

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ ИСЗ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ.

А.А.Азизов, К.П. Гайкович, С.С.Кашкаров, М.Б. Черняева

В работе рассматривается задача определения высотного профиля показателя преломления по измерениям фазы сигнала навигационных ИСЗ из решения обратной задачи. Соответствующее интегральное уравнение 1-го рода с нелинейным ядром решалось на основе итерационного алгоритма, в котором на каждом шаге решалось линеаризованное уравнение Фредгольма 1-го рода с применением методов статистической регуляризации и Тихонова. По вкладу атмосферного водяного пара, выделенному из восстановленного высотного профиля индекса рефракции, определялся профиль концентрации водяного пара и интегральное влагосодержание в вертикальном столбе атмосферы. С помощью численного эксперимента получены статистические оценки точности возможного определения параметров атмосферы в зависимости от точности измерений для ансамблей метеоданных, соответствующих различным климатическим условиям. Приводятся первые результаты восстановления высотных профилей показателя преломления по данным измерений сигналов ИСЗ навигационной системы «Транзит».

## 1. Введение

Рефрактометрические методы дистанционного зондирования атмосферы находят все более широкое применение по мере развития космических исследований и их приложений к решению проблем метеорологии, связи и навигации. Восстановление высотного профиля показателя преломления по вкладу атмосферы в доплеровский сдвиг сигнала, излучаемого с космического аппарата, широко использовалось при радиопросвечивании атмосфер планет Солнечной системы [1-9] и Земли [10-18]. В ситуации, когда и источник и приемник расположены вне исследуемой атмосферы, задача решается путем применения обратного преобразования Абеля к наблюдаемой зависимости измеряемой величины от прицельного параметра. К аналогичному способу решения сводится задача и в случае внутриатмосферных лимбовых измерений рефракции для восстановления профиля показателя преломления ниже уровня наблюдателя [18-20].

Для случая измерений, когда приемник сигнала ИСЗ находится на поверхности Земли, задача становится некорректной и ее решение существенно усложняется. Задача впервые была сформулирована в [22]. Основные вопросы решения этой некорректной задачи рассматривались в [22-30]. В [19] задача была сведена к линейному уравнению Фредгольма 1-го рода; в [25] было получено последовательное решение этой задачи как некорректной, и этот подход был применен к результатам измерений рефракции звезд в оптическом диапазоне [26-28].

В радиодиапазоне необходимо учитывать дополнительный вклад влажности в показатель преломления, что требует отдельного анализа, который проводился в [24,29-30]. В [29-30]

использовалась связь атмосферного вклада в доплеровский сдвиг частоты сигнала ИСЗ с величиной астрономической рефракции  $\epsilon$  эквивалентного бесконечно удаленного вдоль луча источника, установленная в [23]. Это позволило применить в исследованиях разработанные ранее алгоритмы решения обратной задачи оптической рефракции. Был определен диапазон углов места, информативных для измерения. Этот диапазон ограничен сверху углами, на которых вариации рефракции становятся сравнимыми с погрешностями измерений, что является следствием “теоремы Лапласа” [31]. При точности измерений рефракции  $\delta\epsilon = 1''$  диапазон информативных углов находится при  $\theta_0 \leq 5^\circ$ , а при  $\delta\epsilon = 10''$  - соответственно при  $\theta_0 \leq 2-3^\circ$ . Далее, в [29-30] с помощью численного эксперимента были получены статистические оценки точности восстановления показателя преломления по измерениям доплеровского сдвига частоты сигнала ИСЗ. Кроме того, исходя из заданного уровня погрешности  $\delta\epsilon$ , в [29-30] определены требования к точности определения параметров задачи, таких как доплеровская частота  $\nu_D$ , радиальная и поперечная компоненты вектора скорости  $V_R, V_\perp$ , высота  $H$  спутника, приземное значение индекса рефракции  $N_0$ , высота  $h_0$  пункта наблюдения. Оказалось, что характеристики действовавших в то время навигационных систем типа «Транзит» этим требованиям не удовлетворяли в полной мере. На первом этапе исследований удалось лишь использовать результаты амплитудных измерений сигнала «Транзит» для индикации наличия и определения высоты отражающих слоев над морем [32-33].

В последнее время в связи с введением в действие новых навигационных систем, таких как GPS и GLONASS, которые обладают существенно лучшей частотной стабильностью сигнала и траекторные параметры которых известны с большей точностью, чем в прежних системах, появилась реальная возможность применить развитый в [29-30] метод для дистанционного зондирования параметров атмосферы. Первые шаги на этом пути уже сделаны. Решена задача определения интегрального содержания водяного пара по величине влажной части электрической длины пути радиоволн (ЭДПР), которая получается по данным фазовых измерений сигнала GPS на больших углах места [34-36]. Характеристики российской системы GLONASS [37] также позволяют рассчитывать на успех в решении аналогичных задач. Разрабатываются приемники, способные работать с обоими упомянутыми системами, что может увеличить точность определения атмосферных параметров.

Вместе с тем, имея в виду перспективы решения проблемы на базе более совершенных систем, продолжались попытки извлечь информацию об атмосферных параметрах из полученных данных измерений сигналов «Транзит» на основе более совершенных методик и алгоритмов. Опыт такой работы показал, что использование атмосферного вклада в доплеровскую частоту в качестве

исходной величины для анализа, возможно, не является оптимальным. Во-первых, реально измеряемой величиной является изменение фазы сигнала, то есть для определения доплеровского сдвига необходимо выполнить операцию дифференцирования экспериментальных данных, что, как хорошо известно [38], является некорректной задачей и может приводить к серьезным погрешностям. Особенно это становится существенным на малых (наиболее информативных) углах места, где в эксперименте наблюдались сильные вариации фазы сигнала, существенно превосходящие величины, ожидаемые из расчетов по метеозондовым данным. Во-вторых, процедура пересчета доплеровской частоты в рефракцию связана с использованием нелинейного соотношения между величинами, что также может увеличивать погрешность.

В настоящей работе рассматривается новый подход к решению задачи восстановления профиля показателя преломления (индекса рефракции), основанный на решении интегрального уравнения непосредственно для атмосферного вклада в фазу сигнала. Это уравнение, в отличие от уравнения для рефракции, нелинейно, но, как оказалось, отсутствие упомянутых выше погрешностей приводит к более точному решению и позволило применить развитый подход к имеющимся данным измерений сигналов спутников системы «Транзит».

Оценки точности метода были получены методом численного моделирования с использованием ансамблей метеозондовых данных. Получены также оценки возможной точности определения высотного профиля концентрации водяного пара  $q(h)$ , и интегрального содержания водяного пара  $Q$  по высотному профилю индекса рефракции  $N(h)$ , восстановленному из решения обратной задачи измерений фазы (ЭДПР) на малых углах места. В результате численных экспериментов определены требования к точности информативных измерений.

## **2.Методика восстановления профиля показателя преломления по характеристикам сигнала ИСЗ.**

Геометрия задачи представлена на рис.1. Для исключения вклада ионосферы во всех навигационных системах используется излучение на двух разнесенных частотах, поэтому к этому вопросу мы далее не будем возвращаться. Формулировка обратной задачи относительно фазы сигнала ИСЗ является достаточно сложной проблемой. Реально измеряемой величиной является разность фазы  $\Delta\varphi$  сигнала ИСЗ, измеренной в двух точках его орбиты, которым соответствуют истинные углы места  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$ . Кроме того, известными данными можно считать координаты и компоненты вектора скорости ИСЗ, которые передаются в сигнале закодированном виде вместе с соответствующими данными о времени.

