

## Оптимизация состава и структуры СВЧ радиометрической информации, используемой для восстановления трехмерных полей атмосферных параметров

В.П. Саворский, И.Н. Кибардина, А.Б. Аквилонова, В.С. Васильев, С.В. Горобец, С.М. Маклаков

ФирЭ им.В.А.Котельникова РАН, savor@ire.rssi.ru

*Используя оценок информационной емкости СВЧ радиоспектрометров на базе априорной информации о статистических характеристиках атмосферных профилей, осуществлен выбор оптимального набора каналов для исследования профилей метеопараметров атмосферы. Представлены предложения по составу и средствам формирования необходимых априорных данных.*

*Using the estimates of information capacity of the microwave radio spectrometers on the basis of a priori information on statistical characteristics of atmospheric profiles the choice of optimum set of channels for a research of profiles of meteo parameters of the atmosphere is carried out. Proposals on structure and means of formation of necessary a priori data are submitted.*

### Введение

Методической основой выбора оптимального набора каналов для исследования температурно-влажностных профилей атмосферы является подход, развитый в работах [1-3]. Он был опробован применительно к ИК тепловым сенсорам в работе [1] и СВЧ радиометрическим комплексам диапазонов 60, 150 и 180 ГГц в работе [3]. В данной работе в рамках указанного подхода рассмотрены особенности реализации указанной методики для определения информационной емкости СВЧ радиометрических комплексов, т.н. СВЧ зондировщиков атмосферы, на базе статистических модельных представлений о характеристиках изменчивости атмосферных профилей. Для определения состава статистических модельных данных, необходимых для определения информационной емкости СВЧ радиометрических комплексов, кратко описан используемый для этих целей методический подход [1-3], а также реализующий его алгоритм. На основании полученных представлений о статистических модельных данных, необходимых для оценок информационной емкости, проведен анализ полноты и приемлемости доступных источников информации. Приведен пример использования такого рода источников данных для оценок информационной емкости СВЧ радиометрических комплексов в заданной широтной зоне Земли. По результатам анализа сформулированы и обоснованы предложения по дальнейшему развитию методики оценки информационной емкости СВЧ радиометрических комплексов с целью оптимизации состава и структуры СВЧ радиометрической и сопутствующей информации, используемых для восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы.

### 1. Методические основы расчета информационной емкости СВЧ радиоспектрометров

В приближении линейной модели расчетные значения радиоярких температур  $T_{mod}$  относительно реально измеренных значений  $T$  можно представить как

$$T - T_{mod}(x_a) = \frac{\partial T_{mod}}{\partial x} (x - x_a) + \varepsilon = K(x - x_a) + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $K = [K_{ij}] = \left[ \frac{\partial T_{mod_i}}{\partial x_j} \Big|_{x=x_a} \right]$  - матрица Якоби, определяемая частными производными компонентов вектора наблюдаемых значений радиоярких температур  $T_i$  относительно компонентов вектора параметров атмосферы  $x_j$ , описывающего

температурно-влажностные высотные профили атмосферы вблизи априорно заданных значений  $x = x_a$ . Обычно компоненты вектора состояний описывают значения какого-либо одного из параметров состояния, например, температуры или влажности, на разных высотах. Это обусловлено тем, что в большинстве случаев якобиан хорошо разделяется по частотам для разных параметров. Но в общем случае вполне возможно использовать и единый вектор состояния, в котором компоненты включают оба параметра состояния, т.е. и температуру, и влажность, а также отражают не только высотную изменчивость, но и горизонтальную. Здесь  $\varepsilon$  – вектор ошибок измерений, определяемый в нашем случае значениями собственных шумов СВЧ радиометрической системы.

