



На правах рукописи

A handwritten signature in black ink is positioned to the right of the text 'На правах рукописи'. The signature is cursive and appears to be the author's name.

УСПЕНСКИЙ Сергей Александрович

**МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРЫ
ПОВЕРХНОСТИ СУШИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ
ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ МЕТЕОСПУТНИКОВ**

25.00.29 - физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

24 НОЯ 2011

Москва 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Асмус Василий Валентинович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Тимофеев Юрий Михайлович
доктор технических наук, профессор
Пяткин Валерий Павлович

Ведущая организация: Институт Космических Исследований РАН

Защита состоится 30.11.2011 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 327.003.01
Федерального государственного бюджетного учреждения «Гидрометцентр России» по
адресу: 123242, Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, д 11-13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного учреждения
«Гидрометцентр России».

Автореферат разослан «28» октября 2011 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 327.003.01
доктор географических наук



Е.С.Нестеров

Актуальность работы

Температура поверхности суши (ТПС или T_s) – один из основных параметров в физике процессов на поверхности Земли, характеризующих взаимодействие между атмосферой и поверхностью. Знание ТПС требуется для разнообразных научных исследований, включая климатологию, гидрологию и экологию. В частности, данные о ТПС необходимы при решении таких задач, как оценка энергетического и водного балансов на границе атмосфера-подстилающая поверхность, расчеты эвапотранспирации, оценки тепловой инерции и влажности почвы, обнаружение и прогноз заморозков, мониторинг состояния зерновых культур. ТПС является также одним из индикаторов парникового эффекта [1]. Регулярный мониторинг ТПС позволяет проанализировать долговременные временные ряды глобальной поверхностной температуры и оценить ее изменчивость в пределах различных периодов.

Спутниковое дистанционное зондирование - единственное средство получения долговременных однородных рядов данных о ТПС регионального и глобального покрытия. Для дистанционного определения температуры ЗП последние 30 лет используют измерения уходящего теплового (ИК) излучения в диапазоне «окна прозрачности» 10.5-12.5 мкм с помощью сканирующих радиометров, установленных на полярно-орбитальных метеорологических спутниках, а также спутниках наблюдения Земли. Необходимость получения регулярных спутниковых данных о температуре земной поверхности (ЗП) диктуется тем, что сеть наземных (*in situ*) наблюдений ТПС достаточно редкая.

Высокоточное дистанционное определение ТПС затруднено «нечернотой» ЗП, т.е. возможным отличием от единицы спектральной излучательной способности поверхности суши (ИСПС, $\epsilon(\lambda)$, где λ – длина волны). Величина ИСПС для заданной длины волны представляет отношение фактического излучения ЗП при известной температуре к теоретическому излучению, испускаемому абсолютно черным телом (АЧТ) при той же температуре. Одновременное определение T_s и $\epsilon(\lambda)$ по спутниковым измерениям уходящего ИК излучения указанного состава невозможно без привлечения дополнительной информации об $\epsilon(\lambda)$. Кроме того, температура суши имеет значительную пространственную (в частности, в пределах одного пиксела зондирующей аппаратуры) и временную изменчивость (суточный цикл, эффекты перегрева), что затрудняет спутниковый мониторинг полей ТПС.

Использование данных одного спутника обеспечивает покрытие исследуемой территории только дважды в сутки, причем вероятное попадание облачности в поле зрения прибора дополнительно сокращает частоту зондирования. Новые возможности

почти непрерывного во времени спутникового мониторинга ТПС в широтном поясе {55° с.ш. – 55° ю.ш.} возникли в последние годы после запусков европейских геостационарных метеоспутников второго поколения (Meteosat -8, -9). Установленный на борту этих спутников многоканальный сканирующий радиометр SEVIRI (Scanning Enhanced Visible and InfraRed Imager) имеет, в том числе, два ИК канала в спектральном диапазоне 10,5-12,5 мкм.

На запущенном 20 января 2011 г. отечественном геостационарном спутнике нового поколения серии «Электро-Л» установлен радиометр МСУ-ГС (многоканальное сканирующее устройство – геостационарное). Основные ИК каналы МСУ-ГС близки по спектральным характеристикам каналам аппаратуры SEVIRI, поэтому данные SEVIRI могут применяться для отработки методов восстановления температуры ЗП по информации МСУ-ГС.

Создание методов оперативного получения ТПС по данным новых геостационарных спутников позволяет обеспечить регулярное картирование полей ТПС для обширных территорий. Подобные данные могут существенно дополнить наблюдения редкой наземной наблюдательной сети, что особенно важно для малонаселенных районов России.

Цель диссертационной работы

Основной целью диссертационной работы является разработка и апробация метода и технологии дистанционного мониторинга температуры поверхности суши по данным измерений уходящего теплового излучения с геостационарных метеоспутников, а также использование данных спутникового мониторинга в задачах изучения термического режима земной поверхности.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- теоретический анализ информативности данных измерений радиометров геостационарных метеоспутников и потенциальных погрешностей оценивания ТПС;
- разработка метода дистанционного определения ТПС по данным измерений аппаратуры SEVIRI европейского геостационарного метеоспутника Meteosat-9;
- анализ погрешностей предложенного метода дистанционного определения ТПС по данным SEVIRI на основе сопоставления с независимыми спутниковыми оценками ТПС и наземными контактными измерениями;
- создание технологии обработки данных SEVIRI для получения оценок ТПС;

- создание технологии приема, обработки и оперативного доведения до Гидрометцентра России данных и информационной продукции зарубежных полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутников;
- анализ возможности использования данных измерений аппаратуры SEVIRI в задачах оценки приземной температуры воздуха T_a .