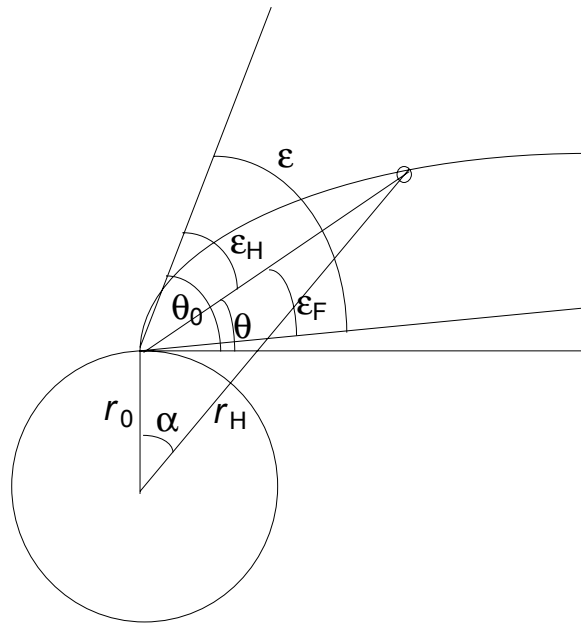


Рис.1.

Разность фаз сигнала источника при углах места  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  может быть представлена как

$$\Delta\varphi = \varphi(\theta_1) - \varphi(\theta_2) = \frac{\omega}{c} \int_{r_0}^{r_{H_1}} n(r) \frac{dr}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_0 r_0 \cos\theta_{0_1}}{nr}\right)^2}} - \frac{\omega}{c} \int_{r_0}^{r_{H_2}} n(r) \frac{dr}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_0 r_0 \cos\theta_{0_2}}{nr}\right)^2}}, \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi\nu$  ( $\nu$  - частота сигнала),  $c$  - скорость света,  $n(r)$  - зависимость показателя преломления атмосферного воздуха от геоцентрического расстояния,  $r_H$  - геоцентрическое расстояние до спутника в двух точках его траектории с высотами над земной поверхностью  $H_1$  и  $H_2$ ,  $r_0$ ,  $n_0$  - радиус Земли и приземное значение показателя преломления, а  $\theta_0$  - углы места прихода луча в точку приема, которые отличаются от истинных углов места на величину атмосферной рефракции  $\epsilon_H$ :

$$\theta_0 = \theta + \epsilon_H, \quad (2)$$

В свою очередь, величина атмосферной рефракции  $\epsilon_H$ , зависящая от координат передатчика, отличается от величины астрономической рефракции (эквивалентного бесконечно удаленного вдоль луча источника)  $\epsilon$  на величину фотограмметрической рефракции  $\epsilon_F$ :

$$\epsilon = \epsilon_H + \epsilon_F \quad (4)$$

где

$$\varepsilon = - \int_{r_0}^{\infty} \frac{d \ln n}{dr} \frac{n_0 r_0 \cos \theta_0}{\sqrt{(nr)^2 - (n_0 r_0 \cos \theta_0)^2}} dr \quad (5)$$

Здесь следует отметить следующее. Наиболее последовательным в математическом смысле способом решения задачи представляется изложенный в [29-30] метод, основанный на определении угла места прихода луча  $\theta_0$  из выражения для доплеровского сдвига частоты сигнала в атмосфере [23]:

$$v_D(\theta) = \frac{v}{cr_H} (p_0 \cos \theta_0 V_{\perp} + \sqrt{r_H^2 - p_{\theta}^2} V_R), \quad (6)$$

где  $p_0 = r_0 n_0$ ,  $p_{\theta} = r_0 n_0 \cos \theta_0$  с последующим решением интегрального уравнения (5), записанного относительно индекса рефракции  $N = 10^6(n-1)$  в виде линейного интегрального уравнения типа Фредгольма 1-го рода:

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon}(p_{\theta}) &= \int_{p_0}^{\infty} N(p) \frac{pp_{\theta}}{(p^2 - p_{\theta}^2)^{3/2}} dp, \\ \tilde{\varepsilon} &= -10^{-6} \varepsilon + p_{\theta} \frac{N(p_0)}{\sqrt{p^2 - p_{\theta}^2}} \end{aligned} \quad (7)$$

и вычислением масштаба высоты из

$$h = \frac{p}{n} - r_0 = \frac{p}{1 + 10^{-6} N(p)}. \quad (8)$$

Однако, как уже отмечалось, такой подход оказался неприменим при интерпретации данных системы «Транзит». В данной работе разработан и применен альтернативный подход, основанный на использовании измерений разности фаз. Соотношение (1) можно записать через разность электрической длины пути радиоволн (ЭДПР), связанную с измеряемой разностью фаз  $\Delta\varphi$  и длин пути  $\Delta l$  (вдоль луча) как

$$\Delta L = L(\theta_1) - L(\theta_2) = \int_0^\infty N(h) \frac{10^{-6} dh}{\sqrt{1 - \left( \frac{n_0 r_0 \cos \theta_{0_1}}{nr} \right)^2}} - \int_0^\infty N(h) \frac{10^{-6} dh}{\sqrt{1 - \left( \frac{n_0 r_0 \cos \theta_{0_2}}{nr} \right)^2}}, \quad (9)$$

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta \varphi - \Delta l$$

где длина пути от точки приема до передатчика вдоль луча  $l$  определяется из

$$l = \int_{r_0}^{r_H} \frac{dr}{\sqrt{1 - \left( \frac{n_0 r_0 \cos \theta_0}{n_0 r_0 \cos \theta_0} \right)^2}} \quad (10)$$

Дальность вдоль луча из-за его кривизны в атмосфере отличается от прямой дальности  $d$  на некоторую величину  $\Delta d$ , которую следует учитывать при анализе, т.е.

$$l = d + \Delta d . \quad (11)$$

Для измерений разности фаз, начиная от некоторого фиксированного значения угла места  $\theta_2$ , соотношение (9) переходит в

$$\Delta L(\theta) = L(\theta) - L(\theta_2) = \int_0^\infty N(h) 10^{-6} \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{n_0 r_0 \cos \theta_0}{nr} \right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{n_0 r_0 \cos \theta_{0_2}}{nr} \right)^2}} \right) dh \quad (12)$$

Разность ЭДПР (12) может также определяться по времени распространения сигнала от спутника до приемника из кодов времени, передаваемых в сигнале ИСЗ. В частности, в системе GPS такую информацию содержат коды P и C/A. Передаваемая в кодах сигнала траекторная информация имеет некоторую избыточность, что также может использоваться для выбора наиболее надежных данных. Для исключения ошибок в ходе часов применяется метод разностных измерений для двух разнесенных пунктов с точно известными координатами и метод двойных разностей, когда в этих двух пунктах сравниваются разностные сигналы двух спутников [34-36]. В первом случае исключается погрешность хода часов спутника, во втором - также и хода часов в точке приема.

