
¹ В.В. Зуев
доктор физ.-мат. наук, профессор,
главный научный сотрудник
¹ А.В. Павлинский
канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник
^{1,2} В.А. Уйманова
канд. географ. наук, младший научный сотрудник
^{1,2} Н.В. Долгова
студент
^{1,2} А.С. Томашова
студент
(¹ Институт мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН
² Национальный исследовательский
Томский государственный университет)
Томск, Российская Федерация

КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ «НЕВА-М»

Описан аппаратно-программный комплекс дистанционного мониторинга пограничного слоя атмосферы «Нева-М», созданный в ИМКЭС СО РАН, его состав и характеристики. Приведен пример регистрируемых данных о температуре воздуха, скорости и направлении ветра, влагосодержания и водосодержания атмосферы с привязкой к приземным данным и к синоптической обстановке при прохождении полярного холодного фронта 7 июня 2021 г. Показаны возможности комплекса по исследованию динамики процессов пограничного слоя.

Ключевые слова: пограничный слой атмосферы, мониторинг, радиометрия, акустическое зондирование, профиль температуры, общее влагосодержание, синоптика.

¹ V.V. Zuev
Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor,
Principle Researcher
¹ A.V. Pavlinsky
Cand. of Phys.-Math. Sciences, Senior Researcher
^{1,2} V.A. Uymanova
Cand. of Geographical Sciences, Junior Researcher
^{1,2} N.V. Dolgova
Student
^{1,2} A.S. Tomashova
Student
(¹ Institute of Climate Monitoring and Ecological Systems SB RAS
² National Research Tomsk State University)
Tomsk, Russian Federation

ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER MONITORING COMPLEX «NEVA-M»

Automated complex "Neva-M" for remote monitoring of the atmospheric boundary layer, created at the IMCES SB RAS, its composition and characteristics are described. An example of recorded data on air temperature, wind speed and direction, total vapor content and total water content of the atmosphere is given with reference to surface weather data and to the synoptic situation during the passage of a polar cold front on June 06 2021. The capabilities of the complex for studying the dynamics of the atmospheric boundary layer processes are shown.

Keywords: atmospheric boundary layer, monitoring, radiometry, acoustic sounding, temperature profile, total vapor content, synoptic meteorology.

DOI: 10.25791/esip.4.2022.1293

Введение

Атмосфера представляет собой сложную взаимозависимую систему, которую принято рассматривать как многослойное образование, и особое место в ней занимает пограничный слой [1].

Пограничным слоем атмосферы (ПСА) называется нижний турбулентный слой атмосферы, свойства которого определяются термическим и динамическим воздействием подстилающей поверхности [2]. Оценка толщины ПСА в разных источниках различна, по вертикали эта область

распространяется непосредственно от подстилающей поверхности до высот в несколько сотен метров (как правило, приводятся средние значения от 300–400 м до 1–2 км). Толщина ПСА прямо пропорционально зависит от шероховатости подстилающей поверхности и от интенсивности развития турбулентности, и поэтому увеличивается с усилением ветра и уменьшением термической устойчивости атмосферы [3]. Днем верхняя граница ПСА часто ограничена инверсией [4], а ночной ПСА, в большинстве случаев, стабильно стратифицируется на протяжении всей его глубины [5].

Вертикальная структура ПСА оказывает значительное влияние на метеорологическую и экологическую обстановку. Она определяет приповерхностную концентрацию загрязняющих веществ и изменение ее с высотой, вертикальные профили средних скоростей ветра и турбулентный вертикальный обмен импульса, тепла, влаги и других примесей [5]. В пограничном слое происходит торможение воздушного потока, здесь наиболее сильны вертикальные градиенты температуры и влаги [1], происходит трансформация нижней облачности [6]. Верхняя граница ПСА препятствует непосредственному проникновению тепловых воздействий, что тормозит распространение примесей в вышележащий слой атмосферы [2].

Измерения метеорологических параметров (температура, влажность, характеристики ветра) внутри ПСА позволяют получать информацию о его структуре и динамике, и играют важную роль в решении различных задач в области метеорологии, изучения динамики атмосферы, процессов взаимодействия атмосферы и подстилающей поверхности, усовершенствования моделей прогноза погоды и изменений климата [7]. Проводимое дважды в сутки аэрологическое зондирование не обеспечивает достаточное пространственное разрешение в ПСА и имеет низкое временное разрешение, не позволяющее исследовать динамические процессы. Высокое пространственно-временное разрешение могут обеспечить прямые контактные измерения на высотных метеорологических мачтах и башнях, которые представляют собой сложные конструкции, что сильно ограничивает их применение и такие измерения проводятся лишь в редких пунктах [8, 9]. Использование спутниковых данных затруднено их низким вертикальным разрешением, низкой частотой сканирования и потенциальным влиянием облачного покрова [10].

