

PROCEEDINGS OF SPIE

27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics

Gennadii G. Matvienko
Oleg A. Romanovskii
Editors

5–9 July 2021
Moscow, Russian Federation

Organized by

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (Russian Federation)
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS (Russian Federation)
M.A. Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS (Russian Federation)
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS (Russian Federation)
V.M. Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS (Russian Federation)

Sponsored by

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (Russian Federation)
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Russian Federation)
"Atmosphere" an Open Access Journal by MDPI (Switzerland)
SOLAR LASER SYSTEM (Belarus)
Photonics Journal (Russian Federation)

Published by
SPIE

Volume 11916
Part One of Three Parts

Proceedings of SPIE 0277-786X, V. 11916

SPIE is an international society advancing an interdisciplinary approach to the science and application of light.

КОНФЕРЕНЦИЯ D

ФИЗИКА ТРОПОСФЕРЫ

КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

Зуев В.В.¹, Нечепуренко О.Е.^{1,2}, Павлинский А.В.¹

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

e-mail: vzuev@list.ru, o.e.nechepurenko@gmail.com, wf@inbox.ru

Приборный комплекс мониторинга приземного слоя атмосферы включает в себя температурный профилемер, ветровой профилемер, измеритель общего влагосодержания атмосферы и метеостанцию. Комплекс обеспечивает непрерывное измерение вертикальных профилей температуры воздуха, силы и направления ветра на высотах до 1000 м с вертикальным разрешением от 10 до 100 м и периодичностью измерений 10 минут. Также регистрируются приземные параметры атмосферы – температура и влажность воздуха, давление, тип и интенсивность осадков. Комплекс предназначен для изучения процессов в приземном слое, образования и прогнозирования опасных явлений. Комплекс установлен на высоте 20 м на крыше здания ИМКЭС СО РАН в г. Томск.

Атмосферным пограничным слоем (АПС) называется нижний турбулентный слой атмосферы, свойства которого определяются термическим и динамическим воздействием подстилающей поверхности [1]. Использование приборов дистанционного зондирования, таких как температурные профилемеры и содары, позволяют контролировать состояние АПС до высоты 500–1000 м с хорошим вертикальным и временным разрешением [2].

Установленный на высоте 20 м на крыше административного здания ИМКЭС СО РАН (г. Томск), комплекс включает в себя акустический ветровой профилемер SODAR PCS.2000-64 [3], метеорологический температурный профилемер МТР-5РЕ [4], радиометр водяного пара RMS-1 [5] и метеорологическую станцию WXT-520 [6]. Комплекс позволяет в режиме непрерывных наблюдений получать данные о влагосодержании атмосферы, профиле температуры воздуха и профиле скорости и направления ветра на высотах от 0 до 1000 м с периодичностью 10 минут, а также приземные метеопараметры – температуру и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, тип и интенсивность осадков.

Ветровой профилемер SODAR PCS.2000-64 представляет собой акустический измеритель скорости ветра и профилей турбулентности на высотах от 15 до 1000 м. Приёмопередатчик акустических импульсов PCS2000-64 представляет собой фазированную антенную решетку, которая формирует узконаправленные зондирующие лучи в азимутальных направлениях 0, 90, 180 и 270 градусов и вертикальный луч. Угол места азимутальных лучей зависит от частоты входного сигнала и составляет от 15,5 до 19,9 градусов. Аналогичным образом формируется диаграмма направленности в режиме приема. Принимаемый акустический сигнал проходит фильтрацию и математическую обработку. Данные о скорости ветра получают путем

определения доплеровского сдвига частоты принятого сигнала. Для зондирования поочередно используются два соседних азимутальных луча и вертикальный луч. Направление ветра в трех измерениях определяется как векторная сумма проекций скорости на каждом луче. Основные характеристики профилемера приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики PCS2000.64

Параметры	Значения
Количество излучателей	64
Рабочие частоты	1300 - 2600 Гц
Многочастотный режим	Есть
Усиление антенны	20 dB
Диапазон измерений скорости ветра	
- горизонтальных компонент	+/- 50 м/с
- вертикальной составляющей	+/-10 м/с
Диапазон измерений направления ветра	0 ... 360°
Рабочие температуры	-30° C to +55° C
Минимальная высота измерений	10 м
Вертикальное разрешение	10–30 м
Минимальная высота измерений	1000 м
Расхождение лучей	7–12° (в зависимости от частоты)
Потребляемая мощность	150 Вт (средняя)
Размер антенны	1,10 м x 1,10 м x 0,40 м
Вес	130 кг

Метеорологический температурный профилемер МТР-5РЕ представляет пассивный сканирующий одноканальный радиометр, измеряющий собственное излучение молекулярного кислорода атмосферы на частоте 56.6 ГГц. Принимаемое излучение содержит в себе информацию о температуре атмосферы в слое до 1000 м [7]. Измеряемая температура вычисляется путем решения обратной задачи с привязкой к приземной температуре воздуха, измеряемой контактным датчиком. Восстановление профиля температуры производится путем пошагового сканирования луча приема в вертикальной плоскости с углом места от –3 до 90 градусов. Профилемер в полярном исполнении (РЕ) имеет повышенное вертикальное разрешение для исследования инверсий и расширенный рабочий диапазон температур. Основные характеристики температурного профилемера приведены в таблице 2.

Радиометр водяного пара определяет общее (интегральное) влагосодержание атмосферного столба в пересчете на единицу площади (м^2 или мм^2). Радиометр принимает микроволновое излучение атмосферы в зените на частотах 20.7 и 31.4 ГГц. На основе измеренной интенсивности излучения вычисляется интегральное влагосодержание. Основные характеристики радиометра приведены в таблице 3.