Зададим априорную статистику ансамбля состояний  $x$  атмосферы гауссовым распределением относительно некоторого среднего по ансамблю значения, т.е. математического ожидания,  $x_a = M\{x\}$ :

$$P(x) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |S_a|^{1/2}} \exp\{-0,5(x - x_a)^T S_a^{-1}(x - x_a)\}, \quad (2)$$

где  $S_a$  – априорная ковариационная матрица вектора состояний параметров атмосферы, определяемая как математическое ожидание

$$S_a = M\{(x - x_a)(x - x_a)^T\}. \quad (3)$$

С этой моделью апостериорная оценка состояния атмосферы  $\hat{x}$  (т.е. восстановленное значение) имеет гауссову апостериорную функцию с ковариацией [2]

$$\hat{S} = S_a - S_a K^T (K S_a K^T + S_\varepsilon)^{-1} K S_a, \quad (4)$$

или в эквивалентном выражении

$$\hat{S}^{-1} = K^T S_\varepsilon K + S_a^{-1}. \quad (5)$$

Здесь ковариационная матрица ошибок измерений

$$S_\varepsilon = M\{\varepsilon \varepsilon^T\} \quad (6)$$

представлена в виде, учитывающем что  $M\{\varepsilon\} = 0$ .

Ковариационная матрица  $\hat{S}$  используется при оптимизации для оценки степеней свободы  $d_s$  [1-3] СВЧ радиометрической системы в задачах восстановления атмосферных профилей, являющейся мерой информационной емкости СВЧ радиоспектрометров, отражающей степень апостериорного улучшения оценок атмосферных параметров по данным СВЧ радиометрических наблюдений

$$d_s = \text{trace}(I - \hat{S}). \quad (7)$$

## 2. Алгоритм расчета числа степеней свободы

Алгоритм расчета числа степеней свободы по формулам (3-7) должны состоять из следующих шагов:

1) задание значений

$m$  – число измеряемых спектральных компонент (СВЧ радиометрических каналов),

$n$  – число компонентов вектора состояния атмосферы;

2) задание априорных ковариационных матриц ошибок измерений  $S_\varepsilon$  ( $m \times m$ ) и значений измеряемой величины  $S_a$  ( $n \times n$ );

3) задание матрицы Якоби  $K$ , описывающей спектр весовых функций радиояркой температуры системы «атмосфера – подстилающая поверхность» относительно компонентов вектора состояния атмосферы;

4) вычисление  $S_\varepsilon^{-1/2}$  и  $S_a^{-1/2}$ ;

4.а вычисление левой матрицы  $L$  нормализованных собственных векторов матрицы  $S_a$ .

$$S_a^T L = L \Lambda;$$

где  $\Lambda$  – диагональная матрица из собственных значений;

4.b вычисление  $S_a^{-1/2}$ :

$$S_a^{-1/2} = L\Lambda^{-1/2};$$

4.c вычисление диагональной матрицы  $S_\varepsilon^{-1/2}$ , у которой диагональные элементы задаются величинами

$$S_{\varepsilon jj}^{-1/2} = \sqrt{S_{\varepsilon jj}};$$

5) вычисление матрицы  $\hat{K}$  (представление матрицы  $K$  в эквидистантном базисе, повышающем точность расчетов):

$$\hat{K} = S_\varepsilon^{-1/2} K S_a^{1/2};$$

б) вычисление матрицы  $\hat{S}^{-1}$

$$\hat{S}^{-1} = \hat{K}^T \hat{K} + I;$$

7) обращение матрицы  $\hat{S}^{-1}$  для определения  $\hat{S}$ ;

8) вычисление числа степеней свободы  $d_s$ , являющейся мерой информационной емкости СВЧ радиоспектрометров при восстановлении температурно-влажностных профилей атмосферы, по соотношению (7).

### 3. Моделирование поля радиоярких температур и вычисление весовых функций

В рамках работы температур были выполнены расчеты спектральных зависимостей весовых функций радиоярких температур с помощью программного пакета ARTS (Atmospheric Radiative Transfer System) [4-7]. Пакет ARTS позволяет вычислять коэффициент поглощения вдоль трассы, значения наблюдаемых для данного состояния атмосферы радиоярких температур и, что существенно для задач данного исследования, значения весовых функций термодинамических температур и влагосодержания для слоя атмосферы заданной толщины в зависимости от высоты.

Весовая функция – это частная производная интенсивности излучения по некоторой переменной, используемой в модели излучения, которая характеризует чувствительность интенсивности излучения в заданной точке к данному параметру. В простейшем случае весовая функция вычисляется для одной переменной с помощью полуаналитического выражения, где предполагается линейное соотношение между переменной и поглощением. Для практических вычислений весовой функции  $K_x$  оценивается только атмосферная часть этой функции, где  $x$  - параметр, для которого вычисляется весовая функция.

