

**В.А. Банах, Х. Вернер\*, В. Верген\*, А. Кресс\*, Н.П. Криволицкий, И. Лайке\*,  
И.Н. Смалихо, Ю. Штрайхер\***

## **Моделирование восстановления ветра из измерений космическим когерентным доплеровским лидаром**

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия  
\* ДЛР, Институт атмосферной физики, г. Веслинг, Германия*

Поступила в редакцию 11.04.2001 г.

Предложен метод восстановления высотных профилей скорости и направления ветра непосредственно из данных сканирующего когерентного доплеровского лидара без предварительного оценивания радиальной скорости ветра. Показано, что метод позволяет восстанавливать из спутниковых лидарных данных высотные профили скорости ветра с погрешностью  $\leq 2$  м/с и направления ветра с погрешностью  $\leq 20^\circ$  до высот 18 км.

### **Введение**

Повышение достоверности прогноза погоды во многом зависит от возможности получения информации о ветре в масштабах всего земного шара. Эффективным инструментом решения этой задачи является доплеровский ветровой лидар космического базирования [1–7]. В этой связи возникает необходимость исследования методических вопросов восстановления скорости и направления ветра из лидарных данных.

Одним из возможных подходов является численное моделирование работы космического доплеровского лидара, имитирующее процессы распространения в атмосфере и регистрации эхосигнала с последующим извлечением информации о ветре из моделируемых данных [5–7].

Принцип работы доплеровского лидара следующий. При распространении в атмосфере зондирующего лазерного импульса происходит рассеяние волны на частицах (аэрозоль, молекулы), увлекаемых ветровым потоком. Движение частиц обуславливает доплеровский сдвиг частоты рассеянной волны, по которому после соответствующей обработки принимаемого эхосигнала определяется проекция вектора скорости ветра на направление распространения импульса (радиальная скорость ветра). Чтобы определить скорость и направление ветра, необходимо проводить измерения в различных направлениях. При измерении доплеровским лидаром со спутника может быть использовано конечное сканирование зондирующим пучком [1, 5].

Существуют два типа доплеровских лидаров, отличающихся по способу детектирования эхосигнала: когерентный и некогерентный. Если в случае когерентного доплеровского лидара носителями информации о скорости ветра являются аэрозольные частицы, то для некогерентного лидара с длиной волны ультрафиолетового диапазона может использоваться и молекулярное рассеяние [6].

В настоящей статье путем численного моделирования исследуется возможность восстановления поля ветра по данным измерений сканирующим когерентным доплеровским лидаром, установленным на спутнике. Если скорость и направление ветра рассчитывать, как это обычно делается, из массива оценок радиальных скоростей, получаемых в результате обработки эхосигналов от одиночных зонди-

рующих импульсов (посылаемых в атмосферу под разными азимутальными углами сканирования), то точность расчета будет зависеть от числа импульсов и погрешности одиночной оценки радиальной скорости ветра. В свою очередь, точность оценивания радиальной скорости зависит от отношения сигнал-шум (числа когерентно детектируемых фотонов), определяемом, при прочих условиях, энергией зондирующего импульса и величиной коэффициента обратного рассеяния [5, 6]. С высотой происходит быстрое уменьшение концентрации аэрозоля (в безоблачной атмосфере), отношение сигнал-шум уменьшается и точность восстановления ветра падает.

Как показывают результаты численного моделирования, таким способом можно восстанавливать высотные профили скорости и направления ветра с приемлемой точностью лишь до высот 2–3 км над поверхностью Земли. В данной статье рассматривается метод оценки скорости и направления ветра непосредственно из лидарных данных, исключаяющий этап нахождения радиальной скорости и позволяющий существенно повысить точность восстановления высотных профилей ветра.

### **1. Структура программы по численному моделированию работы космического когерентного лидара**

Для изучения возможностей восстановления поля скорости ветра из измерений доплеровским лидаром космического базирования Лидарной группой Германского авиакосмического центра (ГАЦ) создана программа «ALIENS» [6], имитирующая измерение радиальной скорости космическим лидаром. В этой программе используются данные о глобальном распределении атмосферных параметров за период 19–30 января 1998 г., представленные германской службой погоды (ГСП). Лабораторией распространения волн Института оптики атмосферы СО РАН разработан блок, в котором моделируются турбулентные флуктуации скорости ветра в соответствии с данными ГСП. Кооперация ГАЦ, ГСП и ИОА позволила создать виртуальный доплеровский лидарный инструмент для изучения возможностей зондирования ветра из космоса в условиях, приближенных к реальности [7].

На рис. 1 показана структура программы «ALIENS» для когерентного доплеровского лидара. Программа состоит из четырех основных блоков: 1) вход, 2) численное моделирование сигнала, 3) обработка сигнала, 4) выход.

