

Содарные исследования турбулентности нижней атмосферы

Н. П. Красненко^{1,2}, Л. Г. Шаманаева³

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева В.Е., 1, E-mail: krasnenko@imces.ru; sima@iao.ru

Анализируются результаты содарных исследований пространственно-временная динамики трех компонент скорости ветра, продольных и поперечных структурных функций поля скорости ветра, структурных характеристик полей температуры и скорости ветра, скорости диссипации кинетической энергии турбулентности, и внешних масштабов температурной и динамической турбулентности в атмосферном пограничном слое. Использован замкнутый итерационный алгоритм обработки содарных данных с учетом турбулентного ослабления звука по трассе распространения, позволяющий одновременно восстанавливать вертикальные профили структурных характеристик полей температуры и скорости ветра и исследовать их взаимосвязь. Результаты измерений показали, что поперечная структурная функция значительно меньше продольной, что указывает на сильную анизотропию атмосферных флуктуаций в продольном и поперечном направлении и сдвливании мелкомасштабной турбулентности в вертикальном направлении. При этом вертикальные профили структурных характеристик скорости ветра, рассчитанные с использованием продольной и поперечной структурных функций, хорошо согласуются между собой и описываются предсказанной теорией $z^{-2/3}$ зависимостью от высоты. В течение суток, значения скорости диссипации изменяются на 2 порядка, при этом она минимальна в утренние часы, затем увеличивается, достигая максимума в вечерние часы, а затем вновь уменьшается примерно на порядок в ночные часы. С ростом высоты, скорость диссипации вначале уменьшается, а затем остается практически постоянной. В реальном масштабе времени визуализируется структура как температурной, так и ветровой турбулентности, что очень важно для практических приложений.

Results of sodar investigations of spatiotemporal dynamics of three wind velocity components, longitudinal and transverse structural functions of wind velocity field, structural characteristics of temperature and wind velocity fields, turbulent kinetic energy dissipation rate, and external scales of temperature and dynamic turbulence in the atmospheric boundary layer are analyzed. A closed iterative algorithm of sodar data processing taking into account the turbulent sound attenuation on the propagation path of acoustic radiation is used that allows us to reconstruct simultaneously the vertical profiles of the structural characteristics of the temperature and wind velocity fields and to investigate their interrelations. Results of sodar measurements demonstrate that the transverse structural function is much smaller than the longitudinal one, which indicates strong anisotropy of atmospheric fluctuations in the longitudinal and transverse directions and squeezing of small-scale turbulence in the vertical direction. The vertical profiles of the structural characteristics of wind velocity calculated using the longitudinal and transverse structural functions are in good agreement with each other and are described by the $z^{-2/3}$ altitude dependence predicted theoretically. During the daytime, the energy dissipation rate changes by 2 orders of magnitude, reaching a minimum in the morning hours, then increases reaching a maximum in the evening, and then decreases again by an order of magnitude at night. With increasing altitude, the energy dissipation rate first decreases and then remains almost constant. The structure of both temperature and dynamic turbulence is visualized in real time, which is very important for practical applications.

Введение

Знание характеристик атмосферной турбулентности имеет фундаментальное значение для исследования структуры и динамики атмосферного пограничного слоя (АПС) и построения его математической модели, широко используемой для целей синоптического прогноза, теоретического анализа и прогноза распространения электромагнитного и акустического излучений, а также диффузии загрязняющих примесей. Статистические характеристики атмосферной турбулентности зависят от высоты над земной поверхностью. При анализе случайного поля скорости ветра в атмосфере, в качестве основных характеристик мелкомасштабных пульсаций используются структурные функции – средние квадраты разностей компонент скорости ветра в двух точках. Для измерения характеристик турбулентности в АПС в основном используются средства лазерного (лидары) и акустического (содары) зондирования. Применение содаров позволяет получать длинные временные ряды наблюдений вертикальных профилей вектора скорости ветра и рассчитать структурные функции поля скорости ветра для разнеса точек наблюдения вплоть до нескольких сотен метров.

В докладе по результатам работ авторов [1–8] анализируется пространственно-временная динамика характеристик атмосферной турбулентности, включая три компонента скорости ветра, продольные и поперечные структурные функции поля скорости ветра, структурные характеристики температуры и скорости ветра, скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, и внешние масштабы температурной и динамической турбулентности, рассчитанные из временных рядов вертикальных профилей вектора скорости ветра, измеренных содаром с рабочей частотой 1700 Гц и мини-содаром с рабочей частотой 4900 Гц с использованием замкнутого итерационного алгоритма обработки содарных данных с учетом турбулентного ослабления звука по трассе распространения до зондируемого объема и обратно, позволяющего впервые одновременно восстанавливать вертикальные профили структурных характеристик полей температуры и скорости ветра и исследовать их взаимосвязь.

Метод зондирования и обработки данных

Доплеровские содары позволяют получать длинные временные ряды вертикальных профилей мощности обратнорассеянного сигнала $P_j(z_k)$ и трех компонент скорости ветра $V_{i,j}(z_k)$ в высотных стробах z_k , где $i = x, y, z$, $j = 1, \dots, N$ обозначает порядковый номер профиля в серии из N измерений, и $k = 1, \dots, M$ обозначает порядковый номер строба. Их можно использовать для расчета временных продольных и поперечных структурных функций для каждого высотного строба z_k :

$$D_{rr}(z_k, n\Delta t \langle \mathbf{V}(z_k) \rangle) = \frac{1}{N-n-1} \times \sum_{j=1}^{N-n-1} [V'_{j+n}(z_k) - V'_j(z_k)]^2, \quad n=1, \dots, N/5, \quad (1)$$

$$D_{tt}(z_k, n\Delta t \langle V_z(z_k) \rangle) = \frac{1}{N-n-1} \sum_{j=1}^{N-n-1} [V_{z,j+n}(z_k) - V_{z,j}(z_k)]^2, \quad n=1, \dots, N/5. \quad (2)$$

Здесь

$$|\mathbf{V}(z_k)| = \sqrt{\langle V_x(z_k) \rangle^2 + \langle V_y(z_k) \rangle^2 + \langle V_z(z_k) \rangle^2}, \quad (3)$$

$$\langle V_i(z_k) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_{i,j}(z_k), \quad i = x, y, z, \quad (4)$$

$$V'_j(z_k) = \{V_{x,j} \langle V_x(z_k) \rangle + V_{y,j}(z_k) \langle V_y(z_k) \rangle + V_{z,j}(z_k) \langle V_z(z_k) \rangle\} / |\langle \mathbf{V}(z_k) \rangle| \quad (5)$$

- продольный компонент вектора скорости ветра по результатам единичного

измерения для высотного строба z_k , и $\langle \mathbf{V}(z_k) \rangle$ - вектор скорости ветра для строба z_k усредненный за период измерения $T = Nt$.