Для расчета излучения, регистрируемого прибором, численно решается прямая задача переноса излучения. В численной модели трасса вдоль линии зрения разбивается на отрезки, где температура постоянна. Процедура вычисления включает

- вычисление коэффициентов поглощения на заданной сетке;
- определение линии визирования;
- вычисление функций источника и коэффициентов передачи вдоль линии зрения;
- итерационное решение уравнения переноса излучения;
- вычисление весовых функций.

Исходной информацией в расчетах при безоблачных условиях являются высотные профили температуры, водяного пара, кислорода, азота и спектральные характеристики газовых компонент атмосферы. Выбор источника информации, полно и достаточно детально описывающего параметры вариаций атмосферных профилей, необходимые для оценок по описанному в разделе 2 алгоритму, приведен ниже в разделе 4. Спектральные характеристики, определяющие процессы переноса излучения в атмосферных газах, выбраны из базы данных по молекулярной спектроскопии HITRAN2012 [8].

#### 4. Выбор источника информации для задания априорных характеристик атмосферных профилей

Для оценки весовой функции  $K$  для компонентов вертикальных профилей атмосферы достаточно использовать априорную информацию об этих компонентах. Для этого, в первом приближении, можно использовать характеристики т.н. стандартных атмосфер. Для этого зачастую используют параметры атмосферы, описанные в национальных стандартах [9-11]. Однако для решения поставленной в работе задачи, характеристик, описываемых в такого рода источниках информации о состоянии атмосферы, недостаточно. Это обусловлено тем, что наряду с вертикальными профилями для оценки информационной емкости СВЧ радиоспектрометров необходимо задавать и ковариационную матрицу  $S_a$ , параметры которой в стандартных атмосферах не описаны.

Для задания  $S_a$  можно использовать данные, приведенные в [12]. Однако анализ использования данных из [12] показал, что затруднительно определить достоверность получаемых при этом оценок  $d_s$ . Причиной этому является малый диапазон высот, при которых, в частности, заданы вертикальные профили влажности. Проблемой применения данных из [12] является также значительное число ошибок в задании ковариационных матриц и отсутствие возможности их скорректировать. В частности, у некоторых из ковариационных матриц обнаруживаются отрицательные собственные значения, что невозможно для ковариационных матриц в принципе. Важно отметить и то, что в работе [12] не описаны особенности сбора и проведения статистических оценок параметров ковариационных матриц, позволяющие определить точности этих оценок.

Указанных недостатков лишен набор данных, приведенный в обучающем наборе данных SeeBor (Seebor V5.0 training dataset) [13,14]. Этот набор данных включает 15704 всесезонных, распределенных глобально атмосферных профилей, полученных в рамках проектов NOAA-88, TIGR-3, ECMWF, а также в рамках регулярного радиозондирования. Каждый из этих профилей содержит данные о температуре, влажности и содержании озона, измеренных на 101 уровне давления.

Для получения оценок средних значений температуры, влажности, их среднеквадратических вариаций и ковариационных матриц их междууровневых вариаций в рамках работы было создано специальное программное обеспечение (ПО) SeeBorAnalyzer. Это ПО позволяет выбирать любую зону на поверхности Земли и оценивать указанные характеристики по подмножеству данных SeeBor для указанного региона. Анализ состава SeeBor показывает, что данные в нем распределены равномерно по поверхности Земли, что является целесообразным выбором для глобальных оценок.

Однако, для проведения регионального оценивания, а тем более для исследования зон со значительными сезонными изменениями, что присуще для среднеширотных регионов, данные SeeBor необходимо применять с осторожностью, учитывая ограниченные размеры региональных выборок в заданных временных интервалах. В частности, при проведении оценок помесечных средних следует ограничиться большими широтными зонами, порядка  $30^{\circ}$ , поскольку даже в этом случае в каждую зону помесечно попадает порядка 200 профилей. Это близко к предельно допустимому в прикладной статистике объему независимых выборок, равному 100, именно поэтому дальнейшее сужение пространственно-временных областей выбора профилей из набора SeeBor нецелесообразно. Указанные выше особенности указывают на то, что набор SeeBor пригоден для обобщенных (глобальных или крупных зональных) оценок атмосферных параметров. Это востребовано, в первую очередь, при первичных оценках

информационной емкости СВЧ радиоспектрометров в задачах восстановления атмосферных профилей. Пример такого оценивания приведен далее в разделе 5.