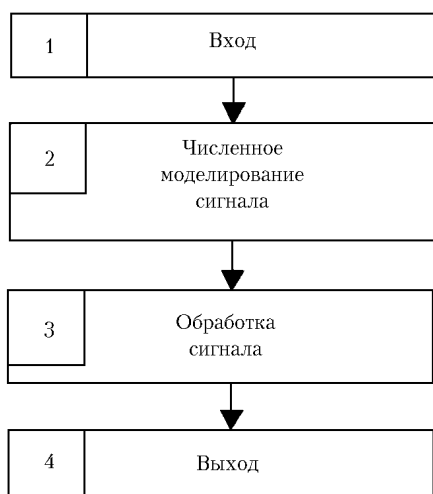


Рис. 1. Структура программы «ALIENS» для когерентного доплеровского лидара

Первый блок включает в себя параметры лидара (длина волны, энергия и длительность зондирующего импульса; частота повторения импульсов; диаметр приемопередаточного телескопа; параметры аналого-цифрового преобразователя, полоса пропускания приемника и т.д.), геометрические параметры зондирования и положения спутниковой платформы (надир, угловая скорость сканирования, высота спутника) и атмосферные параметры (высотные профили коэффициентов обратного рассеяния и ослабления; данные ГСП о распределении по всему земному шару высотных профилей меридиональной и зональной скоростей ветра, температуры, облачности, коэффициентов турбулентного обмена).

Во втором блоке последовательно моделируется процесс: обратное рассеяние зондирующего импульса на аэро-

зольных частицах – оптическое смещение рассеянной и опорной волн – детектирование – оцифровка данных. На выходе блока получают временные зависимости фототока, возникающего в цепи приемной системы лидара. Численное моделирование построено на базе алгоритма, описание которого можно найти в [8–10].

В третьем блоке моделируемые данные обрабатываются с целью получения высотных профилей радиальной составляющей скорости ветра с заданным разрешением по высоте. При этом оценки радиальной скорости могут быть получены различными методами, например, по аргументу корреляционной функции, по максимуму правдоподобия, с помощью спектрального метода и т.д. [9, 10]. Затем, если используется коническое сканирование зондирующим пучком, можно из массивов радиальных скоростей ветра восстановить высотные профили скорости и направления ветра в рассматриваемом районе зондирования (например, с разрешением ~ 1 км по высоте и 100 × 100 км по горизонтали) вдоль траектории полета спутника.

Получаемые высотные профили для скорости и направления ветра аккумулируются в выходном блоке и могут сопоставляться с исходными данными ГСП для ветра. По результатам сравнения можно судить об эффективности лидарных измерений ветровых полей.

На рис. 2 изображена схема зондирования сканирующим доплеровским лидаром. Стрелка указывает направление движения спутника, на котором установлен лидар. Точками показано распределение одиночных зондирующих импульсов в горизонтальной плоскости. Размер ячеек сетки соответствует разрешению данных ГСП по долготе 1,125° и по широте 1,121°, т.е. в районе экватора примерно 100 × 100 км). Из зондирующих импульсов, попадающих в одну такую ячейку, извлекается информация о высотном ходе скорости и направления ветра. При этом используется связь между радиальными скоростями, направлениями распространения (надир, азимутальный угол сканирования) и вектором скорости ветра (две горизонтальные компоненты, вертикальная полагается равной нулю), в предположении, что внутри каждой ячейки на выбранной высоте ветер остается неизменным.

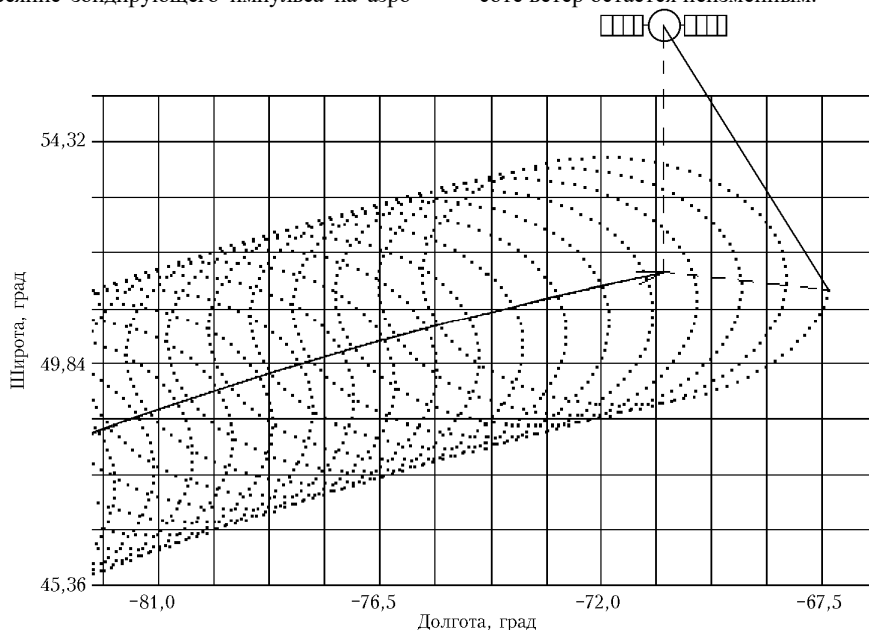


Рис. 2. Геометрия зондирования сканирующим доплеровским лидаром, установленным на спутнике

