

Е. Г. Прошкин

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ МЕТОДОМ РАДИОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Используемые в настоящее время традиционные прямые методы измерений метеорологических величин уже не удовлетворяют практику метеорологических наблюдений ни по оперативности, ни по объему получаемой информации.

Поэтому в последние годы развиваются неконтактные дистанционные методы и средства зондирования атмосферы, которые позволяют оперативно, без использования средств доставки метеорологических датчиков в исследуемую область пространства, получать информацию о процессах, протекающих в пограничном слое атмосферы. Эти методы основаны на том, что в реальной атмосфере происходит рассеяние и поглощение используемых излучений, которые приводят к изменению частоты, амплитуды и частотного спектра зондирующих сигналов.

К таким дистанционным методам относится и радиоакустическое зондирование (РАЗ). Отличительной особенностью этого метода является использование искусственно создаваемой звуковыми волнами периодической структуры плотности воздуха, распространяющейся в атмосфере со скоростью звука. Сведения о температуре и влажности воздуха, скорости и направлении ветра получают путем анализа доплеровского сдвига частоты и амплитуды, рассеянных на звуковой посылке, электромагнитных волн.

Метод РАЗ может быть успешно использован для исследования термодинамических свойств атмосферы над сушей и океаном, кратковременного прогнозирования неблагоприятных метеорологических ситуаций,

приводящих к повышенным уровням загрязнения атмосферного воздуха, прогнозирования условий аномального распространения УКВ, метеорологического обеспечения авиации.

Исследования метода РАЗ и создание аппаратуры начались в Харьковском государственном техническом университете радиозлектроники в 1967 г. Ниже приводятся основные результаты этих исследований.

Анализ метода, выполненный с привлечением результатов теоретических исследований явления дифракции света на ультразвуковых волнах и распространения звука в неоднородной атмосфере, позволил получить выражение для коэффициента отражения электромагнитных волн от звуковой посылки

$$\rho^2 = \frac{P_{пр}}{P_{пер}} = B \frac{n^2}{R^2} \left[ \frac{\sin \pi n \left( \frac{2\lambda_a}{\lambda_e} - 1 \right)}{\pi n \left( \frac{2\lambda_a}{\lambda_e} - 1 \right)} \right]^2 \cdot \exp \left[ - \int_0^{R_{макс}} \alpha(R) dR \right], \quad (1)$$

где  $P_{пр}$  — мощность принимаемого радиосигнала;  $P_{пер}$  — мощность излучаемого радиосигнала;  $n$  — количество длин волн в звуковой посылке;  $\alpha$  — коэффициент затухания звука в атмосфере;  $R$  — высота зондирования;  $B$  — коэффициент, зависящий от параметров аппаратуры и среды;  $\lambda_a$  — длина звуковой волны;  $\lambda_e$  — длина электромагнитной волны.

Из выражения (1) следует, что при изменении частоты звука мощность дифрагированного электромагнитного излучения изменяется по закону  $\sin x/x$ , то есть имеет лепестковый характер. Максимум рассеяния электромагнитной энергии от звуковой посылки наблюдается в случае выполнения условия Брэгга  $\frac{\lambda_e}{\lambda_a} = 2$ . Отражательная способность звуковой посылки пропорциональна  $\frac{\lambda_e}{n^2}$ . С точки зрения увеличения мощности отраженного сигнала выгодно увеличивать  $n$ , однако при этом повышается критичность выполнения условия Брэгга и ухудшается пространственная разрешающая способность. При бистатическом способе зондирования (приемная и передающая антенны радиосигнала разнесены в пространстве) и использовании звуковых посылок большой протяженности условия резонансного отражения, особенно в нижней части трассы, выполняются только от части посылки, вследствие чего нарушается прямая зависимость  $P_{пр}$  от  $n^2$ . Аналогичное явление наблюдается и при значительных градиентах температуры вдоль трассы зондирования.

Снос звуковой посылки горизонтальным ветром приводит к смещению сфокусированного пятна электромагнитного излучения относительно точки приема, вследствие чего снижается высота зондирования. Для компенсации сдвигового действия ветра на звуковую посылку предложен способ,

предусматривающий перемещение акустического излучателя в сторону, противоположную направлению ветра.

Выполненные исследования показали, что основные метеорологические величины, за исключением давления воздуха, могут быть определены методом РАЗ.