Методы исследования

Основные результаты диссертационной работы получены с привлечением современных методов и подходов к обработке и анализу спутниковых данных. Наряду с известными зарубежными моделями и программными комплексами, адаптированными к имеющимся вычислительной среде и информационным ресурсам (модель быстрых радиационных расчетов, процедуры детектирования облачности), в диссертации использованы созданные автором оригинальные методы и алгоритмы тематической обработки и анализа спутниковой информации. Применялись также стандартные статистические методы регрессионного анализа и анализа ошибок.

Научная новизна работы

1. Впервые в отечественной практике создана технология, включая метод, алгоритмы и программное обеспечение, оперативного дистанционного определения температуры поверхности суши по данным геостационарного спутника Meteosat-9 в условиях отсутствия облачности. Метод, в отличие от известных зарубежных аналогов, не требует создания и регулярного обновления баз данных излучательных способностей поверхности.
2. Получены количественные оценки погрешности результатов дистанционного определения ТПС предложенным методом для различных временных периодов 2009-2011 гг. и разных регионов Европы и России, подтвердившие возможность организации мониторинга ТПС с погрешностью не хуже 2.4 К.
3. Предложен и испытан метод дистанционного определения по данным SEVIRI/Meteosat-9 приповерхностной температуры воздуха T_a (на уровне 2 метра), позволяющий получать оценки T_a с уровнем погрешности не хуже 2.5 К для большинства стандартных синоптических сроков.
4. Выполнен сравнительный анализ результатов спутникового мониторинга полей ТПС для Центрально-Черноземной зоны (ЦЧЗ) России за летние периоды 2010 и 2011 гг.

Практическая значимость

1. Создана технология приема и оперативной доставки пользователям (Гидрометцентр России, НПО «Тайфун» и др.) данных и информационной продукции КА гидрометеорологического назначения (полярно-орбитальных и геостационарных). Эта технология обеспечила участие Росгидромета в международной программе EARS (Служба EUMETSAT по сбору и распространению данных) и сделала возможным оперативное получение спутниковых данных, покрывающих Северное полушарие.
2. Разработанные метод и технология обработки данных SEVIRI обеспечивают получение и оперативное представление пользователям оценок ТПС без привлечения дополнительных данных об излучательных способностях поверхности. Предложенный метод позволяет получать оценки ТПС, сравнимые по точности с зарубежными алгоритмами.
3. Предложенный метод дистанционного определения ТПС пригоден для обработки данных измерений перспективных отечественных геостационарных метеоспутников типа «Электро-Л».
4. Разработанные методы и технологии обеспечивают получение оценок ТПС и T_a с точностями, позволяющими использовать их в различных приложениях, например, в схемах численного анализа полей метеозаэlements и моделях гидрологического цикла, при изучении термического режима ЗП для различных регионов и сезонов.

Диссертационная работа выполнялась в период 2007-2011 гг. в рамках плана НИОКР Росгидромета по реализации Целевой научно-технической программы «Научные исследования и разработки в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды» на 2008-2010гг., Федеральной Космической программы 2006-2015 (раздел 1), Соглашения Росгидромет-EUMETSAT об обмене данными и продукцией с метеорологических спутников для использования в анализе и прогнозе погоды.

Результаты диссертации были использованы при выполнении грантов РФФИ № 07-05-13585, 07-05-01030, 10-05-00807.

Личный вклад автора

Результаты, выносимые на защиту, получены автором самостоятельно. Остальные результаты получены при его непосредственном участии. Диссертант выполнил анализ современного состояния проблемы, разработал новые методы дистанционного определения ТПС и T_a , создал технологию картирования полей ТПС по данным геостационарных метеоспутников нового поколения. Применил разработанные методы

для анализа термического режима земной поверхности. Являлся непосредственным разработчиком технологии приема и оперативной доставки пользователям спутниковых данных и информационных продуктов.

Апробация работы и публикации

Результаты диссертации докладывались на научных семинарах ФГБУ «НИЦ «Планета», Гидрометцентра России, кафедры «Физика атмосферы» физического факультета СПбГУ, семинаре по итогам выполнения проектов РФФИ (Гидрометцентр России, декабрь 2008), а также на различных конференциях, совещаниях и симпозиумах: Международная конференция EUMETSAT по метеорологическим спутникам, 2009 (Бат, Великобритания, сентябрь 2009); Международный симпозиум стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика», Санкт-Петербург, 2009, 2011; Международная конференция EUMETSAT по метеорологическим спутникам, 2010 (Кордова, Испания, сентябрь 2010); Международная конференция по изучению данных TOVS (ITSC-16, Монтеррей, США, 2010); Всероссийские конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2008, 2009, 2010); 39-ое совещание координационной группы по метеорологическим спутникам CGMS-39, Санкт-Петербург, 2011.

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 3 в изданиях, включенных в список ВАК.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается использованием теоретически обоснованных и апробированных методов анализа спутниковых данных, современных высокоточных моделей радиационного переноса. Верификация оценок ТПС и приповерхностной температуры воздуха, полученных на основе реальных спутниковых данных, проведена путем сравнения с независимыми спутниковыми и наземными наблюдениями. Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

На защиту выносятся:

1. Метод, алгоритмы и программное обеспечение дистанционного определения ТПС по данным измерений аппаратуры SEVIRI/Meteosat-9 в условиях отсутствия облачности.

2. Результаты анализа погрешностей определения ТПС, полученных сравнением с независимыми оценками T_s по спутниковым данным (измерения аппаратуры SEVIRI, MODIS) и данными контактных (*in situ*) наблюдений температуры поверхности суши.
3. Технология приема и оперативной доставки пользователям данных и информационной продукции КА гидрометеорологического назначения (полярно-орбитальных и геостационарных).
4. Метод дистанционного определения приповерхностной температуры воздуха T_s по данным SEVIRI и оценки погрешностей в различных условиях.
5. Результаты анализа данных спутникового мониторинга полей ТПС для Центрально-Черноземной зоны России за летние периоды 2010-2011 гг.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, и списка литературы из 110 наименований (из них 85 на английском языке). Общий объем диссертации составляет 116 страниц. Работа включает 16 таблиц и 23 рисунка.

