

УДК 551.501.795:551.571.1

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ О ТРОПОСФЕРНОЙ ДИНАМИКЕ ПРИ РАДИОТЕПЛОВОМ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ**

**Д. М. Ермаков**

**Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова  
РАН, 141190, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1**

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2017 г.

**Аннотация.** Предложено расширение классической схемы восстановления вертикальных профилей влажности атмосферы по данным спутникового радиотеплового зондирования путем использования дополнительной информации о тропосферной динамике. Это открывает возможность учета горизонтальных корреляционных связей в данных спутниковых измерений над соседними областями пространства, которые обычно обрабатываются независимо друг от друга. Целью такого учета является уменьшение априорной неопределенности профилей влажности в нижней тропосфере. Описан общий итерационный алгоритм расчетов, выполнен предварительный анализ возможности обеспечить сходимость вычислений к искомому профилю, обсуждены некоторые методические аспекты реализации предложенной схемы.

**Ключевые слова:** радиотепловое зондирование атмосферы, вертикальный профиль влажности, тропосферная динамика.

**Abstract.** Present-day satellite multichannel microwave radiometers-imagers measure two-dimensional fields of radiothermal atmospheric radiation. Thus the existing horizontal correlations in remote data, caused by the nature of geophysical atmospheric fields, can be analyzed and taken into account in models. However, in standard schemes for retrieval of vertical profiles of atmospheric humidity, remote measurements at each point are interpreted independently, i.e. a significant part of the received information is ignored. In this paper, an extension of the classical approach to radiothermal satellite sounding of vertical atmospheric profiles is proposed by using additional information in the form of characteristics of advection (horizontal

motion) in the lower troposphere. Owing to the complexity of the problem, a sufficient goal of assimilating information on troposphere dynamics is to reduce the a priori uncertainty of the vertical distribution of the humidity profile in the vicinity of horizons of 800-600 hPa. The proposed iterative algorithm is aimed at achieving this goal. Practical implementation of this algorithm requires obtaining robust estimates of the velocities of atmospheric advection of water vapor (integral over the height of the entire atmosphere and over the heights of two layers located above and below a certain horizon). The analysis of the previous research in the field, as well as the results of the implementation and practical application of algorithms of satellite radiothermography, show that the problem is fundamentally feasible. A large-scale statistical analysis of radiosonde data, including vertical profiles of wind speed and direction, should become the initial step in its solution. The generalization of this information in the form of average values, variances and covariances of the corresponding parameters (by analogy with the statistical regularization approach) will not only provide an adequate initial approximation of the desired advection velocities, but will also allow to formulate quality criteria for rejecting unreliable estimates.

**Key words:** radiothermal atmospheric sounding, vertical humidity profile, troposphere dynamics

## 1. Введение

Восстановление атмосферных температурно-влажностных профилей по дистанционным измерениям является одной из классических задач дистанционного зондирования Земли в целом и спутникового радиотеплового (пассивного микроволнового) зондирования в частности [1]. Предложенные подходы к ее решению, исходя из общей классификации задач дистанционного зондирования [2], можно разделить на два типа. Первый тип соответствует задачам параметризации и чаще всего основывается на разновидностях метода статистической регуляризации [1,3]. Второй тип соответствует задачам

распознавания и, как правило, использует вычислительные технологии на базе искусственных нейронных сетей [4,5].

Методическое предложение и связанный с ним предварительный анализ, сделанные в настоящей работе, относятся к группе подходов первого типа. Рассмотрена частная задача восстановления профиля влажности атмосферы по спутниковым измерениям ее радиояркостного спектра, однако, с существенным методологическим расширением стандартных вариантов реализации решения. В классической постановке [1], выработанной еще для трассовых радиометров, задача решается независимо для каждой точки измерений. Возможность получения устойчивого решения обеспечивается учетом статистики атмосферных характеристик, в том числе, существующих в них внутренних корреляционных связей. При этом, однако, рассматриваются только вертикальные связи, т.е. корреляция значений температуры и (или) влажности вдоль одного вертикального профиля. Дополнительную информацию можно рассчитывать извлечь использованием горизонтальных корреляционных связей, поскольку современные радиометры сканирующего типа позволяют выполнять многократные измерения близких (частично перекрывающихся) областей пространства, обеспечивая значительную информационную избыточность. Так, периодические спутниковые радиотепловые измерения заданных областей позволяют восстановить эффективные (интегральные по высоте) скорости адвекции (горизонтального движения) водяного пара в нижней тропосфере [6,7]. Именно такого рода дополнительная информация включена в схему восстановления вертикального профиля влажности, предложенную в настоящей работе.

