

УДК 551.510.5; 550.388.2; 550.3+551.5/:629.78

## ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИОНАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ GPS/GLONASS И РАДИОЗАТМЕННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

**В. И. Захаров, В. Е. Куницын**

(кафедра физики атмосферы)

E-mail: atm5571@phys.msu.su

**Обсуждаются возможности восстановления и интерпретации данных, получаемых в радиозатменных экспериментах, о неоднородных атмосферных структурах разных типов на примере циклона и атмосферного фронта с различными характеристиками. Показано, что эти структуры восстанавливаются с сильными искажениями, достигающими десятков процентов и часто имеющих артефакты, что затрудняет интерпретацию вариаций метеопараметров в радиозатменных экспериментах.**

Получение достоверной и оперативной информации о появлении и развитии процессов разных масштабов и данных о текущих погодных условиях необходимо как для прогноза синоптических ситуаций, так и для решения ряда геофизических задач, включая и взаимосвязи в системе геосфер. Для этого широко используются дистанционные методы, особое место среди которых занимает радиозондирование, имеющее развитую базу и методику измерений.

В последнее десятилетие дистанционные методы неразрывно связаны с радиозатменными (РЗ) или рефрактометрическими экспериментами. После удачных опытов на станции «Мир» и спутниках GPS/МЕТ, CHAMPION, Orsted получение данных этим способом стало стандартным. Эти данные используются для различных метеорологических исследований, проверки моделей климата и т. п. Вместе с тем в РЗ-экспериментах возникает ряд проблем, источником которых являются неоднородные структуры сред распространения сигнала, влияющие на точность восстановления.

Планируемое развитие РЗ-методов — создание специализированных малых спутников для исследования атмосферы и ионосферы — неизбежно встретится с ограничениями самого способа получения первичной информации. Поэтому необходимо дополнительно рассмотреть возможные ошибки восстановления и интерпретации данных, получаемых РЗ-методом. Цель настоящей работы — моделирование и анализ влияния неоднородных структур в различных условиях на точность восстановления параметров атмосферы. Использование моделирования дает возможность оценить влияние различных источников, что невозможно в реальном эксперименте. Анализируются особенности восстановления разных атмосферных структур.

### 1. Радиозатменный метод исследования атмосферы

РЗ-метод известен давно [1, 2] и успешно применяется при исследованиях атмосфер разных планет; обширная библиография по этому вопросу приведена в [3]. Метод допускает обобщение на случай зондирования ионосферы планеты, в том числе и Земли [3–7]. В схеме эксперимента по РЗ-просвечиванию атмосферы планеты один спутник наблюдает радиовосход (заход) другого, на котором имеется передатчик электромагнитных волн. При движении спутников осуществляется разрез сред зондирования, причем ионосфера может исследоваться отдельно от атмосферы. Для системы GPS рабочие частоты равны 1575.42 МГц ( $f_1$  или  $L1$ ) и 1227.6 МГц ( $f_2$  или  $L2$ ).

В случае слоистой среды вертикальный профиль показателя преломления  $n(h)$  связан преобразованием Абеля с вертикальным профилем угла рефракции [1, 2]. Восстановленный профиль пересчитывают в профили метеопараметров. Вертикальное разрешение в РЗ-методе определяется размером первой зоны Френеля и для волн дециметрового диапазона составляет в атмосфере Земли порядка сотен метров. Горизонтальное разрешение в плоскости просвечивания определяется длиной пути луча  $L_a$  в слое, толщина которого равна высоте однородной атмосферы  $H_0$ :  $L_a = \sqrt{2H_0R}$  (где учтено, что  $H_0 \ll R$ ), что при радиусе Земли  $R \approx 6400$  км и  $H_0 \approx 5-10$  км дает оценку  $L_a = 400-600$  км.