Содержание диссертационной работы

Во **Введении** изложена проблема дистанционного определения температуры поверхности суши, показана ее актуальность, сформулированы цели исследования и определены его задачи, обсуждается научная новизна и практическая значимость работы, а также кратко излагается содержание диссертации.

Первая глава носит обзорный характер. Раздел 1.1 содержит описание контактных (наблюдения *in situ* агрометеорологической сети) и дистанционных (радиометрические с вышек, самолетов, спутников) методов измерения ТПС. Описание наблюдений *in situ* дано в соответствии с [2].

В разделе 1.2 дано описание спутниковых методов измерения температуры ЗП. Для дистанционного определения T_s в любое время суток используют спутниковые радиометрические измерения уходящего ИК излучения в спектральном диапазоне 10.5-12.5 мкм – «окне прозрачности» атмосферы. В зависимости от типа ЗП выделяются две задачи различной сложности: картирование полей температуры поверхности океана (ТПО) и поверхности суши (ТПС). В обоих случаях под T_s понимается радиационная температура ЗП, усредненная по индивидуальному полю зрения прибора (пикселу), которая характеризует излучение тонкого поверхностного слоя и измеряется в Кельвинах (К).

Водная поверхность для излучения в ИК диапазоне спектра близка к АЧТ ($\epsilon(\lambda) \cong 1$), что облегчает задачу дистанционного картирования ТПО. Методы картирования ТПО, предложенные для двухканальной измерительной схемы (каналы 10.5-11.5, 11.5-12.5 мкм), получили название методов «расщепленного окна прозрачности» (РОП или SWM – split-window method), см., напр. [3-5]. Их основное преимущество – достижение высокой точности определения T_s (лучше 1.0К) без привлечения априорной информации о вертикальных профилях температуры $T(p)$ и влажности $q(p)$ в пунктах зондирования (p – давление).

Методы дистанционного определения ТПС развиты в меньшей степени, главным образом, вследствие необходимости учета «нечерноты» поверхности суши. Большинство исследований последних лет посвящено разработке методов дистанционного определения T_s по данным измерений многоканальных радиометров AVHRR (спутники серий NOAA, MetOp) и MODIS (спутники EOS-Aqua, Terra). Одновременное определение T_s , $\epsilon(\lambda)$ по спутниковым измерениям указанного состава невозможно без привлечения априорной информации об ИСПС вследствие недоопределенности исходной обратной задачи. Если ИК излучение регистрируется в n каналах, то количество неизвестных, равное $n+1$ ($\epsilon_1, \dots, \epsilon_n, T_s$), превосходит число уравнений (n), даже при заданных атмосферных профилях $T(p)$, $q(p)$. Априорное знание $\epsilon(\lambda)$ в пунктах зондирования позволяет использовать для оценки ТПС «локальные» алгоритмы метода РОП, регрессионные коэффициенты в которых зависят от $\epsilon(\lambda)$ в пунктах зондирования.

Большинство предложенных способов учета эффектов нечерноты ЗП базируется на привлечении дополнительной информации об излучательной способности $\epsilon(\lambda)$ – в форме упрощающих гипотез и количественных ограничений, или априорного задания значений $\epsilon(\lambda)$ (относительных, абсолютных) для используемых спектральных каналов. Типичной гипотезой является постоянство $\epsilon(\lambda)$ в нескольких «соседних» спектральных каналах и/или для двух или нескольких сроков наблюдений.

В разделе 1.3 приведено краткое описание информационных характеристик аппаратуры SEVIRI/Meteosat-8, -9 и МСУ-ГС Электро-Л № 1. Сканирующий радиометр SEVIRI имеет 12 каналов (см. Табл.1), в том числе 2 ИК канала в спектральном диапазоне 10.5-12.5 мкм, линейный размер пиксела в подспутниковой точке ~ 3-4 км, причем измерения выполняются каждые 15 мин [6].

На отечественном геостационарном спутнике серии «Электро-Л» № 1 установлен сканирующий радиометр МСУ-ГС, подобный (по информативности) аппаратуре SEVIRI.

Обозначения и спектральные характеристики каналов аппаратуры
SEVIRI/Meteosat-9 и МСУ-ГС/Электро-Л

SEVIRI		МСУ-ГС	
Канал	Спектральная полоса (мкм)	Канал	Спектральная полоса (мкм)
1 (VIS 0.6)	0.56-0.71	1 (ВИД 0.6)	0.5-0.65
2 (VIS 0.8)	0.74 - 0.88	2 (ВИД 0.7)	0.65 - 0.8
3 (IR 1.6)	1.50-1.78	3 (ВИД 0.85)	0.8-0.9
4 (IR3.9)	3.48-4.36	4 (ИК3.8)	3.5-4.01
5 (WV 6.2)	5.35-7.15	5 (ИК 6.3)	5.7-7.0
6 (WV 7.3)	6.85-7.85	6 (ИК 8.0)	7.5- 8.5
7 (IR 8.7)	8.30-9.10	7 (ИК8.7)	8.2-9.2
8 (IR9.7)	9.38 - 9.94	8 (ИК 9.7)	9.2-10.2
9 (IR 10.8)	9.80-11.80	9 (ИК 10.6)	10.2-11.2
10 (IR 12.0)	11.00-13.00	10 (ИК 12.0)	11.2-12.5
11 (IR 13.4)	12.40- 14.40	–	–
12 (HRV 0.75)	0.5-0.9	–	–

Измерения в каналах расщепленного окна прозрачности (каналы №9, 10) обоих видов аппаратуры непосредственно используются для дистанционного определения температуры ЗП. Измерения в других каналах видимого и ИК диапазонов используются в процедурах детектирования облачности.

В разделе 1.3 приведены также характеристики радиометров AVHRR/NOAA, MODIS/Terra, Aqua.