## 5. Расчет степеней свободы СВЧ радиометрической системы диапазона 183 ГГц

В качестве примера в данном разделе показаны результаты оценок информационных возможностей СВЧ радиометрической системы, полученные с использованием в качестве априорной информации тренировочного набора данных SeeVog для летней (с апреля по сентябрь) атмосферы умеренных широт ( $30\div 60^{\circ}$  с.ш.). Для указанного подмножества из набора данных SeeVog были определены средние по выбранному множеству значения профилей температуры и влажности и ковариационные матрицы вариаций вертикальных профилей этих параметров. Полученные оценки вертикальных профилей использованы для определения радиоярких температур системы атмосфера – подстилающая поверхность, а также для вычисления весовых функций этих температур к вариациям температурно-влажностных профилей атмосферы.

В расчетах было принято, что собственные шумы в СВЧ радиометрических системах независимы, т.е. взаимно не коррелированы. Поэтому ковариационная матрица ошибок измерений  $S_{\varepsilon}$  является диагональной, т.е.

$$S_{\varepsilon} = \sigma^2 I, \quad (8)$$

где  $\sigma$  – интенсивность собственных (инструментальных) шумов СВЧ радиометрической системы в  $i$ -м канале. Расчеты проведены в полосах частот СВЧ радиометра 10 и 20 ГГц с шагом 1 ГГц при спутниковом зондировании в нади́р. При этом начало спектральной полосы изменялось в диапазоне от 160 до 185 ГГц. Расчет производился с учетом переноса излучения в тропосфере, т.е. до высот 10 км. Излучательная способность земной поверхности принята равной 0,95.

Из рисунка 1 видно, что для полосы 10 ГГц наиболее информативной для восстановления профилей температуры является применение спектрометра со спектральной полосой 173–183 ГГц. Полоса в 20 ГГц, в случае, когда она захватывает этот участок спектра, т.е. начиная с  $f_{min} = 163$  ГГц, также показывает относительно высокую информативность, где можно использовать 4–5 каналов измерений. Следует также отметить заметное повышение информативности при снижении уровня собственных шумов СВЧ радиометрической системы с 0,1 до 0,03 К.

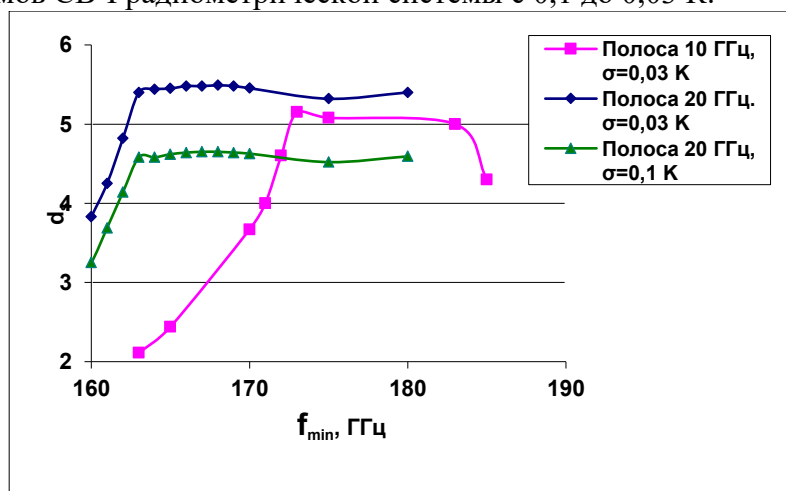
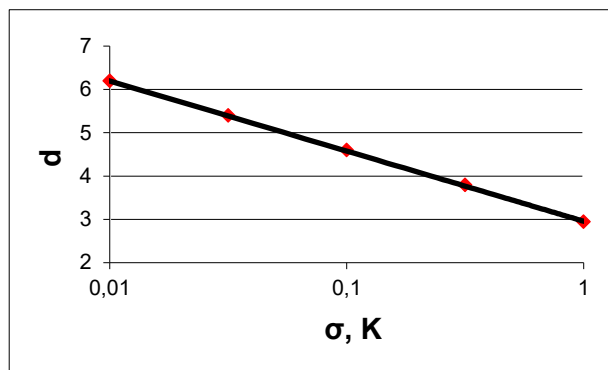


