

## ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СУШИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИК-ЗОНДИРОВЩИКОВ ВЫСОКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ (ИКФС-2)

© 2010 г. А. В. Поляков<sup>1\*</sup>, Ю. М. Тимофеев<sup>1</sup>, А. Б. Успенский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет, С-Петербург

<sup>2</sup>Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “Планета”, Москва

\*E-mail: polyakov@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 10.05.2009 г.

Выполнены численные эксперименты по одновременному восстановлению температуры и спектральной излучательной способности различных типов суши на основе “обращения” моделированных измерений спутникового ИК-зондировщика ИКФС-2 высокого спектрального разрешения. Методика “обращения” данных ИКФС-2 основана на использовании априорной информации о спектральном поведении излучательной способности различных типов поверхности и методе множественной линейной регрессии. Среднеквадратические погрешности определения температуры подстилающей поверхности при использовании различных решающих операторов лежат в пределах 0.26–0.71 К. Применение разработанного метода “обращения” измерений ИКФС-2 позволяет получать оценки излучательной способности поверхности суши со среднеквадратичной погрешностью не более 0.015.

**Ключевые слова:** температура поверхности, спектральная излучательная поверхность, спутниковый ИК-зондировщик, поверхность суши.

### ВВЕДЕНИЕ

Спутниковый мониторинг температуры поверхности Земли из космоса реализуется уже несколько десятилетий. Результаты дистанционного определения  $T_s$  (температура подстилающей поверхности) по спутниковым данным используются в задачах численного анализа и прогноза погоды, гидрологии и агрометеорологии, исследованиях климата и глобальных изменений. Обычно для определения  $T_s$  используют спутниковые измерения уходящего ИК-излучения в окнах прозрачности атмосферы 3.7, 10.5–12.5 мкм. Применительно к температуре поверхности океана (ТПО) в настоящее время оперативно эксплуатируются достаточно эффективные технологии дистанционного зондирования (ДЗ), позволяющие определить  $T_s$  (температуру тонкого скин-слоя) с погрешностью  $\pm(0.6–0.8)$  К по данным измерений с полярно-орбитальных ИСЗ в условиях безоблачной атмосферы, см., например, обзор (Соловьев, Успенский, 1998).

Основу современных методов дистанционного определения ТПО составляет использование спутниковых измерений в двух или нескольких каналах – окнах прозрачности с различным поглощением (Соловьев, Успенский, 1998). Перво-

начально предложенные для двухканальной измерительной схемы, они получили название методов “расщепленного окна прозрачности” (SWM – split-window method). Достоинство этих методов – возможность корректного учета атмосферного ослабления излучения и достижения высокой точности определения  $T_s$  без привлечения априорной информации о вертикальных профилях температуры  $T(p)$  и влажности  $q(p)$  в пунктах зондирования ( $p$  – давление).

Дистанционные методы определения  $T_s$  – температуры поверхности суши (ТПС) по спутниковым данным – развиты гораздо в меньшей степени (Успенский, Щербина, 1996; Успенский и др., 1999; Becker, Li, 1990; Oettle, Vidal-Madjar, 1992; Sobrino et al., 1994; Wan, Dozier, 1996; Mao et al., 2005) и не доведены до уровня оперативных технологий, что объясняется гораздо большей сложностью задачи, в частности, необходимостью корректного учета нечерноты поверхности – спектральной излучательной способности (ИС) суши  $\varepsilon(\nu)$  может быть меньше 1 (Salisbury, 1992; Snyder et al., 1998).

К числу факторов, которые необходимо учитывать при разработке методов дистанционного определения ТПС (Успенский и др., 1999; Becker, Li, 1990; Wan, Dozier, 1996), относятся:

– “нечернота” поверхности суши, т.е. ИС может заметно отличаться от 1 (диапазон изменения 0.8–0.98), варьирует по спектру и в пространстве и недостаточно хорошо известна для ряда основных типов поверхности;

– ТПС имеет значительную пространственную (в частности, в пределах одного пиксела зондирующей аппаратуры) и временную изменчивость, в связи с чем существует проблема валидации спутниковых оценок  $T_s$  (путем сопоставления точечных наблюдений  $T_s$  *in situ* с пространственно-осредненными спутниковыми оценками);

– определение  $T_s$ ,  $\varepsilon(\nu)$  с требуемыми точностными характеристиками даже при корректном учете атмосферного ослабления излучения невозможно без привлечения дополнительной информации об ИС вследствие недоопределенности исходной обратной задачи;

– разность  $T_s - T_a$  над сушей, где  $T_a$  – температура приповерхностного воздуха (на уровне ~2 м) может быть значительной, что затрудняет использование стандартных метеорологических наблюдений  $T_a$  (на сети метеостанций) для валидации оценок  $T_s$ .

