

## Определение высоты внутреннего слоя перемешивания по измерениям содаров серии «Волна»

В.А. Гладких, А.П. Камардин, И.В. Невзорова\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 5.11.2008 г.

Проведен сопоставительный анализ оценок высоты внутреннего слоя перемешивания по содарным данным и по результатам измерений высотно-временных профилей температуры метеорологическим температурным профилимером МТП-5. Термин «внутренний слой перемешивания» определен как слой интенсивных турбулентных пульсаций. Сравнение показало, что содары серии «Волна» способны в полном объеме фиксировать высотно-временной ход области интенсивного турбулентного теплообмена с подстилающей поверхностью. Предложен алгоритм автоматической процедуры определения высоты внутреннего слоя перемешивания для содаров серии «Волна». Проведено исследование сезонной динамики внутреннего слоя перемешивания на примере нескольких лет.

*Ключевые слова:* высота внутреннего слоя перемешивания, атмосферный пограничный слой, акустическое зондирование; internal mixing layer height, atmospheric boundary layer, acoustic sensing.

### Введение

В литературе по исследованию динамических процессов в атмосфере большое внимание уделяется такому параметру, как высота слоя перемешивания. Под слоем перемешивания понимается та область планетарного пограничного слоя, где воздушные массы перемешиваются посредством турбулентности, которая в случае устойчивой стратификации вызывается сдвигом ветра и волновыми процессами, а в случае неустойчивой — еще и силами плавучести. Слой перемешивания представляет значительный интерес для практических метеорологов, контролирующих загрязнение воздуха, так как в этой области может скапливаться значительная масса аэрозолей и других примесей. Определение высоты слоя перемешивания неоднозначно. Данная высота часто отождествляется с высотой пограничного слоя атмосферы, верхняя граница которого в конвективных условиях совпадает с нижней границей температурной инверсии, накрывающей слой конвекции, а при устойчивой стратификации определяется (согласно [1]) как уровень, выше которого интенсивность турбулентности спадает до 5% от ее интенсивности у поверхности.

G.C. Holzworth [2] одним из первых ввел понятие высоты слоя перемешивания для конвекции, которую он определил как высоту, где поднимающиеся перегретые воздушные массы достигают уровня равновесия, т.е. где вертикальный градиент температуры приближается к сухоадиабатическому.

В других работах (например, [3, 11]) высоту слоя перемешивания непосредственно связывают с границами температурных инверсий, причем в случае приподнятой инверсии, запирающей конвективный слой, — с нижней границей инверсии, а в случае приземной — с ее верхней границей.

В статьях отечественных и зарубежных авторов, опубликованных ранее, подробно рассмотрена проблема измерения высоты слоя перемешивания различными, в том числе дистанционными, методами. В основном речь идет о сравнении оценок данного параметра лидарными, содарными методами, температурными и ветровыми профилимерами, а также радиозондами. Было отмечено [4], что в утренние и вечерние часы оценки, полученные по профилям лидарных сигналов, часто завышали этот параметр по сравнению с профилями содарных измерений, а оценки, выполненные с помощью этих методов, в свою очередь оказывались выше, чем измеренные по температурным профилям. Это связано с тем, что температурные флуктуации возрастают в зоне вовлечения, а процессы, связанные с перемешиванием аэрозоля, как отмечено в работе [5], гораздо более инерционны и аэрозоль может проникать выше зоны вовлечения. В работе [8] утверждается, что данные совместных измерений радиозондов и содаров практически всегда показывают удовлетворительные совпадения оценок высоты слоя перемешивания в утренние часы во время поднимающейся инверсии, запирающей конвективный слой, но в дневные часы диапазон содаров часто недостаточен, чтобы проследить высоту конвективного слоя.

Трудности определения высоты слоя перемешивания отмечены и в случаях устойчивости, когда различные процессы, происходящие в пограничном

\* Владимир Александрович Гладких (glvl@iao.ru); Андрей Павлович Камардин (kap136@iao.ru); Ирина Витальевна Невзорова (nevzorova@iao.ru).