Для земной атмосферы и ионосферы особо интересны вариации параметров этих сред, например, температуры, давления, влажности, что требует высокой точности определения указанных параметров [3–8], которая достигнута лишь в последние пятнадцать лет. Полученные серийные данные [5–7] и ряд оценок [9–13] показывают, что влияние сред на точности восстановления метеопараметров сравнимы, а в некоторых случаях и превосходят влияние

аппаратурных погрешностей. Динамика возмущений и возникающее в сложных случаях многолучевое распространение [10, 14] сигналов, а также влияние ионосферы на атмосферные профили [4, 9] накладывается на атмосферные вариации, что затрудняет интерпретацию получаемых данных.

## 2. Методика моделирования радиозатменных экспериментов

Моделирование РЗ-экспериментов основано на решении уравнений распространяющейся в околоземном пространстве волны для получения параметров сигнала, аналогичных наблюдаемым в эксперименте — амплитуды, фазы, групповой задержки сигнала, доплеровского сдвига и угла рефракции в функции прицельного параметра [8–12]. Моделирование позволяет учесть особенности распространения сигнала в случаях неоднородных структур, взаимовлияния самих сред [9], многолучевости [10, 14], эффектов на каустиках, т.е. ограничения метода геометрической оптики [13, 14, 15]. Тем не менее лучевое приближение широко применяется при описании РЗ-экспериментов, поскольку описывает основные особенности распространения сигнала.

В статье рассматривается трехмерная модель среды и распространение сигнала в приближении геометрической оптики аналогично [12, 13]. Эта задача имеет ряд особенностей по сравнению с двумерной [8, 9, 11]; так, в трехмерном случае возникает проблема построения гладких полей метеопараметров и их первых производных по отсчетам в узлах модели, что рассмотрено в [12, 13].

Модельные зависимости пространственного показателя преломления  $n(\mathbf{r})$  выбирались аналогично [8–11], но с учетом 3D-задачи в виде

$$n(\mathbf{r}) = 1 + 10^{-6} [N_{\text{atm}}(\mathbf{r}) + \delta N_{\text{atm}}(\mathbf{r}, \dots)] - (f_c^2/f^2)(N_e(\mathbf{r}) + \delta N_e(\mathbf{r}, \dots))/N_{e \text{ max}}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где  $N_{\text{atm}}(\mathbf{r})$  — высотный ход регулярной рефракции атмосферы — экспоненциальный профиль международного Комитета по радиочастотам,  $N_e(\mathbf{r}, \dots)$  — ход электронной концентрации в ионосфере (набор параболических слоев). В аргументах точками обозначены положение и параметры неоднородных структур;  $f_c$  — критическая частота,  $N_{e \text{ max}}$  — электронная концентрация на уровне максимума слоя,  $\delta$  — вариации параметров.

Неоднородные структуры моделировались разными аддитивными для (1) функциями [8–11]. Так, сечение показателя преломления в атмосферном фронте вдоль направления зондирования предложен в [8, 11] в виде

$$n(h, \theta) = N_{\text{atm}}(h)G(h)[1 + \beta F(\xi)], \quad (2)$$

где  $F$  — функция вида  $\text{erf}(\xi)$ ,  $\xi \in [-\infty, +\infty]$  или  $\cos^2(\pi\xi/2)$ ,  $\xi \in [0, 1]$  и  $\xi = [\theta - \theta_0 + (h/\gamma L_f)]/\Delta\theta$ ,

$\beta$  — интенсивность (амплитуда) фронта. Координаты  $(h, \theta)$  определены в сечении фронта плоскостью зондирования. Введенные параметры имеют простой физический смысл:  $h$  — высота локализации возмущения,  $L_f$  — длина фронта,  $\gamma$  — тангенс угла наклона фронта к поверхности Земли. Функция  $G(h) = \exp(-\gamma h/H_{\text{atm}})$  описывает убывание возмущения с высотой, заданные нами параметры  $\gamma \in [0 \dots 5]$  соответствуют экспериментальным данным.

Моделирование прямой и обратной задач получило название «end-to-end modeling». В работе выбран шаг менее 100 м в атмосфере и около 1 км в ионосфере ( $h > 60$  км). Ошибка при моделировании прямой задачи определялась ошибкой в относительном положении спутников и составляла менее  $10^{-12}$  по углу, что при сферической симметрии среды дает погрешность восстановления профилей метеопараметров менее 0.1%.

