

**Программные средства моделирования процедур восстановления трехмерных полей атмосферных параметров по данным спутникового СВЧ радиометрического мониторинга**

В.П. Саворский, Д.М. Ермаков, И.Н. Кибардина, О.Ю. Панова, А.П. Чернушич, А.Б. Аквилонова, М.В. Данилычев, Б.Г. Кутуза, С.М. Маклаков, Е.В. Савченко, М.Т. Смирнов, А.С. Соловей

*ИРЭ им.В.А.Комельникова РАН, savor@ire.rssi.ru*

*Представлены результаты разработки системы моделирования процедур восстановления трехмерных полей атмосферных параметров по данным спутникового СВЧ радиометрического мониторинга. Описаны методические основы процедур восстановления. Показаны особенности разработанной на их основе программной системы моделирования.*

*The results of the development of a simulation system for the retrieval of three-dimensional fields of atmospheric parameters from satellite microwave radiometric monitoring are presented. The methodical bases of retrieval procedures are described. The features of the software simulation system developed on their basis are shown.*

**Введение**

Методической основой выбора оптимального набора каналов, что востребовано при проектировании перспективных СВЧ радиометрических зондировщиков, а именно СВЧ гиперспектрометров, для исследований температурно-влажностных профилей атмосферы, является статистический 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 системы моделирования процедур восстановления трехмерных полей атмосферных параметров по данным спутникового СВЧ радиометрического мониторинга. Для этих целей проанализированы возможности регуляризирующих алгоритмов и показаны преимущества использования методического подхода [1-3] с учетом ограничений на источники априорной информации. На основании полученных представлений о статистических модельных данных, необходимых для моделирования, проведен анализ полноты и приемлемости доступных источников информации. По результатам анализа разработана структурно-функциональная схема системы моделирования радиометрических комплексов, используемых для восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы. Для проверки реализуемости проектных целей было разработано программное обеспечение (ПО), макетирующее работу основных узлов системы моделирования.

**1. Метод статистической регуляризации для восстановления температурно-влажностных профилей тропосферы по данным спутниковых спектральных СВЧ радиометрических измерений**

При выборе базового методического подхода к решению данной проблемы наряду с общими представлениями о необходимости регуляризовать решение, т.е. обеспечить физичность получаемых оценок, необходимо учитывать также возможность получения оценок точности этих решений. Основу метода статистической регуляризации применительно к восстановлению атмосферных профилей по СВЧ радиометрическим данным заложили работы [2-4]. Методические основы восстановления температурно-влажностных характеристик атмосферы детально

описаны в монографии [5] и существенно дополнены работой [6], в которой разработана статистически обоснованная методика редукции размерности вектора измерений, что является необходимым условием повышения устойчивости получаемых результатов восстановления.

Опишем задачу оценки значения вектора состояния  $S$  по вектору наблюдений  $R$ , а именно задачу восстановления, или обратную задачу. Обозначим эту оценку  $\hat{S}(R)$ . Существует несколько подходов к решению этой задачи. Модельный, или физический, подход использует информацию о функции  $F(\cdot)$ , позволяющей оценить значения вектора состояния  $S$  по значениям вектора наблюдений  $R$ :

$$S = \mathbf{F}(R). \quad (1)$$

Обычно такая задача является некорректной и поэтому не имеет единственного решения. Статистические описания  $R$  и  $S$ , если они существуют, могут быть использованы для выбора «наилучшего» из решений из всего множества допустимых решений. Как показывает анализ, в нашем случае неприемлемы подходы, использующие в качестве априорной информации знание функции распределения вектора состояния, поскольку такая информация, в общем случае, неизвестна на этапе проектирования новой перспективной измерительной системы. Это ограничение не позволяет использовать подходы, связанные с применением функции правдоподобия. Поэтому в работе и применен подход, основанный на восстановлении векторов состояния атмосферы при минимуме априорной информации.

В рамках дальнейшего анализа, следуя методическому подходу [6], мы для упрощения предположим, что случайный вектор наблюдений  $R$  связан с вектором состояния атмосферы в рамках модели  $\mathbf{M}(\cdot)$  следующим образом:

$$R = \mathbf{M}(S) + \psi = X + \psi, \quad (2)$$

где  $\psi$  – случайный вектор ошибок, а  $X$  – очищенный от случайных шумов вектор наблюдений электромагнитного излучения. В данном разделе без сужения общности мы предполагаем, что вектор  $\psi$  центрирован, т.е. его математическое ожидание равно 0.

