

УДК 551.509.32

Измерительно-вычислительный комплекс для мониторинга и прогноза метеорологической ситуации в аэропорту

В.В. Зуев¹, А.П. Шелехов¹, Е.А. Шелехова¹, А.В. Старченко^{1,2},
А.А. Барт², Н.Н. Богословский², С.А. Проханов², Л.И. Кижнер^{2*}

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

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

Поступила в редакцию 24.03.2013 г.

Описан измерительно-вычислительный комплекс для мониторинга и прогноза метеорологической ситуации в аэропорту, в состав которого входят метеорологический температурный профилемер МТР-5РЕ, универсальная метеостанция Vaisala WXT520, основной и дистанционный терминалы для управления комплексом, сетевое хранилище данных, две метеорологические модели высокого разрешения, сервер и кластер Томского государственного университета СКИФ Cyberia. Представлены результаты мониторинга и прогноза температурного профиля атмосферы и приземных значений скорости и направления ветра, давления, влажности и температуры для прошедшей зимы, когда в аэропорту Богашево, г. Томск, отмечались различные экстремальные погодные явления. Показано, что измеренные и рассчитанные вертикальные профили температуры в нижней части атмосферного пограничного слоя имеют высокий уровень количественного и качественного совпадения результатов.

Ключевые слова: измерительно-вычислительный комплекс, мониторинг атмосферного пограничного слоя, мезомасштабные метеорологические модели; the complex measurement and computation system, atmospheric boundary layer monitoring, mesoscale and meteorological models.

Введение

Мониторинг и прогноз высотного хода температуры воздуха, их вариаций и особенно слоев инверсий и изотермий являются актуальными с точки зрения метеорологического обеспечения аэронавигации. Нижний слой атмосферы характеризуется значительной высотной и внутрисуточной изменчивостью, поэтому мониторинг и прогноз, выполненные на основе радиолокационных и шаропилотных средств измерений, не соответствуют требованиям по пространственно-временному разрешению. Высоким требованиям в диапазоне высот от 0 до 1000 м удовлетворяет метеорологический температурный профилемер МТР-5РЕ (версия расширенного температурного диапазона и высокого разрешения), который позволяет отображать термическую структуру нижнего километрового слоя атмосферы и получать ее временную динамику [1–5]. Профилемер МТР-5РЕ положен в основу измерительно-вычислительного комплекса для мониторинга и прогноза метеорологической ситуации в аэропорту. Кроме температурного профилемера в состав комплекса входят

универсальная метеостанция Vaisala WXT520, основной и дистанционный терминалы для управления комплексом, сетевое хранилище данных, две метеорологические модели высокого разрешения [6–9], сервер и кластер Томского государственного университета (ТГУ) СКИФ Cyberia.

В настоящей статье описан измерительно-вычислительный комплекс для прогноза неблагоприятных ситуаций в аэропорту, приведены результаты измерений температурного профиля атмосферы и приземных значений скорости и направления ветра, давления, влажности и температуры (для декабря 2012 г., когда в аэропорту отмечалась аномально холодная погода, и для января 2013 г., когда наблюдалась оттепель, – повышение температуры воздуха до 0° и выше), а также результаты численного прогноза, полученные с использованием этих моделей.

1. Измерительно-вычислительный комплекс для прогноза неблагоприятных ситуаций в аэропорту

Измерительно-вычислительный комплекс состоит из двух частей. Измерительная часть (далее измерительный комплекс) состоит из метеорологического температурного профилемера МТР-5РЕ, универсальной метеостанции Vaisala WXT520, которые

* Владимир Владимирович Зуев (vzuev@imces.ru); Александр Петрович Шелехов (ash@imces.ru); Евгения Александровна Шелехова (sea@imces.ru); Александр Васильевич Старченко (starchenko@iao.ru); Андрей Андреевич Барт; Николай Николаевич Богословский; Сергей Анатольевич Проханов; Любовь Ильинична Кижнер.