Глава 2 посвящена описанию разработанных методов дистанционного определения ТПС по данным измерений с геостационарных метеоспутников. В разделе 2.1 формулируется постановка обратной задачи определения ТПС по данным SEVIRI в условиях отсутствия облачности. Для получения достоверных оценок ТПС необходимо учесть влияние атмосферного ослабления излучения и «нечерноту» ЗП. «Замыкание» задачи достигается привлечением дополнительной информации об $e_1 = \epsilon(\lambda_1)$, $e_2 = \epsilon(\lambda_2)$, где λ_1, λ_2 – центральные длины волн первого и второго каналов РОП (IR 10.8 и IR 12.0 в Табл.1).

Принятый в диссертации подход к численному решению обратной задачи использует модель измерений в каналах РОП (уравнение переноса ИК излучения в системе атмосфера-земная поверхность [7]), а также дополнительную гипотезу о постоянстве во времени значений ИСПС. При реализации подхода использованы методы численного моделирования измерений SEVIRI, описанные в разделе 2.2. В качестве

основы для моделирования данных аппаратуры SEVIRI в ИК каналах выбран программный комплекс быстрых радиационных расчетов RTTOV-7 (Radiative Transfer for (A)TOVS), разработанный при поддержке EUMETSAT и ЕЦСПП (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды, ECMWF), см. [8].

Раздел 2.3 содержит результаты анализа информативности данных SEVIRI и оценки потенциальной погрешности определения ТПС. Для анализа информативности данных SEVIRI построена линеаризованная малопараметрическая модель измерений. В отличие от известных ранее, с помощью этой модели можно анализировать информативность данных SEVIRI для нескольких измерительных циклов, а также оценить возможность дистанционного определения T_a . Установлено, в частности, что в условиях «сухой» и «влажной» атмосфер достигается достаточно высокая потенциальная точность оценивания T_s – величины стандартного отклонения $S(T_s)$ меняются в диапазоне 0.6-1.6К в зависимости от точности априорного задания e_1 и e_2 . Указанные оценки потенциальных погрешностей следует считать оценками «снизу» при переходе к анализу фактических измерений SEVIRI, так как при этом не учитываются погрешности линеаризации и малопараметрической аппроксимации, неточное задание атмосферной модели, погрешности моделирования с помощью RTTOV и др. Близкие результаты получены в [9], где показано, что применение обобщенного метода РОП позволяет получать оценки T_s со среднеквадратичной погрешностью не более 1.6К при зенитных углах измерений в диапазоне 0-55°.

В разделе 2.4 дано описание разработанного метода дистанционного определения T_s , e_1 , e_2 по данным измерений SEVIRI/Meteosat-9. Предложенный в диссертации подход, представляющий комбинацию алгоритмов метода РОП и метода двух температур (МДТ), использует одновременные измерения аппаратуры SEVIRI в каналах РОП.

В локальном методе РОП оценка T_s вычисляется по формуле:

$$T_s = a_1 + (a_2 + a_3 g_1(e) + a_4 g_2(e)) (T_1 + T_2) + (a_5 + a_6 g_1(e) + a_7 g_2(e)) (T_1 - T_2) . \quad (1)$$

Здесь T_1 , T_2 – радиационные температуры, измеренные в каналах 1 и 2; $g_1(e) = (1-e)/e$, $g_2(e) = \Delta e/e^2$, $e = 0.5(e_1 + e_2)$, $\Delta e = e_1 - e_2$; (a_1, a_2, \dots, a_7) – набор регрессионных коэффициентов, зависящих от угла визирования θ : $a_i = a_i(\theta)$. Коэффициенты $a_i(\theta)$ определяются с помощью метода наименьших квадратов (м.н.к.) для заданного диапазона углов. При этом используются модельные значения радиационных температур T_1 , T_2 , рассчитанные с помощью RTTOV-7 для представительной выборки реализаций профилей

$T(p)$, $q(p)$, T_s , в диапазоне зенитных углов наблюдения θ от 0° до 55° . Формула (1) применима для оценки T_s только при заданных e_1 , e_2 .

Алгоритм МДТ базируется на использовании одновременных измерений (как минимум, за два срока t_1 и t_2) при дополнительной гипотезе о постоянстве $e(\lambda_j, t_1) = e(\lambda_j, t_2)$, $j=1, 2$. При измерениях в n каналах минимальное количество сроков m определяется неравенством $m \geq n/(n-1)$, т.е. $m \geq 2$ для $n = 2$. Оценки $T_s(t_1), \dots, T_s(t_m)$, e_1 , e_2 в обобщенном алгоритме МДТ (m сроков зондирования) находятся, исходя из подгонки с помощью м.н.к. измеренных в сроки t_1, t_2, \dots, t_m сигналов $I_j(t_i; \theta)$ к моделированным сигналам $I_j^p(t_i; \theta)$ в каналах РОП ($j = 1, 2$). Сигналы $I_j^p(t_i; \theta)$ рассчитываются с помощью комплекса RTTOV-7 в соответствии с уравнением переноса ИК излучения для плоскопараллельной безоблачной атмосферы [3, 7]:

$$I_j^p(\theta; t_i) = e_j V_j(T_s(t_i)) \tau_{js}(\theta; t_i) + I_j^\uparrow(\theta; t_i) + (1 - e_j) \tau_{js}(\theta; t_i) I_j^\downarrow(\theta; t_i), \quad i=1, 2, \dots, m, j = 1, 2. \quad (2)$$

Здесь $V_j(T_s)$ – функция Планка, τ_{js} – «полная» функция пропускания слоя (θ , p_s), p_s – давление на уровне ЗП, индекс j относится к длине волны λ_j . Первый член в правой части (2) представляет вклад собственного излучения ЗП, члены I_j^\uparrow , I_j^\downarrow – излучение атмосферы вверх и вниз (нисходящее излучение) соответственно:

$$I_j^\uparrow = - \int_0^{p_s} B_j(T) dt_j(0, p), \quad I_j^\downarrow = \int_0^{p_s} B_j(T) dt_j(p_s, p),$$

где $\tau_j(0, p)$, $\tau_j(p_s, p)$ – функции пропускания «вверх» и «вниз» в слоях (0, p) и (p_s , p). Для расчета I_j^p требуется знание T_s , e_1 , e_2 , а также профилей температуры и влажности $T(p)$, $q(p)$ в каждом пункте и для всех сроков зондирования.