Альтернативой вышеназванных проблем является непрерывный мониторинг ПСА с помощью

приборов дистанционного зондирования, которые позволяют контролировать состояние ПСА до высоты 500–1000 м с хорошим вертикальным и временным разрешением [11]. Для решения этой задачи в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН) создан аппаратно-программный комплекс «Нева-М» (рис. 1), который позволяет охватить практически весь спектр исследований ПСА, включая изучение вертикальной структуры турбулентности и оценки ее характеристик и включая вертикальные профили трех компонентов скорости ветра в нижнем слое атмосферы в районе города Томска.

Расположение и состав комплекса

Измерительный комплекс «Нева-М» установлен на высоте 20 м на крыше административного здания ИМКЭС СО РАН (г. Томск). Комплекс включает в себя акустический ветровой профилемер SODAR PCS.2000-64 (METEK GmbH, ФРГ) (рис. 1, а) [12], радиометр водяного пара РВП (рис. 1, б) [13, 14], метеорологический температурный профилемер МТП-5РЕ (рис. 1, в) [14] и метеорологическую станцию WXT-520 (Vaisala Corp., Финляндия) (рис. 1, в) [15].

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

Ветровой профилемер SODAR PCS.2000-64 (рис. 1, а) представляет собой акустический измеритель скорости ветра и профилей турбулентности на высотах от 15 до 1000 м [12]. Основные характеристики ветрового профилемера приведены в таблице 1.

Приёмопередатчик акустических импульсов PCS2000-64 представляет собой фазированную антенную решетку из 64 излучателей мощностью 30 Вт каждый. Путем подачи на излучатели зондирующих импульсов со сдвигом фаз формируются узконаправленные акустические сигналы в азимутальных направлениях 0, 90, 180 и 270 градусов и в зените. Угол расхождения лучей зависит

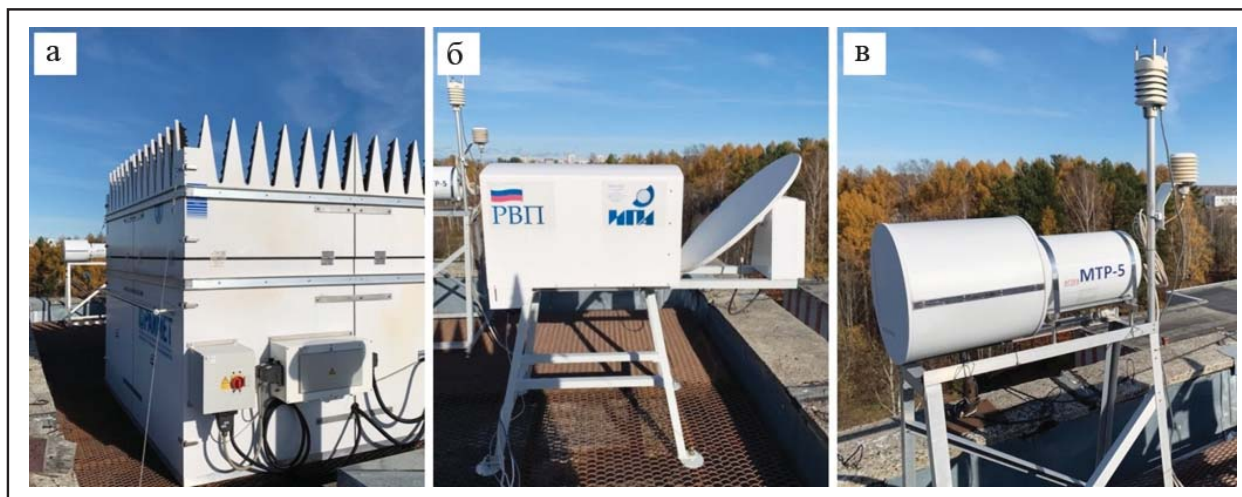


Рис. 1. Аппаратно-программный комплекс «Нева-М»: а) ветровой профилимер SODAR PCS.2000-64; б) радиометр водяного пара РВП; в) метеорологический температурный профилимер МТП-5РЕ и метеостанция WXT520

Таблица 1

Основные характеристики аппаратно-программного комплекса «Нева-М»

	Параметры	Значения
SODAR PCS2000.64	Диапазон измерений скорости ветра	0...35 м/с
	Диапазон измерений направления ветра	0 ... 360°
	Стандартное отклонение радиальной компоненты ветра	3 м/с
	Минимальная высота измерений	40 м
	Вертикальное разрешение	20 м
	Максимальная высота измерений	900 м
	Точность измерений	10 %
	Рабочий диапазон температур	–30° С...+55° С
МТП-5РЕ	Диапазон измерений температуры	–80...+45° С
	Диапазон высот измерения	0...1000 м
	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
	Рабочий диапазон температур	–80...+60° С
	Рабочий диапазон температур	–80...+60° С
РВП	Диапазон измерений интегрального влагосодержания	0,01 – 6 г/см ²
	Диапазон измерений интегрального водосодержания	0,01 – 10 кг/м ²
	Точность измерений	10 %
	Рабочий диапазон температур	–40...+40° С
	Рабочий диапазон относительной влажности	0...98 %

от частоты входного сигнала и составляет от 15,5 до 19,9 градусов. Аналогичным образом – путем сдвига фаз входных сигналов – формируется диаграмма направленности в режиме приема.

