for day and night conditions), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 66–74.
2. Volkova E.V., Uspenskii A.B., Otsenki parametrov oblachnogo pokrova po dannym geostatsionarnogo MISZ Meteosat-9 kruglosutochno v avtomaticheskom rezhime (Day and night automatic estimation of cloud cover parameters using Meteosat-9 data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 16–22.
3. Volkova E.V., Uspenskii A.B., Otsenki parametrov oblachnogo pokrova i osadkov po dannym skaniruyushchih radiometrov polyarno-orbital'nyh i geostatsionarnykh meteospuznikov (Detection and assessment of cloud cover and precipitation parameters using data from scanning radiometers of polar-orbiting and geostationary meteorological satellites), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 5, pp. 30–43.
4. Muzylev E.L., Uspenskii A.B., Startseva Z.P., Volkova E.V., Kuharskii A.V., Uspenskii S.A., Modelirovanie vodnogo rezhima territorii krupnogo sel'skohozyaistvennogo regiona s ispol'zovaniem dannykh izmerenii geostatsionarnykh meteorologicheskikh sputnikov (Simulation of the water regime of a vast agricultural region territory utilizing measurement data from geostationary meteorological satellites), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 53–65.
5. Solovyov V.I., Uspenskii S.A., Monitoring temperatury poverhnosti sushy po dannym geostatsionarnykh meteorologicheskikh sputnikov novogo pokoleniya (Monitoring of the land surface temperature using geostationary meteorological satellite data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 3, pp. 79–89.
6. Lavanant L., *MAIA AVHRR cloud mask and classification. Scientific and validation document*. Meteo-France. MF/DP/CMS/R&D/MAIA3, November 7, 2002. 37 p.
7. Sun Y.J., Wang J.-F., Zhang R.-H., Gillies R.R., Xue Y., Bo Y.-C., Air temperature retrieval from remote sensing data based on thermodynamics, *Theoret. and Appl. Climatology*, 2005, Vol. 30 (1), pp. 37–48.
8. LSA SAF. Product user manual. Land Surface Temperature (LST), SAF/LAND/IM/PUM_LST/2.5, Issue 2.5, 24/09/2010, 49 p.