Комбинированный метод или кратко КМ разработан и реализован для случая $m=3$, т.е. оценки искомым $T_s(t_1)$, $T_s(t_2)$, $T_s(t_3)$, e_1 и e_2 строятся по данным измерений SEVIRI за сроки t_1 , t_2 и t_3 в условиях отсутствия облачности. Процесс построения оценок является итерационным и включает последовательное применение алгоритмов метода РОП для расчета r -го приближения $T_s^{(r)}(t_i)$ и МДТ для расчета $(r+1)$ -го приближения $e_1^{(r+1)}$, $e_2^{(r+1)}$. Критерий окончания итераций стандартный: рассчитывается величина суммы квадратов невязок между измеренными и моделированными сигналами в каналах РОП, и сравнивается со значением $2m \times \sigma^2$, где σ^2 – дисперсия измерительной погрешности ($\sigma^2 \cong 0.3 + 0.5 K^2$). Важной частью КМ при анализе реальных данных SEVIRI является процедура расчета и коррекции на каждой итерации систематических смещений двух типов: смещений оценок T_s за счет применения формулы (1) метода РОП; смещений при

моделировании сигналов $I_j^p(t_i)$ с помощью формулы (2), вызванных методическими погрешностями RTTOV и неточным заданием атмосферной модели (профили $T(p)$, $q(p)$).

Для отработки и испытаний комбинированного метода, а также созданного на его основе программного обеспечения использовались выборки измерений SEVIRI/Meteosat-9, смоделированных с помощью RTTOV. Цель подобных численных экспериментов – отработка первого этапа КМ. Полученные оценки погрешности определения T_s подтвердили работоспособность и эффективность локального алгоритма РОП.

В главе 3 исследуется достоверность результатов спутникового мониторинга ТПС. Для валидации результатов дистанционного определения ТПС комбинированным методом (далее обозначены $T_{s,км}$) их необходимо сравнить с независимыми синхронными и пространственно-совмещенными измерениями T_s (*in situ* или дистанционными). Пространственное разрешение спутниковых оценок $T_{s,км}$ по данным SEVIRI составляет ~ 5-6 км для зенитных углов $35^\circ - 50^\circ$, что затрудняет подбор репрезентативных наземных *in situ* наблюдений T_s . Задача валидации решается более легко, если в качестве опорных («референсных») значений ТПС использовать независимые спутниковые оценки T_s , для которых известен уровень погрешности. Фактически, при этом выполняется кросс-валидация различных оценок T_s . В разделе 3.1 валидация оценок $T_{s,км}$ выполнялась путем сравнения с синхронными пространственно совмещенными оценками $T_{s,LSA}(t)$, полученными по данным SEVIRI с помощью методики [9] в SAF LSA (Прикладной спутниковый центр анализа данных о земной поверхности – Лиссабон, Португалия).

Сравнение указанных оценок включало расчет средних отклонений (систематических смещений b) и среднеквадратичных отклонений (СКО). В табл.2 приведены значения b и СКО для территории Европы и летних периодов 2010-2011 гг. без коррекции и с коррекцией систематических смещений.

Табл.2.

Статистика сравнений оценок $T_{s,км}$ и $T_{s,LSA}$ за летний период 2010-2011 гг.

	Июнь 2010		Июль 2010		Август 2010		Июнь 2011		Июль 2011		Август 2011	
	b	СКО	b	СКО	b	СКО	b	СКО	b	СКО	b	СКО
Без коррекции	-2.5	2.4	-3.2	3.0	-3.9	3.7	-3.1	2.8	-2.7	2.4	-2.7	2.7
После коррекции	-1.0	1.4	-0.3	1.9	-1.2	1.7	-0.3	2.2	-0.7	2.1	-1.4	2.4

Заметим, что согласно зарубежным данным, погрешность оценок $T_{s,LSA}$, полученная путём сопоставления с независимыми радиометрическими измерениями T_s на специальных полигонах в Португалии и Африке, лежит в диапазоне 1.5-2.5К. С учетом

этого достоверность восстановления ТПС предложенным методом является вполне удовлетворительной.

В разделе 3.2 выполнено сравнение оценок $T_{s,км}$ с квазисинхронными оценками $T_{s,MOD}$, полученными по данным MODIS/EOS-Aqua (см. веб-сайт NASA LP DAAC). Сравнение выполнялось для области с координатами 49°30'-54° с.ш., 31°-43° в.д. (Курская область и прилегающие регионы ЦЧЗ, площадь примерно 180000 км²) за июль-август 2009-2010гг. Использовались оценки $T_{s,MOD}$ с разрешением 1км.

Согласно результатам сопоставления, поля ТПС, полученные по данным SEVIRI и MODIS, имеют схожую пространственную структуру. Величина СКО оценок $T_{s,км}$ от $T_{s,MOD}$ равна 3.3К.

Выборки оценок $T_{s,км}$ и $T_{s,MOD}$ были также использованы для расчета среднемесячных значений и изменчивости (стандартных отклонений) ТПС для указанной области спутникового мониторинга и периодов июля, августа 2010г, см. Табл. 3.

Таблица 3

Среднемесячные оценки ТПС и их изменчивость по данным SEVIRI и MODIS
(на 12:00 UTC каждого дня)

Период	SEVIRI		MODIS	
	Среднее	Изменчивость	Среднее	Изменчивость
Июль 2010	38.6	4.9	38.9	6.2
Август 2010	40.7	4.6	41.1	5.3

Малое отличие в среднемесячных оценках ТПС, полученных по данным полярно-орбитальных и геостационарных спутников (Табл.3), подтверждает возможность использования оценок $T_{s,км}$ в задачах изучения термического режима земной поверхности.