Принимаемый акустический сигнал проходит фильтрацию и математическую обработку. Данные о скорости ветра получаются путем определения доплеровского сдвига частоты принимаемых

импульсов. Затем из проекций скорости на каждом луче решением обратной задачи вычисляются азимутальная, меридиональная и вертикальная компоненты скорости ветра.

Программное обеспечение профилемера обеспечивает автоматическую настройку параметров зондирования в зависимости от погодных условий и окружающей шумовой обстановки.

Радиометр водяного пара

Радиометр водяного пара (рис. 1, б) определяет общее (интегральное) влагосодержание и водосодержание атмосферного столба в пересчете на единицу площади (м^2 или мм^2) [13]. Радиометр принимает микроволновое излучение атмосферы с зенита на частотах 20,7 и 31,4 ГГц. На основе измеренной интенсивности излучения вычисляется интегральное влагосодержание и интегральное водосодержание. Основные характеристики радиометра приведены в таблице 1.

Температурный профилемер

Метеорологический температурный профилемер МТР-5РЕ (рис. 1, в) представляет собой пассивный сканирующий одноканальный радиометр, измеряющий собственное излучение молекулярного кислорода атмосферы на частоте 56,6 ГГц [14]. Принимаемое излучение содержит в себе информацию о температуре атмосферы в слое до 1000 м [16, 17]. 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. В составе комплекса «Нева-М» используется профилемер МТР-5РЕ в полярном исполнении (РЕ), который имеет повышенное вертикальное разрешение для исследования инверсий и расширенный рабочий диапазон температур. Основные характеристики температурного профилемера приведены в таблице 1.

Метеостанция

Метеостанция WXT520 (рис. 1, в) измеряет скорость и направление ветра, осадки, атмосферное давление, температуру и относительную влажность воздуха [15].

Измеритель скорости и направления ветра основан на эффекте Доплера 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 или частиц града на мембрану. По сигналу датчика определяется объем и количество капель (частиц), упавших в единицу времени и рассчитывается интенсивность и накопленное количество осадков.

Измеритель давления, температуры и влажности воздуха включает в себя емкостные датчики соответствующих величин с микропроцессорной системой сбора данных.

Система управления

Каждый прибор в составе комплекса управляется собственным специализированным программным обеспечением, которое 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, предотвращающую их обмерзание. Комплекс подключен к сети Интернет с возможностью удаленного управления и выгрузки данных.

Пример работы комплекса «Нева-М» при прохождении над Томском холодного фронта 7 июня 2021 г.

Синоптическая обстановка на юге Западной Сибири 7 июня 2021 г. в срок наблюдений 09 UTC представляла собой размытое барическое поле, в котором возник циклон, находящийся в начальной стадии (рис. 2). Его центр описывался одной замкнутой изобарой, и располагался восточнее Томска. Давление в центре составляло 1008,8 гПа. Это молодой циклон, на что указывало понижение давления в его центральной части. Величина падения давления составляла $-0,9$ гПа за 3 часа. В передней части циклона наблюдалась адвекция тепла (падение давления перед полярным теплым фронтом составляло $-2,5$ гПа за 3 часа), в тыловой части циклона наблюдалась адвекция холода

(рост давления за полярным холодным фронтом составлял +1,2 гПа за 3 часа).

С циклоном связана полярная система атмосферных фронтов и фронт окклюзии. Полярный теплый фронт располагался восточнее Томска, и уходил на юг, пролекая восточнее Горно-Алтайска. Холодный полярный фронт проходил южнее Томска. Фронт окклюзии располагался юго-восточнее центра циклона, пролекая восточнее Новосибирска и западнее Барнаула.

В холодной полярной воздушной массе, располагающейся в тыловой части циклона, отмечались температуры воздуха +15..+19° С. В тыловой части наблюдалась кучевая и кучево-дождевая облачность, с 4–10 баллами облачности. В передней части циклона отмечались температуры +21..+24° С. В тыловой и передней частях циклона наблюдались грозы. Горизонтальная дальность видимости в передней части колебалась от 10 до 20 км, в тыловой – от 20 до 50 км. В тропической воздушной массе, которая располагалась в тёплом секторе циклона, температуры воздуха достигали +24..+26° С. Скорости ветра составили 2–6 м/с. Высота основания облаков составила 600–1000 м над поверхностью земли.

Холодный полярный фронт прошел над Томском примерно в 08:30 UTC. При прохождении фронта температурный профилимер МТР-5 зарегистрировал резкие изменения температуры в ПСА (рис. 3). Перед подходом фронта вертикальный профиль температуры воздуха практически не отличался от адиабатического хода («сухая адиабата») (рис. 4, а, 08:20 UTC). При прохождении фронта в интенсивных осадках температура понизилась и значительно выровнялась по высотам вследствие интенсивного перемешивания (рис. 4, б, 09:00 UTC). После ухода фронта ПСА оставался неустойчивым с ходом температуры от 15,4 градуса у земли до 13 на высоте 1000 м (рис. 4, б, 09:00 UTC).

После прохода фронта высотный ход температуры значительно отличался от нормального.