Вертикальные профили структурной характеристики скорости ветра $C_V^2(z_k)$ рассчитывались по формуле:

$$C_V^2(z_k) = \left\langle \left[V_{z,j}(z_k + r) - V_{z,j}(z_k) \right]^2 \right\rangle \cdot r^{-2/3}. \quad (6)$$

Разнос точек наблюдения может быть выбран либо в горизонтальном, либо в вертикальном направлении. В первом случае $C_{V_t}^2(z_k)$ рассчитывается из вертикального компонента скорости ветра, измеренного в стробе z_k с временной задержкой $n_t \Delta t$ ($n_t = 1, \dots, N/5$, N - число измерений в серии и Δt - период повторения импульсов; в этом случае, $r = n_t \Delta t \langle \mathbf{V}(z_k) \rangle$). Во втором случае, $C_{V_z}^2(z_k)$ рассчитывается из вертикального компонента скорости ветра, измеренного в различных стробах, разнесенных на расстояние $r = n_z \Delta z$ (здесь Δz - вертикальная протяженность строба, и M - число стробов в интервале высот зондирования).

Скорость диссипации кинетической энергии турбулентности $\varepsilon(z_k)$ рассчитывалась по структурной характеристике скорости ветра с использованием формулы:

$$\varepsilon(z_k) = \left[\frac{C_V^2(z_k)}{1.97} \right]^{3/2}. \quad (7)$$

По мощности сигнала обратного рассеяния $P_j(z_k)$, с использованием итерационного алгоритма, рассчитывался вертикальный профиль структурной характеристики температуры и внешний масштаб температурной турбулентности.

Математически, внешний масштаб температурной турбулентности вычислялся с использованием замкнутого итерационного алгоритма, учитывающего дополнительное турбулентное ослабление сигнала. Выражение для i -той итерации внешнего масштаба температурной турбулентности $L_{0T}^{(i)}$ в зависимости от высоты z_k над подстилающей поверхностью имеет вид

$$L_{0T}^{(i)}(z_k) = \left[\frac{C_T^{2(i)}(z_k)}{2.8 \gamma_a^2} \right]^{3/4}. \quad (8)$$

Здесь γ_a - адиабатический градиент температуры, $C_T^{2(i)}(z_k)$ - i -тая итерация структурной характеристики температуры, которая для j -того измерения рассчитывается по формуле

$$C_{0Tj}^{2(i)}(z_k) = \frac{2.7 \cdot 10^2 A_c \lambda^{1/3} T^2 z^2 P_j(z_k)}{\gamma_1 \gamma_2 c \tau A_t P_0 L^{(i-1)}(z_k)}, \quad (9)$$

c - скорость звука,

$\lambda = c/f$ - длина волны,

f - рабочая частота содара,

T - поверхностная температура воздуха,

τ - длительность импульса содара,

A_c - инструментальная константа,

A_t - площадь приемопередающей антенны содара,

$P_j(z_k)$ - мощность сигнала обратного рассеяния с высоты z_k в j -том измерении,

$j = 1, \dots, N$,

P_{0j} – мощность излучаемого сигнала,

γ_1 и γ_2 – коэффициенты преобразования электрического сигнала в акустический и наоборот,

$$L^{(i)}(z_k) = L_{abs}(z_k) \cdot L_{turb}^{(i)}(z_k) \quad (10)$$

– i -тая итерация фактора ослабления, $i = 1, \dots, M$, обусловленная классическим и молекулярным поглощением звуковых волн и его турбулентным ослаблением при распространении от передатчика до рассеивающегося объема и обратно.

Пространственная структурная функция скорости ветра в зависимости от разнота точек наблюдения r в инерционном ($l_{0V} \ll r \ll L_{0V}$, где l_{0V} – внутренний и L_{0V} – внешний масштабы динамической турбулентности) и энергетическом интервалах ($L_{0V} \ll r$) описывается следующими соотношениями:

$$D(z_k, r) = \begin{cases} C_V^2(z_k) \cdot r^{2/3}, & l_{0V} \ll r \ll L_{0V}(z_k), \\ C_V^2(z_k) \cdot L_{0V}(z_k)^{2/3}, & L_{0V}(z_k) \ll r. \end{cases} \quad (13)$$

Она пропорциональна $r^{2/3}$ в инерционном интервале и затем насыщается на постоянную величину. Точка перегиба зависимости структурной функции от разнота точек наблюдения в степени $2/3$ и определяет величину внешнего масштаба $L_{0V}(z_k)$ динамической турбулентности. Формулы (1), (2) и (6)–(9) были реализованы в замкнутом итерационном вычислительном алгоритме.

Измерения проводились трехкомпонентным моностатическим доплеровским содаром с рабочей частотой 1700 Гц, периодом посылки импульсов 11,5 с, длительностью импульса 150 мс. Одна приемная антенна содара была ориентирована вертикально, а две другие наклонены под углом 20° к вертикали в ортогональных плоскостях. Нормированная мощность сигнала обратного рассеяния измерялась с высотным разрешением $\Delta z = 20$ м, минимальная высота зондирования варьировала от 48 до 74 м в зависимости от шумовой обстановки в период измерения. Итерации прекращались на высоте z_M , когда они начинали расходиться. При этом дополнительно контролировалось отношение сигнал/шум по факсимильной записи сигнала. Обработывались серии из $N = 53$ измерений, что обеспечивало 10-мин период усреднения. Аппаратурные константы содара, входящие в формулу (11), были определены путем калибровки содара по результатам независимых измерений C_T^2 ультразвуковым термометром/анемометром в условиях развитой конвекции.