В качестве примера в диссертации выполнен сравнительный анализ среднемесячных значений температуры (на 12:00 UTC) для той же области мониторинга и периодов июль-август 2010 и 2011гг. При этом для июля 2010 и 2011гг. средние значения ТПС составили соответственно 38.6 и 30.1°С, а для августа 2010 и 2011гг. – 40.7 и 30.5°С. Эти цифры качественно подтверждают факт аномально жаркого лета 2010 года.

В разделе 3.3 выполнено сопоставление спутниковых оценок ТПС с данными *in situ* наземной наблюдательной сети. Оценки $T_{s,км}$ за период июнь-август 2009 года сравнивались с синхронными наблюдениями температуры почвы T_s и приземной температуры воздуха T_a на 48 агрометеостанциях территории ЦЧЗ России с координатами {49°30'-54° с.ш., 31°-43° в.д.} в светлое и темное время суток. Общий

объем выборок спутниковых и наземных измерений для отдельных сроков и дат менялся в пределах 250-600 пар. Указанные выборки использовались для расчета средних отклонений b и СКО $T_{s,км}$ и T_s , $T_{s,км}$ и T_a .

Анализ статистики отклонений между спутниковыми и наземными данными показал, что наземные измерения температур T_s и T_a имеют ограниченную пригодность для количественной верификации оценок $T_{s,км}$. Измерения T_s можно применять с ограничениями - в отдельные сроки темного времени суток и для однородных территорий. При сравнении с измерениями T_a наименьшее расхождение получается для сроков 03:00 и 15:00, когда теплообмен между сушей и приповерхностным воздухом приближается к максимальному.

В главе 4 анализируется возможность спутникового мониторинга приповерхностной температуры воздуха T_a по данным SEVIRI. Температура T_a , измеряемая на уровне 2м от поверхности Земли, является важным параметром в различных приложениях. Физические механизмы теплообмена в приземном слое воздуха известны (теплопроводность, конвекция и др.), но связь между T_s и T_a получается достаточно сложной и ее трудно представить в виде детерминированной модели с небольшим количеством независимо определяемых параметров – измеряемых или расчетных. Практически более легким является установление статистической (регрессионной) связи между T_s и T_a . Наличие связи между T_s и T_a , которая, вообще говоря, зависит от времени суток, солнечного зенитного угла, типа подстилающей поверхности или биоты, делает реальным построение регрессионной зависимости между спутниковой оценкой $T_{s,км}$ и T_a и её последующее использование для дистанционного определения T_a .

Для проверки эффективности указанного подхода в диссертационной работе вначале было выполнено построение регрессионных моделей связи между T_a и T_s типа

$$T_a = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i X_i, \quad (3)$$

в которых $x_1=T_s$, а x_2, \dots, x_n – предикторы, упомянутые выше. После определения регрессионных коэффициентов формула (3) используется для получения оценок T_a . При этом предиктор T_s меняется на оценку $T_{s,км}$.

Исходные материалы для построения регрессионной модели (3) включали:

- данные метеорологических наблюдений на 6 станциях Курского региона за 6 сроков для вегетационных периодов (апрель-октябрь) 2006-2009 гг.;
- данные метеорологических наблюдений на 48 станциях за 6 сроков для вегетационного периода 2009 г.;

- дополнительные данные о месте, времени наблюдений.

В численных экспериментах по построению регрессий типа (3) варьировались объемы обучающей и контрольной выборок, а также состав предикторов x_i . Благодаря наличию наземных наблюдений за облачностью в обучающую и контрольную выборки включались только данные с нулевой балльностью облачности.

На первом этапе, исходя из суточного хода величины $|T_s - T_a|$, было решено строить регрессию типа (3) для темного времени суток. Кроме того, в результате численных экспериментов были отобраны следующие наиболее значимые предикторы: $x_1=T_s$, $x_2=N_d$ – порядковый номер дня в текущем месяце, $x_3=N$ – высота наблюдательной площадки над уровнем моря. Результаты экспериментов по построению регрессии (3) показали невозможность применения описанного подхода в светлое время суток. Поэтому было решено испытать варианты регрессии типа (3), в которых основными предикторами являются $T_{s,км}$, а также N_d , или солнечный зенитный угол θ и N . Эксперименты показали относительно малую роль предиктора N и «взаимозаменяемость» предикторов θ и N_d . Результаты построения и применения двух вариантов регрессии (регрессия I: $T_a=c_0+c_1 \cdot T_{s,км}$; регрессия II: $T_a=c_0+c_1 \cdot T_{s,км}+c_2 \cdot N_d$) отражены в Табл.4.

Таблица 4

Применение двух вариантов регрессии для оценивания T_a

Месяц	Время UTC	Погрешность оценивания T_a (42 станции, 2009)		
		СКО _I	СКО _{II}	N
Июнь	00	1.9	1.8	494
	03	1.6	1.6	369
	06	1.7	1.7	164
	09	2.1	2.0	326
	12	2.4	2.3	386
	15	1.9	1.8	427
	18	2.9	2.9	257
	21	2.9	2.8	567
Июль	00	1.8	1.8	489
	03	1.8	1.6	378
	06	1.8	1.8	449
	09	2.3	2.1	247
	12	2.5	2.2	276
	15	1.8	1.7	370
	18	2.3	2.3	434
	21	2.8	2.7	509
Август	00	1.7	1.6	533
	03	2.1	2.1	529
	06	1.7	1.6	466
	09	2.0	2.0	243
	12	1.9	1.9	281
	15	1.5	1.5	395
	18	2.2	2.1	637
	21	2.5	2.5	628

Из Табл.4 следует, что использование достаточно простой регрессионной модели (регрессия I) с двумя предикторами ($T_{s,км}$ и N_d) позволяет получить оценки T_a со среднеквадратичной погрешностью, не превышающей 2.5 К для большинства синоптических сроков. С учетом зарубежного опыта такой результат следует признать вполне удовлетворительным. Отметим, что указанная точность оценивания T_a достигается использованием малого количества предикторов, причем отсутствует необходимость привлечения модельных или прогностических данных.