Нужно подчеркнуть, что в работе рассмотрен только случай наблюдения безоблачной атмосферы. Это позволило сосредоточить основное внимание на принципиально новых аспектах предлагаемой схемы. В то же время, многочастотные радиотепловые измерения находят более широкое применение в диагностике различных состояний атмосферы и, в частности, при восстановлении характеристик облачности [8-10]. Одной из задач дальнейшего

развития предлагаемой схемы является интеграция в нее этих дополнительных возможностей СВЧ радиометрического зондирования.

Работа структурирована следующим образом. В разделе 2 кратко сформулирована суть проблемы в удобной для дальнейшего рассмотрения постановке. Раздел 3 описывает некоторые возможности восстановления характеристик атмосферной динамики на основе спутниковых измерений. В разделе 4 обсуждена предлагаемая схема дополнения стандартного решения путем учета информации о тропосферной динамике. Схема построена итерационно и чередует шаги стандартного метода восстановления вертикального профиля влажности и его коррекции за счет информации о движении. В связи с этим центральный вопрос состоит в возможности обеспечить устойчивость оценок и сходимость истинному профилю влажности. Раздел 5 посвящен обсуждению ряда оснований для положительного разрешения этого вопроса, а также предварительному анализу некоторых методических аспектов реализации предложенной схемы.

## 2. Постановка задачи

Как известно, в метеорологии используется множество разных характеристик влажности воздуха [11]. Среди них абсолютная  $\rho_w$  и относительная  $\varphi$  влажность, массовая  $s_m$  и объемная  $s_v$  доля водяного пара, точка росы  $T_d$  и дефицит точки росы  $\Delta T_d$ . В файлах данных радиозондовых измерений фиксируются  $T_d$  (°C),  $\varphi$  (%),  $s_m$  (г/кг). В широко применяемых программных пакетах для численного моделирования распространения микроволнового излучения в атмосфере, например, ARTS [12], используется  $s_v$ . В нашем рассмотрении удобно перейти к абсолютной влажности  $\rho_w$ , выраженной в кг/м<sup>3</sup>. При известных температуре  $T$  и давлении  $P$  все вышеперечисленные характеристики однозначно связаны между собой. Так,  $\rho_w$  выражается через  $s_m$  следующим образом:

$$\rho_w = \frac{P}{RT} \frac{s_m}{1000} \mu_a, \quad (1)$$

где  $\mu_a = 29,04 \cdot 10^{-3}$  кг/моль – эффективная молярная масса воздуха,  $R = 8,314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; нормировка учитывает принятые единицы измерения  $s_m$  и  $\rho_w$  (см. выше).

От профиля абсолютной влажности легко перейти к интегральному влагосодержанию  $Q$  (кг/м<sup>2</sup>), значение которого над океаном в настоящее время достаточно надежно восстанавливается по спутниковым измерениям [13,14]:

$$Q = \int_0^H \rho_w(z) dz, \quad (2)$$

где  $z$  (м) – высота над поверхностью Земли,  $H$  (м) – условная верхняя граница атмосферы.

Пусть задано  $N$  высотных уровней  $z_i$  от  $z_1 = 0$  до  $z_N = H$ , значения абсолютной влажности  $\rho_i$  на которых достаточно полно характеризуют ее вертикальный профиль. Тогда вариантом дискретной формы записи (2) будет:

$$Q = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\rho_i + \rho_{i+1}}{2} (z_{i+1} - z_i). \quad (3)$$

Как отмечено выше, в случае спутниковых измерений над океаном величину  $Q$  можно считать известной. Согласно (3) это означает, что известно скалярное произведение вектора, составленного из искомых величин  $\rho_i$ , на вектор, составленный из величин  $z_i$ . При этом, как правило, ищут не сами  $\rho_i$ , а их отклонения  $\Delta\rho_i$  от ожидаемых (среднестатистических) значений  $\bar{\rho}_i$  [1,3].

Наряду с  $\rho_i$  рассмотрим величины  $q_i$ , определенные следующим образом:

$$q_1 = 0; \quad q_i = q_{i-1} + \frac{\rho_i + \rho_{i-1}}{2} (z_i - z_{i-1}) = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\rho_{j+1} + \rho_j}{2} (z_{j+1} - z_j), \quad i = 2..N. \quad (4)$$

Величины  $q_i$  характеризуют содержание водяного пара в слое от поверхности Земли до уровня  $z_i$ . Очевидно, что  $q_N = Q$ . Ясно также, что система (4) и условие (3) задают правила взаимно однозначного перехода между наборами значений  $\rho_i$  и  $q_i$ , т.е. решение задачи относительно  $q_i$  эквивалентно решению задачи относительно  $\rho_i$ .