Компенсация влияния ионосферы на атмосферный профиль осуществлялась по двухчастотному методу [4]. Для реальной ионосферы с неоднородностями качество компенсации может ухудшаться. Это приводит к артефактам в атмосферных профилях, как показано в [9] и подтверждено в экспериментах [12]. Восстановление  $n(\mathbf{r})$  проводилось с помощью преобразования Абея [1, 2],  $n(\mathbf{r})$  приписывался точкам перигеев лучей.

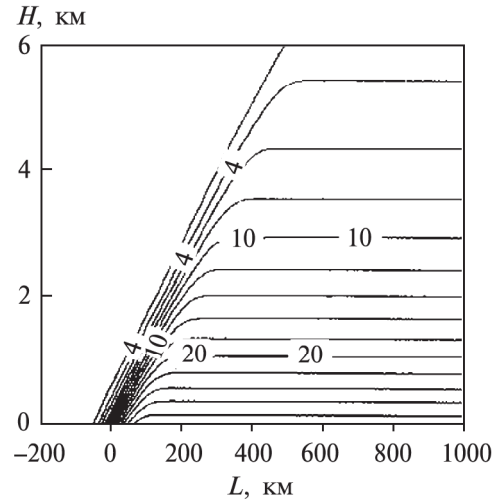
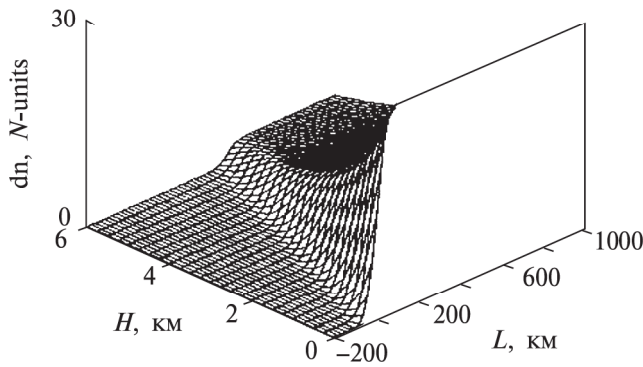
Для анализе РЗ-экспериментов разработаны различные методы: 4Dvar-подход [13] и связанный с ним метод прямого вариационного усвоения данных [17] и «нелинейного оценивания» [16]. В них используют информацию об изменчивости метеорологических полей, полученную в различных моделях и измерениях, т.е. учитывают атмосферную динамику. Сравнение данных методов с реальными ситуациями показывает ряд дополнительных проблем, обсуждение которых выходит за рамки настоящей работы.

## 3. Обсуждение результатов моделирования

В ходе вычислительного эксперимента (см. п. 2) рассматривались типичные случаи горизонтально-неоднородной атмосферы с масштабами возмущений от нескольких сотен до нескольких тысяч километров. Восстановленные профили во многих случаях не имеют особенностей, заданных при моделировании, — структуры менее 400 км сильно искажены. Более крупные структуры походят на оригинал, но в этом случае локальные профили могут сильно искажаться.

Наличие атмосферных структур нарушает квазисферичность задачи. Информация о них будет в реконструкции тогда, когда даже часть структуры попадет в область зондирования с характерными для атмосферы размерами  $L_a$ . Рассмотрим мысленный РЗ-эксперимент, в котором прием зондирующего