слое, приводят к сложным, многослойным структурам, где преобладает перемежающаяся структура турбулентности. В любом случае нет однозначного определения данного параметра, и часто авторы дают его формулировку и оценку, исходя из имеющихся в их распоряжении данных.

Следуя рекомендациям [8], отметим, что в данной статье при определении высоты слоя перемешивания мы воспользовались работами по исследованию аэрозольных данных, так как именно аэрозоль является лучшим индикатором динамических процессов в атмосфере. Так, в статье [9] на основе литературных данных и результатов самолетного зондирования концентрации аэрозоля были детально исследованы понятие «слоя перемешивания», а также его структура и процессы формирования. Критерий оценки высоты слоя перемешивания основан на определении высоты нарушения корреляционной связи распределения аэрозоля. В [9] было установлено, что в процессе вертикального перераспределения аэрозоля можно выделить две стадии, каждой из которых соответствуют свои слои перемешивания: внутренний и внешний (пограничный). Общим для обоих слоев является то, что сверху они ограничены температурной инверсией, слоем с устойчивой стратификацией или изотермией. Зимой высоты этих слоев совпадают, достигая нескольких сотен метров, и, фактически, процесс перемешивания аэрозоля протекает в одну стадию, а летом существенно различаются. На первом этапе в летних условиях накопление аэрозоля происходит во внутреннем слое перемешивания. Затем, после достижения некоторой критической концентрации и под воздействием динамических процессов в этом слое, аэрозоль проникает наверх и формирует внешний слой перемешивания. Необходимо отметить, что в образовании внутреннего слоя перемешивания на первом этапе основную роль играют механизмы турбулентного теплообмена с подстилающей поверхностью и процессы вовлечения на верхней границе высоты слоя перемешивания.

## **Описание оборудования и технология получения оценок высоты внутреннего слоя перемешивания**

Акустический доплеровский локатор является инструментом, чувствительным к турбулентным характеристикам, формирующим структуру принятого сигнала, но рабочий диапазон высот часто не позволяет охватить максимальный слой перемешивания в 2–3 км. В связи с этим мы предположили, что фиксируемый содаром слой интенсивных турбулентных пульсаций температуры и является тем внутренним слоем перемешивания, определение которого дано в работе [9], а верхнюю границу этого слоя в дальнейшем будем считать высотой внутреннего слоя перемешивания. Далее обоснуем свою точку зрения, но вначале представим алгоритм, с помощью которого дается оценка высоты внутреннего слоя перемешивания (ВВСП) по содарным данным. Подробное описание работы содаров серии «Волна», а также технология получения оценок

скорости ветра, его направления и т.д. представлены в работе [6]. Процесс определения ВВСП включает два этапа. На первом этапе производится «очистка» сигнала от окружающего шума, состоящая из следующих пунктов:

а) оценка среднего значения шума по завершающему отрезку (10% отсчетов) каждого профиля сигнала и его вычитание из данного профиля;

б) фильтрация сигнала по профилю вертикального ветра, которая заключается в задании порога (некоторого предельно допустимого значения) вертикального ветра и отбраковки на соответствующих высотах значений сигнала при превышении этого порога;

в) высотная фильтрация профиля сигнала медианным фильтром по 5 элементам;

г) временная фильтрация сигнала по 9 элементам (~ 2 мин) методом скользящего среднего.

Второй этап заключается в поиске минимума в профиле очищенного сигнала, выше которого турбулентные пульсации температуры пренебрежимо малы, и на основании определения этого уровня дается оценка ВВСП. За минимум берется средний уровень окружающего шума. Для подтверждения достоверности полученных оценок мы сравнили их с оценками ВВСП, полученными в результате обработки данных метеорологического температурного профилемера МТП-5 производства фирмы АТТЕХ (Россия) в ходе совместных экспериментов с июля по декабрь 2004 г. В период эксперимента работа МТП-5 обеспечивала восстановление высотных температурных профилей с шагом 50 м до высоты 600 м каждые 5 мин. Паспортная точность измерения температуры прибором МТП-5 составляет 0,2–0,6 °С (в зависимости от высоты). Записи температурных неоднородностей фиксировались содаром каждые 14–16 с в диапазоне высот от 50 до 700 м с шагом 2–3 м. Результаты проводившегося ранее [7] сравнения положения нижней границы приподнятой температурной инверсии, определяемой одновременно содаром и МТП-5, свидетельствуют, что содар более чувствителен к тонкой структуре температурной стратификации, при этом в целом наблюдается удовлетворительное согласие полученных данных.