подключены к терминалу с выходом в Интернет. Измерительный комплекс расположен в аэропорту в непосредственной близости от взлетно-посадочной полосы. В состав вычислительной части комплекса (далее вычислительный комплекс) наряду с используемыми для численного прогноза погоды метеорологическими моделями входят сервер, сетевое хранилище данных и кластер ТГУ СКИФ Cyberia (62 терафлопс).

1.1. Измерительный комплекс

Метеорологический температурный профилимер МТР-5РЕ предназначен для дистанционного измерения профиля температуры атмосферы в диапазоне высот от уровня установки прибора до 1000 м [1–3]. Профилимер состоит из измерительного блока, температурного датчика, блока питания и основания для установки прибора. В состав измерительного блока входят приемник теплового излучения атмосферы, сканирующее устройство с шаговым двигателем, зеркалом-рефлектором, датчиками положения рефлектора и метеозащита с радиопрозрачным окном. Прием теплового излучения атмосферы с разных направлений производится путем механического вращения зеркала-рефлектора, установленного на одной геометрической оси с неподвижной антенной приемника. Излучение атмосферы, пропорциональное температуре для каждого направления, подается на вход приемника и преобразуется на его выходе в напряжение постоянного тока. Усиленный сигнал принимается на вход платы микропроцессора, связанной с ноутбуком. Измеренный сигнал по специальной программе преобразуется в профиль температуры атмосферы, который сохраняется в архиве данных измеренных профилей температур в ноутбуке, расположенном в аэропорту Богашево.

Универсальный метеокomплекс Vaisala WXT520 предназначен для измерения шести важнейших погодных параметров: приземной скорости и направления ветра, жидких осадков, атмосферного давления, температуры и относительной влажности. Он представляет собой полностью интегрированный прибор без движущихся деталей, данные измерений сохраняются в архиве в ноутбуке. Терминал для работы с измерительными приборами с выходом в Интернет состоит из ноутбука и 3g-модема.

1.2. Вычислительный комплекс

Измерительно-вычислительный комплекс содержит две метеорологические модели с пользовательским интерфейсом, расчет по которым регулярно проводится на суперкомпьютере с последующим размещением полученных результатов расчетов на сетевых хранилищах данных. Сервер вычислительного комплекса выполняет функции сбора данных с приборов, установленных в аэропорту Богашево, сохранения данных на сетевом хранилище. Он также взаимодействует с кластером ТГУ СКИФ Cyberia для подготовки и проведения трудоемких расчетов.

К информационным ресурсам, используемым в измерительно-вычислительном комплексе, относится ftp-сервер ГУ Гидрометцентр России, на который ежедневно выкладывается оперативный среднесрочный прогноз по глобальной модели ПЛАВ для Томской, Новосибирской и Кемеровской областей. Эти информационные ресурсы поступают на сервер и сохраняются в сетевом хранилище.

Передача данных из аэропорта на сервер вычислительного комплекса производится с использованием ноутбука с 3g-модемом, находящегося в аэропорту, и по сети Интернет в режиме «реального времени». Управление измерительным комплексом (включение и выключение приборов, оперативный просмотр и передача данных и перезапуск программ) осуществляется дистанционно с помощью удаленного доступа посредством сети Интернет.

2. Результаты измерений

Рассмотрим результаты измерений метеопараметров, проведенных в аэропорту Богашево, г. Томска 13.12.2012 и 26.01.2013 гг., которые существенно различаются синоптическими и погодными условиями.

Синоптическая ситуация в период с 11 по 17 декабря 2012 г. в Томске характеризовалась аномально низкой температурой воздуха, которая опускалась временами ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10]. Такие условия вызваны господством на большей территории мощного антициклона с давлением на уровне моря в центре более 1050 гПа, который располагался на Урале. Давление в аэропорту (рис. 1, а) постепенно возрастало на протяжении всех суток 13.12.2012 г. от 1011 до 1016 гПа, что больше климатической нормы для декабря на 3–8 гПа (рост давления указывает на дальнейшее развитие антициклона), влажность – от 58 до 68%, температура от -33 до $-42,7^{\circ}$ (по данным Vaisala WXT520) и $-43,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (по данным МТР-5РЕ), ветер преимущественно северного – северо-восточного направления – от 0 до 2,5 м/с, что соответствует сухой, очень холодной и практически безветренной погоде. Этот день характеризуется классическим суточным ходом температуры воздуха (с максимумом в 16 ч, минимумом – в 8–10 ч) и относительной влажности воздуха (противоположным ходом температуры).