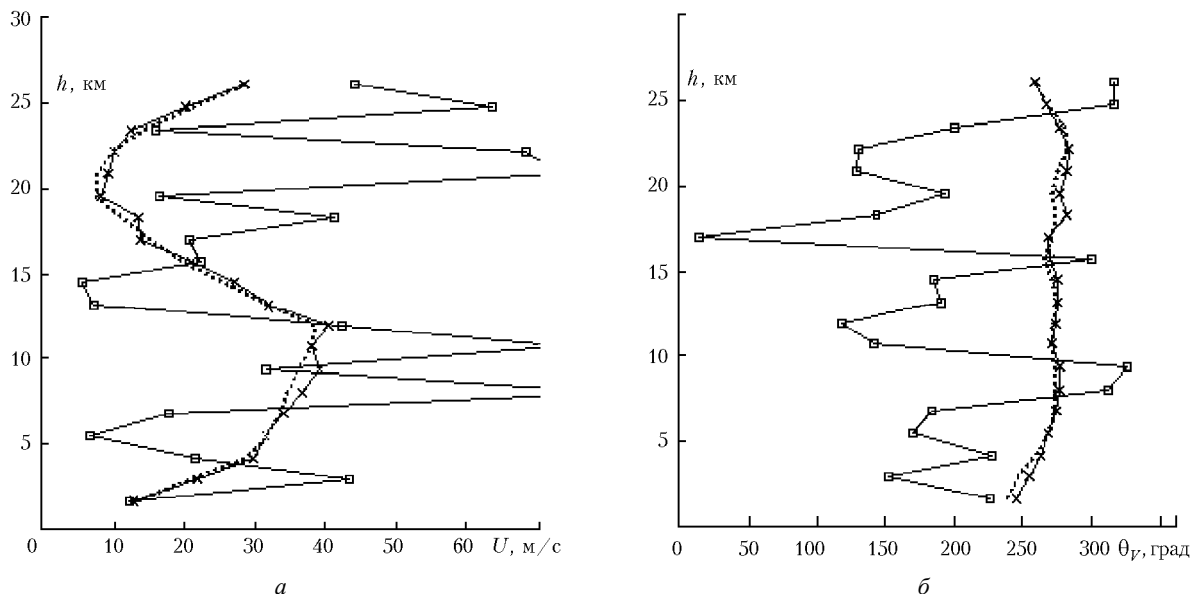


Рис. 3. Примеры восстановления высотных профилей скорости (а) и направления (б) ветра из моделируемых лидарных данных с учетом (квадратики) и без учета (крестики) шумов. Пунктирные кривые – данные ГСП

При численном моделировании нами задавались следующие параметры: высота спутника – 400 км; надир – 35°; одно полное сканирование за 10 с; частота повторения зондирующих импульсов –  $10 \text{ с}^{-1}$ ; длительность импульса – 1 мкс; энергия импульса – 0,5 Дж; длина волны – 2,02184 мкм; диаметр телескопа – 70 см; частота съема данных – 200 МГц; полоса пропускания для обрабатываемых данных – 50 МГц; разрешение по вертикали – 1258 м; разрешение по горизонтали:  $1,125^\circ$  по долготе и  $1,121^\circ$  по широте.

На рис. 3 приведены примеры восстановления высотных профилей скорости и направления ветра из моделируемых лидарных данных с учетом и без учета шумов. Значения скорости и направления ветра рассчитывались из оценок радиальных скоростей ветра для зондирующих импульсов, попавших в выбранную ячейку данных ГСП. Радиальные скорости оценивались из спектров мощности моделируемых сигналов по положению пика в спектральном распределении. Штриховыми кривыми показаны данные ГСП. Видно, что в отсутствие шумов восстановление ветра осуществляется с хорошей точностью. Однако при наличии шумов, вследствие отношения сигнал-шум, полезная составляющая спектра «тонет» в шумовых

пиках и погрешность восстановления ветра для приведенных выше параметров очень большая (в данном примере даже на высоте ~ 3 км).

При плохих отношениях сигнал-шум имеется большая вероятность превышения шумового пика над пиком мощности эхосигнала и, как следствие, неправильной оценки частоты, приписываемой радиальной скорости ветра. При этом получаемая «ложная» оценка доплеровской частоты имеет равномерное распределение в полосе частот 50 МГц или, с учетом соотношения Доплера  $V = (\lambda/2)f$ , в диапазоне скоростей  $\sim \pm 50 \text{ м/с}$ .

По-видимому, единственным надежным способом получения правильной оценки радиальной скорости ветра в условиях низких значений отношения сигнал-шум является аккумуляция спектров, измеряемых при посылке одиночных зондирующих импульсов, в результате чего должны происходить усреднение шумовых пиков и

выделение сигнального пика. На этом построен предлагаемый ниже метод.

## 2. Метод восстановления высотных профилей для скорости и направления ветра

Пусть в результате работы сканирующего космического когерентного лидара получаем комплексные значения зашумленного эхосигнала  $z(\theta_i, mT_s)$ , предназначенные для дальнейшей обработки с целью извлечения информации о ветре. Здесь  $\theta_i$  – азимутальный угол сканирования,  $i$  – номер зондирующего импульса,  $T_s^{-1}$  – частота съема (дискретизации) данных,  $m = 0, 1, 2, \dots$ . Так как полоса пропускания  $B = 50 \text{ МГц}$ , то  $T_s = 1/(2B) = 10 \text{ нс}$ . Для оценки радиальной скорости на какой-нибудь фиксированной высоте выделим  $M$  значений регистрируемого сигнала (разрешение по вертикали).

С помощью БПФ находим спектры мощности

$$W\left(\theta_i, \frac{k}{MT_s}\right) = \frac{T_s}{M} \left| \sum_{m=0}^{M-1} z(\theta_i, mT_s) e^{-2\pi j(km/M)} \right|^2, \quad (1)$$

где  $k = 0, 1, \dots, M-1$ . Разрешение по частоте здесь будет определяться величиной  $\Delta f = 1/(MT_s)$ . С учетом соотношения Доплера разрешение по скорости  $\Delta V = (\lambda/2) \Delta f$  для  $M = 1024$ ,  $\lambda = 2 \text{ мкм}$  и  $T_s = 10 \text{ нс}$  равно примерно 0,1 м/с.