На графиках рис. 1а в качестве примера показано несколько профилей влажности за первые числа августа 2017 г., полученных в дневных и ночных сеансах радиозондовых измерений в Центральной Аэрологической Обсерватории (ЦАО, г. Долгопрудный). Измеренная величина – массовая доля водяного пара  $s_m$  (г/кг). В качестве вертикальной координаты принято давление  $P_i$  (гПа) на соответствующем высотном уровне  $z_i$ . На рис. 1б те же профили пересчитаны в высотный ход  $q_i$  (кг/м<sup>2</sup>).

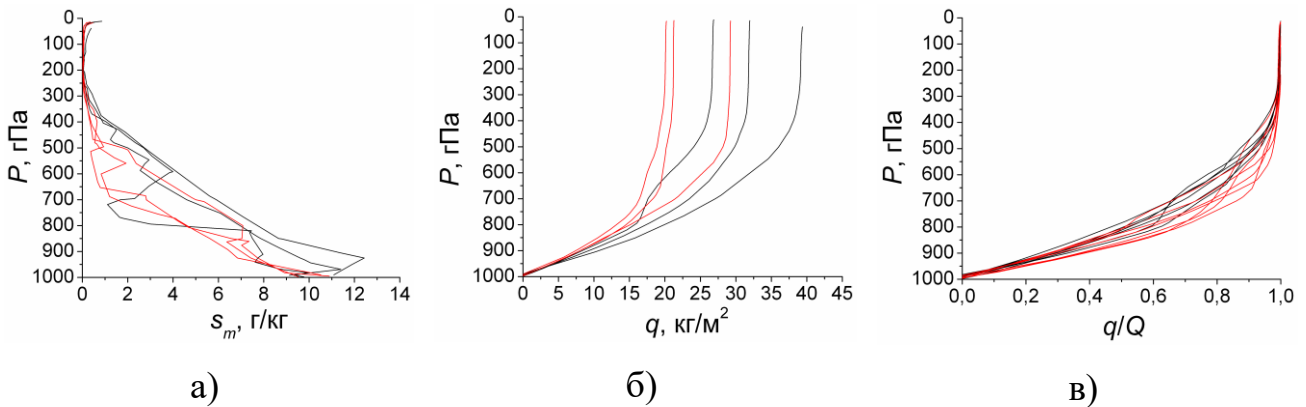


Рис. 1. Высотные зависимости массовой доли водяного пара (а),

влажностердержания в слое от Земли (б) и нормированного влажностердержания (в) по данным радиозондирования в ЦАО (Долгопрудный): красные линии – дневные измерения (12:00 UTC); черные линии – ночные измерения (00:00 UTC)

Многочастотные измерения в окрестности линии поглощения водяного пара за счет сильной зависимости оптической толщины атмосферы от частоты излучения, фактически, дают косвенную информацию о  $q_i$  (или  $Q - q_i$ ), т.е. заменяют зондирование по высоте сканированием по частоте. Включение дополнительной информации преследует цель уменьшения априорной неопределенности профиля  $q_i$ . Чтобы оценить, где такая неопределенность максимальна при известном интегральном влажностердержании  $Q$ , нормируем профили  $q_i$  на величину  $q_N = Q$ , рис. 1в. Ясно, что все нормированные профили начинаются от значения 0 на уровне Земли и монотонно нарастают до 1 на верхней границе атмосферы  $H$ . Максимальная неопределенность (дисперсия значений) возникает на некоторых промежуточных уровнях. Рис. 1в

показывает, что она наиболее заметна в нижней тропосфере вблизи давлений 600 – 800 гПа. Для большей репрезентативности приведены данные 14 сеансов радиозондирования (за 1 – 7 августа 2017 г.). Нужно отметить, что значительные *относительные* вариации влажности возникают и на существенно больших высотах [11] вследствие резкого уменьшения абсолютной влажности. Однако, ограничивая выбор одним уровнем и имея в виду сопряжение дополнительной информации с данными радиотепловых измерений, перспективно рассмотреть прежде всего высоты нижней тропосферы.

### **3. Учет атмосферной динамики**

Подходы к автоматическому восстановлению векторов скорости адвекции (горизонтальных движений) воздушных масс по спутниковым данным успешно развиваются с последнего десятилетия прошлого века [15]. В их основе лежат регулярный мониторинг и анализ изменений пространственных распределений атмосферной влаги в различных фазовых состояниях. Однако, в основном эти подходы развиты для наблюдений с геостационарных спутников, высота орбиты которых (около 36000 км) позволяет в настоящее время достичь приемлемого пространственного разрешения только при наблюдении в видимом и ИК диапазонах спектра. Это, в свою очередь, накладывает ограничения на возможности зондирования нижних слоев атмосферы. Фактически, надежные данные об атмосферной динамике могут быть получены в этих измерениях в основном для высотных уровней от 700 гПа (около 3000 м) и выше.