Обработывались также результаты измерений доплеровского мини-содара с рабочей частотой 4900 Гц, длительностью импульса излучения $\tau = 60$ мс, периодом посылки зондирующих импульсов 4 с. Излучение последовательно посылалось и принималось в трех направлениях – вертикальном и наклонных под углами $\alpha = 14^\circ$ к вертикали в двух взаимно ортогональных плоскостях. Высотные профили трех компонентов скорости ветра $V_{i,j}(z_k)$, $i = x, y, z$, $j = 1, \dots, N$ измерялись в $M = 40$ строках z_k шириной $\Delta z = 5$ м в диапазоне высот 5–200 м. Серии из $N = 150$ профилей обеспечивали получение структурных функций скорости ветра с 10-мин усреднением.

Результаты измерений

Доплеровские моностатические содары широко используются для измерения вертикальных профилей вектора скорости ветра в пограничном слое атмосферы. Из их измерений определяют также вертикальные профили структурных характеристик скорости ветра C_V^2 . Они используются и для определения профилей структурных

характеристик температуры C_T^2 по интенсивности обратно рассеянного сигнала. Однако, сопоставление содарных данных с данными локальных измерений показало, что расхождение содарных и локальных значений C_T^2 в среднем составляет 40% и может достигать 2–5 раз в зависимости от атмосферных условий, что было объяснено неучетом турбулентного ослабления.

Представленный в докладе оригинальный итерационный метод акустического зондирования атмосферной турбулентности с учетом турбулентного ослабления, позволяет одновременно восстанавливать вертикальные профили структурных характеристик температуры и скорости ветра.

На рис. 1 приведены синхронные вертикальные профили структурных характеристик температуры $C_T^2(z)$ и скорости ветра, рассчитанные для вертикального (обозначенные C_{Vz}^2) и горизонтального разноса точек наблюдения (обозначенные C_{Vt}^2) по результатам измерений содаром в утренние (10:00, *а* и *б*) и вечерние часы (16:00, *в* и *г*). Время усреднения 10 минут. Звездочками показаны результаты локальных измерений микропульсационными датчиками.

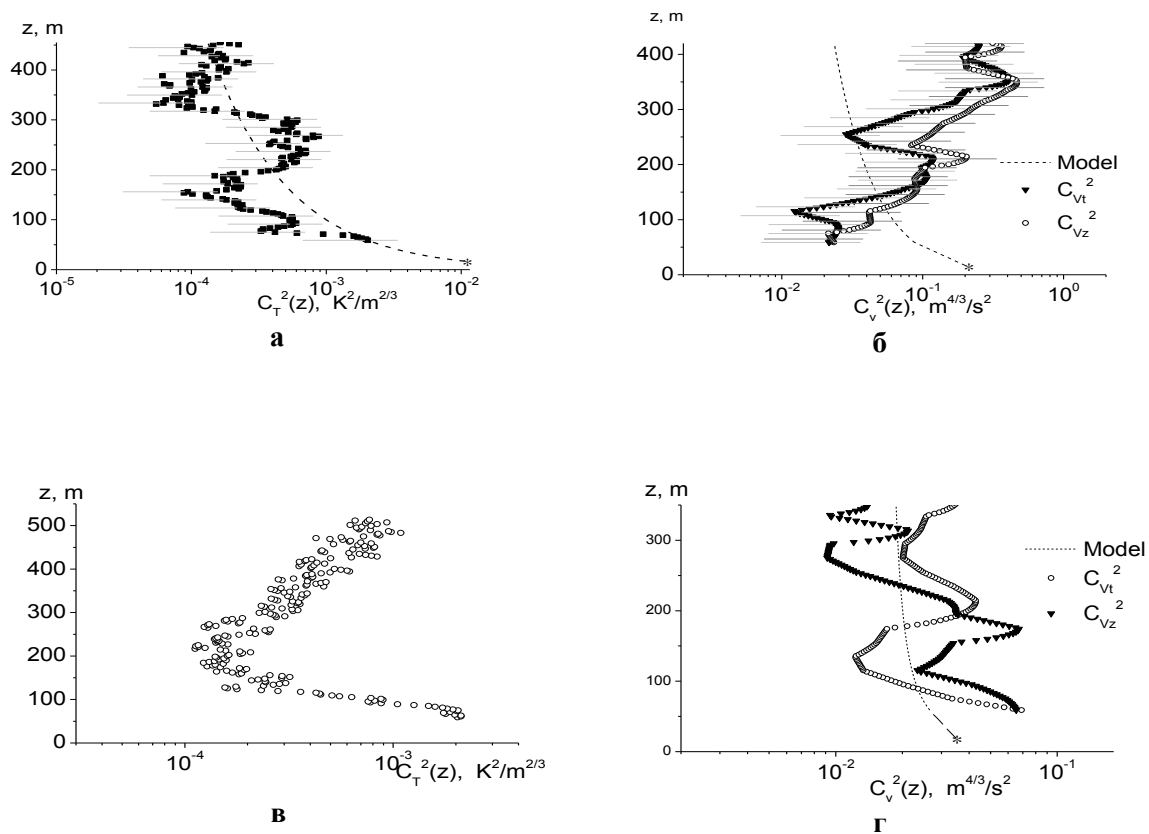


Рис. 1. Структурные характеристики температуры и скорости ветра

Рисунок 2, *а–е* иллюстрирует синхронную временную динамику температурной (факсимильная запись сигнала *а*, *з*) и ветровой турбулентности (*б*, *д* – поперечная (D_{tt}) и *в*, *е* продольная (D_{tt}) структурные функции скорости ветра) в нижнем 200-метровом слое атмосферы в градациях искусственного цвета для двух 10-мин серий измерений минисодаром. Обработывались данные непрерывных минисодарных измерений в течение 6 суток. На факсимильных записях отчетливо видна перьевая структура, характерная для условий дневной конвекции, верхняя граница которой подвержена квазипериодическим колебаниям и имеет выраженную тенденцию к увеличению высоты за период наблюдения. Величины поперечной (*б*, *д*) и продольной (*в*, *е*) структурных функций, в m^2/c^2 , в градациях искусственного цвета, указаны справа от