Итак, задача состоит в решении интегрального уравнения 1-го рода (12) относительно высотного профиля индекса рефракции. Уравнение имеет нелинейное ядро, в которое входит искомый профиль, поэтому представляется естественным применить для его решения итерационный алгоритм. Были применены два варианта. В первом из них на первом шаге итерационного алгоритма в ядро (12) подставлялся средний профиль  $\langle N(h) \rangle$ , вычисленный с использованием ансамбля профилей метеорологического зондирования, а во втором - профиль индекса рефракции, полученный методом статистической экстраполяции от его приземного значения:

$$N^{\partial}(h) = \langle N(h) \rangle + \frac{\mathbf{B}_{NN}(0, h)}{\sigma_N^2(0, 0)} (N_0 - \langle N_0 \rangle), \quad (13)$$

где  $\mathbf{B}_{NN}$  - межуровневая ( по высоте) ковариационная матрица индекса рефракции. Линеаризованное одним из указанных способов уравнение (12) представляет собой интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода. Итерационный алгоритм в операторном виде можно записать как

$$\mathbf{K}(N_{i-1})\vec{N}_i^* = \Delta\vec{L}^{\delta}, \quad (14)$$

где  $\Delta\vec{L}^{\delta}$  - вектор данных заданных с некоторой погрешностью  $\delta$ , звездочка соответствует вектор-строке. Для решения уравнений рассматриваемого типа, которые являются некорректными [38], должны применяться методы регуляризации, вносящие дополнительную априорную информацию о точном решении. В данном случае, так же, как и в [24-30], применялись методы статистической регуляризации и Тихонова. После того, как решение линеаризованного уравнения оказывается получено в первом приближении с использованием любого из методов регуляризации, на следующем шаге итерационного алгоритма в ядро  $\mathbf{K}$  подставляется восстановленный профиль  $N(h)$ . Двух-трех итераций оказывается вполне достаточно для достижения сходимости к приближенному решению.

Существенным моментом постановки задачи является определение вектора данных и угла прихода луча  $\theta_0$  в ядре интегрального уравнения в (12,14). И угол прихода и расстояние до передатчика вдоль луча, входящее в вектор данных, зависят от искомого распределения показателя преломления, что привносит в задачу дополнительную нелинейность. Если при учете нелинейности ядра мы исходим в первом приближении из среднего  $\langle N(h) \rangle$  или статистически экстраполированного профиля  $N^{\partial}(h)$ , то, естественно, этот же профиль должен быть использован

при определении других параметров. Будем исходить из координат передатчика  $(\theta, H)$  - истинного угла места и высоты передатчика над земной поверхностью. Тогда длина трассы по прямой определяется как

$$d = \sqrt{r_0^2 - 2r_0r_H \cos\theta + r_H^2} \quad , \quad (15)$$

а центральный угол  $\alpha$ , отсчитываемый от положения приемника (см. рис.1) можно вычислить из

$$\alpha = \arcsin\left[\frac{d}{r_H} \cos(\theta)\right]. \quad (16)$$

Этот же угол определяется интегрированием до высоты передатчика вдоль пути луча:

$$\alpha = \int_{r_0}^{r_H} \frac{n_0 r_0 \cos\theta_0}{nr^2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_0 r_0 \cos\theta_0}{nr}\right)^2}} dr. \quad (17)$$

Условие равенства (16) и (17) определяет угол прихода луча  $\theta_0$ , соответствующий заданным профилю показателя преломления и положению передатчика. Это значение используется как в ядре интегрального уравнения (12,14), так и в (10) для определения дальности  $l$  вдоль пути луча, которая также используется в (12,14) при определении  $\Delta L$ . На последующих шагах итерационного процесса для аналогичных целей используется уже профиль показателя преломления, восстановленный из решения уравнения (12,14). Можно также использовать на первом шаге итерационного процесса значение угла  $\theta_0$ , определенное из (6) по доплеровскому сдвигу частоты, если соответствующая ошибка меньше величины естественных вариаций рефракции.

Кратко опишем методы регуляризации, использованные для решения задачи на каждом шаге итерационного алгоритма. В *методе статистической регуляризации* (или максимальной энтропии) [39] решение ищется на априорном ансамбле, заданном межуровневой (по высоте) ковариационной матрицей индекса рефракции  $\mathbf{B}_{NN}$ , где плотность вероятности определяется из условия максимума энтропии (минимума дополнительной информации) об искомом векторе  $\vec{N}$ . Мера сглаживания приближенного решения зависит от ковариационной матрицы погрешностей данных измерений  $\mathbf{W}$ . В данной работе полагалось, что ошибки измерений некоррелированы, поэтому в матрице  $\mathbf{W}$  ненулевыми являются лишь диагональные элементы, равные дисперсиям правой части (14) на соответствующих углах места. Апостериорное распределение находится по



формуле Бейеса, а средний по этому распределению вектор  $\bar{N}$  при заданной правой части  $\Delta\bar{L}$  определяет решение

$$\bar{N} = \langle \bar{N} \rangle + (\mathbf{K}^* \mathbf{W}^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{B}_{NN}^{-1}) \mathbf{K}^* \mathbf{W}^{-1} (\Delta\bar{L}^\delta - \langle \Delta\bar{L} \rangle) \quad (18)$$

В методе статистической регуляризации при стремлении к нулю погрешностей измерений решение сходится к точному в среднеквадратичном смысле.

Метод Тихонова [38] в форме принципа обобщенной невязки, использует весьма общую информацию о квадратичной суммируемости искомой функции и ее производной, а также увязывает меру сглаживания решения с уровнем интегральной погрешности данных измерений  $\delta L$ , определяемая как

$$\delta L^2 = \|\mathbf{K}\bar{N} - \Delta\bar{L}^\delta\|_{L_2}^2 = \frac{1}{\theta_2 - \theta_1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [\Delta L(\theta) - \Delta L^\delta(\theta)]^2 d\theta \quad (19)$$

где  $\Delta L$  - правая часть (14), которая соответствует точному решению  $N(h)$ ,  $\Delta L^\delta$  - данные, измеренные с некоторой ошибкой,  $\|x\|_{L_2}^2$  - норма функции  $x$  в пространстве  $L_2$  [38].

В методе Тихонова [38] приближенное решение минимизирует сглаживающий функционал

$$M^\alpha(N) = \|\mathbf{K}_h \bar{N} - \Delta\bar{L}\|_{L_2}^2 + \alpha \|\bar{N}\|_{W_2^1}^2, \quad (20)$$

т.е. может быть найдено путем его минимизации. В приведенных выше соотношениях

$\|N\|_{W_2^1}^2 = \frac{1}{h^{\max}} \int_0^{h^{\max}} [N(h)^2 + (h^{\max} \frac{dN(h)}{dh})^2] dh$  обозначает норму функции  $N(h)$  как элемента

функционального пространства  $W_2^1$  (пространство квадратично суммируемых функций, имеющих квадратично суммируемые производные) [38],  $\mathbf{K}_h$  - приближенное ядро уравнения. Задача минимизации выпуклого функционала, каковым является (20) после соответствующей дискретизации сводится к своему конечномерному аналогу, представляющему собой хорошо изученную с вычислительной точки зрения задачу квадратичного программирования, и решается стандартными градиентными методами. В данной работе применялся метод сопряженных градиентов (в [38] приводится его алгоритм на языке Fortran). Численная реализация метода, в данной работе написанного на языке Borland Pascal 7.0, решает задачу время около секунды на персональном компьютере типа IBM Pentium-200.

Принципиальным элементом уравнения (20) является параметр регуляризации  $\alpha$ , который определяет степень сглаженности приближенного решения. Именно второе (стабилизирующее) слагаемое в (20) обеспечивает выпуклость, а, следовательно, и саму возможность минимизации функционала и решения задачи. Полученное решение выделяет среди множества функций, удовлетворяющих исходному некорректному уравнению такую, которая является минимальной в смысле используемой нормы стабилизирующего слагаемого  $W_2^1$ , содержащей и саму функцию и ее производную, т.е. реализует условие некоторого компромисса минимальности по абсолютной величине и гладкости для искомой функции. Если искать решение как отклонение от разумного среднего и модельного распределения, то минимизироваться будет именно отклонение от этого распределения, что может использоваться для разработки оптимальных алгоритмов.