В главе 5 описана разработанная технология картирования полей ТПС по данным SEVIRI/Meteosat-8,9. В разделе 5.1 приведено описание технологии приема, обработки и оперативного доведения до Гидрометцентра России спутниковой информационной продукции, поступающей по европейской системе распространения данных EUMETCast (включая данные SEVIRI/Meteosat-9). В состав информационной продукции входят также спутниковые данные, передаваемые по системе EARS (EUMETSAT Advanced Retransmission Service, Служба EUMETSAT по распространению данных). Общая функциональная схема наземного комплекса приема, обработки и распространения информации геостационарных метеоспутников приведена на рис. 1.

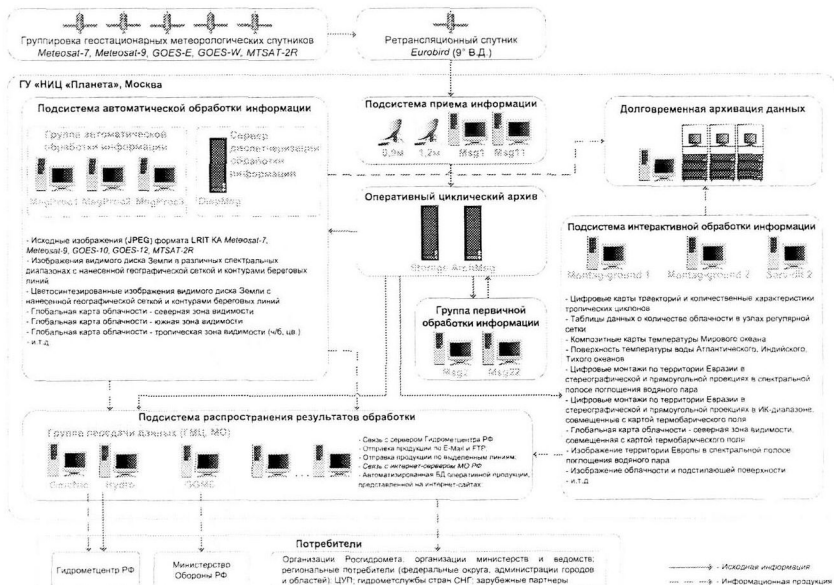


Рис. 1. Функциональная схема наземного комплекса приема и обработки данных зарубежных геостационарных КА

Информация зарубежных геостационарных КА Meteorat-9(8), Meteorat-7 и др., после предварительной обработки в центре приема спутниковой информации EUMETSAT (г. Дармштадте, Германия), ретранслируются через коммуникационный спутник EuroBird и принимается в ФГБУ «НИЦ «Планета». В схеме приема и обработки информации предусмотрено дублирование для исключения возможных аппаратных и программных сбоев. Полученные данные аккумулируются на серверах оперативного циклического архива и с минимальной задержкой становятся доступными пользователям в локальной сети, а также передаются в Гидрометцентр России и другим пользователям. С помощью созданной системы в Гидрометцентр России ежедневно передается более 10 Гб спутниковых данных и информационной продукции.

В разделе 5.2 дано описание программного комплекса картирования ТПС. На Рис.2 изображена блок-схема этого программного комплекса.

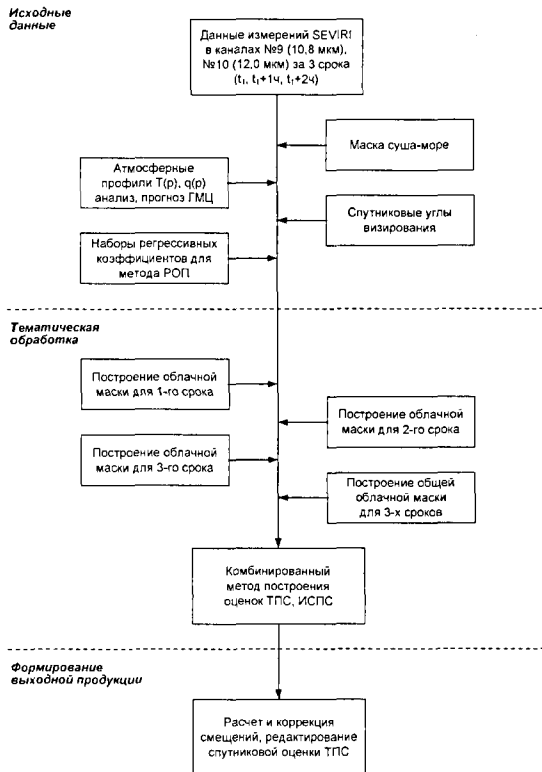


Рис.2. Блок-схема получения оценок ТПС по данным SEVIRI.

Согласно Рис.2 основные этапы обработки данных SEVIRI для получения оценок ТПС включают:

1. формирование выборки разновременных измерений SEVIRI (за 3 последовательных срока) для заданной области мониторинга;
2. преобразование измерений SEVIRI (формата HRIT) в каналах РОП в радиационные температуры, расчет зенитных углы наблюдения для каждого пиксела области мониторинга;
3. извлечение из базы данных Гидрометцентра России профилей $T(p)$, $q(p)$ для выбранной области мониторинга;
4. формирование облачной маски области мониторинга для каждого срока в отдельности и общей облачной маски, получаемой их пересечением;
5. в цикле для каждого пиксела области мониторинга:
 - определяются пиксели, соответствующие поверхности суши (маска «суша-море») и «безоблачным» измерениям (облачная маска);
 - реализуется итерационный алгоритм комбинированного метода. Процесс заканчивается, если достигается требуемый уровень невязки (порядка суммы дисперсий инструментального шума в каналах РОП) или если на очередном шаге итерации не происходит уточнения искомых параметров (ТПС и ИСПС);
6. заключительный этап или формирование выходной продукции включает расчет и коррекцию смещений оценок $T_{s,км}$ относительно независимых спутниковых оценок ТПС, например, $T_{s,LSA}$.