Определение температуры воздуха оказалось возможным благодаря тому, что скорость звука в воздухе зависит от температуры. Эта зависимость в неподвижном воздухе описывается соотношением Лапласа  $C_{зв} = A\sqrt{T}$  и при наличии ветра  $C_{зв} = A\sqrt{T} \pm U_p$ , где  $A$  — коэффициент, слабо зависящий от влажности и давления воздуха;  $T$  — температура;  $U_p$  — составляющая скорости ветра в направлении распространения звука. Результаты длительной эксплуатации систем РАЗ показали, что за время осреднения измеренных значений температуры происходит также осреднение значений  $U_p$  и, как правило, погрешность измерения температуры не превышает 0,5 К [1]. В случае необходимости повышения точности измерения температуры значения  $U_p$  могут быть определены с помощью акустического метода зондирования. Учитывая, что величина доплеровского сдвига частоты отраженных сигналов при радиоакустическом зондировании связана со скоростью звука соотношением  $f_g = 2C_{зв}/\lambda_e$ , возможно определить температуру воздуха

$$t^{\circ}C = \left[ \frac{f_g \cdot \lambda_e}{2A} \right]^2 - 273,15. \quad (2)$$

Для уменьшения методической погрешности из-за отсутствия априорных данных о распределении влажности вдоль трассы распространения звуковых волн необходимо выполнять наземные измерения влажности воздуха традиционными для метеорологии методами и вводить поправку значений  $A$ , а также учитывать бистатистический способ зондирования при расчете температуры воздуха.

Выполненный расчет относительной погрешности измерения температуры показал, что при однократном зондировании  $\sigma_T/T = 4 \cdot 10^{-3}$ . Для снижения погрешности необходимо производить многократное зондирование. Так, например, при  $T = 273K$  и количестве зондирований  $n = 16$   $\sigma_T = 0,273K$ .

Для определения скорости и направления ветра разработаны следующие способы зондирования.

Зондирование с помощью однопозиционной системы в четырех, трех или двух направлениях [1]. Для определения полного вектора скорости ветра при наклонном зондировании в четырех направлениях необходимо решить систему четырех уравнений вида  $C = C_{зв} + \vec{U} \cdot \vec{V}$ , где  $C$  — скорость

распространения звуковых волн в направлении зондирования;  $C_{зв}$  — скорость звуковых волн, определяемая значениями температуры и влажности воздуха;  $\vec{U} \vec{V}$  — проекция скорости ветра на нормаль к звуковой волне. Необходимо отметить, что вертикальная составляющая скорости ветра рассмотренным способом определяется с большой погрешностью и поэтому целесообразно производить наклонное зондирование только в трех направлениях (рис. 1, а). Если угол  $\beta$  выбрать равным  $45^\circ$ , то горизонтальная составляющая скорости ветра определяется выражением

$$U = \frac{\sqrt{2}}{8} \cdot \frac{\lambda_e}{\sin \alpha} \sqrt{(f_{g_2} - f_{g_1})^2 + (f_{g_2} - f_{g_3})^2}, \quad (3)$$

а направление ветра — выражением

$$\varphi = \arctg \frac{f_{g_2} - f_{g_1}}{f_{g_2} - f_{g_3}}, \quad (4)$$

где  $f_{g_1}$ ,  $f_{g_2}$ ,  $f_{g_3}$  — доплеровский сдвиг частоты радиосигнала в направлениях 1, 2 и 3.