Располагая температурными профилями и исследуя их градиенты, можно найти уровни, на которых происходит смена типа температурной стратификации, определяющая, в частности, ВВСП [3].

## **Сравнение оценок ВВСП по данным содара и температурного профилемера**

Для сопоставления оценок ВВСП, определявшихся различными приборами, мы выбирали дни с разным типом устойчивости. Высоты оценивались по профилям температуры согласно таблице устойчивости для градиентов температуры [10]. На рис. 1, а, б на примере двух типичных дней с разной стратификацией проиллюстрирована изменчивость ВВСП, построенная по данным содара и МТП-5.

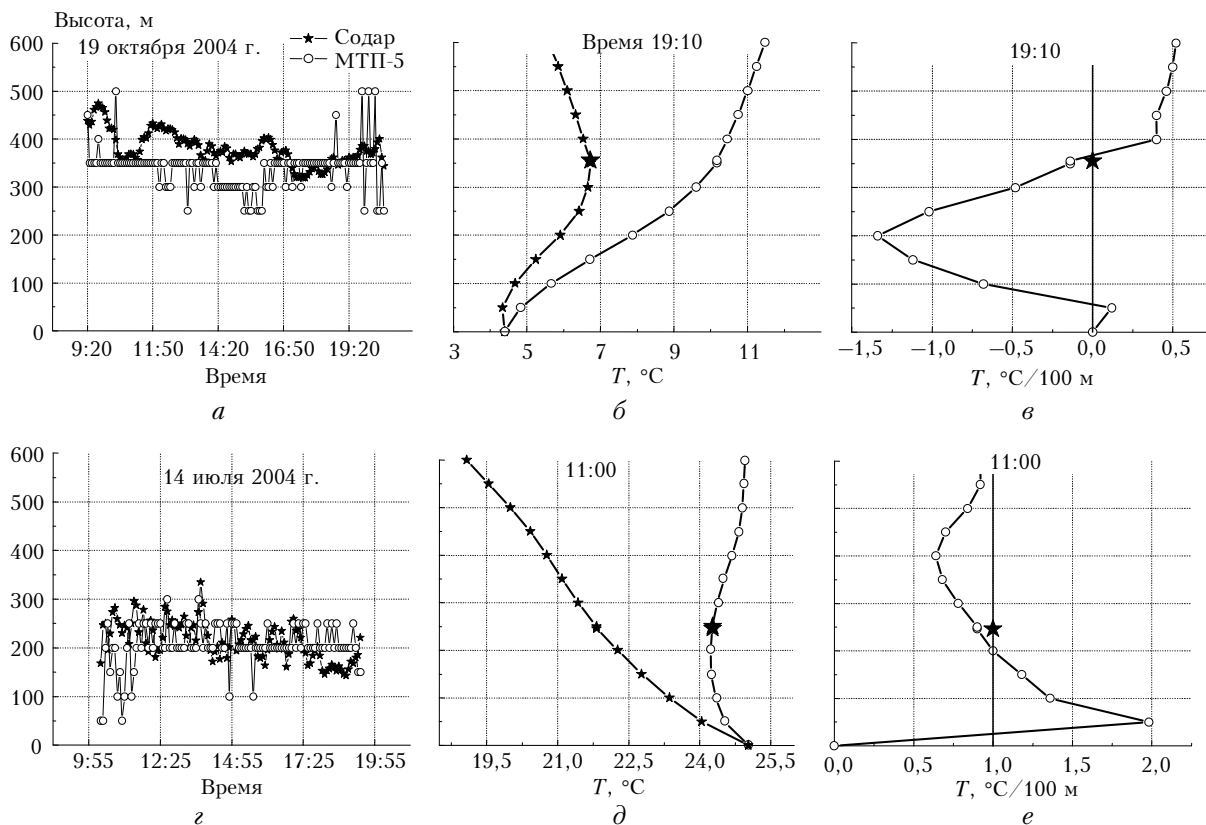


Рис. 1. Оценка ВВСП по измерениям содара и МТП-5 при устойчивой стратификации (а) и в конвективных условиях (д), «мгновенные» профили градиентов температуры (в, е), а также профили потенциальной (кружочки) и абсолютной температур (звездочки) для инверсии (б) и конвекции (д). Звездочками отмечены ВВСП по содарным измерениям (б, в, д, е)

Для более подробной иллюстрации на рис. 1, в, е показаны «мгновенные» высотные профили градиентов температуры, рассчитанные по формуле  $\gamma = -\Delta T / \Delta z$ , где  $\Delta T$  — разность температур ближайших уровней измерения;  $\Delta z$  — высота между уровнями (50 м) и соответствующие им профили абсолютной и потенциальной температур (рис. 1, б, д), с помощью которых можно проследить ход стратификации по высоте. Согласно таблице, приведенной в работе [10], та область, где  $\gamma > 1$ , соответствует области конвекции, т.е. в этом случае градиент температуры выше, чем сухадиабатический, и температура в атмосфере падает с высотой быстрее, чем  $1^\circ\text{C}/100\text{ м}$  [12]. На рис. 1, д в области, где градиент температуры меньше 1, располагается зона слабой устойчивости, и по определению [9] именно граница смены типа стратификации соответствует высоте слоя перемешивания.