Существующие методы дистанционного определения ТПС (по данным измерений в окнах прозрачности атмосферы) так или иначе учитывают перечисленные факторы и сводятся к решению двух подзадач:

1) оценка и исключение атмосферного ослабления из данных спутниковых измерений;

2) коррекция эффектов нечерноты поверхности и оценивание  $T_s$ , возможно, с одновременным оцениванием  $\varepsilon(\nu)$ .

В работе (Успенский и др., 1999) предложен и испытан на моделированной информации многоканальный метод дистанционного определения ТПС по данным измерений ИК-зондировщика IASI в специально отобранном множестве каналов – микроокнах прозрачности (спектральные диапазоны 1070–1160 и 2130–2133  $\text{см}^{-1}$ ). Непосредственное применение этого метода к данным ИКФС-2 невозможно ввиду отсутствия данных в коротковолновом диапазоне ( $>2000 \text{ см}^{-1}$ ); кроме того, для успешного применения этого метода требуется дополнительная информация о поведении  $\varepsilon(\nu)$  в спектральных диапазонах используемого подмножества каналов.

Цель данной работы – рассмотреть возможности дистанционного определения ТПС и ИС по данным измерений атмосферного ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения ИКФС-2 в рамках развиваемого комплексного подхода к интерпретации указанных спутниковых данных (Поляков и др., 2010). С помощью этого подхода

строятся достаточно точные регрессионные оценки профилей  $T(p)$ ,  $q(p)$ , необходимые для корректного учета атмосферного ослабления излучения, т.е. решения подзадачи 1. Для решения подзадачи 2, т.е. получения оценок  $T_s$  и  $\varepsilon(\nu)$  по данным ИКФС-2, предлагается привлечь технику метода главных компонент из (Тимофеев, Мартынов, 1996), позволяющую сократить размерность исходной обратной задачи. В статье дано краткое описание предлагаемого метода “обращения” данных ИКФС-2 (регрессия) для получения оценок ТПС и ИС и обсуждаются результаты его применения к моделированным измерениям ИКФС-2.

## МЕТОД И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для разработки предлагаемого регрессионного метода обращения данных ИКФС-2 необходимо сформировать обучающую выборку – ансамбль параметров состояния атмосферы ( $T(p)$ ,  $q(p)$ , ...) и поверхности суши ( $T_s$ ,  $\varepsilon$ ). Для этого реализации параметров атмосферы выбирались из банка данных TIGR подобно (Поляков и др., 2010) и дополнялись “согласованными” данными о  $T_s$  и  $\varepsilon$ . Температура  $T_s$  моделировалась нормально распределенной случайной величиной со средним значением  $\bar{T}_s = T_a$  ( $T_a$  – приземная температура) и стандартным отклонением  $\text{std} = 4 \text{ К}$ . Данные об  $\varepsilon(\nu)$  в терминах главных компонент (ГК) сформировались с использованием методики (Тимофеев, Мартынов, 1996).

Совокупность ГК строилась следующим образом. Реализации  $\{\varepsilon_j(\nu_i), i = 1, 2, \dots, n\}$  излучательной способности поверхности выбирались из банка данных, содержащего 80 различных зависимостей  $\{\varepsilon_j(\nu_i)\}$ , полученных экспериментально для разных типов земной поверхности в области спектра 5–14 мкм, содержащей атмосферное окно прозрачности 8–12 мкм (спектральное разрешение около  $2 \text{ см}^{-1}$ ), которые любезно предоставил нам Dr. Jack Salisbury (Salisbury, D’Aria, 1992).

