

Рис. 2. Средние за месяц (по всем срокам спутниковых наблюдений по всей выборке) значения dev и SKO (K), полученные при сопоставлении спутниковых (AVHRR/NOAA, МСУ-М/Метеор, SEVIRI/Meteosat (точки стояния 0 и 41,5° в.д.)) оценок T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$ (2 способа расчёта: климатический (клим.) и оперативный (опер.) с результатами аналогичных наземных наблюдений (48 метеостанций ЦПР).

Примечание. Средние за месяц по всей выборке по всем срокам спутниковых наблюдений

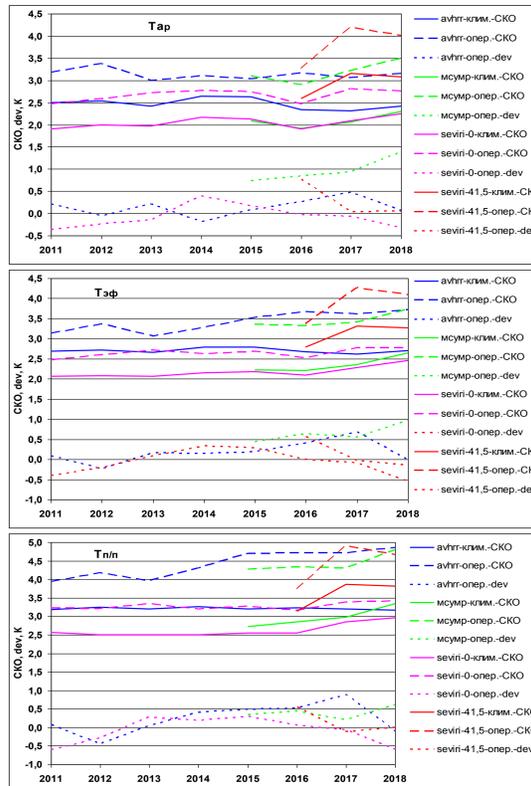


Рис. 3. Средние за год (по всем срокам спутниковых наблюдений) значения dev и SKO (K), полученные при сопоставлении спутниковых (AVHRR/NOAA, МСУ-М/Метеор, SEVIRI/Meteosat (точки стояния 0 и 41,5° в.д.)) оценок T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$ (2 способа расчёта: климатический (клим.) и оперативный (опер.)) с результатами аналогичных наземных наблюдений (48 метеостанций ЦПР).

Примечание. Средние за год по всем срокам спутниковых наблюдений

Средние по всей выборке значения dev и SKO при сравнении с наземными измерениями спутниковых оценок T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$, полученных по данным 4х видов спутниковой информации двумя способами

спутниковый прибор	T_{a_p}			$T_{a_{эф}}$			$T_{n/m}$		
	клим.	оператив.	dev	клим.	оператив.	dev	клим.	оператив.	dev
	SKO	SKO	dev	SKO	SKO	dev	SKO	SKO	dev
AVHRR	2,48	3,13	0,13	2,71	3,42	0,20	3,21	4,42	0,28
МСУ-М	2,08	3,17	0,97	2,35	3,45	0,64	2,96	4,42	0,40
SEVIRI-0	2,14	2,68	-0,04	2,30	2,65	-0,04	2,79	3,27	-0,06
SEVIRI-41,5	3,09	4,07	0,07	3,27	4,15	-0,07	3,82	4,74	-0,04

Спутниковый регулярный мониторинг температуры приземного воздуха на уровне растительного покрова (T_{a_p}), температуры подстилающей поверхности ($T_{a_{эф}}$) и эффективной температуры подстилающей поверхности ($T_{n/m}$ – взвешенная линейная комбинация значений T_{a_p} и $T_{a_{эф}}$ в зависимости от степени проективного покрытия растительностью) с высоким пространственным и временным разрешением необходим для климатического, агрометеорологического и гидрологического моделирования различных ситуаций, например, засух, наводнений и пожаров. В настоящее время предложено много разных методов и методик восстановления значений T_{a_p} по спутниковым данным. Приемлемой точностью считаются ошибки не более 2 К, оптимальной – не более 1 К [7]. Получение спутниковых оценок T_{a_p} и $T_{a_{эф}}$ является более сложной задачей, т.к. на них влияет много разных параметров.