рисунков. Видно, что поперечная структурная функция много меньше продольной, что указывает на сильную анизотропию атмосферных флуктуаций в продольном и поперечном направлении и сдвигании мелкомасштабной турбулентности в вертикальном направлении. Поведение продольной структурной функции также характеризует динамику высоты слоя перемешивания.

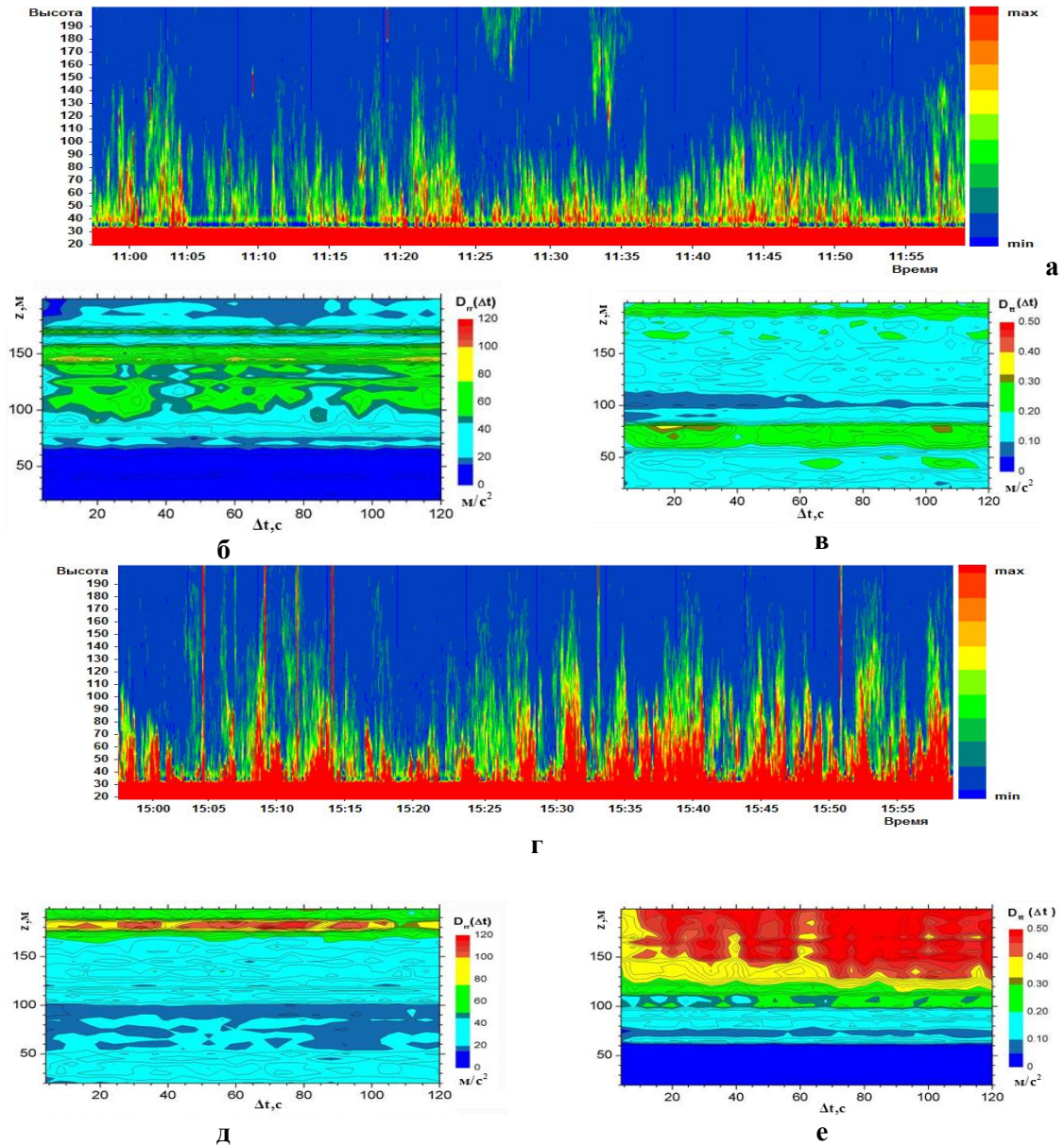


Рис. 2. Динамика структуры температурной и ветровой турбулентности утром в 11:00 (а–в) и днем в 15:00 (г–е)

На рис. 3, а приведен типичный пример временной продольной структурной функции скорости ветра $D_{rr}(z, \Delta t)$, рассчитанной по формуле (1) по результатам измерений содаром в летнее время с 10:00 до 10:10 местного времени, а на рис. 3, б показана соответствующая ей пространственная структурная функция $D_{rr}(z, \Delta r)$, рассчитанная с использованием гипотезы замороженной турбулентности. Видно, что временные структурные функции с увеличением интервала времени наблюдений остаются практически постоянными, испытывая только локальные осцилляции. Их значения растут с увеличением высоты зондирования. Пространственные структурные

функции вначале растут с увеличением разноса точек наблюдения, а затем выходят на режим насыщения, как и предсказывается теорией. Анализ полученных результатов показал, что с увеличением высоты зондирования, насыщение наблюдается при меньших разносах Δr .