Получение оперативной информации о состоянии нижней тропосферы в глобальных масштабах обеспечивают радиотепловые (пассивные микроволновые) спутниковые измерения с низких (как правило, солнечно-синхронных) орбит [13]. Восстановление интегральных характеристик атмосферы по этим данным доведено, фактически, до уровня рутинного технологического процесса. Однако, восстановление вертикальных температурно-влажностных профилей и характеристик динамики нижней

тропосферы все еще входит в число актуальных научных задач дистанционного зондирования.

В работе [16] на основе численного эксперимента было показано, что краткосрочная эволюция поля интегрального влагосодержания, восстановленного по данным спутникового радиотеплового зондирования с пространственным разрешением около 25 км, может быть адекватно описана единым полем адвекции, полученным как взвешенная сумма скоростей ветра на нескольких атмосферных горизонтах. Пусть зональная (вдоль географической параллели) компонента вектора скорости ветра на данном уровне  $z_i$  равна  $u_i$ . Тогда интегральный по высоте массоперенос водяного пара в зональном направлении  $F_u$ , в кг/(м·с), равен:

$$F_u = \sum_{i=2}^N (q_{i+1} - q_i) \frac{u_{i+1} + u_i}{2} = Q \sum_{i=1}^N \frac{q_{i+1} - q_i}{Q} \frac{u_{i+1} + u_i}{2} = Qu^*, \quad (5)$$

где  $(q_{i+1} - q_i)$  по определению равно влагосодержанию в слое между соответствующими высотными уровнями, а полусумма скоростей дает среднюю скорость адвекции в этом слое. Тогда  $u^*$  имеет смысл эффективной (интегральной по высоте) зональной компоненты скорости адвекции водяного пара и представляет собой линейную комбинацию зональных скоростей ветра  $u_i$  на разных горизонтах с коэффициентами, определяемыми значениями  $q_i$ . Аналогичные соотношения можно записать для меридиональных компонент  $v_i$ , получив выражение для эффективной меридиональной скорости адвекции  $v^*$ .

С учетом введенных обозначений утверждение работы [16] можно сформулировать следующим образом:

$$u^* \approx \sum_{j=1}^3 w_j u_{i_j}; \quad v^* \approx \sum_{j=1}^3 w_j v_{i_j} \quad (6)$$

где индексы  $i_j$  соответствуют трем высотным уровням 1000 гПа, 850 гПа, 700 гПа, а  $w_j$  – веса, постоянные в больших диапазонах широт. В частности, для широт выше 50° обоих полушарий получены значения весов 0,517, 0,345 и 0,138 для уровней 1000, 850 и 700 гПа соответственно. Из сравнения (5) и (6)



ясно, что эти веса дают еще один вариант приближения среднеклиматических высотных профилей влажности в нижней тропосфере на основании анализа атмосферной динамики. Поправка к ним, обеспечивающая точное равенство в (6) при заданных (измеренных) значениях компонент скорости адвекции, дала бы дополнительную важную информацию о текущем вертикальном профиле влажности на высотных уровнях от 1000 до 700 гПа.

На рис. 2а в качестве иллюстрирующего примера построены вертикальные профили величин  $s_i = (q_{i+1} - q_i) \frac{u_{i+1} + u_i}{2}$  (массопереноса водяного пара в слое) по данным радиозондирования за 01.08.2017, использованным ранее при построении рис. 1 (см. выше). Данные по величинам и направлениям скоростей ветра на разных горизонтах также содержатся в файлах радиозондирования. На рис. 2б, по аналогии с рис. 1б, построен график интегрального массопереноса в слое от Земли до заданного высотного уровня:

$$f_1 = 0; f_i = f_{i-1} + s_{i-1}, i = 2..N \quad (7)$$

Квадратами на рис. 1б показаны оценки значений интегрального массопереноса  $\hat{f}_i$  в нижней тропосфере, соответствующие весам (6), т.е.:

$$\hat{f}_1 = 0; \hat{f}_{j+1} = Q \sum_{i=1}^j w_i \hat{u}_i, j = 1..3. \quad (8)$$