Модель



Реконструкция

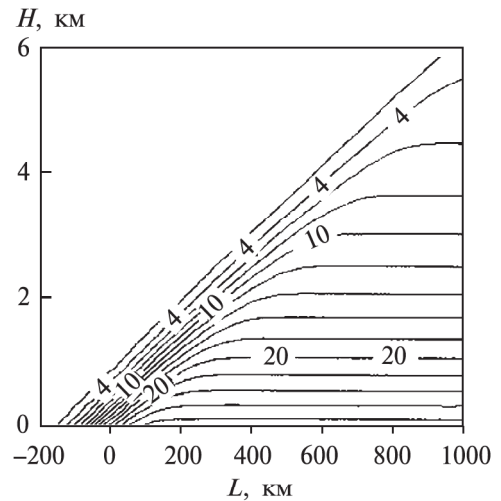
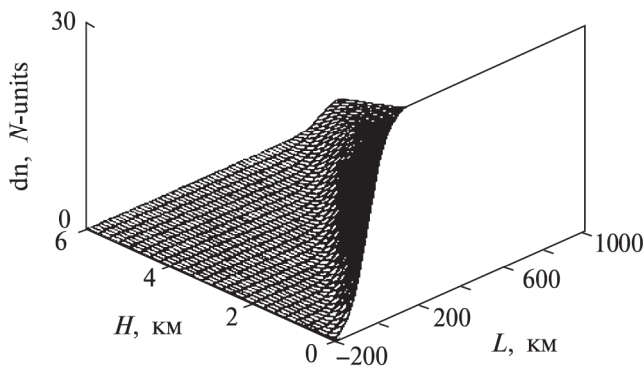


Рис. 1. Радиозатменное зондирование атмосферного фронта

сигнала осуществляется на низкоорбитальных спутниках,двигающихся по одной орбите с радиусом 800 км над поверхностью Земли друг за другом так, чтобы точки перигея зондирующих лучей отстояли друг от друга на расстояния 10 км в проекции на поверхность. Набор получаемых после реконструкции в ходе большого числа (от 100 до 240) вычислительных экспериментов профилей образует поверхность, которую сравнивают с модельной. Эти поверхности, т.е. объединение результатов вычислительных экспериментов, обсуждаются далее. Сечения  $L = \text{const}$  соответствуют профилю, получаемому в каждом радиозатменном эксперименте. Для удобства регулярный ход  $n(h)$  не показан.

**3.1.** Полученные результаты показывают, что атмосферный фронт в РЗ-экспериментах размыт по горизонтали. Плавные фронты — с тангенсом наклона поверхности  $|\gamma| < 0.02$ , см. (2) — восстанавливаются похоже на оригинал. Крутые метеофронты

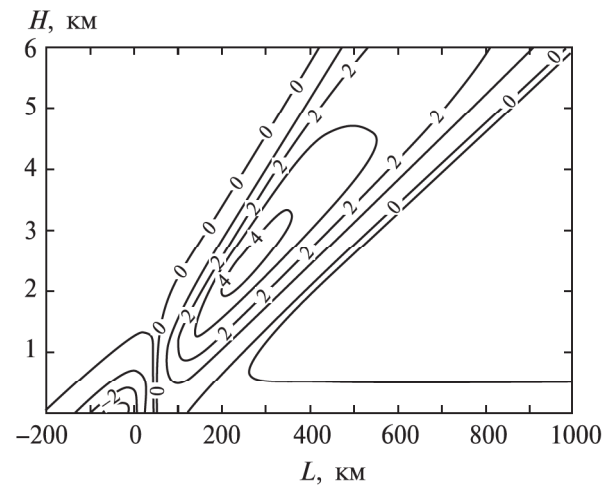


Рис. 2

(с шириной  $L_f = 50 \dots 100$  км) восстанавливаются со значительными искажениями (рис. 1). На рис. 1

на верхней панели представлена модель, а на нижней — совокупность всех возможных реконструкций атмосферного фронта с  $L_f = 50$  км,  $H = 3$  км,  $\alpha = 3$ ,  $\gamma = 0.05$  (см. (2)). Угол наклона фронта для восстановленной структуры уменьшается в  $L_a/L_f$  раз, а ошибки зависят от амплитуды возмущения и его размеров. Для типичных значений величина этих ошибок может достигать 1–10% при различных параметрах фронта. На рис. 2 представлена топология относительных ошибок восстановления фронта  $\delta = (1 - n_{\text{retrieval}}(r)/n_{\text{model}}(r)) \cdot 100\%$ , параметры которого приведены выше. Величина предельного наклона фронта составляет угол порядка величины регулярной рефракции в атмосфере, для Земли это величина порядка 20 мрад.

**3.2.** Возможности РЗ-метода при мониторинге атмосферных процессов мы рассмотрели и для циклонов. Для описания этого возмущения к регулярному профилю показателя преломления (1) добавлен эллипсоид вращения с узким вырезом внутри, имитирующим глаз циклона.