При поиске с минимумом информации оценкой является значение  $\hat{S}$ , которое является самой «близкой» оценкой в смысле наименьших квадратов к номинальному состоянию  $S_0$  и удовлетворяет условию:

$$(R - \mathbf{M}(\hat{S}))^T (R - \mathbf{M}(\hat{S})) = M\sigma^2, \quad (3)$$

где  $M\sigma^2$  – скалярная величина, связанная с ошибкой измерений  $\sigma$ .

Если мы линеаризуем вблизи  $R_0, S_0$  и заменим  $\mathbf{M}(\cdot)$  на матрицу  $\mathbf{K}$ , то тогда:

$$R = \mathbf{K}S + \psi. \quad (4)$$

Фактически это означает, что мы линеаризуем функцию  $\mathbf{M}(\cdot)$  в окрестности  $S_0$ . Учитывая то, что  $R_0 = \mathbf{M}(S_0) \cong \mathbf{K}S_0 + \psi$ , соотношение (4) можно представить в виде:

$$\delta R = \mathbf{K}\delta S + \psi, \quad \delta R = R - R_0, \quad \delta S = S - S_0, \quad (5)$$

В этом случае решение с минимальной информацией при наличии шума с ковариацией  $C_{\psi\psi}$  имеет вид:

$$\widehat{\delta S}(R) = \mathbf{K}^T (\mathbf{K}\mathbf{K}^T + \beta C_{\psi\psi})^{-1} \delta R, \quad (6)$$

где  $\beta$  – некоторая константа.

Никакой статистической связи между  $R$  и  $S$  при восстановлении с минимумом информации не используется.

И, наконец, если ковариационная матрица  $C_{SS}$  для  $S$  известна и принимается линейная модель (4), то уравнение (6) может быть модифицировано, чтобы включить априорную информацию об  $S$  следующим образом:

$$\widehat{\delta S}(R) = C_{SS} \mathbf{K}^T (\mathbf{K}C_{SS} \mathbf{K}^T + C_{\psi\psi})^{-1} \delta R, \quad (7)$$

Матрица ошибок восстановления в этом случае равна

$$\hat{\mathbf{F}} = (\hat{\mathbf{K}}^T \hat{\mathbf{C}}_{\psi\psi}^{-1} \hat{\mathbf{K}} + \hat{\mathbf{C}}_{SS}^{-1})^{-1} \quad (8)$$

Здесь используется априорная информация в виде ковариационной матрицы  $C_{SS}$  и ковариационной матрицы  $C_{\psi\psi}$ , т.е. такой подход применяется в незначительном объеме априорных данных, что соответствует минимуму априорной информации, необходимой для регуляризации решения.

При восстановлении трехмерной структуры атмосферы необходимо также учитывать взаимную корреляцию  $r(\Delta x)$  атмосферных профилей вдоль земной поверхности. Оценки этих корреляционных зависимостей определяются пространственно-временными масштабами атмосферных флуктуаций [7]. Учет горизонтальной связности профилей в первом приближении связан с модификацией ковариационной матрицы  $C_{SS}$ . При использовании ее в выражениях (7), (8) ее необходимо заменить на матрицу  $C'_{SS}$ :

$$C'_{SS} = C_{SS}L(\Delta x), \quad (9)$$

где  $L(\Delta x)$  – диагональная матрица с элементами  $r(\Delta x)$ .

## 2. Структурно-функциональная схема системы моделирования процедур восстановления трехмерных полей атмосферных параметров по данным спутникового СВЧ радиометрического мониторинга

Структурно-функциональная схема системы моделирования приведена на рис.1. Ее особенностью является то, что ансамбль радиозондовых измерений используется как для формирования статистик, так и для выбора тестовых профилей. Оценки спектров радиоярких температур СВЧ диапазона и якобианов, описывающих зависимости вариаций наблюдаемых радиоярких температур от вариаций температурно-влажностных профилей проведены по методике, описанной в [8].