Рис.1. Зависимость числа степеней свободы  $d_s$  спутниковых СВЧ радиометрических спектрометров диапазона 160–185 ГГц, применяемых для восстановления вертикальных профилей температуры, от минимальной частоты спектрального диапазона. Летняя (с апреля по сентябрь) атмосфера умеренных широт ( $30\div 60^{\circ}$  с.ш.)

Зависимость числа степеней свободы  $d_s$  СВЧ радиометрических спектрометров диапазона 160÷185 ГГц, применяемых для восстановления вертикальных профилей температуры, от точности измерений (интенсивности собственных шумов радиометров) приведена на рисунке 2.



**Рис.2.** Зависимость числа степеней свободы  $d_s$  спутниковых СВЧ радиометрических спектрометров диапазона 160÷180 ГГц, применяемых для восстановления вертикальных профилей температуры, от точности измерений для подмножества набора данных See\_Vog, для летней (с апреля по сентябрь) атмосферы умеренных широт (30÷60° с.ш.)

Приведенный на рисунке 2 график удовлетворительно аппроксимируется зависимостью

$$d = -0,7 \ln(\sigma) + 2,95 . \quad (9)$$

## 6. Сбор радиозондовых данных

Как показал проведенный в работе анализ, в настоящее время доступны достаточно продолжительные и достаточно подробные (2 срока в сутки) регулярные радиозондовые измерения. Эти наборы данных позволяют определить статистические описания локальных характеристик атмосферных профилей, которые могут быть использованы при восстановлении атмосферных профилей в качестве статистических регуляризаторов в процессе решения некорректных обратных задач. Это связано с тем, что корректные решения обратной задачи по восстановлению профилей температуры и влажности атмосферы по дистанционным СВЧ радиометрическим измерениям связаны с имеющейся априорной информацией об искомых параметрах, которая накладывает определенные ограничения на область поиска искомого решения. Такой информацией являются сведения о профилях метеопараметров, усредненных за определенный период для заданной метеостанции или ряда метеостанций, их ковариационных матрицах, описывающих связи одного параметра на разных высотах, а также ковариационных матрицах, описывающих связи между разными параметрами на разных высотах.

Набор SeeVog не позволяет исследовать статистические параметры атмосферы для отдельных станций наблюдения, поскольку не содержит достаточного объема данных по отдельным станциям. Эти объемы в SeeVog настолько малы, что не составляют ни продолжительных рядов наблюдений, ни коротких, но выбранных с большой частотой, их подмножеств.

Поэтому в рамках настоящей работы было решено получить необходимые статистические характеристики, используя для этих целей исходные радиозондовые данные конкретной метеостанции или некоторого выбранного ряда станций. Ввиду отсутствия в открытом доступе отечественного источника радиозондовой информации в объеме, достаточном для получения достоверных статистических оценок, в качестве

источника данных использован сервер Университета штата Вайоминг [15]. Для работы были отобраны станции, имеющие достаточно продолжительные ряды измерений (не менее 20-30 лет). Основной состав формируемого массива информации по радиозондовым измерениям составили данные о состоянии атмосферы вдали от крупных городов за исключением данных со станций Воейково (Санкт-Петербург), Долгопрудный (Московская обл.), Нижний Новгород. В выборку включены станции на Европейской территории России и в Сибири. В таблице 1 приведен список отобранных на первом этапе станций с указанием их международного номера, координат и периода, данные по которому включены в формируемый архив радиозондовой информации. Эти данные сформировали в ИРЭ РАН базу данных радиозондирования (БДРЗ), предназначенную для проведения оценок информационной емкости СВЧ радиометрических зондировщиков атмосферы.