Прохождение фронта сопровождалось осадками в виде дождя, осадки фиксировались с 08:41 UTC. Наиболее интенсивные осадки наблюдались в 08:56 UTC и составили 75,3 мм/час (рис. 5). На рисунке 5 так же приведены изменения общего влагосодержания и общего водосодержания атмосферы, зарегистрированные радиометром водяного пара РВП при прохождении фронта. Общее влагосодержание атмосферы до прохождения

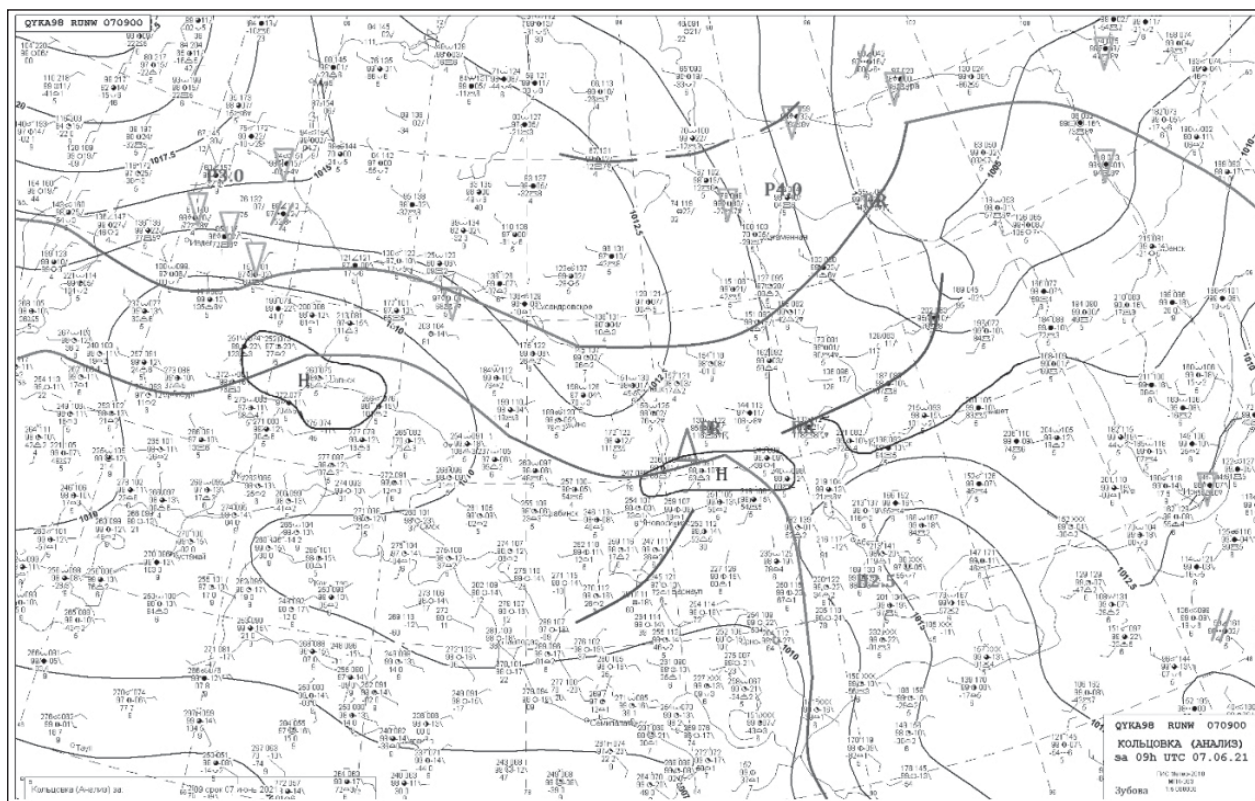


Рис. 2. Кольцевая карта синоптической обстановки на юге Западной Сибири за 7 июня 2021 г. 00:09 UTC