Будем считать, что в отдельную ячейку горизонтальной сетки ГСП попало  $n$  одиночных зондирующих импульсов ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Если нет сканирования, то процедура аккумуляции данных заключается в простом суммировании значений спектра в соответствующих каналах (номера спектральных каналов  $k = 0, 1, \dots, M-1$ ). В результате при достаточно хорошем усреднении с применением скользящего сглаживания из суммарного спектра можно получить оценку радиальной скорости ветра с приемлемой точностью.

В нашем случае сканирующего лидара радиальная скорость ветра  $V_r$  является функцией угла  $\theta_i$ . В предположении горизонтальной однородности ветра  $V_r(\theta_i)$  определяется выражением

$$V_r(\theta_i) = U \cos \alpha \cos(\theta_i - \theta_V), \quad (2)$$

где  $U$  и  $\theta_V$  – скорость и угол направления ветра;  $\alpha$  – угол места (угол между осью зондирующего пучка и поверхностью Земли).

Величины  $U$  и  $\theta_V$  являются искомыми в выбранном объеме зондирования. Их можно найти, минуя стадию оценивания радиальных скоростей из данных зондирования отдельными импульсами. Предлагаемый нами подход основывается на вариационном принципе. С учетом (2) рассчитывается двумерный массив  $F(U, \theta_V)$  при произвольных  $U$  и  $\theta_V$ :

$$F(U, \theta_V) = \sum_{i=1}^n \sum_{k'=k'-\Delta k}^{k'+\Delta k} W \left( \theta_i, \frac{k''}{MT_s} \right), \quad (3)$$

где

$$k'' = \left[ \frac{U}{\Delta V} \cos \alpha \cos(\theta_i - \theta_V) \right], \quad (4)$$

$U = \Delta U l$ ;  $\theta_V = \Delta \theta_V m$ ,  $l = 1, 2, \dots$ ,  $m = 1, 2, \dots$ ,  $\Delta U$  и  $\Delta \theta_V$  – разрешение по скорости и по углу, прямоугольные скобки в (4) означают целую часть числа. Затем по положению максимума функции  $F(U, \theta_V)$  определяются скорость  $U$  и направление  $\theta_V$  ветра.

Таким образом, с использованием (3) оценка скорости ветра осуществляется из достаточно хорошо усредненных данных измерений: по  $n$  зондирующим импульсам и по спектральному окну шириной  $(2\Delta k + 1)/(MT_s)$ . Численные эксперименты показали, что при разрешении по скорости  $\Delta V \approx 0,1$  м/с в (3) оптимальным является значение  $\Delta k = 4$ . Когда же вначале из измеренных спектров получают оценки радиальных скоростей  $\hat{V}_r(\theta_i)$ , а затем из них, например, методом наименьших квадратов находят скорость и направление ветра в условиях слабого сигнала по отношению к шуму, наличие даже относительно небольшой доли «ложных» оценок радиальных скоростей может привести к большой погрешности в определении  $U$  и  $\theta_V$  (см. рис. 3).

В соответствии с данными рис. 2 в ячейку могут попадать максимум 53 импульса (в среднем  $n \sim 26$ ). Из результатов численного моделирования следует, что этого числа импульсов достаточно для восстановления профиля ветра до высот  $\sim 7$ –8 км. Анализ данных ГСП для ветра на больших высотах показал, что с целью лучшего усреднения в формуле (3) можно использовать лидарные данные, получаемые при попадании зондирующих импульсов в 9 ячеек, не опасаясь при этом излишнего усреднения ветра по большой площади  $\sim 300 \times 300$  км.

### 3. Результаты численного моделирования

На рис. 4 приведены примеры функций  $F(U, \theta_V)$  на различных высотах  $h$ . Для получения этих функций использовались данные, моделируемые в ячейке с горизон-

тальным размером  $\sim 100 \times 100$  км в регионе, в котором, согласно данным ГСП за 20.01.98, полностью отсутствуют облака. Пересечение сплошных прямых показывает положение максимума  $F(U, \theta_V)$ , а пересечение пунктирных соответствует значению скорости и направления ветра по данным ГСП. По расстоянию между точками пересечений можно судить о точности лидарного восстановления скорости и направления ветра на данной высоте. Видно, что с увеличением высоты картина распределения  $F(U, \theta_V)$  становится менее контрастной, т.е. превышение пика полезного сигнала над шумовым фоном уменьшается. В результате, как показано на рис. 4, при  $h = 21,9$  км один из многих шумовых пучков может превысить пик, действительно содержащий требуемую информацию, что приведет к большой погрешности в оценивании скорости и направления ветра.

На рис. 5 представлен высотный профиль отношения сигнал-шум (SNR) для указанных выше параметров лидара для безоблачной атмосферы. На высотах  $h \gtrsim 20$  км SNR становится меньше  $10^{-3}$ . Из представленных ниже результатов следует, что восстановление поля ветра с требуемой точностью при таких SNR становится невозможным.