Для расчетов мы использовали данные для известного урагана Катрина (23.08–30.08.2005), классифицируемого как ураган 4–5-й категории. Анализ его эволюции по космическим снимкам дает диаметр от нескольких сотен до 1200 км, при этом диаметр «глаза» (чистая от облаков в оптическом диапазоне область в центре циклона) оценивается в 100–300 км. Для моделирования приняты размеры тела циклона в 200, 600 и 1200 км.

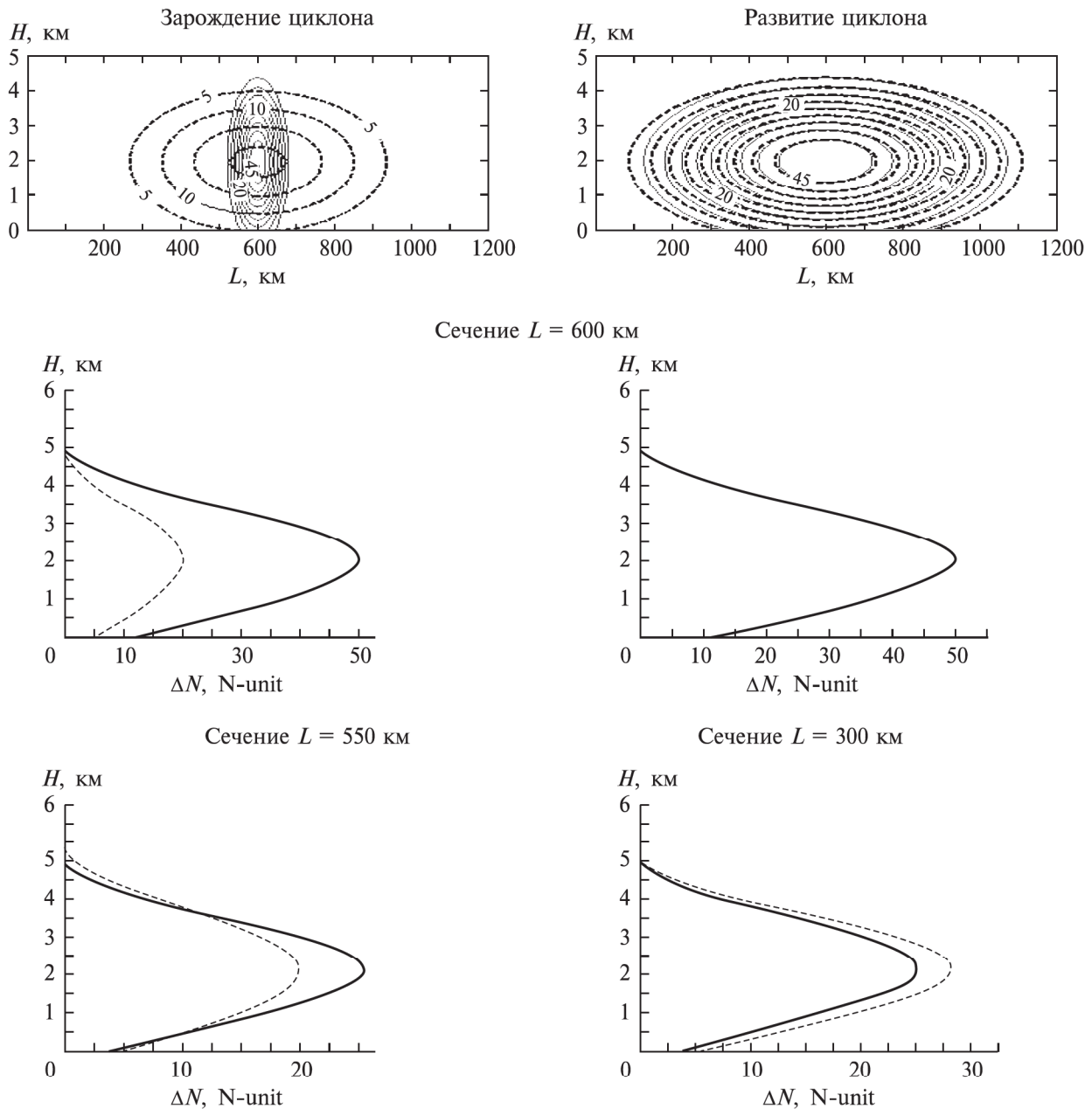


Рис. 3. Использование РЗ-метода диагностики на различных этапах развития циклона. Штриховые кривые — модель, сплошные — реконструкция