Рис. 1. Общая схема работы системы моделирования

### 3. Особенности программной реализации системы моделирования процедур восстановления трехмерных полей атмосферных параметров по данным спутникового СВЧ радиометрического мониторинга

#### 3.1. Отбор и фильтрация данных радиозондов

Для отработки ПО восстановления спектров на начальном этапе работы были выбраны данные, относящиеся к августу за период с 1973 по 2017 гг. для метеостанции «Долгопрудный» (ЦАО). Фиксация временного интервала и географического положения позволила провести полное программное моделирование задачи восстановления атмосферных профилей для заданного класса состояний (относящегося к более общему типу летней континентальной атмосферы средних широт). Для выбора заданного класса состояний атмосферы (безоблачные условия) был реализован алгоритм автоматического отбора измерений, выполненных в ясную погоду (точнее, в условиях отсутствия осадков и достаточно слабой облачности, не оказывающей заметного влияния на атмосферные радиояркостные спектры и температурно-влажностные профили нижней тропосферы). Алгоритм разделения данных по погодным условиям показан на рис. 2.

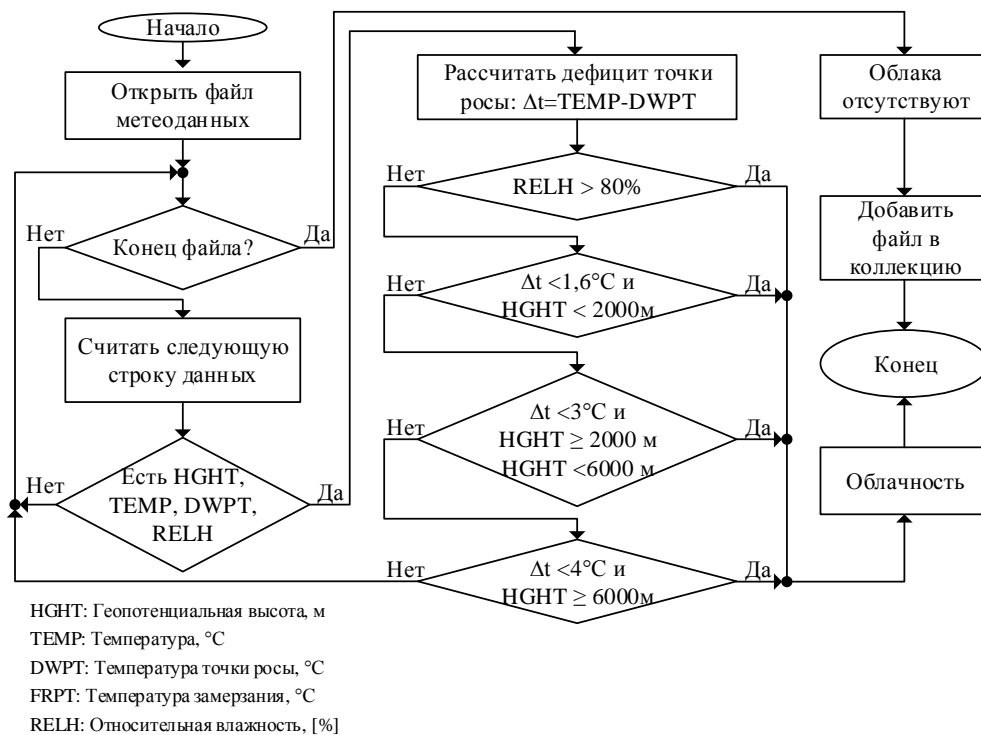


Рис. 2. Алгоритм разделения данных по погодным условиям.

#### 3.2. Расчет статистических характеристик атмосферных профилей

Данные измерений, выполненных в ясную погоду (из коллекции отобранных ранее файлов), были приведены к единой сетке уровней давления и дополнительно сгруппированы по времени измерений (утренние – 06Z, дневные – 12Z, вечерние – 18Z, ночные – 00Z). Расчет статистик осуществлялся независимо для каждой группы данных; в пределах каждой группы данные строились независимо по двум геофизическим параметрам: температуре и объемной доле водяного пара. Поскольку расчетные формулы для обоих параметров одинаковы, ниже принято общее обозначение  $S$  для любого из них. Как и ранее будем нумеровать атмосферные уровни индексом  $i$ , а сеансы измерений в пределах отобранной группы – индексом  $n$ . Таким образом,  $S_{in}$  – значение геофизического параметра, полученное в  $n$ -м измерении и