Как показано в [38], параметр регуляризации, и это является фундаментальным достоинством метода обобщенной невязки, оказывается однозначно связанным с интегральной мерой погрешности данных (числом), убывая по мере убывания уровня погрешности, но более медленно. При этом по мере увеличения точности роль второго стабилизирующего слагаемого в (20) постепенно уменьшается. Параметр  $\alpha$  находится как корень одномерного нелинейного уравнения обобщенной невязки:

$$\rho(\alpha) = \|\mathbf{K}_h \vec{N}^\alpha - \Delta \vec{L}^\delta\|_{L_2}^2 - \delta^2 = 0, \quad (21)$$

где  $N^\alpha$  - функция, минимизирующая функционал (20), т.е. алгебраическое уравнение (21) решается совместно с функциональным уравнением (20). Смысл (21) состоит в том, что норма невязки полученного решения должна быть в точности равна норме погрешности, поскольку нет оснований минимизировать отклонение от данных измерений за пределами уровня ошибок. В уравнение (21) входит параметр эффективной погрешности  $\delta$ , который должен быть определен априори, исходя из конкретных условий решения задачи. Этот параметр должен включать в себя все составляющие ошибок измерения и интерпретации. В частности, в  $\delta$  должна быть включена ошибка измерений  $\delta L$ , как случайная, так и систематическая. В рамках метода может быть учтена также погрешность ядра  $\mathbf{K}_h$ , которая включает в себя погрешность линеаризации и дискретизации при численном решении:

$$\delta_h^2 = \|\mathbf{K}_h \vec{N} - \mathbf{K} \vec{N}\|_{L_2}^2, \quad (22)$$

где  $\mathbf{K}_h$  - задаваемое при решении (14) приближенное ядро. Указанные погрешности могут приводить также к несовместности вектора данных с решаемым уравнением, поскольку сглаживающее действие ядра ограничивает класс возможных реализаций  $\Delta L(\theta)$ , и при наличии случайной погрешности функция  $\Delta L^\delta(\theta)$  может выйти из допустимого класса, т.е. ни при каком распределении  $N(h)$  невозможно получить измеренное распределение  $\Delta L^\delta(\theta)$ . Мера несовместности  $\delta_\mu$  не может, естественно, превосходить суммарной погрешности ядра и измерений:

$$\delta_\mu^2 = \|\mathbf{K}_h \vec{N} - \Delta \vec{L}^\delta\|_{L_2}^2 \leq (\delta L + \delta_h)^2 . \quad (23)$$

Таким образом, в качестве параметра эффективной погрешности принимается

$$\delta^2 = (\delta L + \delta_h)^2 + \delta_\mu^2, \quad (24)$$

где учтены ошибки измерений, дискретизации, линеаризации и других неточностей описания ядра, а также зависящая от этих факторов мера возможной несовместности уравнения со своей правой частью. В методе Тихонова значения входящих в (24) параметров должны представлять собой соответствующие оценки по максимуму на классе возможных реализаций для искомой функции. При этом величина параметра регуляризации  $\alpha$ , а следовательно, и степень сглаженности решения, определяются одним числом - значением параметра эффективной погрешности  $\delta$ . Последнее обстоятельство является весьма существенным достоинством метода, поскольку теперь субъективизм исследователя переносится с области интерпретации экспериментальных данных на оценку погрешности своих измерений. Поскольку оценка погрешности всегда содержит некоторую неопределенность, существует возможность выбора стратегии решения. Так, если ставится задача заведомого исключения несуществующих деталей в решении, то лучше принять оценку погрешности с некоторым избытком, что, конечно может привести к заглаживанию некоторых реальных деталей тонкой структуры. Если при решении задачи более важным представляется не пропустить эти детали, то следует принять наименьшую ошибку из области ее реально возможных значений. В этом случае, однако, становится возможным появление в решении и не существующих реально (ложных) деталей. Правильная оценка ошибки дает оптимальное в смысле метода Тихонова решение. После определения величины  $\delta$  процедура получения конечного результата становится формальной.

Очень важное преимущество метода обобщенной невязки по сравнению с другими известными методами состоит в том, что при стремлении  $\delta$  к нулю в интегральной метрике

приближенное решение сходится к точному равномерно, т.е. в метрике, где нормой является максимум модуля, хотя, как правило, в отличие от корректных задач, скорость сходимости не пропорциональна уменьшению  $\delta$ , а более медленная. Равномерная сходимость позволяет использовать максимум модуля отклонения решения от точного для типичных распределений индекса рефракции в качестве меры точности восстановления и не привлекать для анализа статистические ансамбли.

## 2.Методика нахождения параметров атмосферы по профилю индекса рефракции.

В радиодиапазоне для безоблачной атмосферы индекс рефракции (приведенный показатель преломления) определяется соотношением [31]:

$$N = K_1 \frac{P}{T} + K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} , \quad (25)$$

где  $K_1 = 77,607 \pm 0,013$  °К/мбар,  $K_2 = - 6,007 \pm 8,5$  °К/мбар,  $K_3 = (3,747 \pm 0,031) \cdot 10^5$  °К<sup>2</sup>/мбар,  $P$  - давление воздуха,  $e$  - парциальное давление водяного пара,  $T$  - абсолютная температура.

Зная высотное профиль индекса рефракции  $N(h)$ , из (25) можно найти высотное распределение парциального давления водяного пара, считая известной температуру и давление:

$$e(h) = \frac{N(h) - K_1 \frac{P}{T}}{\frac{K_2}{T} + \frac{K_3}{T^2}} , \quad (26)$$

и, далее, можно определить профиль плотности :

$$\rho(h) \cong 2,16 \frac{e(h)}{T} , \quad (27)$$

интегральное содержание водяного пара в атмосфере:

$$Q = \int_0^{\infty} \rho(h) dh , \quad (28)$$

и высотный профиль концентрации (удельной влажности) водяного пара:

$$q(h) = \frac{0,6e(h)}{P - 0,37e(h)}, \quad (29)$$

Очевидно, что при определении характеристик влагосодержания из восстановленного профиля индекса рефракции профили температуры и давления, входящие в (26-29), должны задаваться, исходя из тех или иных модельных представлений, либо из результатов их независимых измерений. Естественные вариации вычитаемого в числителе (26) вклада сухой части индекса рефракции слишком велики, чтобы можно было обойтись в его оценке без использования хотя бы приземного значения давления. При этом естественно считать известной и приземную температуру. Тогда в (26-29) используется модельный линейный профиль температуры со стандартным градиентом температуры 6,5 К/км :

$$T(h) = T_0 - 6,5 h. \quad (30)$$

и соответствующий профиль давления вычисляется из профиля температуры (30) по барометрической формуле с использованием приземного значения давления  $P_0$ .

### 3. Статистические оценки точности определения атмосферных параметров.

В данной работе проводится численный эксперимент с использованием тех же статистических ансамблей радиозондовых данных (по 80 профилей для одного времени суток в каждом для климатических условий ЕТ РФ и тропического океана), что и в [25-29]. Схема численного эксперимента включала расчет разности ЭДПР  $\Delta L(\theta_0)$  и интегрального содержания водяного пара  $Q$  по зондовым профилям метеопараметров; набрасывание случайной нормально распределенной погрешности с заданной дисперсией  $\delta L^2$  на правую часть (14); решение (14) с применением одного из методов регуляризации; вычисление по восстановленному профилю индекса рефракции профилей концентрации водяного пара и его интегрального содержания; статистический анализ погрешностей определения атмосферных параметров с целью определения зависимости точности восстановления от уровня моделируемой погрешности. Полагалось, что задаваемая при моделировании ошибка включает в себя все виды ошибок, кроме погрешности линеаризации.