Оценки возмущения, вносимого циклоном в  $n(h)$ , проводились по метеорологическим данным о температуре, давлении, осадках на пути его движения [19–21]. Анализ различных источников показал, что величина возмущения индекса рефракции для циклонов 4–5-й категории составляет порядка 30–50 N-units, т.е. 10–15% от регулярных значений.

Восстановленные РЗ-методом профили во многих случаях не имеют характерных особенностей, заданных при моделировании. На рис. 3 приведены результаты реконструкции модели, описывающей различные фазы эволюции циклона. Характеристики неоднородностей: интенсивность 50 N-units, длина вдоль поверхности Земли одной структуры 200 и другой — 1200 км, толщина обеих 4 км. Неоднородности локализованы над поверхностью Земли на высоте 2 км.

Левая панель рис. 3 соответствует возмущению длиной 200 км. Видно, что такие структуры искажаются при использовании радиозатменных методик. Сравнение высотных сечений модели и реконструкции приведены на рисунках этой панели ниже. Видно, что сечение, проходящее через максимум модели ( $L = 600$  км), имеет ошибки до 70%, а в «удачном» сечении  $L = 550$  ошибки достигают 15%. Область  $L \in [200 \dots 500]$  км содержит артефакты, т.е. показывает наличие структуры, которой там нет.

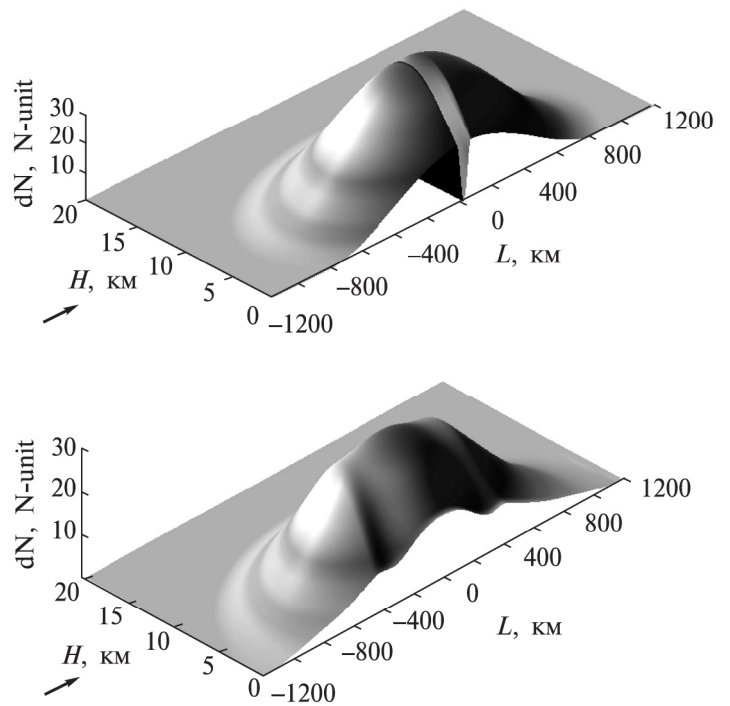


Рис. 4. Модельное высотное распределение возмущения в атмосфере — развитого циклона с глазом — представлено на верхней панели, его восстановление в радиозатменных экспериментах — на нижней. Направление зондирования (трасса спутник-спутник) отмечено стрелкой