При решении комплексной обратной задачи по определению  $T_s$ ,  $\varepsilon$  использована методика, из (Тимофеев, Мартынов, 1996). Для этого на основе упомянутых экспериментальных данных об  $\varepsilon(\nu)$  были рассчитаны статистические характеристики ансамбля реализаций излучательной способности: средние значения  $\bar{\varepsilon}$  и выборочная ковариационная матрица  $\mathbf{C}_{\varepsilon\varepsilon}$ . Средние значения излучательной способности в рассматриваемом ансамбле варьируют от 0.91 до 0.97, а вариации  $\varepsilon(\nu)$  меняются по спектру в несколько раз (от 0.02–0.03 на границах рассматриваемого спектрального интервала 700–900 и 1250–1350  $\text{см}^{-1}$  до 0.05–0.08 в области 1050–1150  $\text{см}^{-1}$ ).

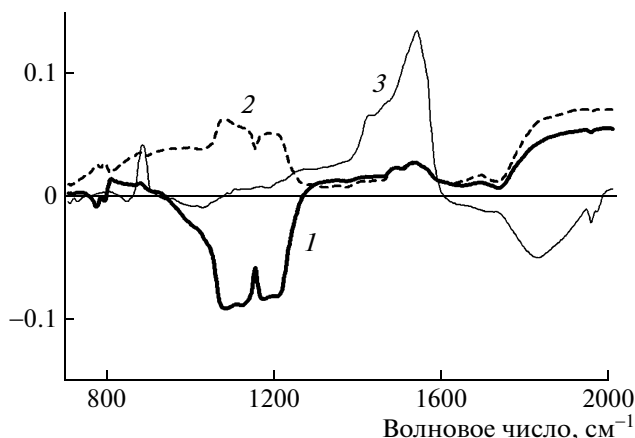


Рис. 1. Первые собственные векторы ковариационной матрицы излучательной способности  $\varepsilon(\nu)$ . Указаны номера векторов.

Далее, для матрицы  $C_{\varepsilon\varepsilon}$  была решена задача на собственные векторы (с.в.) и собственные значения (с.з.). На рис. 1 в качестве примера представлены первые три собственных вектора ковариационной матрицы  $C_{\varepsilon\varepsilon}$ . Хорошо видно, что наибольшие абсолютные значения первого собственного вектора приходятся на область 1060–1240  $\text{см}^{-1}$  максимума излучательной способности и максимума ее изменчивости. Второй собственный вектор вносит дополнительную информацию об излучательной способности в области 900–1060  $\text{см}^{-1}$ , третий – в области около 1550  $\text{см}^{-1}$ .

Набор “старших” с.в. матрицы  $C_{\varepsilon\varepsilon}$  (соответствующих старшим с.з.) использован в качестве ЭОФ – эмпирического ортогонального базиса для оптимальной параметризации  $\varepsilon(\nu)$ :

$$\varepsilon(\nu_i) = \sum_{\alpha=1}^{\alpha=m} \theta_{\alpha} f_{\alpha}(\nu_i) + \bar{\varepsilon}(\nu_i),$$

где  $m \ll n$ ,  $\theta$  – коэффициенты разложения или главные компоненты. На рис. 2 показан спектральный ход погрешности аппроксимации ИС при использовании ЭОФ с различным количеством с.в. Для сравнения на рис. 2 также приведена априорная изменчивость исходного ансамбля. Из рис. 2 видно, что использование базиса с одним собственным вектором  $f_1(\nu_i)$  значительно уменьшает априорную изменчивость ИС (с 0.06–0.09 до 0.01–0.02) в области спектра 1070–1180  $\text{см}^{-1}$ , а в об-



Рис. 2. Погрешность оптимального параметрического представления излучательной способности  $\varepsilon(\nu)$  при использовании базиса ЭОФ различной размерности. Указана размерность базиса, 0 – априорная погрешность.

ластях 710–910  $\text{см}^{-1}$  и 1260–1350  $\text{см}^{-1}$  погрешность аппроксимации остается сравнимой с априорной изменчивостью. При использовании трех с.в. погрешность составляет ~0.01–0.03, а пяти векторов – 0.005–0.01 (за исключением узких областей вблизи 880–900 и 1600  $\text{см}^{-1}$ , где погрешность возрастает до 0.015–0.02). Отметим, что уменьшение погрешности до 0.01 во всей спектральной области 5–14  $\mu\text{м}$  удается достичь только при использовании восьми собственных векторов.