Как обычно [см. 25-29], решение обратной задачи включает расчеты средних значений и среднеквадратичных естественных вариаций измеряемых и восстанавливаемых величин с целью получения исходных критериев для качества измерений и восстановления. Результаты такого анализа для решения обратной задачи, а именно, расчеты вариаций рефракции, а также ее вариаций при фиксированном приземном значении индекса рефракции, определяющие информативность измерений, представлены в [29]. Здесь мы приведем данные о связанных с погодной изменчивостью вариациях параметров для рассматриваемой обратной задачи фазовых измерений. В табл. 1 представлены результаты для ансамбля данных ЕТ РФ, соответствующие летним континентальным условиям.

Табл.1

$\theta_0$	0,5°	1°	2°	5°	10°	20°	60°	90°
$\langle L \rangle$ , см	8102	6680	4851	2528	1359	704,6	280,1	242,5
$\sigma_L$ , см	267	185	112	50	26	13	5,3	4,6
$\sigma_L/N_0$ , см	49	48	42	23	12	6,3	2,5	2,2
$\langle \Delta d \rangle$ , см	248	147	60	9,3	1,4	-	-	-
$\sigma_d$ , см	38	18	5,6	0,7	0,1	-	-	-
$\langle \epsilon \rangle$	0,58°	0,48°	0,35°	0,18°	-	-	-	-
$\sigma_\epsilon$	2'35"	1'55"	1'13'	33"	-	-	-	-
$\sigma_\epsilon/N_0$	41"	21"	7"	1"	-	-	-	-

Для тропических условий все вариации и погрешности возрастают примерно в 1,5 - 2 раза. Помимо погодных вариаций, приведенных в табл.1, в естественную изменчивость приведенных величин добавляется суточная и сезонная динамика. Суточная динамика имеет приблизительно тот же порядок величины, а сезонная может быть существенно больше. Из табл.1 видно, что для информативных измерений уровень суммарной погрешности правой части  $\delta L$  в (14) не должен превышать величины естественных погодных вариаций  $\sigma_L$ , а более строго - величины вариаций при известном приземном значении показателя преломления  $\sigma_L/N_0$ . Погрешность определения  $L$  в системе GPS составляет в настоящее время не хуже 1,5 см для зенитного направления [34-36], что позволяет считать, что уровень информативности измерений достигнут.

Точность определения ЭДПР на низких углах места для навигационных систем, включая GPS, точно неизвестна, поскольку все приложения систем и исследования относились к достаточно высоким углам места. Поэтому в численном моделировании исследовалась

зависимость точности восстановления от уровня ошибок в широком интервале их значений. Оказалось, что измерения в этом интервале являются информативными, причем даже без использования приземного значения индекса рефракции, то есть в ядро уравнения (12,14) на первом шаге может подставляться среднее, а не экстраполированное от приземного значения распределение (13). Исходя из этого, удалось разработать метод в варианте, где не используются никакие другие измерения, кроме параметров спутникового сигнала и в котором приземное значение индекса рефракции также получается из решения обратной задачи.

Результаты показали, что так же, как и при решении задачи рефракции из измерений доплеровской частоты в [29], практически вся информация о высотном профиле индекса рефракции содержится в данных о фазе сигнала на углах места ниже  $5^\circ$ , поэтому в численных экспериментах были использованы значения ЭДПР на углах места от  $0,5^\circ$  до  $5,5^\circ$  (11 углов). В рассмотренном интервале моделируемых ошибок дальнейшее увеличение числа и интервала углов практически не влияло на точность восстановления.

На рис.2а представлена зависимость погрешности восстановления профиля индекса рефракции для различного уровня моделируемой ошибки (постоянной по углу места) для случая применения метода статистической регуляризации в итерационном алгоритме. На рис.2б можно видеть соответствующие результаты для метода Тихонова. Уровень стандартного отклонения моделируемой ошибки в представленных данных перекрывает большой диапазон ( $\sigma L = 1,5; 100$  и  $500$  см).

Статистический анализ в аспекте сравнения двух методов требует установления связи интегральной ошибки (19) метода Тихонова со стандартным отклонением  $\sigma L$  и средним значением (систематической ошибкой)  $\Delta_L$  моделируемой случайной погрешности. Это непростая задача, поскольку оценка (19) по максимуму приводит к излишнему заглаживанию большей части данных. Если исходить из минимальной среднеквадратичной погрешности восстановления, то наилучшие результаты получались, когда использовалось не максимальное, а среднее значение (19), для которого можно получить простое соотношение:

$$\delta L^2 = \frac{1}{\Delta\theta} \int_{\theta_1}^{\theta_2} < [\Delta L(\theta) - \Delta L_m^\delta(\theta)]^2 > d\theta = \frac{1}{\Delta\theta} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [\sigma L^2(\theta) + \Delta_L^2(\theta)] d\theta \quad (31)$$

При постоянных параметрах  $\Delta_L$  и  $\sigma L$

$$\delta L = \sqrt{\sigma L^2(\theta) + \Delta_L^2(\theta)} \quad (32)$$

Можно видеть, что при нулевой систематической ошибке  $\delta L = \sigma L$ . Наоборот, при нулевой случайной ошибке  $\delta L = \Delta_L$ .

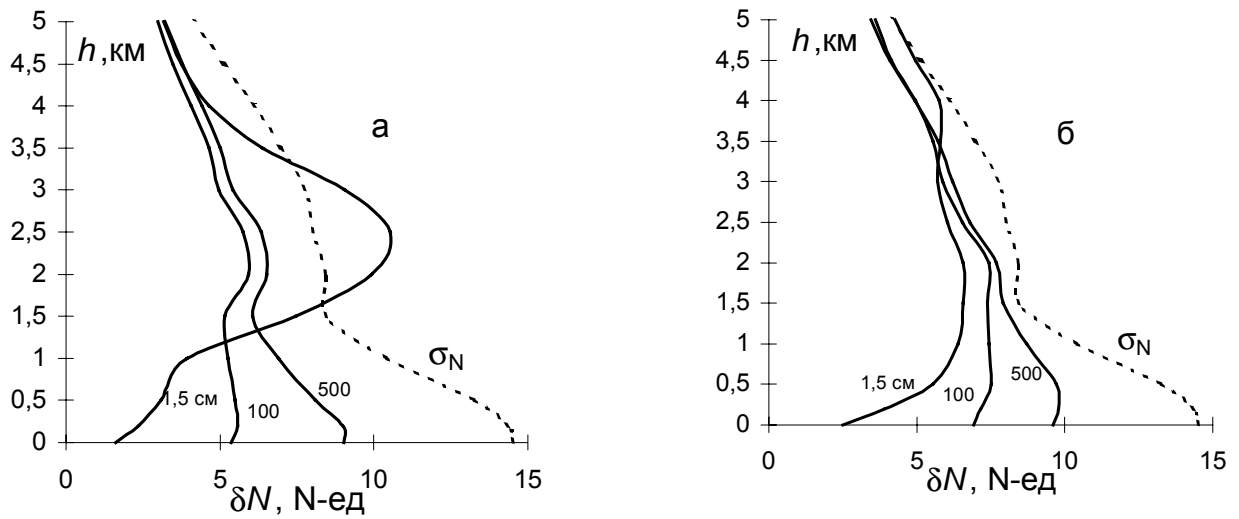


Рис.2.

Видно, как точность восстановления профилей индекса рефракции зависит от уровня моделируемой погрешности. Даже при уровне погрешности разности ЭДПР  $\delta L = 5$  м измерения оказываются информативными несмотря на то, что этот уровень превышает величину естественных вариаций. Этот, на первый взгляд, странный результат связан с коррелированностью фазы по узлу места, которая при некоторой статистической избыточности дискретизации по углу места приводит к уменьшению эффективной среднеквадратичной погрешности данных, что свидетельствует о целесообразности увеличения числа точек по углу места, если есть основания считать погрешность некоррелированной.