В «НИЦ «Планета» разработан [5] достаточно простой алгоритм расчёта значений T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$ по данным спутниковых измерений радиационной температуры на $\lambda=11$ и 12 мкм (T_{11} , T_{12}) для безоблачных пикселей, которые автоматически детектируются с помощью Комплексной Пороговой Методики (КПМ) для данных МСУ-МР с полярно-орбитального КА Метеор-М №2 [2], для данных AVHRR с полярно-орбитального КА серии NOAA [1] и для данных SEVIRI с геостационарных КА серии Meteosat [4]. Восстановление значений T_{a_p} и $T_{a_{эф}}$ по спутниковым ИК измерениям происходит по методу GSW (Generalised Split-Window) для территорий с однородными условиями [7, 8].

Юг Европейской территории России (ЕТР) (Центрально-Черноземный регион (ЦЧР)) достаточно однороден по типу рельефа и растительности, а также температурно-влажностному режиму. Поэтому в методике в качестве предикторов используются значения T_{11} и ($T_{11}-T_{12}$), а коэффициенты, учитывающие влияние атмосферы и подстилающей поверхности, подбираются к ним эмпирически. Формула расчёта выглядит следующим образом: $T_{a_p} = T_{11} + a_1(T_{11}-T_{12}) + a_2$, где T_{11} – температура в канале 11, a_1 и a_2 – эмпирические коэффициенты (разные для T_{a_p} и $T_{a_{эф}}$). Значения T_{a_p} рассчитываются: $T_{a_p} = T_{a_p} \cdot b + (1-b) \cdot T_{n/m}$ (в светлое время суток) или $T_{a_p} = (T_{a_p} + T_{n/m}) \cdot 2$ (в тёмное время), где $b = 2 / (NDVI + 0.1)$ – степень проективного покрытия растительностью, $NDVI = (A_{0.6} - A_{0.8}) / (A_{0.6} + A_{0.8})$ – индекс вегетации, $A_{0.6}$ и $A_{0.8}$ – измерения альбедо в каналах 1 и 2 ($\lambda=0.6$ и $0.8-0.9$ мкм) спутниковых приборов.

Существует 2 варианта методики:

- 1) «климатическом» варианте используются коэффициенты-константы a_1 , a_2 и a_3 , рассчитанные по методу наименьших квадратов для каждого месяца и года отдельно для каждого срока наземного метеонаблюдения по той же самой выборке, для которой определяются значения T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$. Основные его недостатки – обязательность наличия синхронного спутникового архива данных наземных метеонаблюдений для T_{a_p} и $T_{a_{эф}}$ и необходимость ожидания конца периода времени, для которого выполняются спутниковые оценки;
- 2) «оперативный» вариант использует «динамические» коэффициенты a_1 , a_2 и a_3 , непрерывно меняющиеся в зависимости от значений высоты солнца (h_s), времени дня и суток. Главное его преимущество – возможность получения оценок T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$ сразу после поступления спутниковой информации в БД. Для разных спутниковых приборов получены разные формулы расчёта T_{a_p} и $T_{a_{эф}}$:

для МСУ-МР/Метеор:

для первой половины дня:

$$T_{a_p} = T_{11} + (T_{11} - T_{12}) \cdot 10 \cdot (dtmm - 0.5) \cdot ddat + 3 \cdot ddat - (1 - dtmm) \cdot 17.5;$$

$$T_{n/m} = T_{11} + (T_{11} - T_{12}) \cdot (2 \cdot ddat - dtmm + hsol \cdot ddat + 2 \cdot dtmm) \cdot ddat + 5 + 35 \cdot ddat \cdot (2 - dtmm - 1.25);$$

для второй половины дня:

$$T_{a_p} = T_{11} + (T_{11} - T_{12}) \cdot (1 + 2 \cdot hsol \cdot ddat) + 5 + 45 \cdot hsol \cdot ddat \cdot (dtmm - 0.5);$$

$$T_{n/m} = T_{11} + (T_{11} - T_{12}) \cdot (1 + 2 \cdot ddat \cdot dtmm + hsol \cdot ddat + 2 \cdot dtmm) \cdot 2.5 + 55 \cdot ddat \cdot (dtmm - 0.5).$$