В Заключении приведены основные результаты работы и выводы.

1. Разработана и введена в опытную эксплуатацию технология (методы и программное обеспечение) тематической обработки данных SEVIRI для дистанционного определения T_s в любое время суток в условиях отсутствия облачности. В эту технологию интегрирован программный комплекс быстрых радиационных расчетов RTTOV-7. Покрытие данными ТПС ограничено зоной видимости геостационарного спутника Meteosat-9 и включает, в частности, территорию Европы и часть ЕТР.
2. Выполнен анализ погрешностей дистанционного определения ТПС предложенным методом. Получена и проанализирована статистика ошибок определения T_s на основе сопоставления с независимыми спутниковыми оценками (по данным SEVIRI и MODIS) и наземными контактными измерениями T_s . Согласно сопоставлениям с независимыми спутниковыми оценками T_s , величина СКО для территории Европы и областей ЦЧЗ России не превышает 2.4 К.

3. Создана и введена в эксплуатацию технология приема, обработки, архивирования и оперативной доставки пользователям (Гидрометцентр России, НПО «Гайфун» и др.) спутниковой информационной продукции, в том числе, поступающей по европейской системе распространения данных EUMETCast (включая данные SEVIRI/Meteosat-9 и информацию, распространяемую по системе EARS).
4. Предложен метод дистанционного определения по данным SEVIRI приповерхностной температуры воздуха T_a для областей ЦЧЗ России. Уровень СКО получаемых оценок T_a не превосходит 2.5 К для большинства синоптических сроков, что сравнимо с лучшими зарубежными оценками.
5. Подтверждена возможность использования данных спутникового мониторинга полей ТПС для сравнительного анализа среднемесячных температур поверхности суши на примере Центрально-Черноземной зоны России за летние периоды 2010-2011 гг.

Цитируемая литература

1. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, <http://www.ipcc.ch/>
2. Быховец С.С., Сороковиков В.А., Мартуганов Р.А. и др. История наблюдений за температурой на сети метеорологических станций России // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 1, с. 7–20.
3. Becker, F. and Z.-L. Li, Toward a local split window method over land surface // Int. J. Remote Sens., vol. 11, no. 3, pp. 369-393, 1990.
4. Wan, Z., J. Dozier, 1996, A generalised split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol.34, no.4, pp. 892-905.
5. Соловьев В.И., Успенский А.Б. Современное состояние и перспективы развития дистанционных методов определения температуры поверхности океана из космоса // Исслед. Земли из космоса. 1998, N1. С. 102-112.
6. Schmetz, J., P. Pili, S. Tjemkes, D. Just, et al. An introduction to Meteosat Second Generation (MSG) // Bull. Amer. Meteor.Soc., 2002. 83, P. 977-992.
7. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики, 2003, 475 с.
8. Saunders R.W., M. Matricardi, P. Brunel. An Improved Fast Radiative Transfer Model for Assimilation of Satellite Radiance Observations // Q.J.R. Meteorol. Soc. 1999. v.125. P.1407-1425.
9. Product User Manual Land Surface Temperature (LST), SAF/LAND/IM/PUM_LST/2.5, Issue 2.5, 2010, 49 с.

Публикации по теме диссертации (* - в изданиях из списка ВАК)

1. В.И. Соловьев, С.А. Успенский. Мониторинг температуры поверхности суши по данным геостационарных метеорологических спутников нового поколения. // Исследование Земли из космоса. 2009, № 3, с. 79-89. *
2. Serge Uspensky, Valery Solovjiev, Alexander Uspensky. Monitoring of land surface temperatures based on SEVIRI/METEOSAT-9 measurements. // Proceedings of 2009 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 2009, EUMETSAT P.55, 6p.
3. В.И.Соловьев, С.А.Успенский, А.Б.Успенский. Эксперименты по дистанционному определению температуры поверхности суши на основе данных с геостационарных метеорологических ИСЗ // Сб. тезисов Международного симпозиума стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика», СПб, 2009, с 33.
4. В.И. Соловьев, А.Б.Успенский, С.А. Успенский. Определение температуры земной поверхности по данным измерений уходящего теплового излучения с геостационарных метеорологических ИСЗ // Метеорология и гидрология, №3, 2010, с. 5-17. *
5. В.И. Соловьев, А.Б.Успенский, С.А. Успенский. Развитие методов мониторинга температуры поверхности суши по данным геостационарных спутников нового поколения // Сб. научных статей конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 2010, т.7, №2, с.67-74. *
6. М.А.Бурцев, В.Ю.Ефремов, А.А.Мазуров, А.М.Матвеев, А.А.Прошин, С.А.Успенский, Е.В.Флитман. Распределенная система приема и обработки данных полярно-орбитальных спутников в центрах Росгидромета // Сб. научных статей конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 2008, т.2, с.443-446.
7. Успенский С.А., Успенский А.Б., Рублев А.Н. Анализ возможности мониторинга приповерхностной температуры воздуха по данным геостационарных метеорологических спутников // Сб. тезисов Международного симпозиума «Атмосферная радиация и динамика», СПб, 2011, с.37-38.

Подписано в печать: 27.10.11
Объем: 1,5 усл.п.л.
Тираж: 100 экз. Заказ № 477
Отпечатано в типографии «Реглет»
119526, г. Москва, Рождественка, 5/7, стр.1
(495) 623-93-06; www.reglet.ru