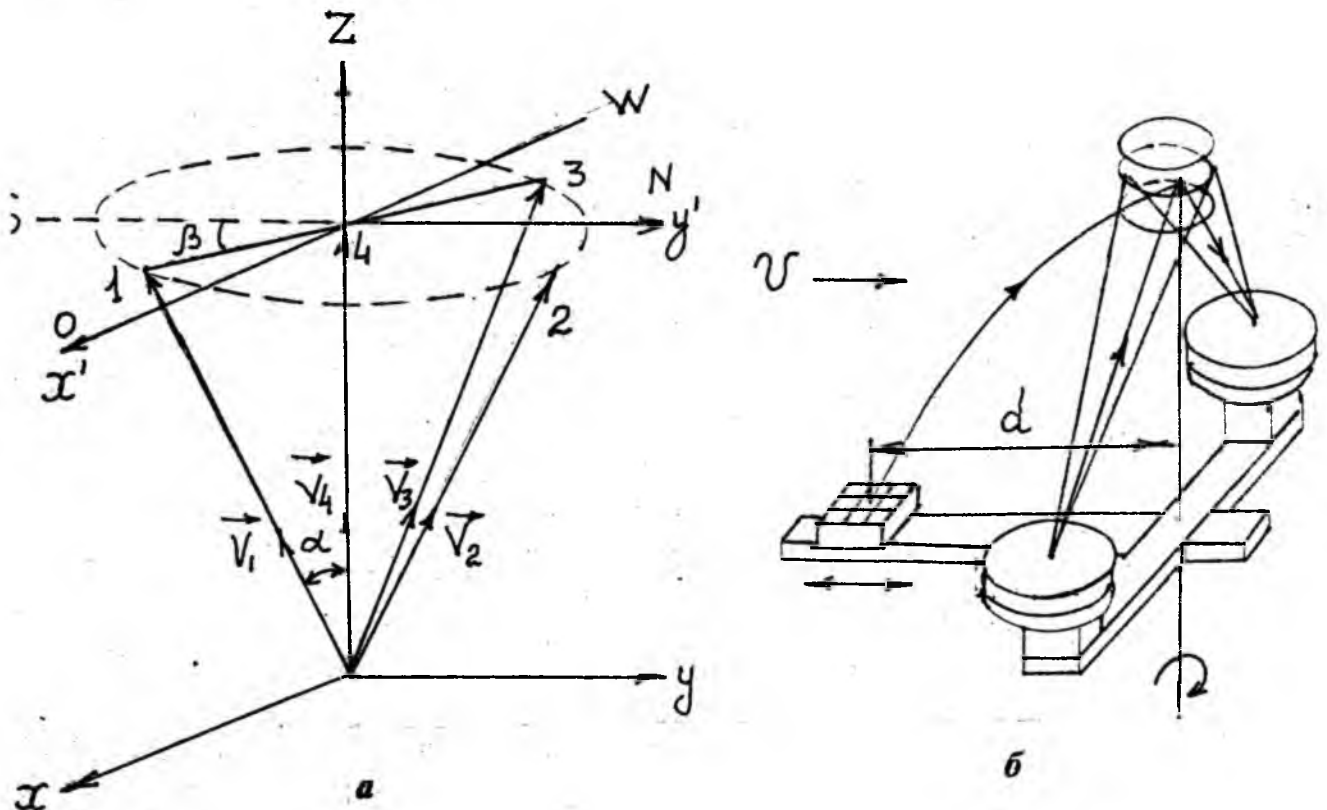


Рис. 1. Определение скорости и направления ветра способом наклонного зондирования (а) и способом смещения акустического излучателя (б)

Недостатком метода является его сложность и значительное влияние скорости ветра на высоту зондирования.

Лучшие результаты измерения параметров ветра получаются при зондировании только в двух противоположных направлениях: по ветру и против ветра. Направление ветра определяется по максимальному или минимальному значениям сдвига доплеровской частоты сигнала, найденным при круговом развороте антенного устройства. При этом горизонтальная составляющая скорости ветра

$$V = \frac{\lambda_e}{4} (f_{g_1} - f_{g_3}) \cdot \cos \alpha, \quad (5)$$

Среднее значение скорости ветра в исследуемом слое атмосферы может быть найдено путем измерения величины выноса акустического излучателя в сторону, противоположную направлению ветра и времени распространения звуковой посылки от момента ее излучения до приема максимального значения отразившегося от посылки радиосигнала.

Величина выноса определяется из условия

$$d = \frac{V(R)}{c_{зв}} \cdot R, \quad (6)$$

где  $V(R)$  — среднее значение ветра в слое.

Сущность измерения скорости и направления ветра заключается в следующем. При выполнении кругового разворота антенного устройства вокруг вертикальной оси по максимуму сигнала, отраженного от звуковой посылки, определяется направление ветра (рис. 1, б). По измеренным значениям  $d$  и  $\Delta t$  находится скорость ветра в слое.