С помощью изложенного в разделе 2 метода было проведено множество численных экспериментов по лидарному восстановлению поля ветра в различных регионах земного шара. На рис. 6 показаны примеры восстановления скорости и направления ветра в безоблачной атмосфере и при наличии облаков и данные ГСП. Видно, что в отсутствие облачности профили ветра восстанавливаются с приемлемой точностью до высот  $\sim 18$ –20 км. При наличии облаков возникает большая погрешность восстановления в слое ниже  $\sim 8$  км из-за сильного ослабления в облаках зондирующего и обратно рассеянного излучения.

На основе полученных нами данных восстановления высотных профилей ветра двумя методами: 1) методом, в котором вначале получают оценки радиальных скоростей ветра, а затем рассчитывают скорость и направление ветра с помощью процедуры подгонки (фиттинга) этих оценок к зависимости, описываемой формулой (2) (назовем его методом фиттинга радиальных скоростей (ФРС)), и 2) методом, описанным в разделе 2 (назовем его методом вариационной аккумуляции спектров (ВАС)), были рассчитаны абсолютные погрешности для скорости  $\epsilon_U = [(U_L - U_W)^2]^{1/2}$  и направления  $\epsilon_\theta = [(\theta_L - \theta_W)^2]^{1/2}$  ветра, где  $U_L$  и  $\theta_L$  – лидарные оценки, а  $U_W$  и  $\theta_W$  – данные ГСП.

На рис. 7 показана область земного шара вдоль спутникового трека, для которой использовались данные ГСП при численном моделировании. Для расчета  $\epsilon_U$  и  $\epsilon_\theta$  были взяты 746 восстановленных высотных профилей скорости и направления ветра, приходящихся на отдельные ячейки расчетной сетки с размером по долготе  $1,125^\circ$  и по широте  $1,121^\circ$ . Профили ветра были восстановлены в предположении, что во всей области зондирования облака отсутствуют, а также с учетом данных ГСП по распределению облачности в атмосфере за 20.01.98. Вначале рассчитывались погрешности  $\epsilon_U$  и  $\epsilon_\theta$  для отдельных профилей ветра, затем были получены значения этих погрешностей, усредненные по выделенной на рис. 7 области зондирования. В поперечном сечении спутникового трека размер зондируемой области составлял  $\sim 600$  км.