В табл. 1 приведены величины среднеквадратической погрешности (СК) оптимальной аппроксимации  $\varepsilon(\nu)$  по спектральному интервалу (714–1348  $\text{см}^{-1}$ ) при учете в разложении различного числа собственных векторов. В столбце табл. 1 с индексом 0 приведена естественная относительная СК-изменчивость ансамбля ИС. Из таблицы следует, что для достижения СК-погрешности, не превышающей 0.01 по всему указанному выше спектральному интервалу, достаточно использовать первые четыре собственных вектора, при СК, не превышающей 0.005, – семь векторов. Стоит отметить, что описанный подход (Тимофеев, Мартынов, 1996) к параметризации  $\varepsilon(\nu)$  применялся для анализа данных AIRS, IASI (см. например, (Li et al., 2007)).

Таблица 1. Погрешности  $\sigma$  оптимальной параметризации излучательной способности при использовании различного числа собственных векторов

Число векторов	0	1	2	3	4	5	6	7
$\sigma$ , %	0.049	0.025	0.015	0.010	0.0087	0.0072	0.0058	0.0046

**Таблица 2.** Среднеквадратичная погрешность определения ТПС при использовании различных решающих операторов и априорная неопределенность температуры поверхности (К)

Широтные зоны	Глобальный РО		Локальный РО		<i>A priori</i>
	Погрешность 1	Погрешность 2	Погрешность 1	Погрешность 2	
Все	0.56	0.64	—	—	18.9
Тропики	0.63	0.71	0.54	0.63	8.6
Средние широты 1	0.51	0.59	0.37	0.45	10.0
Средние широты 2	0.48	0.54	0.34	0.41	8.15
Полярная 1	0.49	0.57	0.26	0.34	9.74
Полярная 2	0.53	0.61	0.37	0.46	10.5

### ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ СУШИ

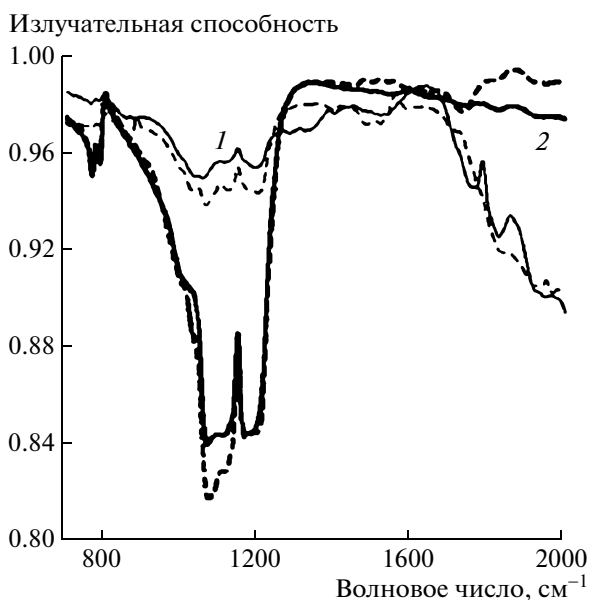
Для отработки предложенной методики “обращения” спутниковых данных и оценки потенциальных погрешностей результатов зондирования было выполнено экспериментальное восстановление температуры и излучательной способности поверхности суши по данным ИКФС-2. В экспериментах использованы моделированные измерения ИКФС-2 (рассчитаны с использованием параметров состояния атмосферы и поверхности из описанного выше ансамбля), а также данные об измерительных погрешностях аппаратуры ИКФС-2 из (Поляков и др., 2010): относительная погрешность колеблется от 0.2 до 30% в зависи-

мости от спектральной области измерений (погрешность 1); увеличенная в 1.5–3 раза погрешность (погрешность 2).