Более оперативный метод измерения скорости ветра основан на анализе пространственного распределения интенсивности радиосигнала, отраженного от сферических поверхностей акустического пакета. Перемещающийся в горизонтальном направлении под действием ветра акустический пакет вызывает также перемещение сфокусированного им “пятна”, которое, проходя через раскрыв приемной антенны, приводит к изменению амплитуды радиосигнала. Время прохождения “пятна” через раскрыв антенны обратно пропорционально скорости ветра. Произведя измерения амплитуд сигнала через равные промежутки времени  $\Delta t$  на нарастающем участке ( $A_1$ ), вблизи максимума ( $A_2$ ) и на спаде ( $A_3$ ), вычислим скорость ветра по формуле

$$V = \frac{K_{\Phi}}{2\Delta t} \sqrt{\frac{1}{2} \rho_n \left( \frac{A_2^2}{A_1 \cdot A_3} \right)}, \quad (7)$$

где  $K_{\phi}$  — параметр фокусировки, определяемый площадью раскрыва антенн.

Определение влажности воздуха методом РАЗ оказалось возможным благодаря существующей частотной зависимости поглощения звука в атмосфере. Поэтому для определения влажности разработан способ двухчастотного зондирования, основанный на том, что отношение мощностей радиосигналов, отраженных от звуковых посылок различной частоты, при выполнении резонансной дифракции зависит как от дальности зондирования, так и от разности коэффициентов поглощения звуковых волн в реальной атмосфере. По измеренной величине разности коэффициентов поглощения  $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ , которая зависит от концентрации паров воды, температуры воздуха и частоты звукового излучения, определяется значение влажности. Температура находится путем измерения доплеровского сдвига частоты любого из двух эхосигналов.

Минимальные значения погрешности определения влажности достигаются в области положительных температур при малых значениях относительной влажности и составляют при устойчивой стратификации атмосферы порядка 5 %. С увеличением турбулентности атмосферы погрешность определения влажности возрастает.

Для анализа влияния атмосферы на условия распространения радио и оптического диапазонов волн необходимо знать высотное распределение коэффициента преломления воздуха.

Так как метод и аппаратура РАЗ позволяют дистанционно получать данные о вертикальных профилях температуры и влажности воздуха, а атмосферное давление может быть измерено прямыми методами у поверхности земли или океана с последующим пересчетом по барометрической формуле для заданных значений высот, оказалось возможным определять профили показателя преломления для радио и оптического диапазонов волн косвенным методом, используя формулу Дебая [2].

Учитывая полученные значения погрешностей определения температуры и влажности воздуха методом РАЗ и погрешность измерения давления примененными в исследованиях барометрами, для случая устойчивой стратификации атмосферы получим  $\sigma_N \approx 3N$  единицы. Выполненные оценки погрешности определения  $N$  свидетельствуют о целесообразности использования метода РАЗ для получения данных непрерывного характера о профиле показателя преломления в условиях устойчивой стратификации атмосферы, то есть в условиях, когда возможно распространение дециметровых и более коротких радиоволн за линию горизонта. Исходя из требований, предъявляемых к аппаратуре РАЗ и путей их реализации [3], были разработаны и реализованы три модификации одночастотных систем и двухчастотная

**система РАЗ.** Использование дециметрового диапазона радиоволн позволило создать мобильные системы, пригодные для маршрутных измерений метеовеличин и использования в экспедициях по изучению термодинамических свойств пограничного слоя атмосферы в различных регионах страны. В акустическом канале двухчастотной системы используются сигналы частоты 3,4 и 6,8 кГц. Для измерения температуры воздуха, скорости и направления ветра до высот 400 м система работает в режиме одночастотного излучения звукового сигнала частотой 3,4 кГц. Измерение влажности воздуха до высот 150 м осуществляется в режиме двухчастотного излучения сигналов. Наличие в составе аппаратуры моностатического акустического локатора позволяет дополнительно к метеовеличинам, определяемым радиоакустическим зондированием, измерять вертикальную составляющую скорости ветра, получать сведения о пространственно-временном характере атмосферной турбулентности, определять высоту верхней границы туманов.

В системе реализован принцип внутренней когерентности доплеровского радиолокатора, предусмотрено устройство компенсации воздействия ветра на дальность зондирования, применена подстройка частоты звука для выполнения условий резонансной дифракции, осуществлена квазиоптимальная фильтрация сигнала с использованием следящего фильтра. Реализация бистатического способа зондирования обеспечивает высокую степень развязки между передающим и приемным трактами доплеровского радиолокатора, работающего в режиме непрерывного излучения электромагнитных волн, использование которого обосновано узкополосностью метода РАЗ, а также требованием обеспечения малой "мертвой" зоны.