**Таблица 1. Метеостанции, данные по которым включены в ИРЭ БДРЗ**

Номер станции	Название станции	Координаты		Период	
		Широта, град.	Долгота (вост.), град.	Начало	Конец
27612	Долгопрудный (Московская обл.)	55,75	37,95	01.1973	12.2016
27730	Рязань	54,63	39,70	08.1994	12.2016
34172	Саратов	51,56	46,03	01.1973	12.2016
27707	Сухиничи (Калужская обл.)	54,09	35,34	01.1973	12.2016
34247	Калач (Воронежская обл.)	50,40	41,04	01.1983	12.2016
26063	Воейково (г.Санкт-Петербург)	59,95	30,70	01.1974	12.2016
27459	Нижний Новгород	56,26	44,00	01.1998	12.2016
23884	Бор (Красноярский край)	61,59	90,01	01.1973	12.2016
29231	Колпашево (Томская обл.)	58.31	82.94	01.1973	12.2016

Для анализа данных БДРЗ разработано специальное ПО RZ\_Analyser, обеспечивающее получение статистических оценок атмосферных профилей, необходимых для определения информационной емкости СВЧ радиометрических средств наблюдения (см. выше разделы 1, 2) для выбранных метеостанций за заданный период, сезон, с выбранным интервалом повторения. Полученные при этом статистические характеристики были использованы в качестве априорной информации для получения оценок степеней свободы  $d_s$  [1-3] СВЧ радиометрической системы в задачах восстановления локальных атмосферных профилей в зонах расположения указанных в таблице 1 метеостанций.

### **Выводы**

В работе проанализированы возможности оценки информационной емкости СВЧ радиоспектрометров, отражающей степень апостериорного улучшения оценок атмосферных параметров по данным спутниковых СВЧ радиометрических

наблюдений. В результате разработаны методики получения этих оценок на базе априорной информации о статистических характеристиках атмосферных профилей. Представлены предложения по составу и средствам формирования указанных априорных данных.

*Работа поддержана грантом РФФИ № 16-07-00956, 16-29-09615 и Госзаданием «ЦОХКИ-1» – регистрационный номер – 01201354304, ИКРБС 216021210030.*

### **Литература**

1. Rodgers C.D. Information content and optimization of high spectral resolution measurements // Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research II, Hays P.B., Wang J., Eds. Bellingham, WA: SPIE, 1996, pp. 136–147.
2. Rodgers C.D. Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice. Singapore: World Scientific, 2000.
3. Lipton A.E. Satellite Sounding Channel Optimization in the Microwave Spectrum // IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 41, N. 4, April 2003, 761.
4. Buehler S.A., Eriksson P., Kuhn T., von Engeln A., Verdes C. ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer, 91:65–93, 2005.
5. Eriksson P., Buehler S.A., Davis C. P., Emde C., Lemke O. ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator, version 2 // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 112(10):1551–1558, July 2011.
6. Eriksson P., Buehler S. ARTS User Guide, 2017.
7. Саворский В.П., Кибардина И.Н., Турыгин С.Ю, Смирнов М.Т. СВЧ радиометрические комплексы для восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы с высоким пространственным разрешением // VI Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред // Материалы VII Всероссийской научной конференции. –Муром: Изд. -полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – с.223-229.
8. Rothman L.S et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, vol. 130, pp. 4-50 (2013).
9. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная.1981 (с изменениями №1 от февраля 1987 года).
10. US Standard Atmosphere, 1976. Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770009539.pdf>, дата просмотра 13.05.2017.
11. McClatchey R.A. et.al. Optical Properties of the atmosphere. (Third edition) // AFCRL–72–0497, 1972.
12. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986, 264с.
13. Borbas, E. E., Seemann S. W., Huang H.-L., Li J., Menzel W. P. Global prole training database for satellite regression retrievals with estimates of skin temperature and emissivity // Proceedings of the XIV. International ATOVS Study Conference, pp.763-770, May 2005.
14. SeeBor V5.1 Training data set. Режим доступа: [http://cimss.ssec.wisc.edu/training\\_data/data/SeeBorV5.1\\_Training\\_data\\_Emis10inf2004.bin](http://cimss.ssec.wisc.edu/training_data/data/SeeBorV5.1_Training_data_Emis10inf2004.bin), дата просмотра 13.05.2017.
15. Wyoming Weather Web. Upperair Air Data. Soundings. Режим доступа: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> , дата просмотра 13.05.2017.