Здесь $hsol = h_s$ при $h_s > 0^\circ$ и $hsol = 0$ при $h_s < 0^\circ$; $ddat = 0,1 + (183 - 193 \cdot day) : 180$, day – номер календарного дня от начала года; $dtmm = (720 - 720 \cdot tmm) : 720$, $tmm = hour \cdot 60 + min$, hour – часы, min – минуты;

для AVHRR/NOAA:

$$T_{a_p} = T_{11} + (1 + ddat \cdot 0.01) \cdot (T_{11} - T_{12}) \cdot ddat + (1 - ddat) \cdot (1 - hs) \cdot 7 - 1.5 \cdot hs;$$

$$T_{n/m} = T_{11} + (1 + (ddat + 2 \cdot shda) \cdot 0.01) \cdot (T_{11} - T_{12}) \cdot (ddat + 2 \cdot shda) + (1 - ddat) \cdot 3 \cdot (1 - hs),$$

где $shda = hs \cdot ddat$, $ddat = 0,1 + (183 - 183 \cdot (day - 10)) : 180$, day – номер календарного дня от начала года, $hs = h_s$ при $h_s > 0^\circ$ рад. и $hs = 0$ при $h_s < 0^\circ$;

для SEVIRI/Meteosat:

$$T_{a_p} = T_{11} + (T_{11} - T_{12}) \cdot (datd - hs) + shda^2 \cdot (1 - ddat) \cdot 0.5 + ta_1 + ta_2 + ta_3;$$

$$T_{n/m} = T_{11} + 1.5 \cdot (T_{11} - T_{12}) + (T_{11} - T_{12})^2 \cdot shda + 7 \cdot shda \cdot ddat \cdot 1 - hs + ts_1 + ts_2 + ts_3;$$

где $shda = hs \cdot ddat$, $datd = 0,1 + (183 - 183 \cdot (day - 10)) : 180$, day – номер календарного дня от начала года, $hs = h_s$ при $h_s > 0$ град. и $hs = 0$ при $h_s < 0^\circ$, $ta_1 = f(ddat, hs)$ для разных сроков спутниковых наблюдений, $ta_2 = f(ddat, hs)$ для разных месяцев, $ta_3 = const$ для разных месяцев, $ts_1 = f(ddat)$ для разных месяцев и сроков спутниковых наблюдений, $ts_2 = f(hs)$ для разных сроков спутниковых наблюдений, $ts_3 = const$ для разных месяцев.

Для настройки и валидации разных вариантов методики использовались значения T_{a_2} (температура воздуха на высоте 2 м (в методике принимается что $T_{a_2} = T_{a_p}$, хотя на самом деле значения T_{a_p} могут относиться как к уровню травы, так и к верхушкам деревьев)) и $T_{n/m}$, полученные в результате измерений на 48 метеостанциях ЦПР (49-54° с.ш. и 31-43° в.д.). Для данных AVHRR/NOAA и SEVIRI/Meteosat (точка стояния 0° в.д.) была доступна выборка 2011-2018 гг., МСУ-МР/Метеор – выборка 2015-2018 гг., для данных SEVIRI/Meteosat (точка стояния 41,5° в.д.) – выборка 2016-2018 гг.

При сопоставлении спутниковых и наземных оценок температуры рассматривались фрагменты 3x3 пикселя для информации МСУ-МР/Метеор и AVHRR/NOAA (размеры пикселя 1' (0,01667°) по широте и 1,5' (0,025°) по долготе, т.е. ~1-2 км; спутниковые оценки получались средними для фрагмента) с центром в районе метеостанции. Для информации SEVIRI/Meteosat сопоставление проводилось для пикселя спутникового изображения (линейные размеры пикселя ~6-8 км) соответствующего координатам метеостанции. Разница по времени между спутниковыми и наземными наблюдениями не превышала ± 1 ч для данных МСУ-МР/Метеор и AVHRR/NOAA и ± 15 мин для данных SEVIRI/Meteosat. Рассчитывались $dev = T_{назем} - T_{спут}$ – среднее отклонение спутниковой оценки температуры от наземной и среднее квадратичное отклонение (SKO).