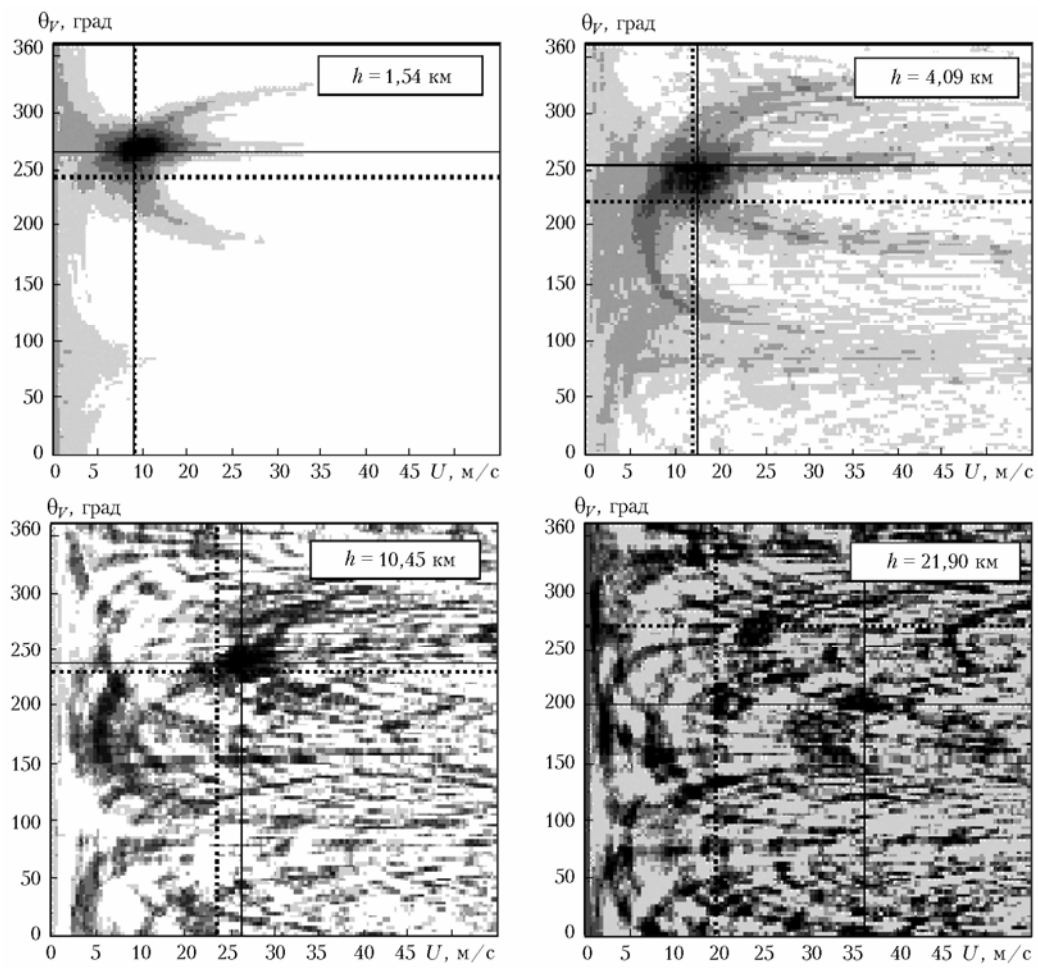


Рис. 4. Примеры функций  $F(U, \theta_r)$  на различных высотах

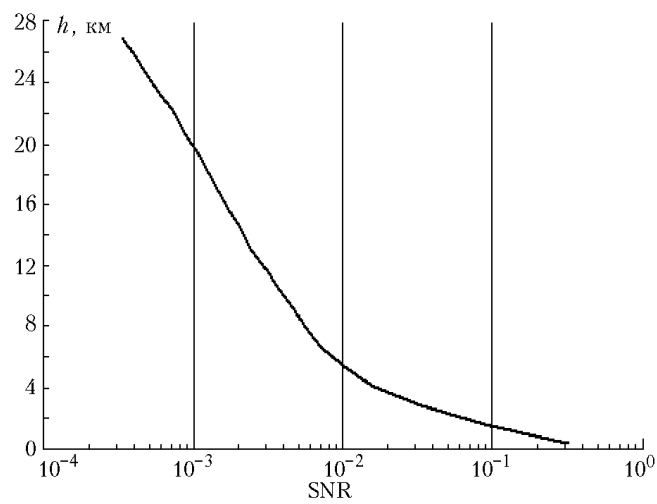


Рис. 5. Высотный профиль отношения сигнал-шум

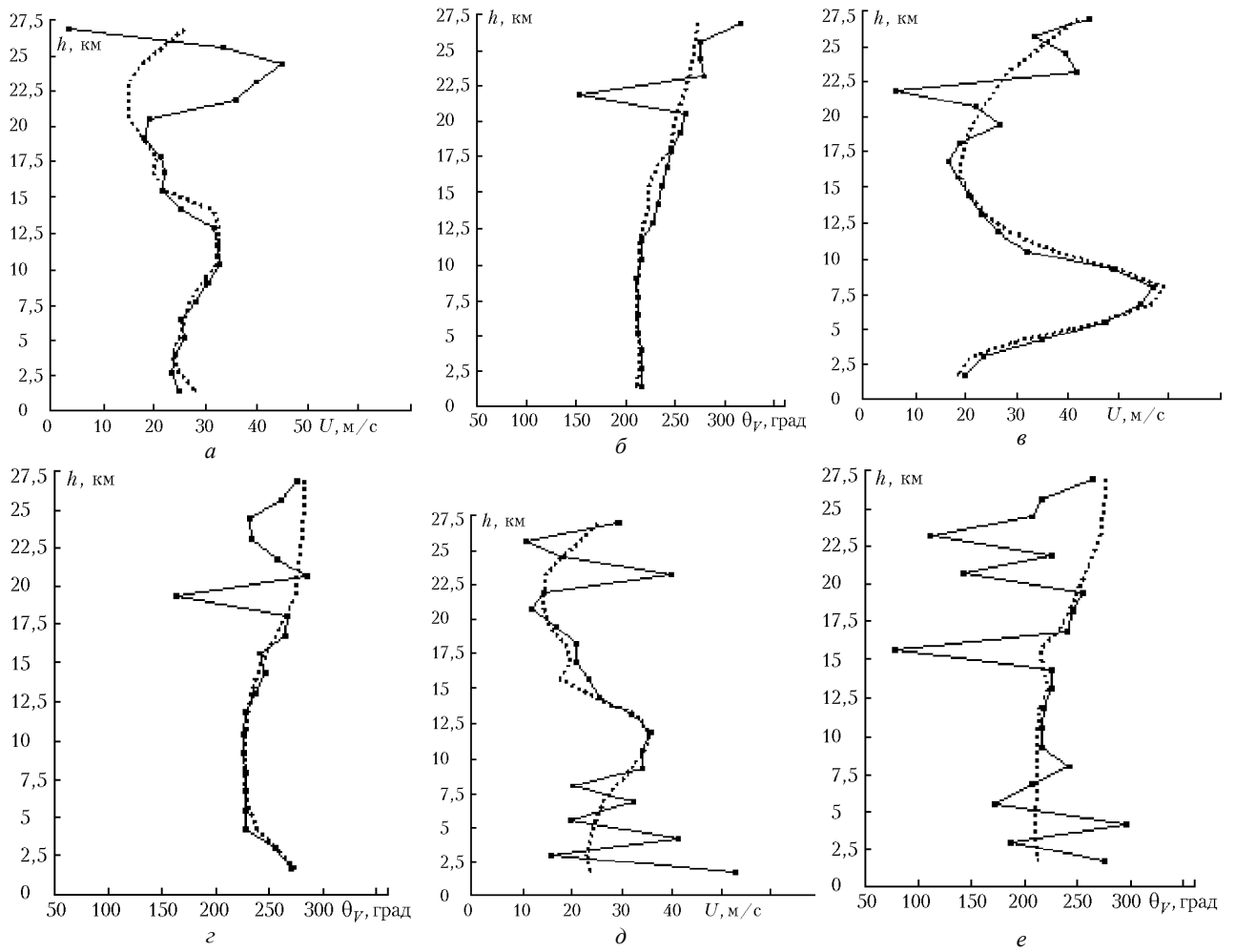


Рис. 6. Примеры восстановления скорости (*a*, *b*, *d*) и направления (*b*, *c*, *e*) ветра в безоблачной атмосфере (*a* – *c*) и в присутствии облаков (*d*, *e*). Сплошные кривые – лидарные данные, пунктирные кривые – данные ГСП