приведенное к  $i$ -му атмосферному уровню. Для каждого геофизического параметра рассчитывались следующие характеристики:

- среднее по выборке на каждом уровне

$$\bar{S}_i = \sum_{n=1}^N S_{in} / N; \quad (10)$$

- дисперсия по выборке на каждом уровне

$$D_i = \sum_{n=1}^N (S_{in} - \bar{S}_i)^2 / (N-1); \quad (11)$$

- ковариация значений по выборке между уровнями

$$C_{ij} = \sum_{n=1}^N (S_{in} - \bar{S}_i) \cdot (S_{jn} - \bar{S}_j) / (N-1); \quad (12)$$

- корреляция значений по выборке между уровнями

$$r_{ij} = \sum_{n=1}^N (S_{in} - \bar{S}_i) \cdot (S_{jn} - \bar{S}_j) / \sqrt{D_i \cdot D_j}; \quad (13)$$

где  $N$  – мощность выборки соответствующей группы измерений.

Типовые результаты расчетов статистик по данным радиозондов станции «Долгопрудный» приведены в презентации доклада.

### 3.3. Расчет статистических характеристик радиоярких спектров атмосферы

Для каждого сеанса измерений по методике, описанной в [8], был определен свой радиояркий спектр  $T_{ln}$ , где  $l$  – индекс частотного канала, связанный с частотой  $f_l$  в ГГц формулой:

$$f_l = 10 + 0.1 \cdot (l-1), \quad l = 1..1901. \quad (14)$$

Полученные спектры были использованы для расчета среднего (для данных метеоусловий, места и времени измерений) радиояркого атмосферного спектра:

$$\bar{T}_l = \sum_{n=1}^N T_{ln} / N, \quad (15)$$

где  $N$  – мощность выборки соответствующей группы измерений.

Далее был рассчитан якобиан прямой задачи (чувствительность радиояркого спектра к возмущениям профиля) для обоих геофизических параметров (температура и объемная доля водяного пара). Поскольку расчет абсолютно аналогичен для обоих геофизических параметров, используем для них общее обозначение  $S$ , как и ранее. Якобиан  $\mathbf{K}$  представляет собой матрицу конечно-разностных аналогов производных  $\partial T_l / \partial S_i$ , характеризующих приращение яркостной температуры в частотном канале  $l$  при малом возмущении атмосферного профиля на высотном уровне  $i$ .

Расчет осуществлялся следующим образом. За основу брали вычисленные ранее средние атмосферные профили (10) и средние атмосферные спектры (15). В средний профиль  $\bar{S}_i$  на некотором уровне  $k$  вносили возмущение  $\partial S_k$ , малое по сравнению с естественной изменчивостью, оцененной из дисперсии параметра  $D_k$  (11). Получали возмущенный профиль  $S'_i$ :

$$S'_i = \begin{cases} \bar{S}_i + \partial S_k, & i = k \\ \bar{S}_i, & i \neq k \end{cases} \quad (16)$$

Рассчитывали соответствующий радиояркий спектр атмосферы  $T'_l$  для всех частот  $f_l$  (14). Рассчитывали отклик радиояркого спектра  $\partial T_l$  на возмущение профиля:

$$\partial T_l = T'_l - \bar{T}_l, \quad l = 1..1901. \quad (17)$$

Далее по методике, описанной в [8], вычисляли значения соответствующих элементов  $K_{ij}$  матрицы якобиана:

$$K_{ik} = \partial T_l / \partial S_k, \quad l = 1..1901, \quad k = 1..39. \quad (18)$$

Вычисления проводили независимо для температурного и влажностного возмущений атмосферных профилей (при возмущении одного второй оставляли равным среднему), последовательно по всем уровням высот и по всем частотным каналам при возмущении на каждом высотном уровне. Результаты расчетов радиояркого спектров приведены в презентации доклада.

### 3.4. Численное моделирование решения обратной задачи

Для создания, проверки и отладки ПО, реализующего восстановление атмосферных профилей по методу статистической регуляризации, была реализована схема численного моделирования обратной задачи.