Период с 23 по 27 января 2013 г. характеризовался существенно более высокими температурами воздуха ($-6\div+2\text{ }^{\circ}\text{C}$) по сравнению со средними климатическими [10]. Такая ситуация была вызвана поступлением теплого и влажного морского тропического воздуха. Мощный юго-западный перенос на карте АТ-850 указывает на приход воздушных масс с Каспийского и Аральского морей. В течение 26.01.2013 г. давление, влажность, температура и ветер (рис. 1, б) менялись соответственно в пределах: 976–989 гПа, 52–91%, $-6\div+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и с 2 до 20 м/с, что соответствует синоптической ситуации на данный день: адвекция теплого воздуха до 14–15 ч (уменьшение давления, рост температуры, высокая влажность – больше 80%), прохождение циклона и адвекция холодного воздуха к концу суток (резкое

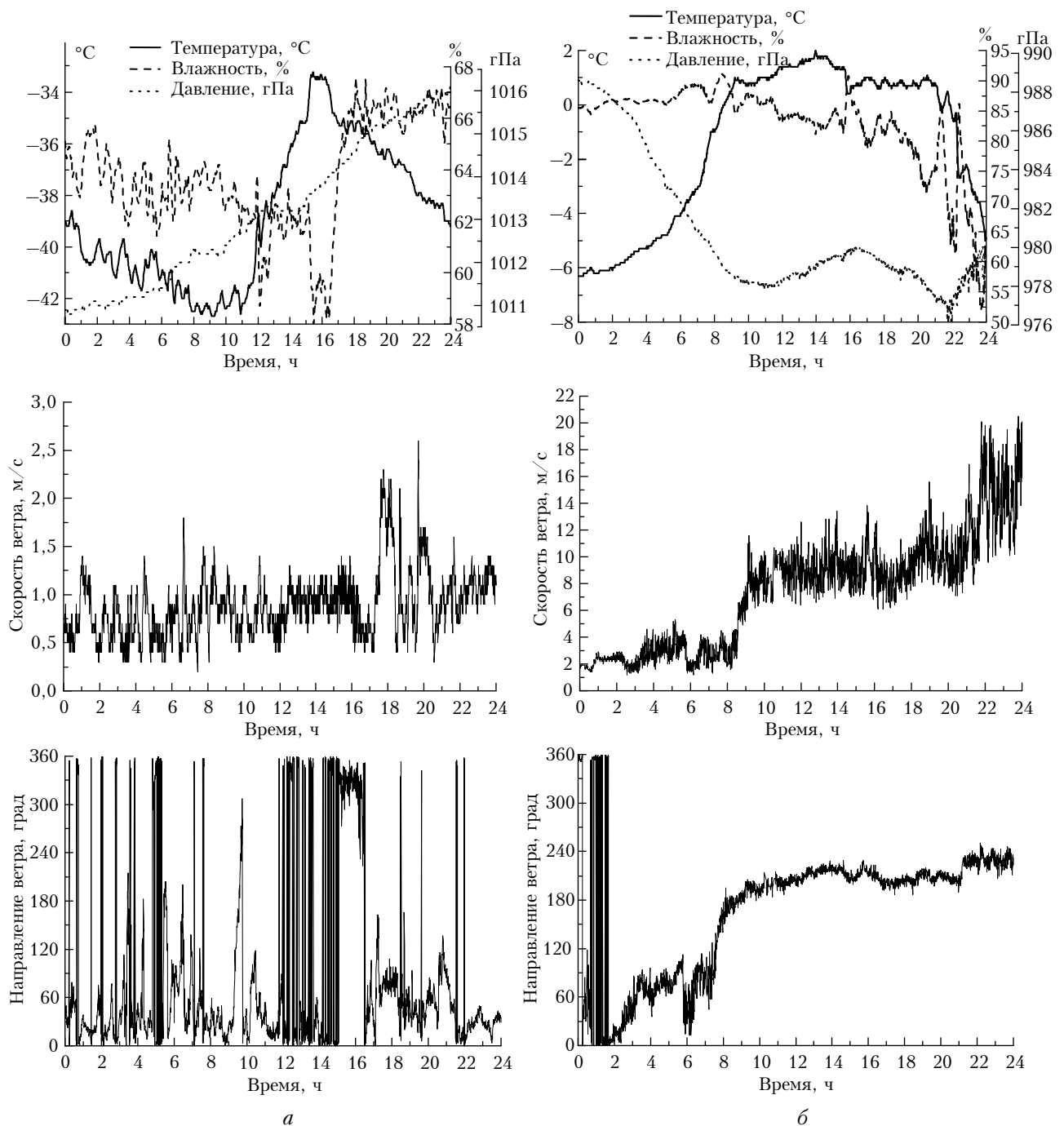


Рис. 1. Суточные вариации приземных значений метеопараметров: *a* – 13.12.2012 г.; *б* – 26.01.2013 г.

увеличение давления воздуха, понижение температуры и влажности, сильный и порывистый ветер) [10].