Таблица 2. Основные характеристики МТР-5РЕ

Параметры	Значения
Диапазон измерений температуры	-80...+45 °С
Диапазон высот измерения	0 ...1000 м
Интервал измерений	от 5 мин.
Дискретность представления в слое 0–100 метров	10 м
Дискретность представления в слое 100–200 метров	25 м
Дискретность представления в слое 200–1000 метров	50 м
Предел погрешности результата измерений температуры атмосферы	1,2 °С
Предел погрешности определения высоты измеряемых слоев атмосферы	25 %
Нелинейность градуировочной характеристики	± 5 %
Наличие автоматической калибровки	Есть
Время установления рабочего режима	1 ч.
Питание от сети переменного тока	220 В, 50 Гц
Интерфейс передачи данных	RS232
Рабочий диапазон температур	-80...+60 °С
Рабочий диапазон относительной влажности	0...100 %
Масса	25 кг

Таблица 3. Основные характеристики радиометра RMS-1

Параметры	Значения
Диапазон измерений интегрального влагосодержания	0,2 – 4 г/см ²
Точность измерений	0,1 г/см ²
Наличие автоматической калибровки	Есть
Относительная нестабильность коэффициента передачи за 18 часов	±0,5 %
Ширина диаграммы направленности антенной системы по уровню 3 дБ	3°
Чувствительность приемника при постоянной времени 1 с	0,1 К
Время установления рабочего режима	6 ч
Питание от сети переменного тока	220 В, 50 Гц
Интерфейс передачи данных	RS232
Рабочий диапазон температур	-40...+40 °С
Рабочий диапазон относительной влажности	0...98 %
Масса	130 кг

Метеостанция WXT520 измеряет скорость и направление ветра, осадки, атмосферное давление, температуру и относительную влажность воздуха. Измеритель скорости и направления ветра основан на эффекте Допплера и состоит из трех равноудаленных друг от друга измерительных ультразвуковых датчиков, расположенных в горизонтальной плоскости. Скорость и направление ветра определяются по времени прохождения ультразвукового импульса от каждого датчика к двум другим. Измеритель интенсивности осадков представляет собой пьезоэлектрический датчик, улавливающий шум от падения капель дождя на мембрану. По сигналу датчика определяется объем и количество капель, упавших в единицу времени и рассчитывается интенсивность и накопленное количество осадков. Датчик способен различать осадки в виде дождя и града. Измеритель давления, температуры и влажности воздуха включает

в себя емкостные датчики соответствующих величин с микропроцессорной системой сбора данных.

Каждый прибор в составе комплекса управляется собственным специализированным программным обеспечением. ПО каждого прибора обеспечивает непрерывные измерения, выдачу данных и запись архива в автоматическом режиме. Измерения проводятся синхронно с интервалом 10 минут. Приборы имеют встроенную автоматическую калибровку, не требующую участия оператора, и системы обогрева приемных устройств для предотвращения их обмерзания. Комплекс подключен к сети Интернет с возможностью удаленного управления и выгрузки данных. В целом, комплекс рассчитан на длительную автономную работу без вмешательства персонала.

Разработанный комплекс включает полный набор приборов, что позволит охватить весь спектр исследования АПС, включая изучение вертикальной структуры турбулентности и оценки ее характеристик, включая вертикальные профили трех компонентов скорости ветра в нижнем слое атмосферы в районе города Томска.

Наряду с решением фундаментальных вопросов физики атмосферы, таких как изучение приземного распространения электромагнитных и звуковых волн [8], существует перспектива практического применения полученных результатов в ряде прикладных задач, например, анализ динамики и прогноз условий загрязнений нижнего слоя атмосферы, определение местоположения ветровых установок, мониторинг зон обледенения [9] и вихрей и предупреждение о сдвиге ветра для обеспечения безопасности полетов малой авиации и БПЛА.

1. Зилитинкевич С.С., Тюряков С.А., Троицкая Ю.И., Мареев Е.А. Теоретические модели высоты пограничного слоя атмосферы и турбулентного вовлечения на его верхней границе // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 1. С. 150–160.

2. Репина И.А., Варенцов М.И., Чечин Д.Г. и др. Использование беспилотных летательных аппаратов для исследования атмосферного пограничного слоя // Инноватика и экспертиза. 2020. Т. 2. № 30. С. 20–39.

3. Metek GmbH [Электронный ресурс]. URL: <https://metek.de/product/pcs-2000-64/>.

4. Кадыгров Е.Н., Ганьшин Е.В., Миллер Е.А., Точилкина Т.А. Наземные микроволновые температурные профиломеры: потенциал и реальность // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 6. С. 521–528.

5. Институт прикладной астрономии РАН [Электронный ресурс]. URL: <http://iaaras.ru/quasar/wvr/>.

6. Vaisala Corporation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vaisala.com/en/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/weather-stations-and-sensors/WXT-520/>

7. Кадыгров Е.Н., Горелик А.Г., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Троицкий А.В., Точилкина Т.А., Шапошников А.Н. Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 6. С. 459–465.

8. Красненко Н.П. Содары для зондирования атмосферного пограничного слоя // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 4. С. 82–89.

9. Зуев В.В., Павлинский А.В., Мордус Д.П., Ильин Г.Н., Быков В.Ю., Нечепуренко О.Е. Результаты радиометрических измерений параметров атмосферы в районе аэропорта Пулково (Санкт-Петербург, Россия) // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2020. № 52. С. 3–8.