На рис. 2, а–в представлены изменения высот, где реальный вертикальный градиент температуры становится равным сухадиабатическому ( $\gamma_a = 1^\circ\text{C}/100\text{ м}$ ) за июль 2004 г. (составлен по данным профилера МТП-5). Рассматривались промежутки времени с 10 ч утра до 16 ч дня, характерные для конвекции. Согласно [12] линия, проходящая через эти точки пересечения, является границей, на которой турбулентный поток тепла меняет знак и выше которой располагается устой-

чивый слой. По определению, данному в работе [9], эта граница является высотой внутреннего слоя перемешивания. Сравнение этой границы с оценками ВВСП, выполненными по содарным измерениям (рис. 2, а–в), а также сопоставление осредненных за месяц результатов оценок МТП-5 и содара (рис. 2, г) в целом демонстрируют хорошее согласие. Следовательно, можно сделать вывод, что и высота слоя с интенсивными турбулентными пульсациями температуры, измеренная содаром, также будет являться ВВСП.

В случае устойчивости, согласно [3,11], высотой слоя перемешивания может служить верхняя граница инверсионного слоя, поскольку атмосферная турбулентность, как правило, затухает внутри этого слоя. На рис. 1, б этой границе соответствует точка, в которой градиент температуры меняет знак с положительного на отрицательный.

На рис. 3 представлена гистограмма расхождений  $R$  оценок ВВСП, полученная вычитанием из оценок содара оценок, выполненных профилимером в течение 6 дней с разным типом стратификации. Видно, что данные содара несколько выше, чем данные МТП-5, но в целом совпадения удовлетворительные.

Приведенные на рис. 1–3 результаты, а также обработка других данных, полученных содаром и МТП-5 в течение комплексного эксперимента