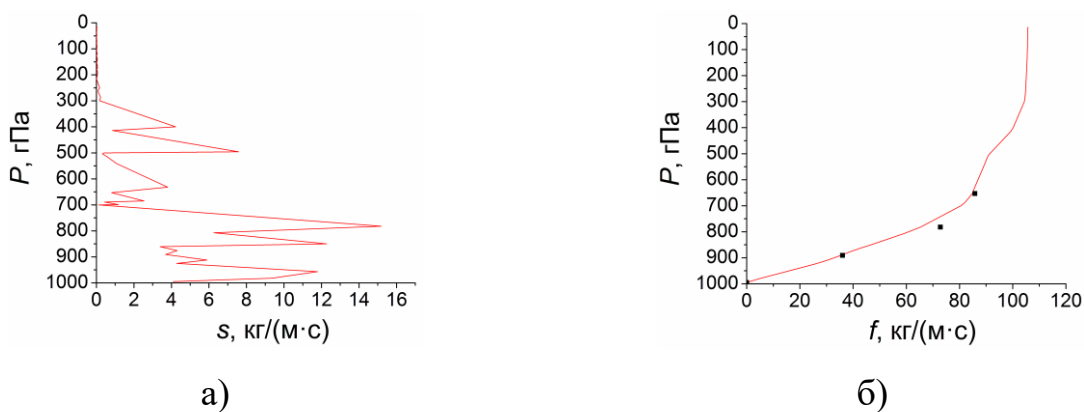


Рис. 2. Профиль массопереноса водяного пара (а); интегральный массоперенос в слое от Земли до заданного уровня давления  $P$  (б): красная линия – расчет по радиозондовым данным на 01.08.2017, черные квадраты – оценка по весам [16]

В качестве  $\hat{u}_i$  взяты средние значения измеренных радиозондами скоростей  $u_i$  на соседних высотных уровнях выше горизонтов 1000, 850 и 700 гПа,

поскольку в [16] используются модельные поля ветра, сильно сглаженные по сравнению с радиозондовыми данными (см. рис. 2а). Смещение опорных уровней вверх по высоте связано с тем, что оценки в [16] получены для атмосферы, начинающейся от уровня моря, а измерения в ЦАО проводятся от высоты около 200 м над уровнем моря. Несмотря на отмеченные обстоятельства, видно, что (8) дает в целом адекватное первое приближение реальной вертикальной структуры адвективного массопереноса водяного пара. При этом наибольшие отличия от среднестатистических значений возникают в нижней тропосфере (в рассмотренном случае около горизонта 800 гПа). Следует заметить, что веса в [16] подобраны для атмосферы над открытым океаном, без учета сезонности и других факторов изменчивости, в то время как данные радиозондирования получены для дневной летней континентальной атмосферы. При более тщательном учете географических и временных факторов следует ожидать еще лучшего соответствия.

В [6,7] предложен и развит подход к восстановлению величин  $u^*$  и  $v^*$  непосредственно из анализа дистанционных данных, а именно, хронологической последовательности полей интегрального влагосодержания атмосферы, рассчитанных по спутниковым радиотепловым измерениям. Если  $u^*$  и  $Q$  известны, то (5) по аналогии с (3) накладывает дополнительное условие на профиль влажности в форме скалярного произведения двух векторов, один из которых описан искомыми величинами  $\rho_i$ .

Следует отметить, что выражения для зональных и меридиональных компонент потоков не могут быть использованы в качестве двух независимых условий, поскольку, как правило, величины  $u_i$  и  $v_i$  линейно зависимы в нижней тропосфере из-за мало меняющегося с высотой направления ветра. Поэтому задачу имеет смысл рассматривать в скалярной постановке, подразумевая под  $u_i$  полную горизонтальную скорость адвекции.

Сложность состоит в том, что компоненты  $u_i$  априорно неизвестны. Их можно вычислить по аналогии с  $u^*$ , если измерены пространственные

распределения влагосодержания в соответствующих слоях атмосферы. Это приводит к идее итерационной схемы, которая дает первоначальную оценку вертикального профиля влажности и, соответственно, влагосодержания в слоях ниже и выше некоторого горизонта, например, 700 гПа, а затем реализует метод последовательных приближений, рассчитывая эффективные характеристики атмосферной адвекции в этих слоях и вводя соответствующую коррекцию на невязку потоков при выполнении следующей итерации расчета вертикального профиля влажности. Эта схема обсуждена в следующем разделе.

#### 4. Предлагаемая расчетная схема

В классическом методе статистической регуляризации предполагается известным нулевое приближение к решению, например, среднеклиматический профиль влажности для данного места. Очередное приближение получается расчетом поправок к предыдущему на основе данных измерений. На рис. 3 условно показан истинный профиль влажности (сплошная линия) и рассчитанное приближение к нему (пунктирная линия). Зафиксируем некоторый высотный уровень в нижней тропосфере и рассмотрим атмосферный слой «I» выше этого уровня до верхней границы атмосферы и слой «II» ниже него до поверхности Земли. Обозначим истинные значения влагосодержания в слоях «I» и «II» через  $q_1$  и  $q_2$ , а эффективные скорости адвекции в них через  $u_1$  и  $u_2$ , соответственно (рис. 3).