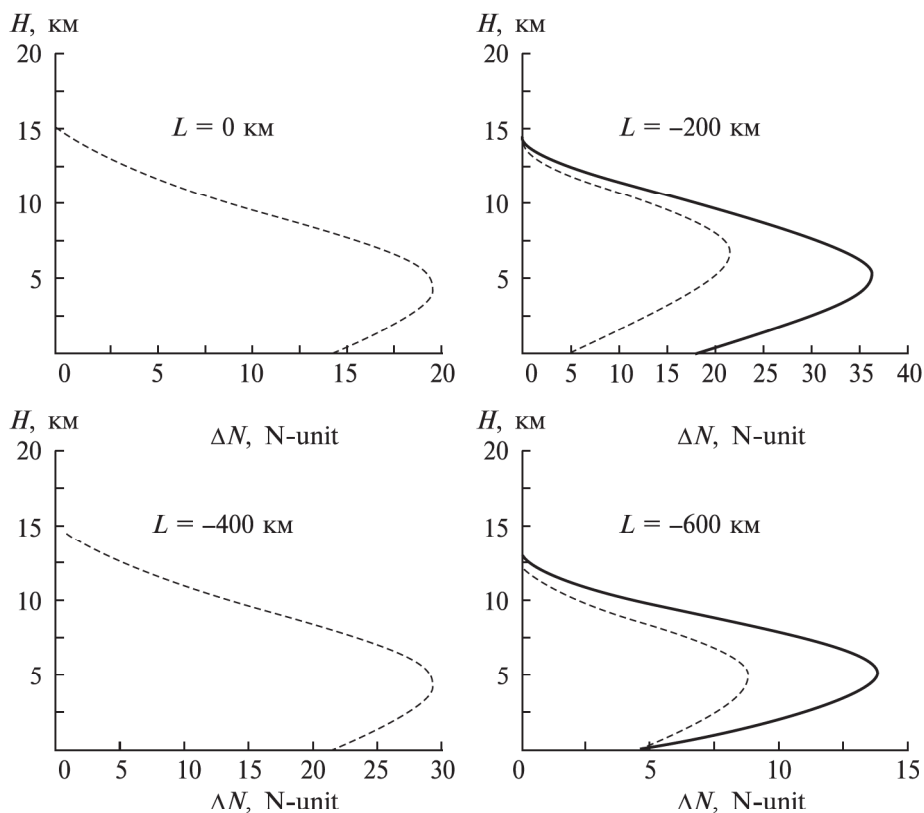


Рис. 5. Основные характерные варианты ошибок и артефактов, которые могут возникать при различных интерпретациях данных, полученных в радиозатменных экспериментах. Модель, представленная на рис. 4 сверху, здесь показана сплошной линией, реконструкция — пунктирной



Для размера возмущения длиной 1200 км ситуация значительно лучше. Так, сечение  $L = 600$  км восстанавливается с ошибкой менее 1% (см. средний рисунок правой панели). Ошибки начинают возрастать при движении «к периферии» рассматриваемой структуры — в сечении  $L = 300$  км максимальная ошибка составляет не более 12%. Отметим, что во всех случаях метод четко определяет высотное положение максимума неоднородности.

**3.3.** Проведенный анализ показывает, что величины ошибок зависят от знака возмущения, т. е. от того, выступает или нет неоднородная структура над уровнем фона. Это иллюстрирует рис. 4, на котором приведены модель (вверху) и реконструкция (внизу) циклона с глазом шириной 150 км. В глазе циклона амплитуда возмущения в модели падает до нуля, т. е. относительно тела циклона она имеет другой знак. Остальные параметры структуры приведены выше. Видно, что глаз циклона небольших размеров не восстановился, а наличие градиента индекса рефракции на границах глаза привело к появлению квазивозмущений в районе  $L = \pm 400$  км. На рис. 5 показано, что при  $L = 0$  реконструкция имеет артефакты, при  $L = -200$  км ошибки достигают 30%, при  $L = -400$  км ошибки меняют свой знак, а при  $L = -600$  км величины ошибок достигают свыше 40%.

Рассмотренные примеры иллюстрируют сложность независимой интерпретации РЗ-экспериментов. В конкретном РЗ-эксперименте может реализоваться любая из профилей, приведенных на рис. 3, 5, ведь заранее не известны ни ориентация неоднородных структур относительно излучателя и приемника, ни их местоположение и тип, ни даже знак возмущения  $n(h)$  в них.