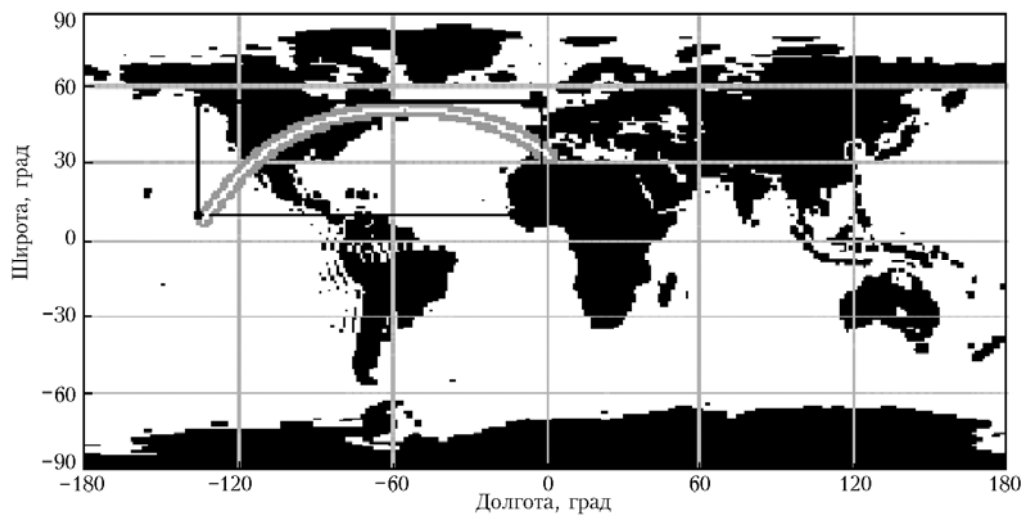


Рис. 7. Район земного шара вдоль спутникового трека, для которого были использованы данные ГСП при анализе погрешностей восстановления ветра

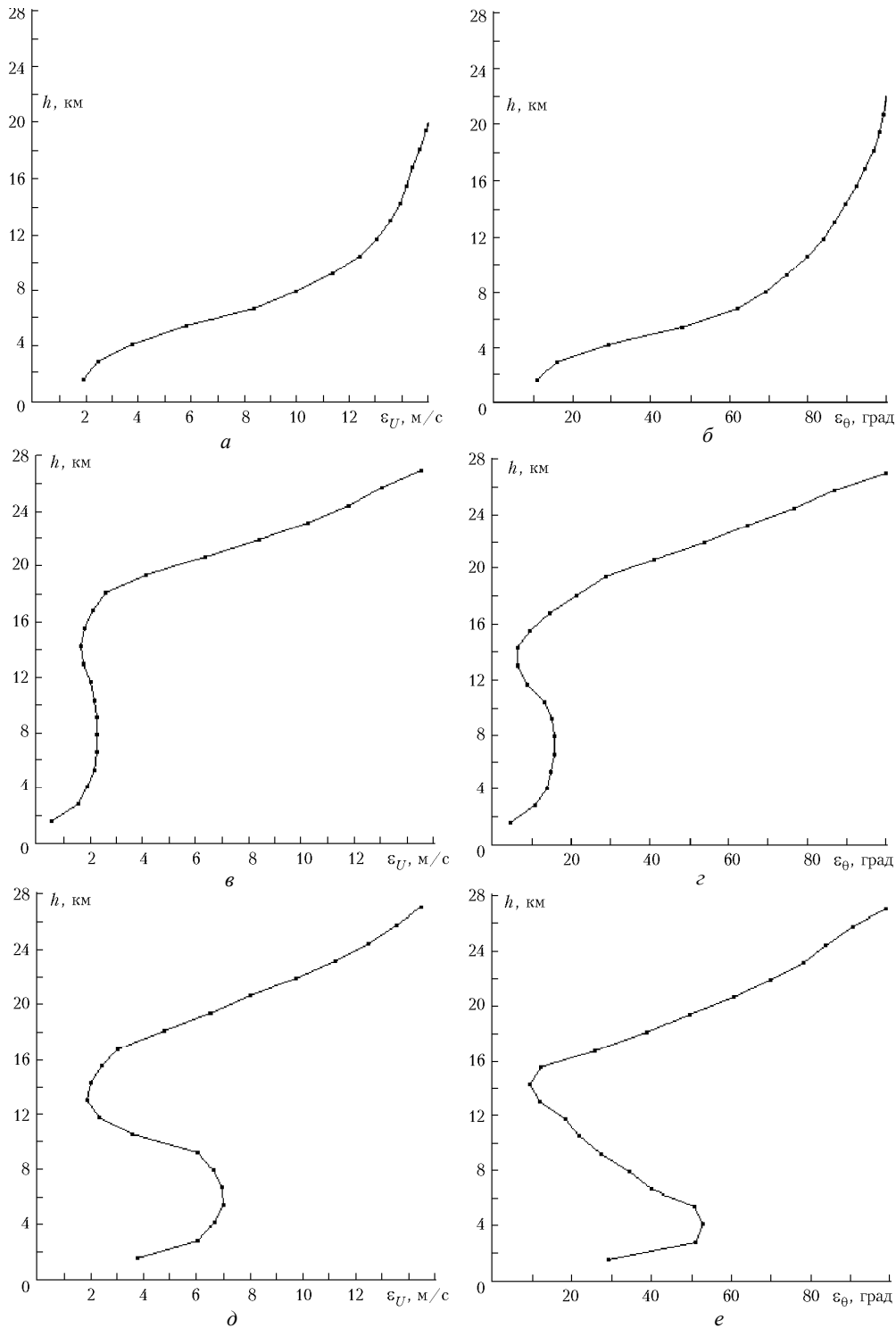


Рис. 8. Зависимости погрешностей оценивания скорости  $\varepsilon_U$  и направления  $\varepsilon_\theta$  от высоты для ФРС- (*a, б*) и ВАС- (*в – е*) методов; *a – з* – расчет в предположении отсутствия облачности; *д, е* – расчет с учетом распределения облаков по данным ГСП за 20.01.98