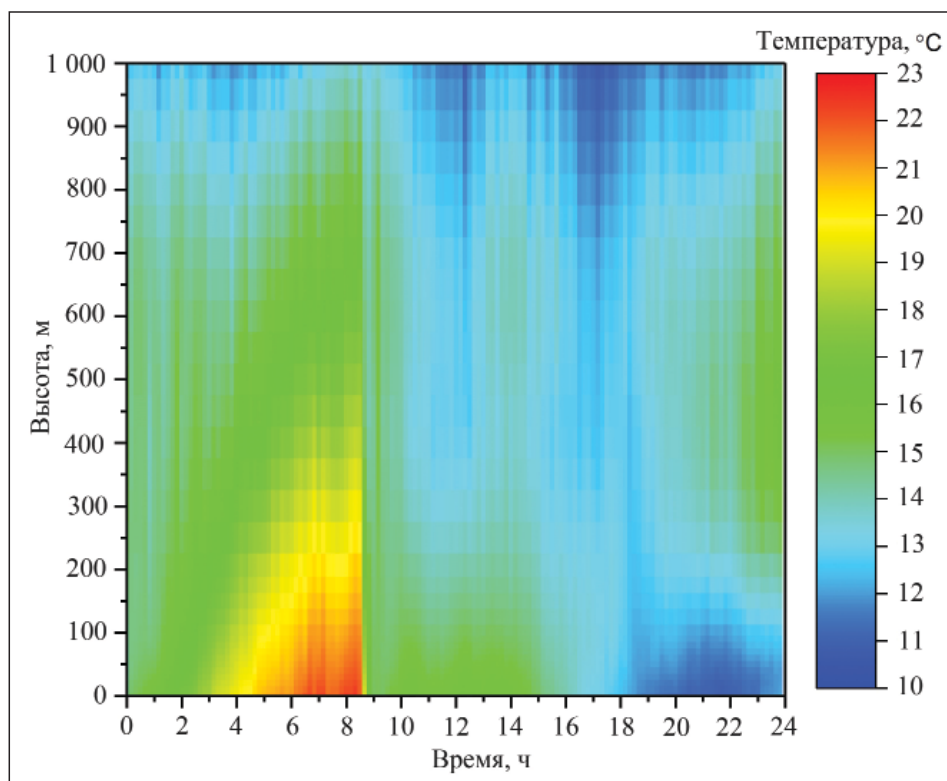


Рис. 3. Диаграмма хода температуры воздуха в течение суток 7 июня 2021 г.

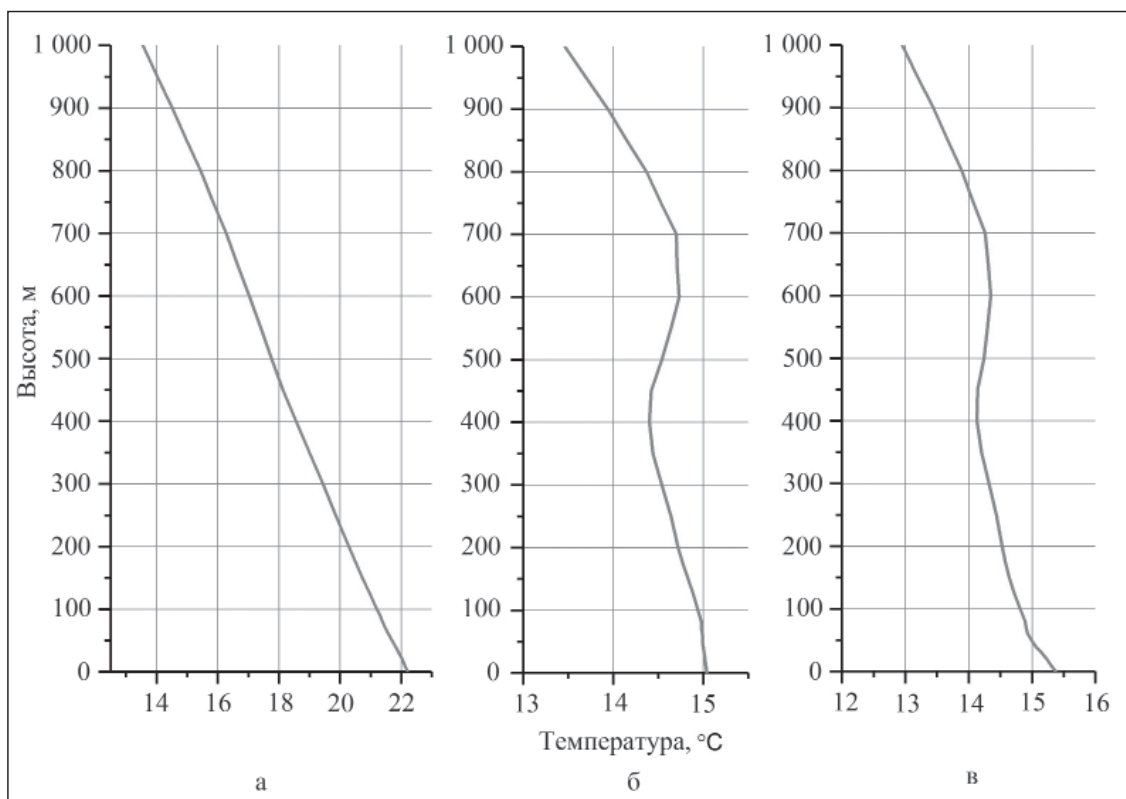


Рис. 4. Вертикальные профили температуры воздуха до подхода (а), при проходе (б) и после прохода (в) холодного фронта 7 июня 2021 г.

фронта существенно не изменялось, оставаясь в пределах 1,9–2,2 г/см². Непосредственно перед началом осадков, в 08:33 UTC влагосодержание

начало увеличиваться, и в момент начала осадков показания достигли максимума 6,8 г/см², обусловленного насыщением приемного тракта РВП.