Результаты исследований показали, что (см. табл. и рис.):

- 1) при использовании климатического варианта методики (по сравнению с оперативным) получаются наименьшие значения SKO и dev=0 К;
- 2) точнее всего (наименьшие значения SKO) по спутниковым данным восстанавливаются значения T_{a_p} . Значения $T_{a_{эф}}$ восстанавливаются немного хуже, а для значений $T_{n/m}$, несмотря на небольшие значения dev, величина SKO заметно больше. Для разных спутниковых данных средние значения SKO: $SKO_{Ta_p} = SKO_{Ta_{эф}} = 2-4$ К, $SKO_{Tn/m} = 3-5$ К, $dev = \pm 1-2$ К, однако для отдельных сроков спутниковых наблюдений и метеостанций значения dev могут достигать 10 К, ночью летом – до 5 К, а зимой – до 15 К (для $T_{n/m}$ до 20 К);
- 3) точнее всего восстанавливаются T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$ по данным SEVIRI/Meteosat (0° в.д.). Ближиз к ним значения SKO по данным МСУ-МР/Метеор, однако оперативный вариант методики обычно занижает спутниковые оценки T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$ относительно наземных измерений на 0,5-1 К. По данным AVHRR/NOAA оценки T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$ оперативным вариантом методики, в целом, тоже немного ниже, чем по наземным измерениям (dev=0,1-0,3 К), однако значения SKO существенно выше для климатического варианта (по сравнению с оценками по данным SEVIRI/Meteosat (0° в.д.) и МСУ-МР/Метеор), а при оперативном варианте расчёта SKO выше, чем по данным SEVIRI/Meteosat (0° в.д.), по сопоставлению со значениями SKO по данным МСУ-МР/Метеор. Несмотря на то, что при использовании данных SEVIRI/Meteosat (41,5° в.д.) для расчёта T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$ dev=0 К при любом способе расчёта, однако значения SKO получаются самыми высокими;
- 4) независимо от вида спутниковой информации значения SKO в целом больше в тёплый период года (апрель-сентябрь) и светлое время суток (6-15 ч ВСВ), чем в холодный период года и ночью. Однако хорошо заметны 2 максимума значений SKO (летом (из-за резких перепадов температур в пределах пикселя: тени от облака и крупных объектов, небольшие холодные водоёмы, перегретые крыши и дороги и др.) и зимой (из-за неточного восстановления облачной маски (ошибки детектирования могут достигать 25% всех пикселей фрагмента спутникового изображения для данных МСУ-МР/Метеор)) и 2 минимума (весной и осенью).
- 5) в целом, значения dev (оперативный вариант методики) имеют более ровный сезонный и суточный ход для данных SEVIRI/Meteosat (0° в.д.) (из-за больших размеров выборки и меньшей разницы по времени между спутниковыми и наземными наблюдениями) для всех 3х видов температур. При использовании данных AVHRR/NOAA спутниковые оценки T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$ получаются ниже (dev<0 К) наземных в тёплый период года (а для T_{a_p} и осенью), а также днём, и выше (dev<0 К) зимой. Похожим образом ведут себя спутниковые оценки T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$ по данным МСУ-МР/Метеор. Для данных SEVIRI/Meteosat (41,5° в.д.) сезонный и суточный ход dev обратные.
- 6) среднегодовые значения dev и SKO меняются слабо (условно можно считать их константами) для разных лет рассматриваемых выборок вплоть до 2017 г. (резкое увеличение значений SKO и уменьшение dev – в среднем на 0,5 К даже для данных SEVIRI/Meteosat (0° в.д.)). Вероятно, это связано с изменением точности, начиная с 2017 г., данных анализа Exeter, используемых в качестве дополнительной информации при детектировании облачной маски [3].

Таким образом, оба варианта методики, в основном, достаточно хорошо работают круглогодично и круглосуточно для юга ЕТР и обеспечивают приемлемую точность, предъявляемую потребителями к её выходным продуктам [7].