В качестве реального атмосферного профиля случайным образом выбирали один из сеансов радиозондовых измерений, отнесенных к определенному классу по условиям и времени наблюдений (см. выше). В качестве климатической нормы и статистики вариаций брали результаты расчетов по формулам (10) – (13). Для выбранного температурно-влажностного профиля рассчитывали соответствующий радиояркий спектр и, вычитая из него рассчитанный ранее средний спектр (15), получали радиояркий отклик  $\partial T_l$  (17). Восстановление отклонения атмосферного профиля от среднего выполняли по формуле (7), где в качестве  $\partial R$  подставляли расчетный вектор  $\partial T_l$ , в качестве  $C'_{SS}$  – соответствующую матрицу  $C_{ij}$  (12) с учетом коррекции по формуле, задаваемой выражением (9), для температуры или влажности, в качестве  $\mathbf{K}$  – соответствующий якобиан  $K_{ij}$  (18) для температуры или влажности. Матрицу ковариаций ошибок измерений  $\mathbf{C}_{\psi\psi}$  моделировали диагональной матрицей размерами 1901 на 1901 элемент с равными значениями диагональных элементов, настраиваемыми в параметрах командной строки (значения в диапазоне от 0.01 до 0.9). Таким образом, выполняли оценку отклонений  $\partial \hat{S}_i$  реального профиля от среднеклиматического по формуле (7). Исходя из нее, восстанавливали профиль  $\hat{S}_i$  как

$$\hat{S}_i = \bar{S}_i + \partial \hat{S}_i, \quad (19)$$

который далее сравнивали с реальным профилем и среднеклиматической нормой для оценки качества восстановления.

## 4. Тестирование разработанного программного обеспечения

Для тестирования разрабатываемого в рамках работы ПО нами были выбраны наборы данных, которые собраны в погодно-климатических условиях, близких к условиям проводимых в рамках данной работы натуральных экспериментов. А именно, для анализа радиозондовых данных, как приоритетные, были выбраны данные, полученные с радиозондов ЦАО (г. Долгопрудный) в августе месяце с 1973 по 2017гг.

Это обусловлено тем, что натурные измерения были проведены в августе 2017г. в г. Фрязино на расстоянии около 33 км от ЦАО. Таким образом радиозондовые измерения августа 2017г. можно считать синхронизованными с соответствующими сеансами натурных круглосуточных СВЧ радиометрических измерений для наблюдения существенной части мезомасштабных процессов в атмосфере, имеющих размеры от 5 до 200 км и времена развития от нескольких часов до 7 суток. При этом радиозондовые измерения, проведенные ЦАО с 1973 по 2017 годы, образуют достаточную базу для определения статистических характеристик атмосферы на август месяц.

При выборе данных для первичного тестирования разрабатываемого ПО были выбраны только те сеансы зондирования, которые были проведены при безоблачных условиях. Это было сделано с тем, чтобы методически приблизить условия моделирования к наблюдаемым условиям. Наличие облаков требует дополнительно привлечение статистики по различным видам облаков с учетом их горизонтальной и вертикальной протяженности, а также распределения влажности в облаках. В дальнейшем мы предполагаем продолжить отработку методов восстановления метеопараметров и при наличии облаков. Тем более, что в настоящее время такая статистика имеется, например, в [9, 10].

### 5. Методика оценки точности восстановления

Для определения точности восстановления температурно-влажностных профилей нами были применены описанные ниже методические подходы.

1) Определение методической точности восстановления температуры и влагосодержания для  $i$ -го слоя атмосферы, описываемых соответственно векторами  $\vec{\sigma}_{t_i}^{met}$  и  $\vec{\sigma}_{q_i}^{met}$  с компонентами, равными:

$$\sigma_{t_i}^{met} = \sqrt{F_{ii}^t} \quad \text{и} \quad \sigma_{q_i}^{met} = \sqrt{F_{ii}^q}, \quad (20)$$

где  $F_{ii}^t$  и  $F_{ii}^q$  – диагональные элементы определяемых в соответствии с соотношением (8) матриц ошибок восстановления температуры и влажности  $i$ -го слоя атмосферы.

В оценках  $\sigma_{t_i}^{met}$  и  $\sigma_{q_i}^{met}$  использованы модельные представления о формировании восходящего собственного излучения системы безоблачная атмосфера – подстилающая поверхность в диапазоне 10-200 ГГц.