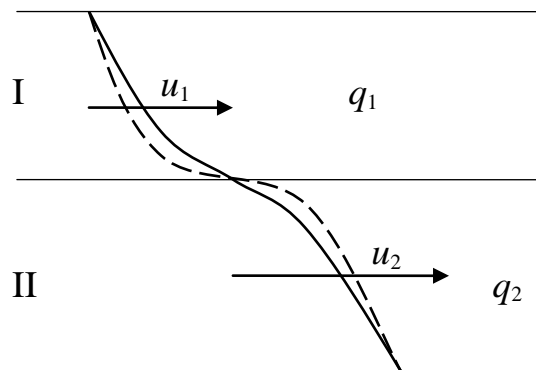


Рис. 3. Двухслойная модель, описанная системой (9): сплошная кривая – истинный профиль влажности; пунктирная кривая – текущее приближение

Если интегральное влагосодержание равно  $Q$ , а эффективная скорость адвекции водяного пара по всей высоте атмосферы равна  $u^*$ , имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} q_1 + q_2 = Q \\ q_1 u_1 + q_2 u_2 = Q u^* \end{cases} \quad (9)$$

Пусть теперь  $q'_1$  и  $q'_2$  – оценки влагосодержания в слоях «I» и «II» на основе рассчитанного приближения профиля влажности, а ошибка оценки  $q'_1$  равна  $\Delta = q'_1 - q_1$ . Считая  $Q$  известным, получим из условия  $q'_1 + q'_2 = Q$  и верхнего уравнения системы (9):  $q_2 - q'_2 = \Delta$ . Тогда из нижнего уравнения системы (9) получим:

$$(q'_1 - \Delta)u_1 + (q'_2 + \Delta)u_2 = Q u^*, \quad (10)$$

откуда следует:

$$\Delta = \frac{q'_1 u_1 + q'_2 u_2 - Q u^*}{u_1 - u_2}. \quad (11)$$

Распределив поправки  $-\Delta$  и  $\Delta$  в слоях «I» и «II» с учетом статистики вертикальных корреляций и дисперсий влажности на разных высотах, которая также используется в классическом методе статистической регуляризации, получим следующее приближение к решению. Откорректированный вертикальный профиль влажности может быть использован в следующей итерации по методу статистической регуляризации, результаты расчета снова могут быть скорректированы с учетом тропосферной динамики и т.д. Блок-схема описанной последовательности действий представлена на рис. 4. Условием выхода из итерационного цикла расчетов можно принять малое изменение очередного приближения профиля влажности по отношению к предыдущему.

Некоторые существенные методические аспекты реализации предложенной схемы обсуждены в следующем разделе.