Требуемая интенсивность звукового излучения обеспечивается решеткой, состоящей из большого количества рупорных электродинамиков.

Для экспериментального определения погрешностей измерения метеовеличин проведены сравнительные измерения системами РАЗ и контактными датчиками, установленными на восьми уровнях 300-метровой высотной метеорологической мачты. При оценке погрешности измерения анализировались значения среднеквадратического отклонения  $\sigma_{ср}$  измерений метеовеличин системой РАЗ от результатов измерений тех же величин датчиками, установленными на мачтах. Для анализа привлекались данные зондирования, полученные в разное время года и суток и в различных метеорологических условиях. В результате проведенных сравнительных измерений установлено, что погрешности определения метеовеличин методом РАЗ не превышают: температуры 0,5 К, скорости ветра 1 м/с, направления ветра 10°, влажности (при устойчивой стратификации атмосферы) 10%. Выполненный анализ сравнительных измерений свидетельствует о соответствии полученных точностных характеристик с априорными оценками.

Исследование термодинамического состояния пограничного слоя атмосферы в прибрежной зоне при ясном небе и при наличии туманов проводилось на полигоне Одесского гидрометеорологического института. Радиоакустическое и акустическое зондирование производилось в условиях, контролируемых с помощью средств дистанционного радиозондирования и наземного автоматизированного аппаратурного комплекса, метеорологические датчики которого располагались на высотах 2 м и 16,5 м.

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты измерения профилей температуры  $T$ , влажности  $H$ , скорости ветра  $V$  и индекса преломления воздуха  $N$ . Крестиками обозначены значения метеовеличин, полученные при радиозондировании, а точками (на уровнях 2 м и 16,5 м) — датчики наземного аппаратурного комплекса в согласованные с РАЗ сроки.

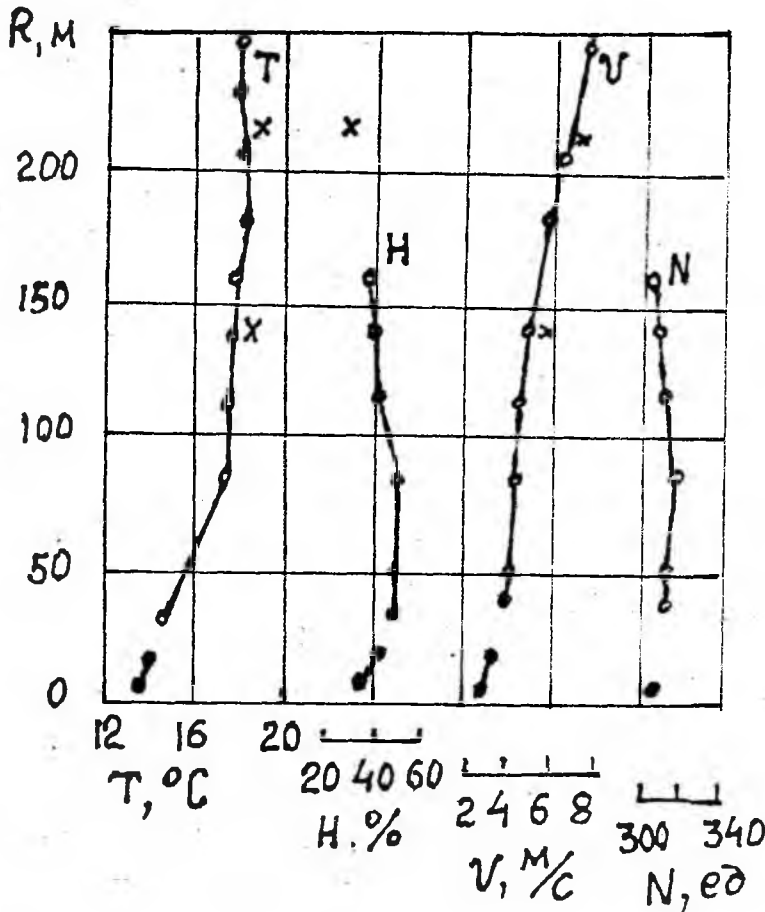


Рис. 2. Результаты измерения температуры  $T$ , влажности  $H$ , скорости ветра  $V$  и индекса преломления воздуха  $N$

На рис. 3 изображены пространственно-временные структуры полей температуры воздуха (а) и ветра (б) по данным РАЗ и наземных метеонаблюдений с одновременной регистрацией изменения высотного положения области повышенного отражения для моностатического акустического зондирования при адвективном тумане.