На рис. 4 показана продольная временная структурная функция скорости ветра рассчитанная с использованием уравнения (1). Высотные профили вектора скорости ветра измерялись мини-содаром также в летнее время с 16:00 до 16:10. Видно, что поле скорости ветра однородно во времени; оно остается практически неизменным с увеличением времени и растет с высотой точки наблюдения. При этом с увеличением высоты наблюдения с 30 до 110 м, значение структурной функции возрастает с $\sim 10 \text{ м}^2/\text{с}^2$ до $\sim 50 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Для больших высот, $D_{rr}(z, \Delta t)$ увеличивается быстрее, достигая $\sim 100 \text{ м}^2/\text{с}^2$ для $z=125$ м. Два слоя интенсивной турбулентности, в которых $D_{rr}(z, \Delta t)$ достигает $135 \text{ м}^2/\text{с}^2$, располагаются на высотах 125–145 м и 170–180 м. Для высот более 180 м, структурная функция насыщается на $D_{rr}^{\text{sat}}(z, \Delta t) \approx 100 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

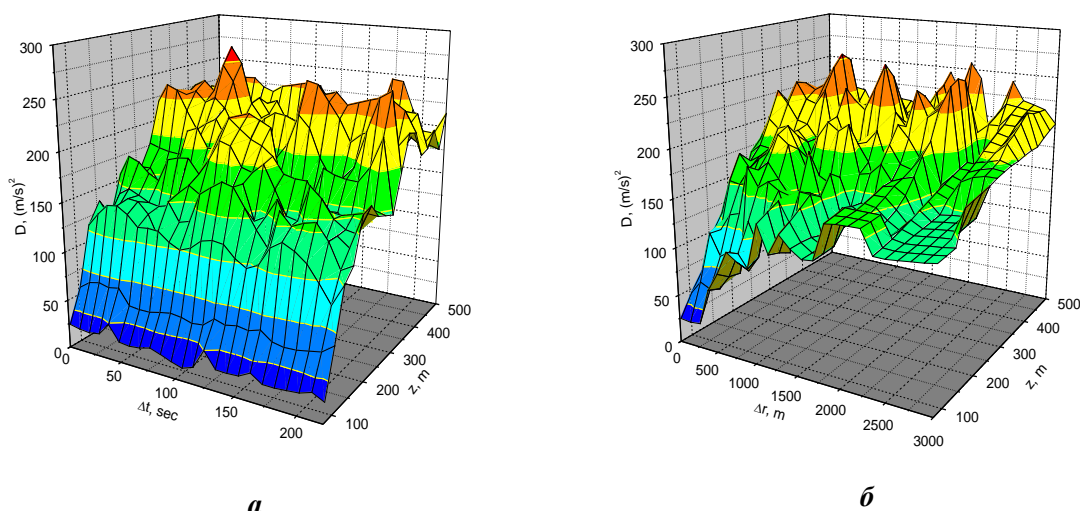


Рис. 3. Продольная временная (а) и пространственная (б) структурные функции скорости ветра по результатам измерений содара

Соответствующая временная поперечная структурная функция $D_{tt}(z, \Delta t)$, рассчитанная по формуле (2), приведена на рис. 5. Она много меньше $D_{rr}(z, \Delta t)$. Сильная анизотропия временных спектров флуктуаций амплитуды звуковой волны при ее продольном и поперечном распространении относительно скорости ветра отмечалась и ранее. При этом корреляция в продольном направлении была намного более сильной, чем в поперечном. Временная поперечная структурная функция, в отличие от продольной, изменяется со временем. С увеличением высоты, она растет, и насыщается на $D_{tt}^{\text{sat}}(z, \Delta t) \approx 0,23 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Отчетливо видны мелкомасштабные неоднородности со временем жизни порядка 10 с.

Следует отметить, что в дополнение к традиционным факсимильным записям содаров, которые иллюстрируют динамику температурной турбулентности в пограничном слое атмосферы, представленные результаты иллюстрируют динамику ветровой турбулентности, наглядно показывая слои более интенсивной ветровой турбулентности, что может быть использовано, например, для повышения безопасности полетов.

Суточная динамика структурной характеристики поля скорости ветра иллюстрируется на рис. 6, где показаны вертикальные профили C_V^2 , рассчитанные по данным ежечасных измерений мини-содаром, усредненные за период 10 мин (по 150 индивидуальным профилям) 13 сентября 2006 г. с 11:00 до 22:00. Здесь профили (a) получены с 11:10 до 11:20, (b) с 12:10 до 12:20, ... , профили (l) с 22:10 до 22:20. Пунктирная кривая иллюстрирует высотную зависимость $C_V^{2(\text{теор})}(z) \propto z^{-2/3}$, предсказанную теоретически для условий развитой конвекции. Из графиков видно, что для представленной серии измерений, $C_V^{2(\text{теор})}(1\text{ м})$ остается постоянной и равной $0,18 \text{ м}^{4/3} \cdot \text{с}^{-2}$ с 11:00 до 15:00, затем в 16:00 уменьшается до $0,12 \text{ м}^{4/3} \cdot \text{с}^{-2}$, с 17:00 растет с $0,15 \text{ м}^{4/3} \cdot \text{с}^{-2}$ до $0,22 \text{ м}^{4/3} \cdot \text{с}^{-2}$ в 18:00, достигая максимального значения $0,25 \text{ м}^{4/3} \cdot \text{с}^{-2}$ в 19:00 и 20:00, затем уменьшается до $0,1 \text{ м}^{4/3} \cdot \text{с}^{-2}$ в 21:00, и вновь возрастает до $0,22 \text{ м}^{4/3} \cdot \text{с}^{-2}$ в 22:00.