### Выводы

РЗ-метод исследования атмосферы в случае протяженных атмосферных структур (свыше 600 км) позволяет реконструировать профили метеопараметров с достаточной для практики точностью. В случаях атмосферных структур малых размеров (до 300–400 км) или сложных атмосферных структур — например, развитого циклона с глазом — ошибки восстановления метода значительно возрастают. Для крутых фронтов давления меняется наклон фронтальной поверхности и возможно появление артефактов на восстановленном профиле. Величины ошибок зависят и от знака возмущения в неоднородной структуре.

Присутствие локальной неоднородности в атмосфере всегда затрудняет интерпретацию конкретного профиля, полученного РЗ-методом, результат восстановления зависит от положения неоднородности относительно перигея зондирующих лучей и не может быть интерпретирован однозначно.

Подводя итоги, отметим, что РЗ-диагностика атмосферы оказалась эффективной для глобальных

структур. В случае присутствия возмущений метод дает локально ненормированные ошибки, причем возможность интерпретации только полученных этим методом данных ухудшается. Увеличение точности определения метеопараметров атмосферы для различных приложений и адекватная интерпретация данных, полученных РЗ-методом, возможны лишь при решении задачи комплексной диагностики всех сред распространения зондирующего излучения, а также путем интеграции информации, полученной разными методами при сочетании спутникового и наземного мониторинга, включая и методики томографии атмосферы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты 06-05-64988а и 05-05-65145а).

### Литература

1. *Phinney R.A., Anderson D.L.* // J. Geoph. Res. 1968. **73**, N 5. P. 1819.
2. *Татарский В.И.* // Изв. АН СССР. ФАО. 1968. **4**, № 8. С. 811.
3. *Яковлев О.И.* Космическая радиофизика. М., 1998.
4. *Воробьев В.В., Красильникова Т.Г.* // Изв. АН. Физика. 1993. **29**, № 5. С. 626.
5. *Kursinski E.R., Hajj G.A., Bertiger W.I. et al.* // Science. 1996. **271**, N 5252. P. 1107.
6. *Ware R., Exner M., Feng D. et al.* // BAMS. 1996. **77**, N 1. P. 19.
7. Earth observation with CHAMP. Results from three years in orbit / Ed. by C. Reigberg, H. Lühr, P. Schwintzer, J. Wickert. Springer, 2005. P. 628.
8. *Гурвич А.С., Соколовский С.В.* // Изв. АН СССР. ФАО. 1988. **21**, № 1. С. 12.
9. *Захаров В.И., Куницын В.Е.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1998. № 4. С. 45.
10. *Захаров В.И., Куницын В.Е.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1999. № 4. С. 46.
11. *Kunitsyn V.E., Zakharov V.I., Berbeneva N.A. et al.* // Phys. Chem. Earth (A). 2001. **26**, N 3. P. 131.
12. *Kunitsyn V., Zakharov V., Dethloff K. et al.* // Physics and Chemistry of the Earth. 2004. **29**. P. 277.
13. *Zou X., Vandenbergh F., Wang B. et al.* // J. Geophys. Res. 1999. **104**. D18. P. 22301.
14. *Gorbunov M.E.* // Danish Meteorological Institute. 2001. DMI Report. N 01–02.
15. *Gorbunov M.E., Gurvich A.S.* // Radio Sci. 2000. **35**, N 4. P. 1025.
16. *Bean B.R., Dutton E.J.* Radio meteorology. N. Y., 1968.
17. *Gorbunov M.E., Kornbluech L.* // Max-Planck Institute for meteorology. N 30. P. 34. Hamburg, 2003.
18. *Palmer P.I., Barnett J.J., Eyre J.R. et al.* // J. Geophys. Res. 2000. **105**. D13. P. 17; P. 513.
19. <http://www.wunderground.com/hurricane/hurrarchive.asp>.
20. <http://www.msnbc.msn.com/id/3033055 и /7845030>.
21. <http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php>.