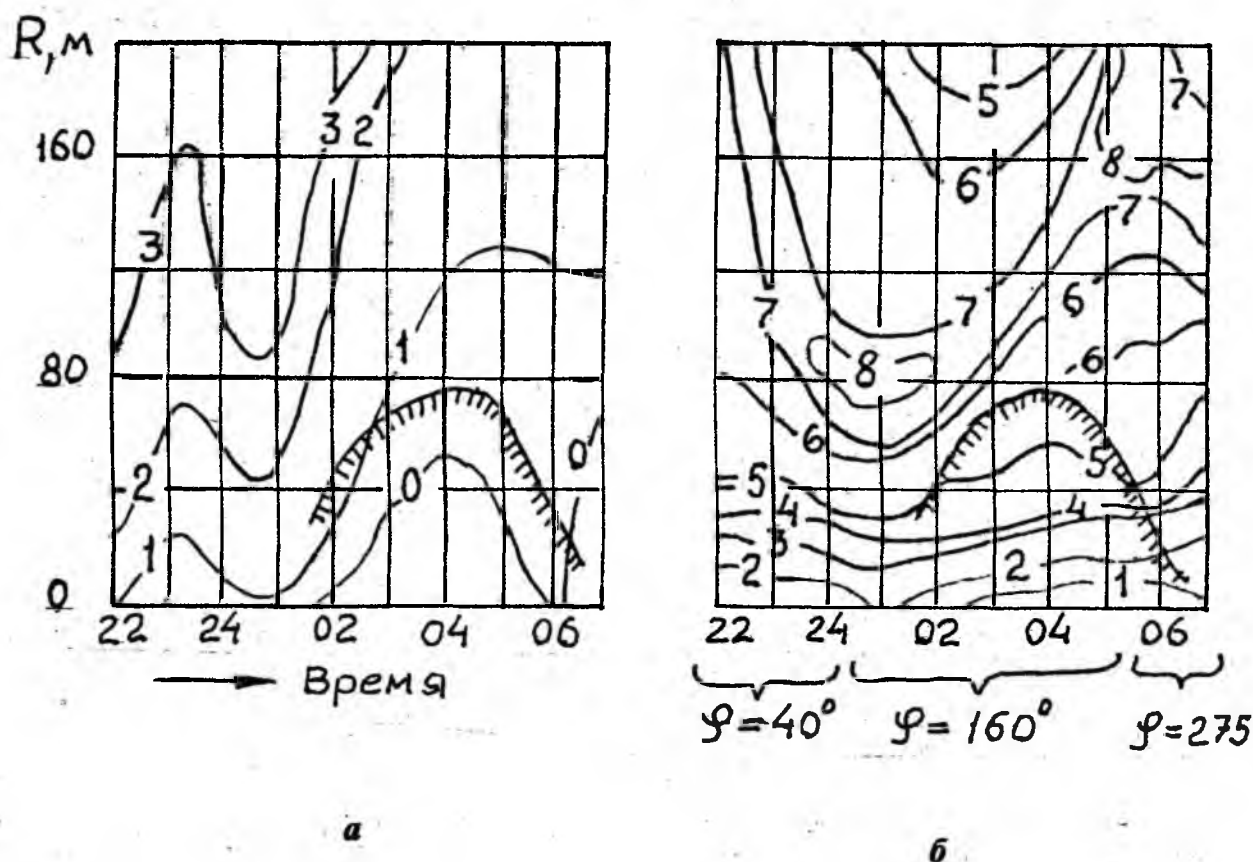


Рис. 3. Пространственно-временные структуры полей температуры воздуха (а) и ветра (б)

Л и т е р а т у р а: 1. Бабкин С. И., Прошкин Е. Г., Ульянов Ю. Е. Экспериментальные результаты температурно-ветрового зондирования атмосферы радиоакустическим методом // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.— 1984.— Т. 6.— С. 495—500. 2. Современная радиолокация / Под ред. Ю. Б. Кобзарева. — М., 1969. — 704 с. 3. Прошкин Е. Г. Радиоакустическое зондирование в системе контроля загрязнения атмосферного воздуха.— 1987.— 115 с.— Деп. в УкрНИИНТИ 05.05.87.— № 1382-Ук 87.