В табл. 2 приведены СК-определения  $T_s$  при использовании различных решающих операторов (РО) в методе множественной линейной регрессии. Из табл. 2 видно, что среднеквадратические погрешности определения температуры подстилающей поверхности для единого глобального РО (построенного по всем 2311 реализациям состояния атмосферы) колеблются от 0.48 до 0.71 К, а для локализованных РО (т.е. построенных для отдельных подансамблей состояния атмосферы и поверхности из (Поляков и др., 2010)) – от 0.26 до 0.63 К. Отметим, что в отдельных случаях использование локальных РО позволяет уменьшить СК погрешности определения  $T_s$  почти вдвое.

Приведенные в табл. 2 величины погрешностей определения  $T_s$  следует трактовать как минимальные. Дело в том, что при построении РО использована гипотеза  $\bar{T}_s = T_a$ . На самом деле, как упомянуто во ВВЕДЕНИИ, во многих ситуациях наблюдается постоянный температурный контраст:  $\delta = (\bar{T}_s - T_a) \neq 0$ . Эксперименты, выполненные в (Успенский и др., 1999), показывают, что погрешность оценивания  $T_s$  минимальна при  $\delta = 0$  и возрастает с ростом  $\delta$ .

На рис. 3 приведены примеры восстановления спектрального хода излучательных способностей для двух типов поверхности суши – почвы (1) и грубого песчаника (2). Очевидно хорошее качественное и количественное соответствие заданных в численном эксперименте и полученных в результате ДЗ спектральных зависимостей излучательной способности. Устойчиво воспроизводятся все основные максимумы и минимумы в ИС, особенности в области 900–1300  $\text{см}^{-1}$ . Отметим, что хотя окно прозрачности атмосферы ограничено спектральным интервалом 780–1200  $\text{см}^{-1}$ , предложенный подход к параметризации излучательной способности поверхности позволяет, как видно из рис. 3, с хорошей точностью оценить спек-



**Рис. 3.** Примеры восстановления спектрального поведения излучательной способности подстилающей поверхности: 1 – почва; 2 – грубый песчаник. Сплошные линии – исходные излучательные способности в замкнутом численном эксперименте; пунктир – результаты восстановления.

**Таблица 3.** Среднеквадратичные погрешности восстановления излучательных способностей поверхности в спектральном диапазоне  $750\text{--}1300\text{ см}^{-1}$ 

Широтные зоны	Глобальный РО		Локальный РО	
	Погрешность 1	Погрешность 2	Погрешность 1	Погрешность 2
Все	0.0137	0.0147	—	—
Тропики	0.0141	0.0154	0.0132	0.0144
Средние широты 1	0.0132	0.0142	0.0119	0.0127
Средние широты 2	0.0129	0.0136	0.0114	0.0120
Полярная 1	0.0132	0.0145	0.0106	0.0118
Полярная 2	0.0140	0.0150	0.0127	0.0134

тральный ход ИС в более широком интервале  $715\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ .

Проведенные численные эксперименты позволили получить оценки СК погрешностей восстановления  $\epsilon(\nu)$  для различных типов поверхности суши. Заметим, что априорная изменчивость протестированных излучательных способностей составляет 0.035. В табл. 3 приведены эти погрешности при использовании глобального и локальных решающих операторов в методе множественной линейной регрессии. Напомним, что для используемого набора с.в. (количество с.в. равно 5), СК аппроксимации = 0.007 (см. табл. 1), т.е. составляет существенную часть погрешностей определения излучательных способностей, полученных в численных экспериментах.

Из табл. 3 видно, что при использовании глобального РО среднеквадратические погрешности определения излучательных способностей составляют от 0.0129 до 0.0154 в зависимости от широтного пояса, а для локализованных РО — от 0.0106 до 0.0144, т.е. на 0.001–0.0023 меньше. В целом можно заключить, что максимальная среднеквадратическая погрешность восстановления спектрального хода излучательной способности не превышает 0.015.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Выполнены численные эксперименты по одновременному восстановлению температуры и спектральной излучательной способности различных типов суши на основе обращения моделированных измерений спутникового ИК-зондировщика ИКФС-2. Методика обращения данных ИКФС-2 основана на использовании априорной информации о спектральном поведении  $\epsilon(\nu)$ , полученной экспериментально для различных типов поверхности, и методе множественной линейной регрессии.