В методе статистической регуляризации при малой моделируемой ошибке данных проявляется роль неучтенной погрешности, связанной с нелинейностью ядра уравнения (14), которая в этом случае заведомо превышает моделируемый уровень ошибки. Для  $\delta L = 1,5$  см эффект проявляется в результатах восстановления на высотах больше 1 км (см. рис.2а). Метод Тихонова позволяет гибко учитывать погрешность ядра, связанную с линеаризацией, включая ее в параметр ошибки  $\delta$  (24). Так, при  $\delta L = 1,5$  см наилучшие результаты в методе Тихонова получались при величине  $\delta = 5$  см на первом шаге итерационного процесса. Надо отметить, что некоторое преимущество метода статистической регуляризации в среднеквадратичной точности восстановления не свидетельствует о том, что метод Тихонова хуже, поскольку метод



статистической регуляризации по определению минимизирует эту ошибку для данного статистического ансамбля. Ясно, что при наличии вариаций, связанных с суточной и сезонной динамикой, а также для других климатических условий, потери в точности для метода статистической регуляризации будут неизбежны, тогда как метод Тихонова свободен от таких ограничений. Более того, анализ восстановления конкретных профилей показывает, что метод Тихонова является более чувствительным и дает лучшее качество восстановления, но, при неизбежном в статистическом ансамбле наличии редких больших погрешностей, чувствительность метода приводит к большим отклонениям и потерям в среднеквадратичной точности. Наконец, стоит напомнить, что для метода Тихонова естественной мерой погрешности является не среднеквадратичная ошибка, а отклонение по максимуму модуля.

На рис.3 представлены среднеквадратичные погрешности восстановления профилей концентрации по восстановленному двумя методами индексу рефракции (рис.3а - метод статистической регуляризации, рис.3б - метод Тихонова) на основе описанной выше методики, где используются дополнительные данные о значениях приземной температуры и давления.

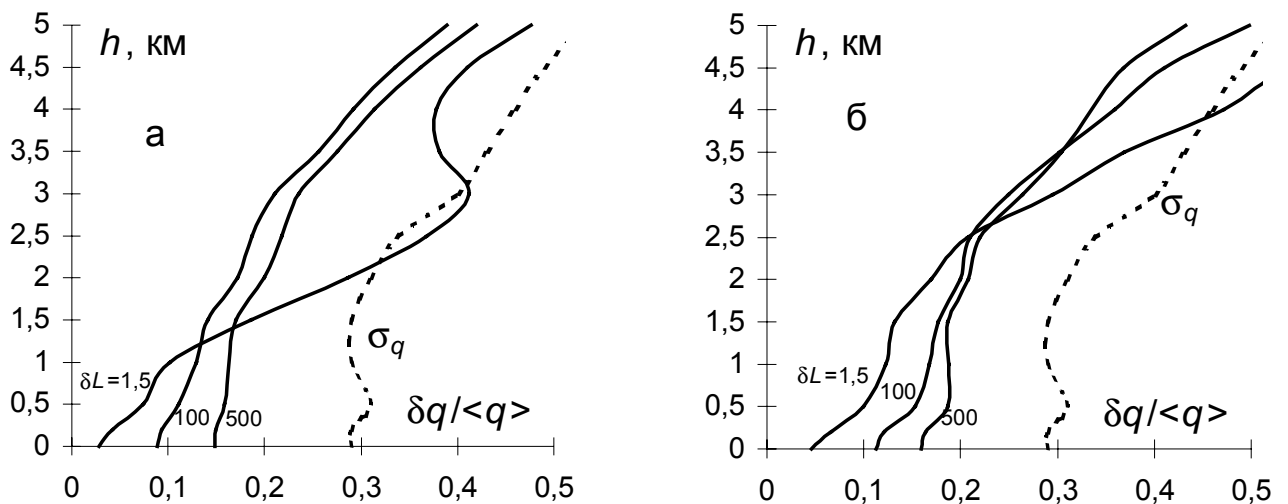


Рис.3

Можно видеть, что предложенный метод весьма эффективно уменьшает априорную неопределенность в профиле концентрации водяного пара, представленную величиной стандартного отклонения естественных вариаций концентрации водяного пара (отнесенных к средним значениям на соответствующих высотах). Отметим, что если вместо линейного профиля (30) использовать точный профиль температуры, результаты улучшатся незначительно, причем, главным образом, в интервале высот выше 2 км.

Величина интегрального влагосодержания  $Q$  в [34-36] определяется по значению ЭДПР в зенитном направлении, которое легко вычисляется из разности фаз сигнала на высоких углах места. Между этими величинами существует связь, близкая к детерминированной [40]:

$$L(\pi / 2) = 0,22717P_0 + (0,107 + \frac{1729,1}{T})Q, \quad (33)$$

куда входит единственный, вносящий небольшую неопределенность, параметр - средняя (с некоторым весом по высоте) температура. Для ансамбля данных, использованных в данной работе справедливо регрессионное соотношение для статистической оценки  $L$  по величине  $Q$ :

$$L(\pi / 2) = 2,09 + 0,22717P_0 + 5,9Q. \quad (34)$$

Из (33)-(34) легко получаются полученные в [34-36] оценки точности определения величины  $Q$ . При достигнутой точности измерений  $\delta L(90^\circ) = 1,5$  см погрешность определения интегрального влагосодержания составляет  $\delta Q = 0,2$  г/см<sup>2</sup> или 2 мм осажденной воды (при условии, что известно приземное значение давления воздуха, входящее в соответствующие формулы). Погрешность определения  $Q$  из (33)-(34), связанная с неточностью определения приземного давления, составляет 2 мм/мбар.

Показанная в данной работе возможность использования измерений фазы только на низких углах места ( $\theta_0 \leq 5^\circ$ ), где измерения информативны даже при погрешностях, превышающих 1 м, позволяет рассчитывать как на определение профиля концентрации водяного пара, так и его интегрального содержания путем интегрирования этого профиля из (28) при существенном снижении требований к точности определения орбитальных параметров, что, возможно, позволит отказаться от методов многопозиционных измерений, применяемых с целью уменьшения траекторных ошибок до требуемого уровня. Следует также отметить, что многие спутники не поднимаются достаточно высоко над горизонтом, чтобы применять методику [34-36], связанную с использованием измерений на высоких углах места, так что метод, использующий измерения на малых углах позволяет уменьшить среднее время между измерениями.

На рис.4 представлены погрешности определения  $\delta Q$  из восстановленных профилей индекса рефракции по измерениям фазы на углах места  $\theta_0 \leq 5^\circ$  в зависимости от величины погрешности измерений. Сплошными линиями представлены результаты для метода Тихонова, а пунктиром - для метода статистической регуляризации. Показаны погрешности определения полной массы водяного пара  $\delta Q/T_0$  при учете линейного профиля (30) и  $\delta Q/T(h)$  при

использовании точного профиля температуры по сравнению с величиной среднеквадратичных погодных вариаций  $\sigma_Q$ . В данном случае способ учета температуры в (26-29) оказался существенным. Можно видеть, что если имеется возможность учесть текущий профиль температуры из результатов его независимых измерений, то в интервале ошибок  $\delta L < 50$  см точность определения  $Q$  значительно возрастает.