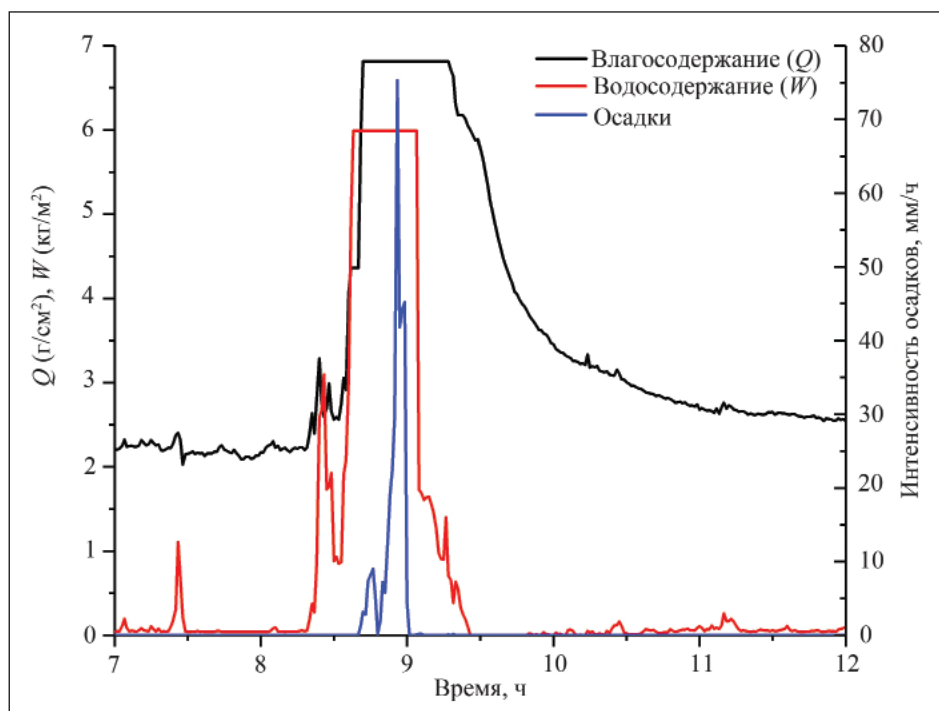


Рис. 5. Временной ход общего влагосодержания Q , общего водосодержания W и осадков с 00:07 до 12:00 UTC 7 июня 2021 г.

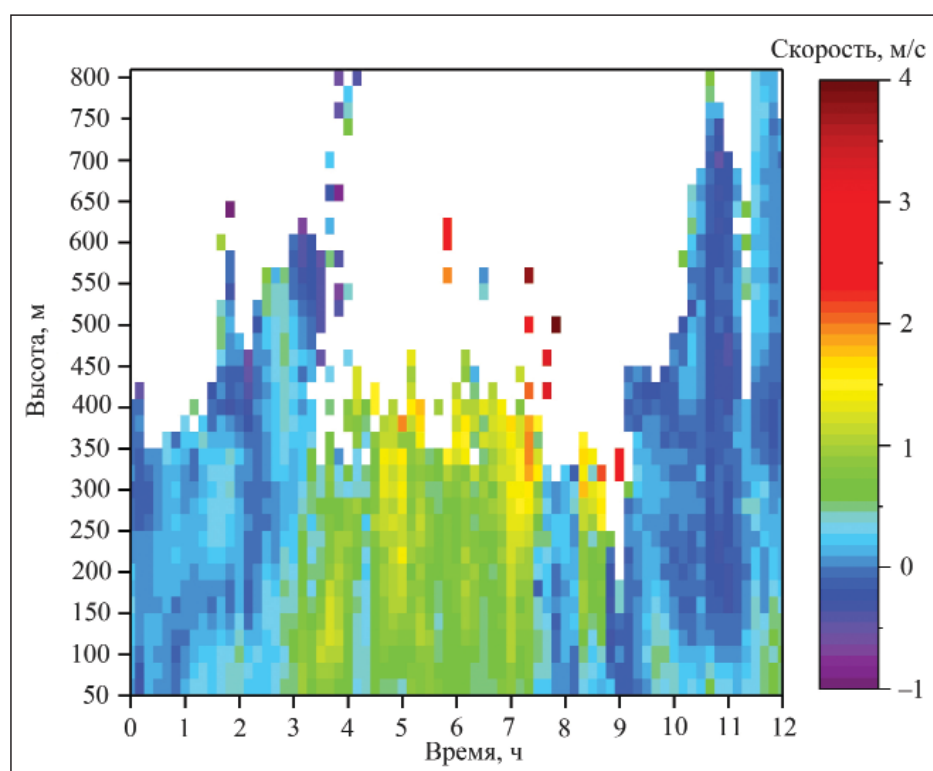


Рис. 6. Диаграмма вертикальной скорости ветра в ПСА за 00:00 – 00:12 UTC 7 июня 2021 г.

Влагосодержание начало снижаться в 09:18 UTC и затем в течение суток оставалось около 2,3–2,5 г/см². В целом, содержание водяного пара в воздухе увеличилось после прохождения фронта и оставалось практически неизменным, а ход приземной влажности воздуха определялся его температурой. Водосодержание атмосферы в начале суток было незначительным, около 0,035 кг/м², затем после 03:00 UTC, начало увеличиваться до

0,05 кг/м², что означает появление в ПСА рассеянной облачности. Около 08:20 UTC наблюдался резкий рост водосодержания до 7,9 кг/м², обусловленный появлением плотной кучево-дождевой облачности в луче зрения РВП и насыщением приемного тракта. В 09:05 UTC водосодержание снизилось до 1,67 кг/м², затем в 09:20 UTC – до 0,033 кг/м² и далее в течение суток оставалось в пределах 0,05 кг/м².