Среднеквадратические погрешности определения температуры подстилающей поверхности при использовании глобального решающего опе-

ратора лежат в пределах  $0.5\text{--}0.7\text{ К}$ . Использование локальных РО (т.е. построенных для отдельных подансамблей состояния атмосферы и поверхности) уменьшает погрешности до уровней  $0.3\text{--}0.6\text{ К}$ .

Применение разработанного метода обращения измерений ИКФС-2 позволяет получать оценки излучательной способности поверхности суши со среднеквадратической погрешностью не хуже 1.5%.

Полученные оценки погрешностей говорят о высоких потенциальных возможностях прибора ИКФС-2 для определения важных параметров суши, а также целесообразности использования их оценок при уточнении решения задач температурно-влажностного зондирования атмосферы с помощью двухэтапной процедуры (регрессия + численное решение обратной задачи).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов Рособразования № 101138, № 393846 и РФФИ — № 09-05-00797-а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Температурно-влажностное зондирование атмосферы по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 3. С.
- Соловьев В.И., Успенский А.Б. Современное состояние и перспективы развития дистанционных методов определения температуры поверхности океана из космоса // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 1. С. 102–112.
- Тимофеев Ю.М., Мартынов А.А. Об определении температуры и излучательной способности поверхности суши // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 4. С. 12–17.
- Успенский А.Б., Троценко А.Н., Копылов А.В. и др. Определение температуры земной поверхности по спутниковым измерениям уходящего теплового излучения высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 4. С. 21–31.
- Успенский А.Б., Щербина Г.И. Оценки температуры и излучательной способности поверхности суши по данным измерений уходящего теплового излучения с ИСЗ NOAA // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 5. С. 102–112.

- Becker F., Li Z.L.* Towards a local split window method over land surface // *Int. J. Rem. Sens.* 1990. V. 11. № 3. P. 369–393.
- Li J., Weisz E., Zhou D.K.* Physical retrieval of surface emissivity spectrum from hyperspectral infrared radiances // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34, L16812, doi:10.1029/2007GL030543.
- Mao K., Qin Z., Shi J. et al.* A practical split-window algorithm for retrieving land surface temperature from MODIS data // *Int. J. Rem. Sens.* 2005. V. 15. № 15. P. 3181–3204.
- Ottle C., Vidal-Madjar D.* Estimation of land surface temperature with NOAA 9 data // *Rem. Sens. Environ.* 1992. V. 40. № 1. P. 27–41.
- Salisbury W., D'Aria D.M.* Emissivity of terrestrial materials in the 8.14  $\mu\text{m}$  atmospheric window // *Rem. Sens. Environ.* 1992. V. 42. № 2. P. 83–106.
- Snyder W.C., Wan Z., Zhang Y., Feng Y-Z.* Classification based emissivity for land surface measurements from space // *Int. J. Rem. Sens.* 1998. V. 19. № 14. P. 2753–2774.
- Sobrino J.A., Li Z.L., Stoll M.P., Becker F.* Improvements in the split window technique for land surface temperature determination // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1994. V. 32. № 2. P. 243–253.
- Wan Z., Dozier J.* A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature measurement from space // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1996. V. 34. № 4. P. 892–905.

## Possibilities for Retrieving the Temperature and Emissivity of Underlying Surface from Data of Satellite IR Sounders with High Spectral Resolution (IRFS-2)

A. V. Polyakov<sup>1</sup>, Yu. M. Timofeyev<sup>1</sup>, A. B. Uspensky<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Saint-Petersburg State University, Physical Faculty, Saint-Petersburg*

<sup>2</sup>*Scientific Research Center of Space Hydrometeorology "Planeta" (SRC "Planeta"), Moscow*

The experiments have been carried out for simultaneously retrieving the temperature and spectral emissivity of different land surfaces from synthetic IRFS-2 sounder data. The satellite data inversion technique is based on the use of a priori information on the spectral behavior of various surfaces and the multiple linear-regression technique. The RMS errors for retrieved surface temperatures are shown to be equal to 0.26–0.71 K depending on different solving operators. Developed method for inversion the IRFS-2 data enables to estimate the land surface emissivity with a RMS error of no worse than 0.015.

**Key words:** surface temperature, spectral emissivity, IR sounder, land surface.