Для юга ЕТР построена модель влаго- и теплообмена покрытых растительностью участков суши с атмосферой для вегетационного периода (LSM, Land Surface Model) [6], используемая для расчёта составляющих водного и теплового балансов исследуемой территории (влагозапасов почвы, суммарного испарения, инфильтрации влаги в почву, вертикальных потоков тепла и др.), а также температур поверхности почвы и растительного покрова и распределений влажности и температуры почвенного слоя по глубине, в которой применяются в качестве входных переменных полученные по разным спутниковым данным (двумя способами) значения T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$. Сравнение рассчитанных по модели значений суммарного испарения и влагозапасов почвы с измерениями на 48 агрометеостанциях региона показало, что их расхождение находится в допустимых пределах, что также свидетельствует об адекватности спутниковых оценок температур.

На основе оперативного варианта методики, разработанного для юга ЕТР, в ФГБУ «НИЦ «Планета» создан специализированный программный комплекс (СПК) «ETR-talents», позволяющий в автоматическом режиме определять по спутниковым данным (радиометры AVHRR/NOAA, МСУ-МР/Метеор-М №2, SEVIRI/Meteosat) параметры подстилающей поверхности и приземного воздуха для Европейской территории России и сопредельных стран (46-63° с.ш. и 20-50° в.д., равномерная географическая сетка с шагом 1' (0,01667°) по широте и 1,5' (0,025°) по долготу). СПК состоит из 4х пакетов программ – для каждого вида спутниковой информации: AVHRR/NOAA, МСУ-МР/Метеор-М №2, SEVIRI/Meteosat (точки стояния 0° в.д. и 41,5° в.д.). Выходные продукты СПК представлены в виде матриц значений определяемых параметров. Круглосуточно для каждого безоблачного пикселя спутникового изображения рассчитываются T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$, а в светлое время суток дополнительно к ним вычисляются излучательная способность поверхности почвы (E) (3 способа расчёта), вегетационный индекс (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index), листовой индекс (LAI – Leaf Area Index) (7 вариантов расчёта для основных типов растительного покрова) и проективное покрытие растительностью (B). Значения NDVI рассчитываются стандартным образом, значения B и LAI – с использованием эмпирических зависимостей от NDVI.

Использование результатов расчётов СПК «ETR-talents» совместно с данными численного прогноза состояния атмосферы позволяет применять LSM в оперативном режиме для получения текущих значений запасов почвенной влаги, суммарного испарения и других составляющих водообмена, например, с целью получения прогноза водообеспеченности территорий сельскохозяйственного назначения.