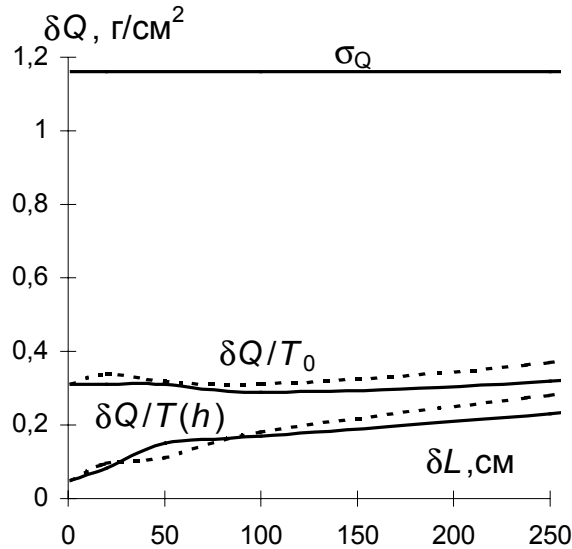


Рис.4.

Можно также видеть, что результаты применения метода Тихонова для задачи определения полной массы водяного пара оказались в целом более точными по сравнению с методом статистической регуляризации, что является объективным количественным подтверждением приведенных выше аргументов в пользу лучшего качества восстановления с использованием этого метода. Приведенные результаты показывают, что метод, основанный на измерениях при малых углах места, дает сравнимые с [34-36] точности определения полной массы водяного пара при существенном (на два порядка) снижении требований к точности фазовых измерений и наличии преимуществ, связанных с небольшим интервалом времени измерений и независимостью от траектории спутника.

#### **4. Результаты восстановления по данным измерений параметров сигналов системы «Транзит».**

В 1993 г в Звенигородской лаборатории ИФА РАН в пункте с точно известными координатами был выполнен цикл измерений сигналов навигационной системы «Транзит» (частоты 400 и 150 МГц). При измерениях использовался приемник «Челн-1» с двумя антеннами

типа волновой канал на каждый из каналов с шириной диаграммы направленности около  $40^\circ$ . Действительное значение частоты опорного генератора не выходило за пределы  $\pm 1 \cdot 10^{-11}$  и непрерывно контролировалось по сигналам радиостанции РБУ с помощью фазового компаратора. Точность измерений фазы составляла  $1/160$  часть фазового цикла. Номинальная точность определения доплеровской частоты при реализованных параметрах системы составляла около  $0,005$  Гц, что по замыслу должно было позволить реализовать точность определения рефракции  $5''$ , при которой измерения были бы информативны для восстановления профиля индекса рефракции согласно [29]. В реальности из-за сильных вариаций фазы на малых углах места  $\theta_0 \leq 5^\circ$  среднеквадратичная ошибка в определении доплеровской частоты составила  $0,28$  Гц, что привело к ошибкам определения угла прихода луча и, соответственно, к ошибкам в определении рефракции  $\delta \epsilon = 4,5'$ , которые, как можно видеть из табл.1, превышают величину погодных вариаций. Такие измерения, следовательно, являются неинформативными для решения обратной задачи рефракции по методике [29].

Помимо погрешностей, связанных с возможным возрастанием влияния турбулентности, влияния помех сигнала, отраженного от земной поверхности, а также возрастания роли горизонтальных неоднородностей атмосферы, следует отметить, что весьма вероятной причиной наблюдаемой в эксперименте сильной фазовой изменчивости на малых углах места может быть тонкая структура вертикальной стратификации приземного слоя атмосферы (толщиной порядка  $100$  м). Используемые для анализа метеозондовые данные не обладают необходимой для исследования этой тонкой структуры разрешающей измерений способностью по высоте, поэтому соответствующие вариации фазы не могут быть определены на основе расчетов. Это свидетельствует о необходимости специальных исследований с привлечением необходимых методов измерений параметров приземного слоя. Тогда, можно надеяться, что разработанный метод, может оказаться эффективен и для восстановления тонкой структуры профиля индекса рефракции в приземном слое.

В описываемом эксперименте ошибка определения разности ЭДПР, связанная с погрешностью измерения фазы, составляла около  $1$  см. Определяющую роль в ошибку правой части (12,14) вносила, очевидно, неопределенность разности расстояний вдоль луча, связанная с погрешностью определения орбитальных параметров. Номинальная точность передаваемых координат в системе “Транзит” составляет  $10 - 20$  м, однако, как показывают оценки вклада разности расстояний вдоль луча в погрешность разности ЭДПР на короткой дуге в интервале углов места  $\theta_0 \leq 5^\circ$ , который спутник проходит за  $1 - 2$  мин, соответствующая ошибка должна быть не более  $1$  м. Имеет место сильная зависимость траекторной ошибки от конкретной орбиты спутника. Встречающиеся иногда потери фазового цикла, связанные с сильными вариациями фазы

на низких углах места также не превосходят указанной погрешности. Такой уровень точности, как показано в приведенных результатах численных экспериментов, является информативным для восстановления профиля индекса рефракции.

С учетом всех факторов, влияющих на точность измерений, из полученных данных для дальнейшего анализа было отобрано около 30 случаев. В ряде случаев в течение короткого времени удавалось измерить фазовые зависимости для нескольких спутников, что позволяло путем усреднения получить более надежные результаты. К сожалению, одновременные независимые метеозондовые измерения не проводились, поэтому определялись лишь приземные метеопараметры в точке приема.

Поскольку условия реального эксперимента не слишком хорошо соответствовали примененным в статистическом анализе ансамблям метеоданных и соответствующие ковариационные матрицы могли бы быть неадекватными реальности, для восстановления по данным реальных измерений был использован метод Тихонова. Результаты решения обратной задачи (14) без использования информации о независимо измеренных приземных значениях индекса рефракции позволили оценить их среднеквадратичное отклонение от восстановленных из решения обратной задачи значений, которое составило  $7,3 N$ -ед, что близко к оценке ошибки для  $\delta L=100$  см (см. рис.2). На рис.7 приведен пример восстановления высотного профиля индекса рефракции для 15.11.93. Кружком представлено приземное значение индекса рефракции в точке приема, определенное из прямых измерений давления, температуры и влажности.

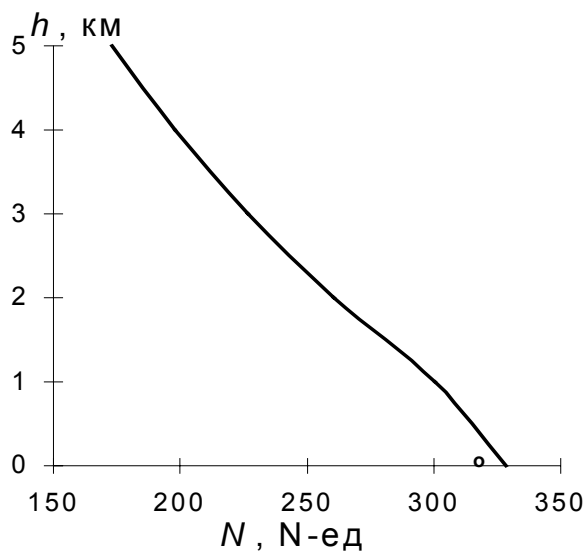


Рис.7.

Параметры влагосодержания не восстанавливались, поскольку измерения проводились в основном при отрицательных или близких к ним температурах, когда влагосодержание столь мало, что трудно рассчитывать информативность соответствующих оценок при реализованном уровне точности.

## 5. Заключение

Разработан итерационный метод восстановления по наблюдаемой низких углах места фазовой зависимости сигналов навигационных ИСЗ высотных профилей индекса рефракции и связанных с ними атмосферных параметров: концентрации водяного пара его интегрального содержания. Определены среднеквадратичные указанных параметров в зависимости от величины моделируемой погрешности измерений рефракции.

Метод применен для восстановления профилей показателя преломления по данным измерений характеристик сигналов спутниковой навигационной системы «Транзит». Результаты показывают наличие перспективы применения развитой методики для дистанционного зондирования параметров атмосферы с использованием более совершенных навигационных систем GPS и GLONASS.