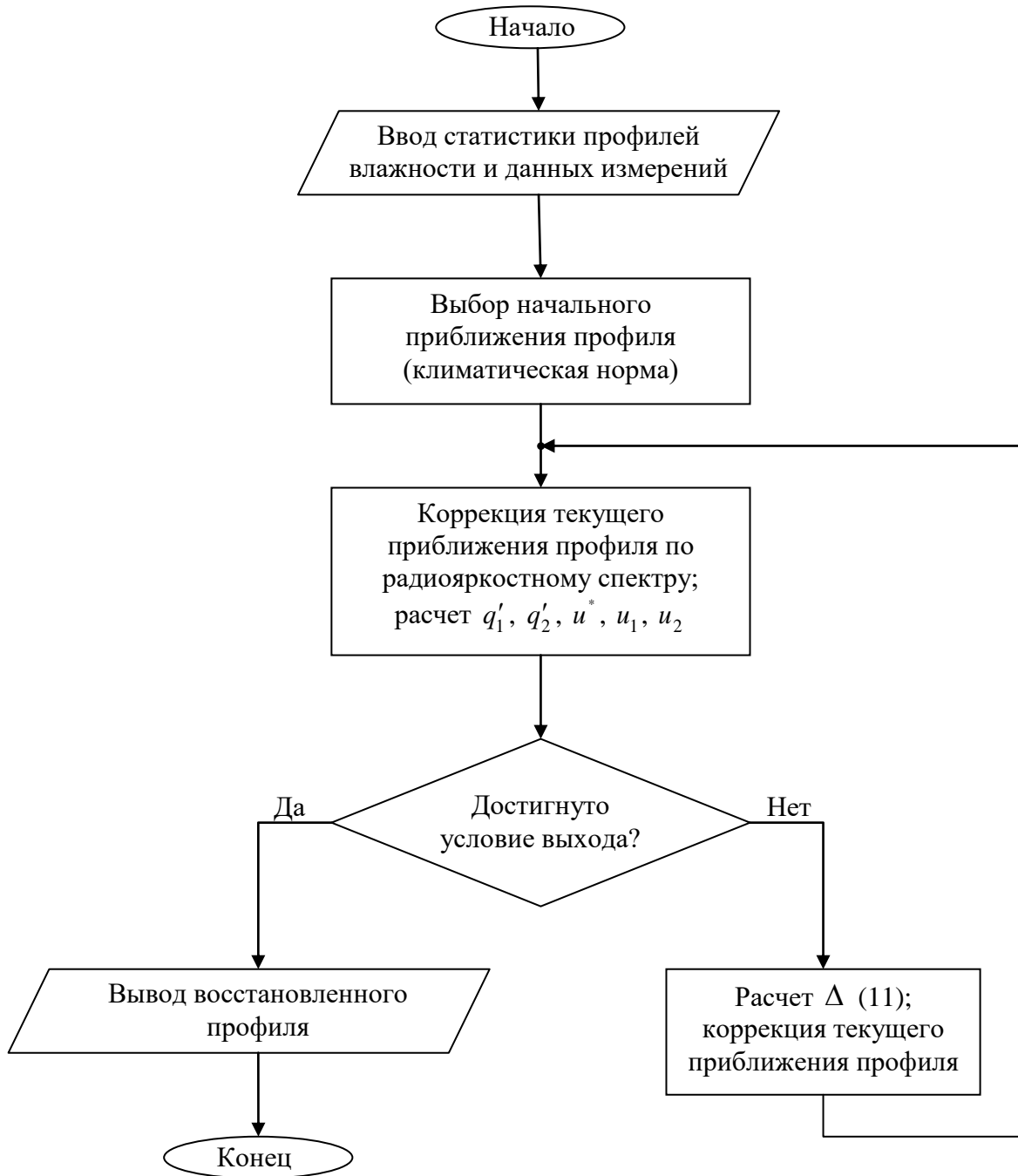


Рис. 4. Блок-схема предложенного итерационного алгоритма расчета

## 5. Методические аспекты реализации предложенной расчетной схемы

Итерационный алгоритм предложенной схемы и вид выражения для поправки  $\Delta$  вызывают серьезный вопрос о возможности обеспечения сходимости расчетов к искомому профилю влажности. Как минимум, жесткие требования должны быть предъявлены к оценкам скоростей адвекции  $u^*$ ,  $u_1$  и  $u_2$ . В отсутствие дополнительной (априорной) информации о тропосферной

динамике обеспечение робастных расчетов скоростей адвекции в каждой точке измерений представляется невыполнимым. Однако на примере результатов [16], обсужденных выше, видно, что уже учет среднеклиматической статистики способен дать хорошее начальное приближение восстанавливаемых динамических характеристик. Еще лучшее приближение должен обеспечить учет географического положения, сезонности, времени суток и синоптических условий наблюдений. Его можно получить путем широкомасштабной обработки данных измерений радиозондами, что должно стать первым шагом практической реализации предложенного подхода.

В [17] была представлена вычислительная схема на базе технологии искусственных нейронных сетей для оценки характеристик зональной и меридиональной адвекции атмосферы. Обученная на больших массивах радиозондовых данных, она оказалась способной реалистично воспроизводить картину атмосферной циркуляции водяного пара в низких широтах, используя в качестве оперативной входной информации только данные о скорости приводного ветра по скаттерометрическим измерениям. Краткий обзор развития такого рода схем дан в [18].

Отметим, что предложенный в настоящей работе подход реализует учет тропосферной динамики в скалярной форме (9). Поэтому весьма эффективным может оказаться использование в качестве дополнительной оперативной информации полей модуля скорости приводного ветра, восстанавливаемых по данным спутникового радиотеплового зондирования одновременно с полями интегрального влагосодержания атмосферы [13,14].

Важным элементом расчетной схемы должен стать текущий и апостериорный контроль качества оценок. В частности, можно внедрить блок расчета баллов (флагов) качества по аналогии с имплементированными в алгоритмах, описанных в [15]. Неверные и сомнительные данные по тропосферной динамике могут заменяться на результаты интерполяции по соседним значениям или среднестатистические характеристики, либо полностью игнорироваться. В последнем случае рассмотренная схема будет

редуцирована до классической, что позволит избежать риска увеличения ошибок, вызванного ненадежной дополнительной информацией.