2) Определение модельной точности восстановления температуры и влагосодержания для  $i$ -го слоя атмосферы, описываемых соответственно векторами  $\vec{\sigma}_{t_i}^{mod}$  и  $\vec{\sigma}_{q_i}^{mod}$  с компонентами, равными

$$\sigma_{t_i}^{mod} = \sqrt{\frac{\sum (t_i^{rs} - t_i^{retr1})^2}{n}}, \quad \sigma_{q_i}^{mod} = \sqrt{\frac{\sum (q_i^{rs} - q_i^{retr1})^2}{n}}, \quad (21)$$

где  $t_i^{rs}$  и  $q_i^{rs}$  – измеренные радиозондами значения температуры и влагосодержания для  $i$ -го слоя атмосферы,

$t_i^{retr}$  и  $q_i^{retr}$  – восстановленные по смоделированным радиоярким температурам значения температуры и влагосодержания для  $i$ -го слоя атмосферы.

В оценках  $\sigma_{t_i}^{mod}$  и  $\sigma_{q_i}^{mod}$  использованы модельные представления о формировании восходящего собственного излучения системы безоблачная атмосфера – подстилающая поверхность в диапазоне 10-200 ГГц.

3) Определение натурной точности восстановления температуры и влагосодержания для  $i$ -го слоя атмосферы, описываемых, соответственно векторами  $\vec{\sigma}_{t_i}^{nat}$  и  $\vec{\sigma}_{q_i}^{nat}$  с компонентами, равными

$$\sigma_{t_i}^{nat} = \sqrt{\frac{\sum (t_i^{rs} - t_i^{retr2})^2}{n}}, \quad \sigma_{q_i}^{nat} = \sqrt{\frac{\sum (q_i^{rs} - q_i^{retr2})^2}{n}}, \quad (22)$$

где  $t_i^{rs}$  и  $q_i^{rs}$  – измеренные радиозондами значения температуры и влагосодержания для  $i$ -го слоя атмосферы,

$t_i^{retr}$  и  $q_i^{retr}$  – восстановленные по измеренным радиояркостным температурам значения температуры и влагосодержания для  $i$ -го слоя атмосферы.

В оценках  $\sigma_{t_i}^{nat}$  и  $\sigma_{q_i}^{nat}$  на данном этапе работы использованы натурные измерения нисходящего собственного излучения атмосферы в диапазоне 19-27 ГГц.

Для валидации результатов восстановления температурно-влажностных профилей часть радиозондовых измерений (до 40%) используется для определения точности решения обратной задачи, а остальные данные служат для создания статистического ансамбля, определяющего априорную информацию.

### **Выводы**

В работе представлены результаты разработки системы программного моделирования процедур восстановления трехмерных полей атмосферных параметров по данным спутникового СВЧ радиометрического мониторинга. Описаны методические основы процедур восстановления, алгоритмы работы системы, процедуры получения априорных статистик и оценки точности восстановления.

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

### **Литература**

1. Турчин В.Ф., Козлов В.П., Малкевич М.С. Использование методов математической статистики для решения некорректных задач. УФН, 1970. Т.102. вып.3.
2. Горчакова И.А., Малкевич М.С., Турчин В.Ф. Определение вертикального профиля влажности атмосферы по измерениям собственного излучения Земли Изв. АН СССР, сер. Физ. атм. и океана, 1970. Т.6. 565.
3. Strand O.N., Westwater B.R. Statistical Estimation of the Numerical Solution of a Fredholm Integral Equation of the First Kind. J. Associat. Comput. Machin. 15, 100 (1968).
4. 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.
5. Rodgers C.D. Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice. Singapore: World Scientific, 2000.
6. 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.
7. Kutuza V.G. Spatial and temporal fluctuations of atmospheric microwave emission. Radio Science, 2003, vol.38, No.3, 8047.
8. Саворский В.П., Кибардина И.Н., Аквилонова А.Б., Васильев В.С., Горобец С.В, Маклаков С.М. Оптимизация состава и структуры СВЧ радиометрической информации, используемой для восстановления трехмерных полей атмосферных параметров. / Материалы Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн», 27.06-29.06.2017 г. Муром. Изд.полиграфический центр МИ ВлГУ . С.167-174.
9. Облака и облачная атмосфера. Справочник.//Л. Гидрометеиздат. 647 с.
10. Васищева М.А., Щукин Г.Г. Экспериментальные исследования водности облаков. Статистические модели атмосферы. Обзор. // Обнинск. ВНИИГМИ-МЦД. 1976. 93 с.