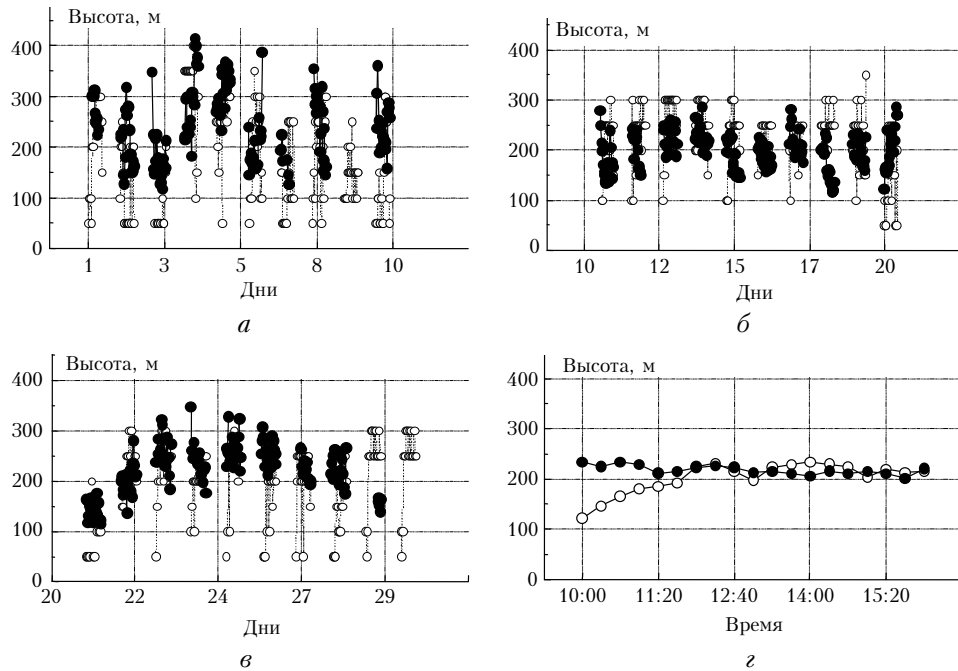


Рис. 2. Точки пересечения вертикального градиента температуры с сухоадиабатическим по данным МТП-5 (светлые кружки) и ВВСП по данным содара «Волна-3» (точки) за июль 2004 г. (а–в). Время наблюдений – с 10:00 до 16:00 с интервалом 20 мин; осредненные за месяц оценки МТП-5 и содара в данный временной отрезок (г)

2004 г., позволяют полагать, что содарные измерения адекватно отражают динамику высоты внутреннего слоя перемешивания при различных типах температурной стратификации.

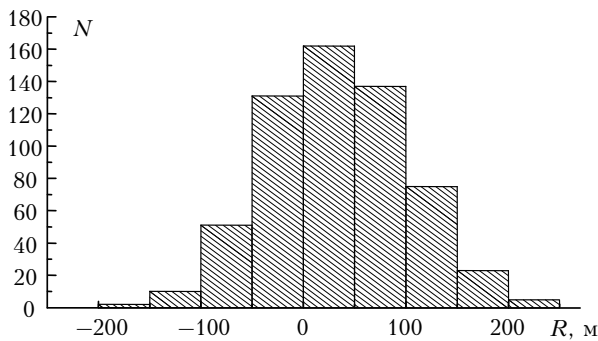


Рис. 3. Гистограмма расхождений оценок ВВСП по данным содара и температурного профилера по шести дням наблюдений.  $N$  – число случаев,  $R$  – расхождение, м

### Оценка динамики ВВСП по сезонам года

Базируясь на сделанном выводе о применимости содарных технологий оценки ВВСП, мы рассмотрели суточную динамику этой высоты и в другие годы, когда содар работал без сопровождения МТП-5. На рис. 4 осредненные суточные ходы ВВСП представлены по четырем сезонам за несколько лет. В конце графиков нанесены осредненные за сутки среднеквадратические отклонения.

Мы выбирали только те месяцы, в которые непрерывная работа содара составляла не менее 60%

времени. Видно, что, изменяясь в течение суток, высота внутреннего слоя перемешивания остается в пределах 100–500 м, что совпадает с выводами работы [9].