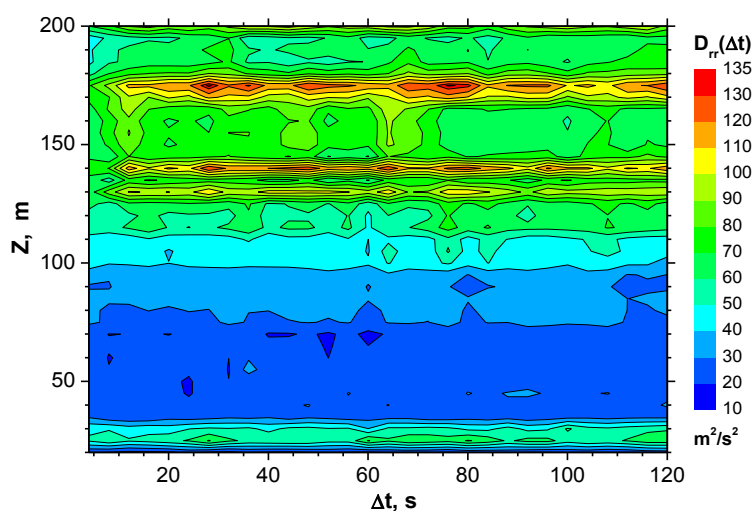


Рис. 4. Продольная временная структурная функция скорости ветра $D_{rr}(z, \Delta t)$, рассчитанная по результатам измерений мини-содаром

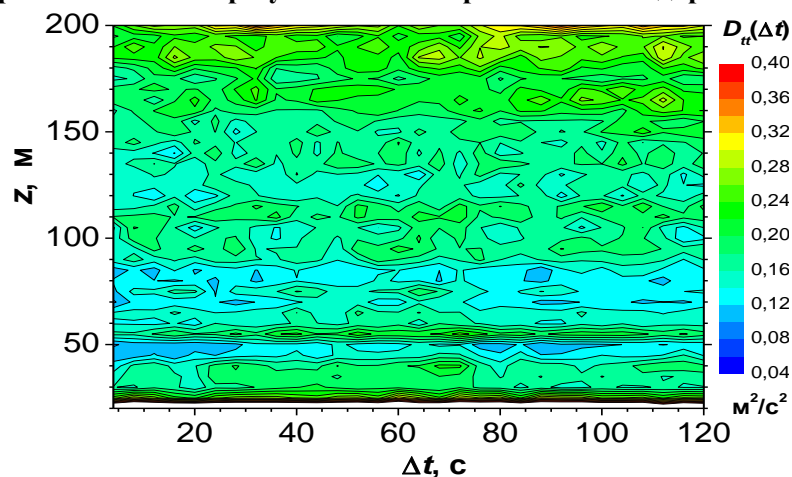


Рис. 5. Поперечная временная структурная функция скорости ветра $D_{tt}(z, \Delta t)$, рассчитанная по результатам измерений мини-содаром

Временная динамика вертикального профиля скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ε , рассчитанная по формуле (7) из данных минисодара с учетом дополнительного турбулентного ослабления, приведена на рис. 5. Месяц,

число, год, и время начала 10-мин серии содарных измерений указаны справа на рисунке. Для сравнения, звездочками показаны результаты восстановления ε по измерениям 2-мкм когерентным доплеровским лидаром

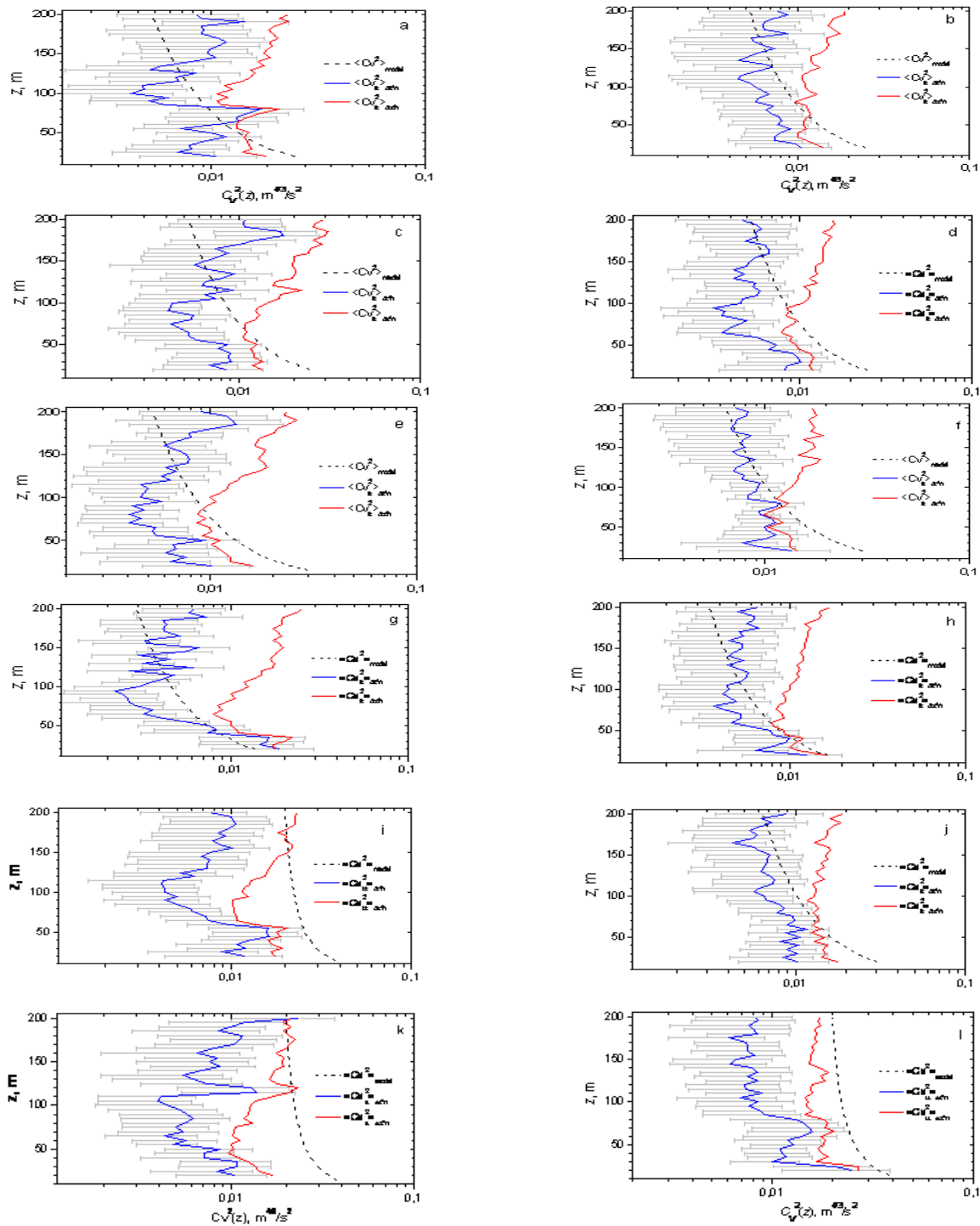


Рис. 6. Почасовая динамика структурной характеристики поля скорости ветра. Горизонтальными линиями отмечены 95% доверительные интервалы