На рис. 8 представлены результаты расчетов зависимости погрешностей  $\varepsilon_U$  и  $\varepsilon_\theta$  от высоты в случае использования ФРС- и ВАС-методов. Данные получены в предположении отсутствия облаков вдоль спутникового трека и с учетом распределения облаков (в соответствии с данными ГСП) в области зондирования. Из сравнения рис. 8, *a, б* и *в, г* следует, что в безоблачной атмосфере ФРС-метод позволяет восстанавливать профили скорости и направления

ветра с приемлемой точностью до высот максимум 2–3 км, в то время как использование предлагаемого здесь метода ВАС дает возможность восстановления скорости ветра с погрешностью  $\approx 2$  м/с и с погрешностью по направлению  $\approx 20^\circ$  до высот  $\sim 18$  км. Если в области зондирования присутствуют облака, то, как следует из рис. 8, *д, е*, лидарное восстановление ветра возможно лишь в слое примерно от 10 до 16 км.

## Заключение

Предложен метод восстановления высотных профилей скорости и направления ветра непосредственно из данных сканирующего когерентного доплеровского лидара без предварительного оценивания радиальной скорости ветра. Как показывает численное моделирование, метод позволяет восстанавливать скорость и направление ветра из лидарных измерений со спутника с хорошей точностью. Так, для сканирующего 2-мкм лидара с энергией импульса 0,5 Дж, частотой повторения импульсов 10 Гц и диаметром телескопа 70 см в условиях безоблачной атмосферы возможно восстановление высотных профилей скорости с погрешностью  $\leq 2$  м/с и направления ветра с погрешностью  $\leq 20^\circ$  в прилегающем к Земле слое толщиной  $\sim 18$  км. Такая точность вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым метеорологическими службами к данным ветрового зондирования для их использования в прогностических моделях погоды.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 98-05-03131 и 00-05-64033).

1. Huffaker R.M., Lawrence T.R., Post M.J., Priestly J.T., Hall F.F., Jr., Richter R.A., and Keeler R.J. Feasibility studies for a global wind measuring satellite system (Windsat): analysis of simulated performance // *Appl. Opt.* 1984. V. 23. № 15. P. 2523–2536.

2. Emmitt G.D. Proc. Fourth Conf. on Coherent Laser Radar: Technology and Applications. Aspen CO // *Opt. Soc. Amer.* 1987. P. 213–216.
3. Emmitt G.D. and Wood S.A. // Proc. Fifth Conf. on Coherent Laser Radar. Munich, Germany, OSA/ IEEE/ SPIE/ Amer. Meteorol. Soc. 1989. P. 64–66.
4. Werner Ch., Streicher J., and Wildgruber G. Proc. of Central Symposium of the International Space Year Conference. Munich, March 30 – April 4, 1992. ESA SP–341.
5. Baker W.E., Emmitt G.D., Robertson F., Atlas R.M., Molinari J.E., Bowdle D.A., Paegle J., Hardesty R.M., Menzies R.T., Krishnamurti T.N., Brown R.A., Post M.J., Anderson J.R., Lorennc A.C., McElroy J. Lidar-Measured Winds from Space: A Key Component for Weather and Climate Prediction // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1995. V. 76. № 6. P. 869–888.
6. Streicher J., Leike I., and Werner Ch. ALIENS: Atmospheric Lidar end-to-end Simulator // Proc. SPIE «Atmospheric and Ocean Optics». 1998. V. 3583. P. 380–386.
7. Leike I., Streicher J., Banakh V., Smalikho I., Werner Ch., Werggen W., and Cress A. // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2001 (be published).
8. Salamitou P., Dabas A., and Flamant P.H. // *Appl. Opt.* 1995. V. 34. P. 499–506.
9. Frehlich R. // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 1997. V. 14. P. 54–72.
10. Банух В.А., Смалыхо И.Н. Оценивание скорости диссипации турбулентной энергии из данных импульсного доплеровского лидара // *Оптика атмосф. и океана.* 1997. Т. 10. № 12. С. 1524–1538.

### *V.A. Banakh, Ch. Werner, W. Werggen, A. Cress, N.P. Krivolutskii, I. Leike, I.N. Smalikho, J. Streicher. Modeling of wind reconstruction from measurements by space coherent Doppler lidar.*

A method of reconstruction of altitude profiles of the wind speed and direction immediately from the scanning coherent Doppler lidar measurements is proposed. The method does not require preliminary estimation of the wind radial speed. The method is shown to retrieve altitude profiles of the wind speed with the error of no more than 2 m/c and wind direction with the error of no more than  $20^\circ$  up to heights of 18 km from space lidar data.