С другой стороны, явно прослеживается при относительно одинаковом ходе кривых ВВСП их различие в зависимости от года наблюдений за исключением зимнего сезона. Чтобы разобраться в причинах такого поведения, мы на рис. 4 отметили среднемесячную температуру за каждый выбранный год. Оказалось, что в весенний и осенний сезоны чем выше среднемесячная температура, тем выше ВВСП. Подстилающая поверхность в этот период года, как правило, свободна от травяного покрова, и, возможно, поэтому больше прогревается, что, несомненно, влияет на интенсивность турбулентного теплообмена. Для летнего сезона эта зависимость прямо противоположная: более высокой среднемесячной температуре соответствует более низкое положение ВВСП. При исследовании синоптических особенностей стратификации атмосферного пограничного слоя автором [10] была отмечена зависимость высоты конвективных «перьев» от типа господствующей воздушной массы и ее температурного контраста с подстилающей поверхностью, причем эта зависимость такова, что при более холодной воздушной массе высота конвекции выше. Для зимнего сезона не наблюдается заметной зависимости от среднемесячной температуры, и кривые практически совпадают. Можно предположить, что в данном случае подстилающая поверхность, покрытая снегом, не оказывает существенного влияния на поведение ВВСП независимо от температуры и года наблюдения.

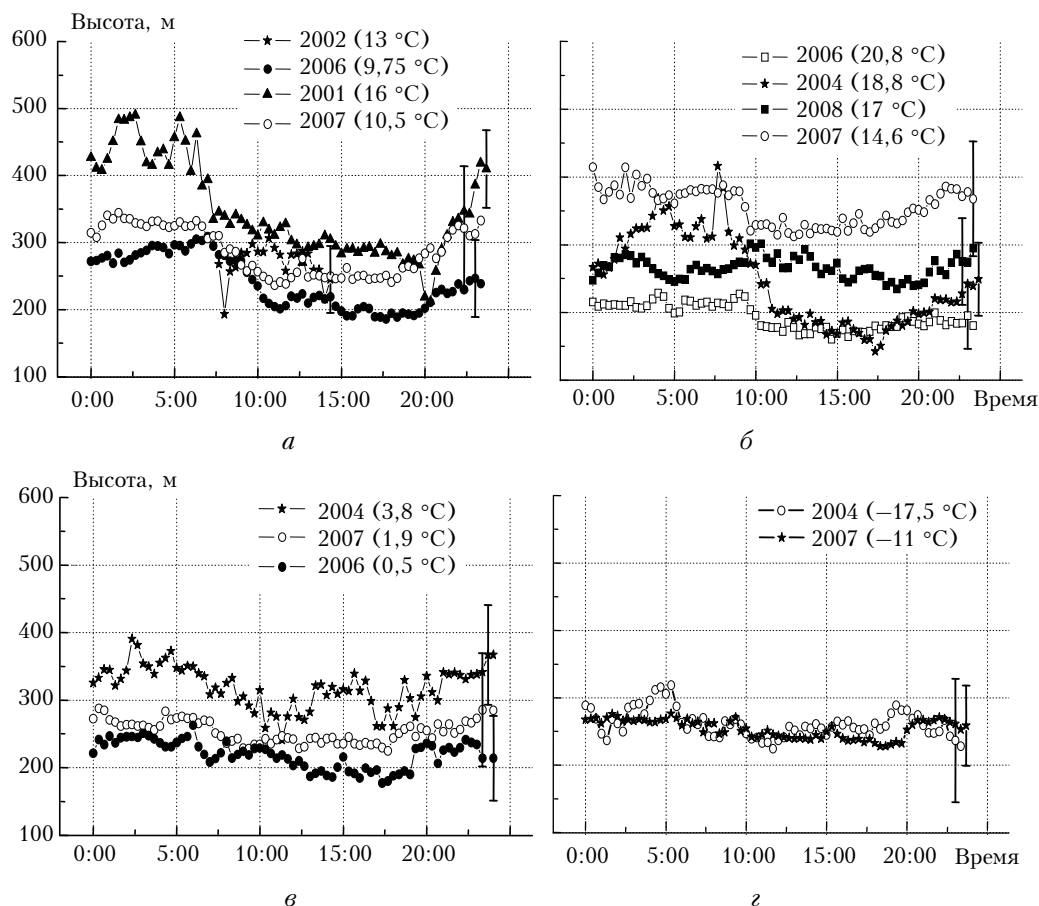


Рис. 4. Суточные среднemesячные изменения ВВСП по данным содаров серии «Волна» за май 2001, 2002, 2006 и 2007 гг. (а), за июнь 2004, 2006, 2007 и 2008 гг. (б), октябрь 2004, 2006, 2007 гг. (в), декабрь 2004, 2007 гг. (з). В скобках — среднemesячная температура