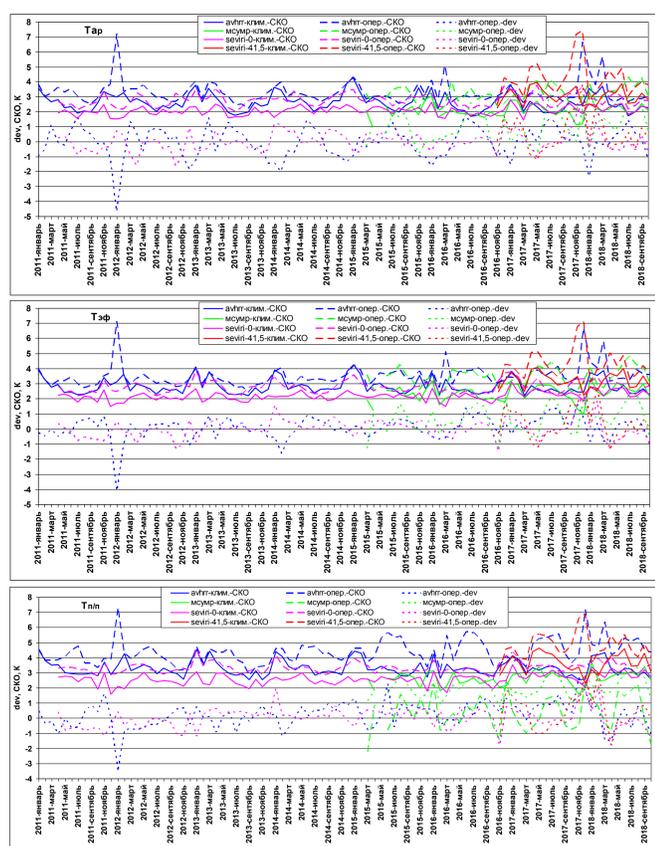


Рис. 4. Средние за каждый стандартный срок (BCB) значения dev и SKO (K), полученные при сопоставлении спутниковых (AVHRR/NOAA, МСУ-МР/Метеор, SEVIRI/Meteosat (точки стояния 0 и 41,5° в.д.)) оценок T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$ (2 способа расчёта: климатический (клим.) и оперативный (опер.)) с результатами аналогичных наземных наблюдений (48 метеостанций ЦПР). Примечание. Средние для срока по всей выборке

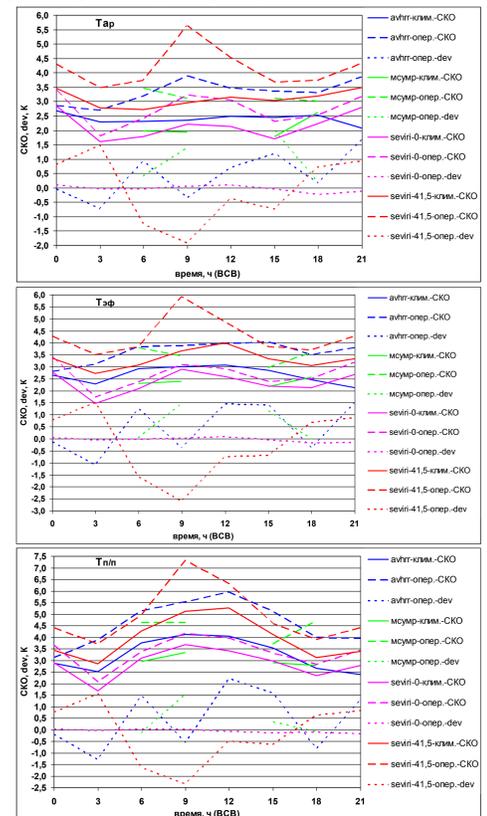


Рис. 5. Средние для каждого стандартного срока (BCB) значения dev и SKO (K), полученные при сопоставлении спутниковых (AVHRR/NOAA, МСУ-МР/Метеор, SEVIRI/Meteosat (точки стояния 0 и 41,5° в.д.)) оценок T_{a_p} , $T_{a_{эф}}$ и $T_{n/m}$ (2 способа расчёта: климатический (клим.) и оперативный (опер.)) с результатами аналогичных наземных наблюдений (48 метеостанций ЦПР). Примечание. Средние для срока по всей выборке

Литература

1. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова, осадков и опасных явлений погоды по данным радиометра AVHRR с МКС серии NOAA круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 66-74.
2. Волкова Е.В. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным радиометра МСУ-МР с полярно-орбитального метеоспутника «Метеор-М» №2 для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 300-320.
3. Волкова Е.В., Кузнецкий А.Б. Сопоставление результатов прогнозирования полей температуры и давления глобальных моделей NCER и Exeter (применяемых в спутниковом анализе параметров облачного покрова и осадков) // Сборник тезисов Шестнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2018 г. С. 167. ISBN 978-5-00015-018-4. doi:10.21046/2076-162ZZconf-2018.
4. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова по данным геостационарного МКС Meteosat-9 круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 16-22.
5. Волкова Е.В., Успенский С.А. Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности, приземной температуры воздуха и эффективной температуры по спутниковым данным для юга ЕТР // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 291-303.
6. Мухомов Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В., Кузнецкий А.Б., Успенский С.А. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании компонент водного и теплового балансов территории Центрально-Черноземных областей России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 17-34.
7. USA SAF. Product user manual. Land Surface Temperature (LST). SAF/LAND/IM/PUM_LST2.5. Issue 2.5. 24/09/2010. 49 pp.
8. Wan Z., Dacier J. A Generalized Split-Window Algorithm for Retrieving Land-Surface Temperature from Space. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1996. Vol. 34. № 4. P. 892-905.