Видно хорошее согласие результатов лидарных и акустических измерений. Анализ результатов, представленных на рис. 7 показал, что $\varepsilon(z)$ уменьшается примерно на порядок с увеличением местного времени измерений с 01:00 до 09:00, что согласуется с

результатами лидарных измерений. Она достигает минимума в 11:00. Скорость диссипации 16 сентября растет примерно на полтора порядка, когда местное время измерения увеличивается с 11:00 до 21:00, а затем начинает уменьшаться, когда время измерений увеличивается до 23:00. Для $z=100$ м 17 сентября, она уменьшается с $\sim 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^2$ в 01:00 до $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^2$ в 05:00.

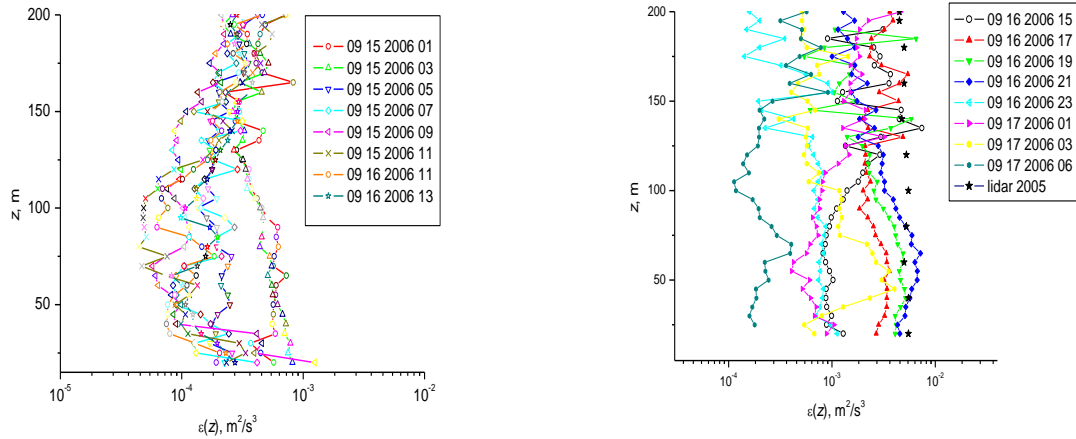


Рис. 7. Скорость диссипации кинетической энергии турбулентности по результатам измерений мини-содаром

На рис. 8 приведены результаты измерений внешнего масштаба температурной турбулентности $L_{0T}(z)$, выполненных в условиях развивающейся конвекции (а) в утренние часы (с 10:00 местного времени), развитой дневной конвекции (б) (с 15:00 местного времени), и в условиях устойчивой стратификации (в, г).

Видно, что внешний масштаб температурной турбулентности растет с высотой, что согласуется с его имеющимися моделями.

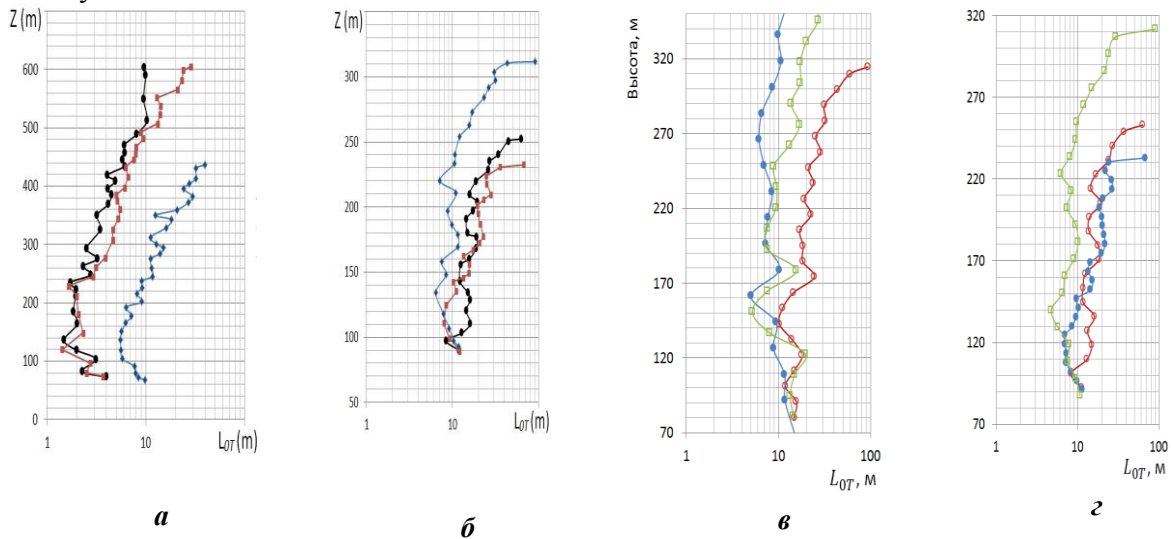


Рис. 8. Внешний масштаб температурной турбулентности для 3-х последовательных 10-минутных серий измерений содаром (кружки, ромбики, квадратики) в условиях развивающейся (а) и развитой конвекции (б) и в условиях устойчивой стратификации (светлые кружки, темные кружки, светлые квадратики). с 01:00 местного времени