Перед проходом фронта в пограничном слое установился западный ветер с приземной скоростью 5 м/с, с высотой усиливающийся, до 10 м/с к 500 метрам высоты. По данным ветрового профилемера PCS.2000-64 в слое высот до 600 метров с 03:00 UTC до прохода фронта наблюдались восходящие потоки с вертикальной скоростью до 4 м/с (рис. 6). Непосредственно перед прохождением фронта вертикальное движение воздуха прекратилось. После прохождения фронта направление ветра сменилось на северное, приземная скорость ветра составила 3 м/с, на высоте 500 м – до 10 м/с, со снижением до 5 м/с.

Заключение

Комплекс «Нева-М» показал хорошие возможности и перспективы для комплексных наблюдений процессов ПСА. Высокое пространственное и временное разрешение получаемых данных позволит исследовать динамику быстрых изменений состояния атмосферы. Дальнейшим направлением развития комплекса представляется объединение его данных с прогностической моделью WRF (Weather Research and Forecasting), с целью привязки модели к точке наблюдений и применения ее для краткосрочного прогнозирования.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300156-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Струнин М.А. Исследования пограничного слоя атмосферы с помощью самолетов-лабораторий // *Мир измерений*. 2008. № 8. С. 6–14.
2. 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.
3. Лайхтман Д.Л. *Физика пограничного слоя атмосферы* (2 изд.). Л.: Гидрометеиздат. 1970. 342 с.
4. Beyrich F., Weill A. Some aspects of determining the stable boundary layer depth from SODAR data // *Boundary-Layer Meteorology*. 1993. Vol. 63. Pp. 97–116.
5. Emeisa S., Munkel C., Vogt S., Muller W.J., Schafer K. Atmospheric boundary-layer structure from simultaneous SODAR, RASS, and ceilometer measurements // *Atmospheric Environment*. 2004. Vol. 38. Pp. 273–286.
6. Лайхтман Д.Л., Надежина Е.Д. Симонов В.В. Влияние изменения внешних условий на трансформацию нижней облачности // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. 1966. Вып. 187. С. 67–72.
7. 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.
8. Jonassen M.O., Tisler P., Altstädter B. et al. Application of remotely piloted aircraft systems in observing the atmospheric boundary layer over Antarctic sea ice in winter // *Polar Research*. 2015. Vol. 34. Pp. 1–15.
9. Kral S., Reuder J., Vihma T. et al. Innovative Strategies for Observations in the Arctic Atmospheric Boundary Layer (ISOBAR) – The Hailuoto 2017 Campaign // *Atmosphere*. 2018. Vol. 9(7). № 268. Pp. 1–29.
10. Караваев Д.М., Кулешов Ю.В., Успенский А.Б., Щукин Г.Г. Валидация информационных продуктов спутниковых радиометров микроволнового диапазона // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 3. С. 259–267.
11. Смирнова М.М., Рубинштейн К.Г., Юшков В.П. Оценка воспроизведения региональной моделью характеристик пограничного слоя атмосферы // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 12. С. 5–16.
12. Metek GmbH [Электронный ресурс]. URL: <https://metek.de/product/pcs-2000-64/>
13. Кадыгров Е.Н., Ганьшин Е.В., Миллер Е.А., Точилкина Т.А. Наземные микроволновые температурные профилемеры: потенциал и реальность // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28. № 6. С. 521–528.
14. Институт прикладной астрономии РАН [Электронный ресурс]. URL: <http://iaaras.ru/quasar/wvr/>
15. Vaisala Corporation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vaisala.com/en/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/weather-stations-and-sensors/WXT-520/>
16. Кадыгров Е.Н., Горелик А.Г., Миллер Е.А. и др. Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом // *Оптика атмосферы и океана*. 2013. Т. 26. № 6. С. 459–465.
17. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя – метод, аппаратура, результаты измерений // *Оптика атмосферы и океана*. 2009. Т. 22. № 7. С. 697–704.