### Заклочение

В результате сопоставительного анализа оценок ВВСП по данным содара и вертикальных температурных профилей по измерениям МТП-5 показано, что «видимый» содаром слой интенсивных турбулентных пульсаций температуры является внутренним слоем перемешивания, в котором происходит аккумуляция примесей на первой стадии перемешивания. Мы исследовали сезонную динамику ВВСП на примере нескольких лет. Замечено, что ВВСП независимо от сезона года остается в пределах 100–500 м и существует связь, за исключением зимнего сезона, со среднemesячной температурой и текущими синоптическими условиями в атмосфере. Необходимо отметить, что работа велась в пригороде Томска и в других местах закономерности могут быть другими.

Мы выражаем искреннюю признательность руководству «АТТЕХ» за предоставленную возможность использовать в наших комплексных экспериментах температурный профилимер МТП-5.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Программы Президиума РАН «Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы» (проект № 16.1).

1. *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей* / Под ред. Ф.Т.М. Ньистадта и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 352 с.
2. *Holzworth G.C.* Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous United States // *Mon. Weather Rev.* 1964. V. 92. N 5. P. 235–242.
3. *Keder J.* Detection of inversions and mixing height by REMTECH PA2 Sodar in comparison with collocated radiosonde measurement // *Meteorol. and Atmos. Phys.* 1999. V. 71. P. 133–138.
4. *Emeis S., Munkel C.* Atmospheric boundary-layer structure from simultaneous Sodar, Rass and ceilometer measurement // *Atmos. Environ.* 2004. V. 38. N 2. P. 273–286.
5. *Панченко М.В., Терпугова С.А.* Годовой ход содержания субмикронного аэрозоля в тропосфере над Западной Сибирью // *Оптика атмосф. и океана.* 1994. Т. 7. № 8. С. 1033–10044.
6. *Гладких В.А., Макиенко А.Э., Федоров В.А.* Акустический доплеровский содар Волна-3 // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12. № 5. С. 437–444.
7. *Камардин А.П., Одинцов С.Л.* Анализ результатов совместной работы акустического доплеровского локалатора (содара) и температурного профилимера // *Труды 16-й сессии РАО.* Т. 2. М.: ГЕОС, 2005. С. 124–127.
8. *Seibert P., Beyrich F., Gryning S., Joffre S., Rasmussen A., Tercier P.* Review and intercomparison of opera-

- tional methods for the determination of the mixing height // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34. N 7. P. 1001–1027.
9. *Белан Б.Д.* Динамика слоя перемешивания по аэрозольным данным // *Оптика атмосф. и океана.* 1994. Т. 7. № 8. С. 1045–1054.
10. *Lokoshchenko M.A.* Long-term sodar observation in Moscow and a new approach to potential mixing determination by radiosonde data // *J. Atmos. and Ocean. Technol.* 2002. V. 19. N 8. P. 1151–1161.
11. *Пекур М.С.* Определение параметров слоя перемешивания по факсимильным записям эхо-сигнала содара (обзор). Препр. / ИФА АН СССР. (М.). 1990. № 7. С. 15–29.
12. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1976. С. 640.

*V.A. Gladkikh, A.P. Kamardin, I.V. Nevzorova.* **Determination of internal mixing layer height from “Volna” sodar measurements.**

We performed a comparative analysis of the estimates of the internal mixing layer height from sodar data against estimates from measurements of altitude-temporal temperature profiles using the meteorological temperature profiler M7V-5. The term “internal mixing layer” is defined as the layer of intense turbulent pulsations. The comparison have shown that the “Volna” sodars are totally capable to record the altitude-temporal behavior of the region of intense turbulent heat exchange with the underlying surface. An algorithm of automatic determination of the internal mixing layer height is proposed for sodars of “Volna” series. Seasonal dynamics of the internal mixing layer is studied by the example of a few-year record.