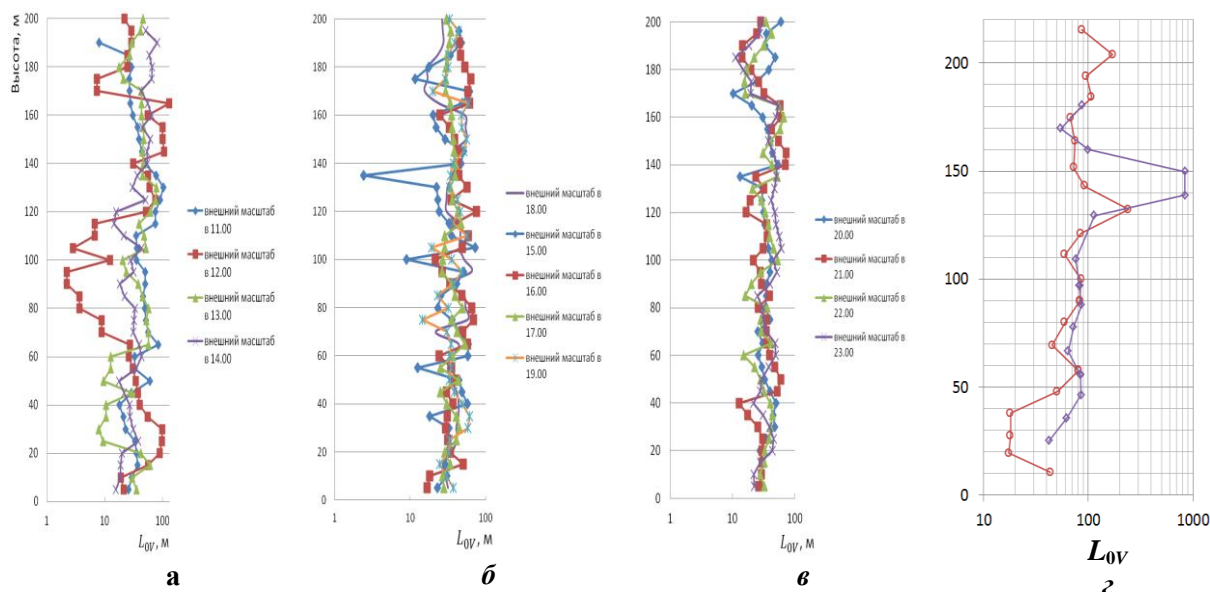


Рис. 9. Полусуточная почасовая динамика высотных профилей внешнего масштаба динамической турбулентности по результатам мини-содарных измерений. Время начала измерения профиля, усредненного за 10 мин период, указано справа от кривых

На рис. 9 приведена полусуточная почасовая динамика вертикальных профилей внешнего масштаба динамической турбулентности, рассчитанных по 10-минутным сериям мини-содарных измерений с 11:00 до 23:00 местного времени. Из рисунка видно, что внешний масштаб динамической турбулентности лежит в интервале от 5 м до 100 м, что хорошо согласуется с результатами его теоретической оценки и результатами самолетных измерений. Прослеживается также общая тенденция роста внешнего масштаба с высотой. Что касается временной динамики, видно, что максимальные значения внешнего масштаба наблюдаются в утренние и вечерние часы. При этом внешний масштаб изменяется утром больше, чем в дневное и вечернее время, и его вертикальная стратификация также более ярко выражена в утренние часы. Для сравнения, на рис. 9, г показан высотный профиль внешнего масштаба динамической турбулентности по данным ночных измерений 2-мкм доплеровским лидаром с 23:23 до 23:40 местного времени с использованием азимутальной структурной функции после пространственной фильтрации лидарных данных (кружки) а также с использованием радиальной структурной функции после пространственной фильтрации лидарных данных (ромбики). Из рисунка видно хорошее согласие содарных данных с результатами лидарных измерений. Также обращает на себя внимание наличие ярко выраженной слоистой структуры внешнего масштаба динамической турбулентности как по содарным, так и по лидарным данным.

Литература

1. Капегешева О.Ф., Красненко Н.П., Стафеев П.Г., Шаманаева Л.Г. Влияние времени усреднения на качество восстановления характеристик мелкомасштабной ветровой турбулентности при акустическом зондировании. Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 10, с. 28-31.
2. Капегешева О.Ф., Красненко Н.П., Стафеев П.Г., Шаманаева Л.Г. Динамика структуры температурной и ветровой турбулентности в нижних слоях атмосферы по результатам акустического зондирования. // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 9/2, с. 228-232.
3. Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г. Пространственно-временная динамика скорости

- диссипации кинетической энергии турбулентности в нижней атмосфере // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 12, С. 101-106.
4. Красненко Н.П., Капегешева О.Ф., Стафеев П.Г., Шаманаева Л.Г. Внешние масштабы температурной и динамической турбулентности по результатам акустического зондирования атмосферы // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 6, с. 57-62.
 5. Капегешева О.Ф., Красненко Н.П., Стафеев П.Г., Шаманаева Л.Г. Оценка внешнего масштаба динамической турбулентности по результатам акустического зондирования атмосферы // Известия вузов. Физика, 2013 г., № 9/2, С. 254-255.
 6. Капегешева О.Ф., Красненко Н.П., Стафеев П.Г., Шаманаева Л.Г. Внешний масштаб динамической турбулентности по результатам акустического зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 11. С. 964–968.
 7. Красненко Н.П., Л.Г. Шаманаева Пространственно-временная динамика характеристик атмосферной турбулентности по результатам акустического зондирования // Ученые Записки Физического Факультета МГУ, № 6, 2014. 6 с.
 8. Капегешева О.Ф., Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г. Динамика температурной и ветровой турбулентности в пограничном слое атмосферы по результатам акустического зондирования // В кн. «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». Труды Международной конференции, посвященной памяти академика А.М. Обухова / Отв. ред. Г.С. Голицын и др. – М.: ГЕОС, 2014, с. 90-96. ISBN 978-5-89118-654-5.