## 6. Заключение

В работе предложено и проанализировано с методической точки зрения расширение классической схемы восстановления вертикальных профилей влажности атмосферы по данным дистанционного радиотеплового зондирования. Базовая идея заключается в использовании дополнительной информации о горизонтальных корреляционных связях поля влажности путем учета характеристик тропосферной динамики по последовательности спутниковых наблюдений.

Вследствие сложности задачи достаточной целью усвоения информации о тропосферной динамике представляется получение реперной точки профиля влажности в окрестности горизонта 700 гПа. На достижение этой цели направлен предложенный итерационный алгоритм расчетов. Практическая реализация этого алгоритма требует получения робастных оценок скоростей атмосферной адвекции водяного пара (интегральных по высоте всей атмосферы и по толщине двух слоев, расположенных выше и ниже некоторого горизонта).

Анализ литературы, а также результаты реализации и практического применения алгоритмов спутникового радиотепловидения, показывают, что рассмотренная задача принципиально выполнима. Начальным шагом ее решения должен стать широкомасштабный статистический анализ данных радиозондовых измерений, содержащих информацию, в том числе, и о вертикальных профилях скорости и направления ветра. Обобщение этой информации в форме средних значений, дисперсий и ковариаций соответствующих параметров (по аналогии с подходом статистической регуляризации) не только обеспечит адекватное начальное приближение искомым скоростям адвекции, но и позволит сформулировать критерии качества для отбраковки ненадежных оценок.

Создание использованного в работе программного обеспечения частично поддержано грантом РФФИ № 15-07-04422 А.

### Литература

1. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974, 188 с.
2. Поляков В.М. Дистанционное зондирование природной среды радиофизическими методами: Конспект лекций / Под ред. Б.А. Розанова. М.: Изд-во МГТУ, 1995, 104 с.
3. Rodgers C.D. Inverse methods for atmospheric sounding: Theory and practice. Singapore: World Scientific (Ed. Taylor F.W.), 2000, 255 p.
4. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А. Использование метода искусственных нейронных сетей при восстановлении вертикальных профилей атмосферных параметров // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. N1. с. 34–39.
5. Blackwell W.J. A neural-network technique for the retrieval of atmospheric temperature and moisture profiles from high spectral resolution sounding data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, Vol. 43, No. 11, pp. 2535–2546.
6. Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П. Возможности количественного описания мезомасштабных процессов в атмосфере на основе анимационного анализа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. N4. с. 153–162.
7. Ermakov D.M., Sharkov E.A., Chernushich A.P. Satellite radiothermvision of atmospheric mesoscale processes: case study of tropical cyclones // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives, 2015, Vol. XL, No. 7/W3, pp. 179–186, doi:10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-179-2015.
8. Аквилонова А.Б., Кутуза Б.Г. Радиотепловое излучение облаков // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23. № 9. с. 1792–1806.
9. Башаринов А.Е., Кутуза Б.Г. Исследование радиоизлучения и поглощения облачной атмосферы в мм и см диапазоне волн // Труды ГГО. 1968. Вып. 222. с. 100–110.



10. Гурвич А.С., Кутуза Б.Г. «Космос-243» — первый в мире эксперимент по исследованию Земли из космоса радиофизическими методами // Исследование Земли из космоса. 2010. № 2. с. 14–25.
11. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1986, 264 с.
12. ARTS: The Atmospheric Radiative Transfere Simulator. Available at: <http://www.radiativetransfer.org/>
13. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД, 2016, 336 с.
14. Wentz F.J. A well-calibrated Ocean Algorithm for SSM/I // Journal of Geophysical Research, 1997, Vol. 102, No. C4, pp. 8703–8718.
15. Velden C.S., Hayden C.M., Nieman S.J., Menzel W.P., Wanzong S., Goerss J.S. Upper-tropospheric winds derived from geostationary satellite water vapor observations // Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, Vol. 78, No. 2, pp. 173–195.
16. Wimmers A.J., Velden C.S. Seamless advective blending of total precipitable water retrievals from polar orbiting satellites // Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2011, Vol. 50, No. 5, pp. 1024–1036.
17. Lie W.T., Tang W. Estimating moisture transport over oceans using space-based observations // Journal of Geophysical Research, 2005, Vol. 110, No. D10, D10101, doi:10.1029/2004JD005300.
18. Robertson F.R., Bosilovich M.G., Roberts J.B., Reichle R.H., Adler R., Ricciardully L., Berg W., Huffman G.J. Consistency of estimated global water cycle variations over the satellite era // Journal of Climate, 2014, Vol. 27, No. 16, pp. 6135–6154.

**Ссылка на статью:**

Д.М.Ермаков. Использование информации о тропосферной динамике при радиотепловом дистанционном зондировании вертикального профиля влажности атмосферы. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec17/15/text.pdf>