Авторы признательны проф. А.С.Гурвичу за внимание к работе и полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке CRDF, grant No. RG2-357.

Институт физики атмосферы РАН

Научно-исследовательский радиофизический институт

Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского

Статья поступила в редакцию 28 ноября 1997 г.

1. Kliore A.J., Gain D.L., Levy G.S., Eshelman V.R. // Astronaut and aeronaut. 1965. N T-7.P. 72.
2. Lions J.R., Sweetnam D.L., Eshleman V.R. et al. // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. N 13. P. 14.987.
3. Fjeldbo G., Eshleman V.R. // Radio Sci., 1969, v.4, No.10, p.879-897.
4. Kliore A.J., Fjeldbo G., Seidel B. // Radio Sci., 1970, v.5, No.2, p.373-380.
5. Kliore A.J., Patel J.R., Seidel B. et al. // J. Geophys. Res., 1980, v.85, No.A-11, p.5857-5870.
6. Lindal G.F., Sweetnam D.L., Eshleman V.R // Astron J., 1985, v.90, No.6, p.1136-1146.
7. Lindal G.F., Lions J.R., Sweetnam D.L. et al. // J. Geophys. Res., 1987, v.92, No.A-13, p.14.987-15.001.
8. Lindal G.F., Lions J.R., Sweetnam D.L. et al. // J. Geophys. Res., 1990, v.17, No.10, p.1733-1736.
9. Колосов М.А., Яковлев О.И., Круглов Ю.М. и др.// Радиотехника и электроника, 1972, т.17, N.12, с.2483-2490.
10. Гречко Г.М, Гурвич А.С., Романенко Ю.В., Савченко С.А., Соколовский С.В. // Доклады АН СССР, 1979, N 4, с.828-831.
11. Соколовский С.В. // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1981, т.17, N 6, с. 574-579.
12. Гурвич А.С., Кан В., Попов Л.И., Рюмин В.В., Савченко С.А. // Изв.АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1982, т.18, N 1, с. 3-7.
13. Гайкович К.П., Наумов А.П. // Исследование Земли из космоса, 1983, N 4, С.25.
14. Гайкович К.П. // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1984, т.20, N 8, С.675.
15. Соколовский С.В. // Изв.АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1986, т.22, N 8, с. 890-892.
16. Волков А.А., Гречко Г.М, Гурвич А.С. и др. // Изв.АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1987, т.23, N 11, с. 1228-1230.
17. Гречко Г.М, Гурвич А.С., Казбанов В.А. и др. // Труды ГОИ, 1989, т.71, вып.205, 121 с.
18. Бесчастнов С.П., Гречко Г.М, Гурвич А.С. и др. // Изв.АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1984, т.20, N4, с.231.
19. Гайкович К.П., Гурвич А.С., Наумов А.П. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1983. Т. 19. N 7. С.675.
20. Бесчастнов С.П., Гречко Г.М., Гурвич А.С., и др. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1984. Т. 20. N 2. С.231.
21. Загоруйко С.В., Кан В. // Радиотехника и электроника, 1984, т.29, N 5, С.95.
22. Павельев А.Г. // Радиотехника и электроника, 1980, т.25, N12, с.2504-2509.
23. Колосов М.А., Павельев А.Г. // Радиотехника и электроника, 1982, т.27, N.12, с.2310-2317.
24. Арманд Н.А., Андрианов В.А., Смирнов В.М. // Радиотехника и электроника, 1987, т.32, N4, с.673-680.

25. Гайкович К.П., Сумин М.И. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1986. Т. 22. N 9. С. 917.
26. Василенко Н.А., Гайкович К.П., Сумин М.И. // ДАН СССР. 1986. Т. 290. N 6. С. 1332.
27. Василенко Н.А., Гайкович К.П., Сумин М.И. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1986. Т. 22. N 10. С. 1026.
28. Василенко Н.А., Гайкович К.П., Черняева М.Б. // Изв. Вузов. Радиофизика. 1997. Т. 40. N 6. С. 682.
29. Гайкович К.П. //Изв. Вузов. Радиофизика. 1992. Т. 35. N 3-4. С. 211.
30. Gaikovich K.P. // Digest of IGARSS'94, Pasadena, USA, August 8-12, 1994. V.1. P.7.
31. Колосов М.А., Шабельников А.В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры, Марса. М: Сов. радио, 1976, 219 С.
32. Богатуров А.Н., Гайкович К.П., Гурвич А.С. и др. // Доклады АН СССР, 1990, т. 315, N 4, с.830-834.
33. Gaikovich K.P., A.N.Bogaturov, A.S.Gurvich, et al. // Digest of IGARSS'96 ( May 27-31, 1996, Lincoln, Nebraska, USA), v.1, pp.369-371.
34. Bevis M. , Businger S., Herring T.A., et al. // J. Geophys. Res. 1992. V.97. N D14. P. 15.787.
35. Rocken Ch., Ware R., Van Hove T., at al. // Geophys. Res. Lett. 1993. V. 20. N 23. P. 2631.
36. Tralli D.M., Lichten S.M. // Bull. Geod. 1990. V.64. P.127.
37. Russian's Global Navigation Satellite System. Edited and integrated by ANSER. 1215 Jefferson Davis Hwy, Arlington, Virginia 22202, USA, 1994.
38. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.:Наука, 1983. 200 с.
39. Турчин В.Ф., Козлов В.И., Малкевич М.С. Использование методов математической статистики для решения некорректных задач // УФН, т.102, вып.3, с. 345 - 386.
40. Алексеев В.А., Гайкович К.П., Наумов А.П. Тезисы докл. 13-й Всесоюзн. конф. по распространению радио волн. М: Наука, 1981, ч.2, с.80-82.



Use of navigation satellites signals for determination of atmosphere parameters. Azizov A.A., Gaikovich K.P., Kashkarov S.S., Tchernjaeva M.B.

In the paper the problem of determination of height profile of the refractive index by measurements of elevation angle dependence of signal phase of navigation satellites from the inverse problem solution is considered. The corresponding integral equation of the 1-st kind with the nonlinear kernel is solved on the basis of iterative algorithm, on each step of which the linear Fredholm equation of the 1-st kind is solved with the application of statistical or Tikhonov's regularization methods. Using the humidity part of refraction index derived from its retrieved profile, the water vapor concentration profile and water vapor total content are determined. On the basis of numerical simulation, statistical estimations of accuracy of the possible determination of atmosphere parameters in dependence on the measurement accuracy are obtained for meteorological data ensembles for different climate conditions. The first results of retrieval of height profiles of the refraction index by signal measurements of satellites of navigation system «Transit» are presented.

Использование сигналов навигационных ИСЗ для определения параметров атмосферы.  
А.А.Азизов, К.П. Гайкович, С.С.Кашкаров, М.Б. Черняева (автореферат)

В работе рассматривается задача определения высотного профиля показателя преломления по измерениям фазы сигнала навигационных ИСЗ из решения обратной задачи. Соответствующее интегральное уравнение 1-го рода с нелинейным ядром решалось на основе итерационного алгоритма, в котором на каждом шаге решалось линейаризованное уравнение Фредгольма 1-го рода с применением методов статистической регуляризации и Тихонова. По вкладу атмосферного водяного пара, выделенному из восстановленного высотного профиля индекса рефракции, определялся профиль концентрации водяного пара и интегральное влагосодержание в вертикальном столбе атмосферы. С помощью численного эксперимента получены статистические оценки точности возможного определения параметров атмосферы в зависимости от точности измерений для ансамблей метеоданных, соответствующих различным климатическим условиям. Приводятся первые результаты восстановления высотных профилей показателя преломления по данным измерений сигналов ИСЗ навигационной системы «Транзит».