REFERENCES

1. Strunin M.A. Issledovaniya pogrannichnogo sloya atmosfery s pomoshch'yu samoletov-laboratorij [Study of the atmospheric boundary layer using laboratory aircraft]. *Mir izmerenij* [World of measurements]. 2008. № 8. Pp. 6–14.
2. Zilitinkevich S.S., Tyuryakov S.A., Troitskaya J.I., Mareev E.A. Teoreticheskie modeli vysoty pogrannichnogo sloya atmosfery i turbulentnogo vovlecheniya na ego verhnjej granice [Theoretical models of the height of the atmospheric boundary layer and turbulent interaction at its upper boundary]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya RAN. Physics of the atmosphere and ocean]. 2012. Vol. 48. № 1. Pp. 150–160.
3. Leichtman D.L. *Fizika pogrannichnogo sloya atmosfery (2 izd.)* [Physics of the Boundary Layer of the Atmosphere (2nd ed.)]. L.: Gidrometeoizdat. 1970. 342 p.
4. Beyrich F., Weill A. Some aspects of determining the stable boundary layer depth from SODAR data // *Boundary-Layer Meteorology*. 1993. Vol. 63. Pp. 97–116.
5. Emeisa S., Munkel C., Vogt S., Muller W.J., Schafer K. Atmospheric boundary-layer structure from simultaneous SODAR, RASS, and ceilometer measurements // *Atmospheric Environment*. 2004. Vol. 38. Pp. 273–286.
6. Leichtman D.L., Nadezhina E.D., Simonov V.V. Vliyanie izmeneniya vneshnih uslovij na transformaciyu nizhnjej oblachnosti [The influence of changes in external conditions on the transformation of the lower cloudiness]. *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voejkova* [Proceedings of the A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory]. 1966. Vol. 187. Pp. 67–72.
7. Repina I.A., Varentsov M.I., Chechin D.G. et al. Ispol'zovanie bespilotnyh letatel'nyh apparatov dlya issledovaniya atmosfernogo pogrannichnogo sloya [The use of unmanned aerial vehicles for the study of the atmospheric boundary layer]. *Innovatika i ekspertiza* [Innovatics and Expertise]. 2020. Vol. 2. № 30. Pp. 20–39.
8. Jonassen M.O., Tisler P., Altstädter B. et al. Application of remotely piloted aircraft systems in observing the atmospheric boundary layer over Antarctic sea ice in winter // *Polar Research*. 2015. Vol. 34. Pp. 1–15.
9. Kral S., Reuder J., Vihma T. et al. Innovative Strategies for Observations in the Arctic Atmospheric Boundary Layer (ISOBAR) – The Hailuoto 2017 Campaign // *Atmosphere*. 2018. Vol. 9(7). № 268. Pp. 1–29.
10. Karavaev D.M., Kuleshov Yu.V., Uspensky A.B., Shchukin G.G. Validaciya informacionnyh produktov sputnikovyh radiometrov mikrovolnovogo diapazona [Validation of information products of satellite microwave radiometers]. *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]. 2014. Vol. 11. № 3. Pp. 259–267.
11. Smirnova M.M., Rubinstein K.G., Yushkov V.P. Ocenka vosproizvedeniya regional'noj model'yu harakteristik pogrannichnogo sloya atmosfery [Estimation of the regional model's reproduction of the characteristics of the atmospheric boundary layer]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology]. 2011. № 12. Pp. 5–16.
12. Metek GmbH [Electronic resource]. URL: <https://metek.de/product/pcs-2000-64/>
13. Kadygrov E.N., Ganshin E.V., Miller E.A., Tochilkina T.A. Nazemnye mikrovolnovye temperaturnye profilemery: potencial i real'nost' [Ground-based microwave temperature profilers: potential and reality]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2015. Vol. 28. № 6. Pp. 521–528.
14. *Institut prikladnoj astronomii RAN* [Institute of Applied Astronomy RAS] [Electronic resource]. URL: <http://iaaras.ru/quasar/wvr/>
15. Vaisala Corporation [Electronic resource]. URL: <https://www.vaisala.com/en/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/weather-stations-and-sensors/WXT-520/>
16. Kadygrov E.N., Gorelik A.G., Miller E.A. et al. Rezul'taty monitoringa termodinamicheskogo sostoyaniya troposfery mnogokanal'nym mikrovolnovym radiometricheskim kompleksom [Results of monitoring the thermodynamic state of the troposphere by a multichannel microwave radiometric complex]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2013. Vol. 26. № 6. Pp. 459–465.
17. Kadygrov E.N. Mikrovolnovaya radiometriya atmosfernogo pogrannichnogo sloya – metod, apparatura, rezul'taty izmerenij [Microwave radiometry of the atmospheric boundary layer – method, equipment, measurement results]. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2009. Vol. 22. № 7. Pp. 697–704.



Информация об авторах

¹ **Зуев Владимир Владимирович**, доктор физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник

¹ **Павлинский Алексей Валерьевич**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

^{1,2} **Уйманова Валерия Александровна**, канд. географ. наук, младший научный сотрудник, ассистент

^{1,2} **Долгова Наталья Владиславовна**, инженер, студент магистратуры

^{1,2} **Томашова Анастасия Сергеевна**, инженер, студент магистратуры

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

² Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, Российская Федерация, пр. Ленина, 36

Information about authors

¹ **Zuev Vladimir Vladimirovich**, Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor, Principle Researcher

¹ **Pavlinsky Aleksey Valer'evich**, Cand. of Phys.-Math. Sciences, Senior Researcher

^{1,2} **Uymanova Valeriya Aleksandrovna**, Cand. of Geographical Sciences, Junior Researcher, Assistant

^{1,2} **Dolgova Natal'ya Vladislavovna**, Engineer, Graduate Student

^{1,2} **Tomashova Anastasiya Sergeevna**, Engineer, Graduate Student

¹ Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS
634055, Tomsk, Russian Federation, pr. Akademicheskij, 10/3

² National Research Tomsk State University
634050, Tomsk, Russian Federation, pr. Lenina, 36