На рис. 2 и 3 представлены суточные вариации высотного профиля температуры; рис. 2, *a* и 3, *a* соответствуют 13.12.2012 г., 2, *б* и 3, *б* – 26.01.2013 г. Из рис. 2, *a* и 3, *a* видно, что 13.12.2012 г. в течение всех суток отмечалась инверсия температуры. До 11 ч инверсия охватывала весь километровый слой. Наиболее резкий рост температуры отмечался в нижнем 100–150-метровом слое. Затем рост температуры замедлился, в слое до 350–400 м отмечались

изотермия либо незначительное уменьшение температуры и далее снова температура с высотой возрастала. Интенсивность инверсии составляла 7–10 °C. После 11 ч мощность инверсии несколько уменьшилась (700–800 м). На протяжении этого времени интенсивность инверсии составляла 6–11 °C, максимальная за сутки – 12 °C.

Примерно с 14 до 16 ч за счет незначительного дневного прогрева отмечалась приподнятая инверсия с высотой нижней границы до 50 м. Такая ситуация характеризует исключительно устойчивую погоду, способствующую сильному загрязнению атмосферы.

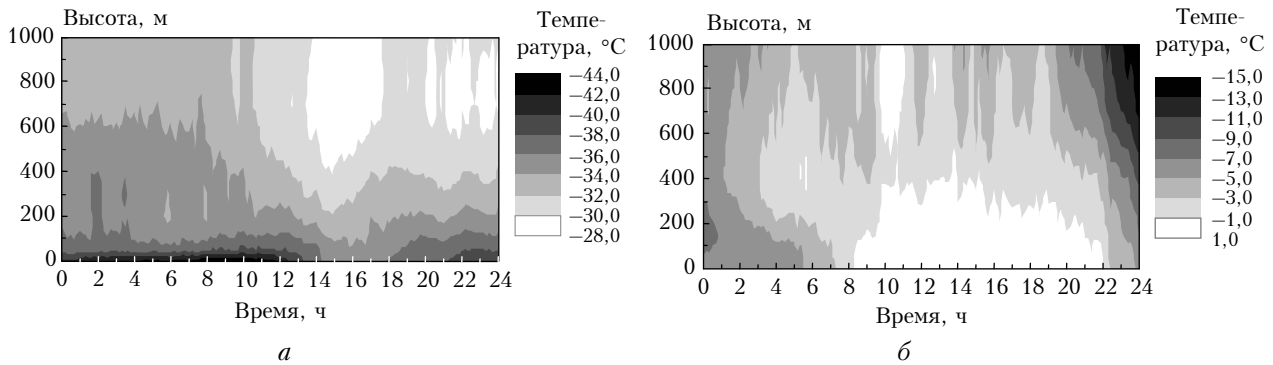


Рис. 2. Суточные вариации высотного профиля температуры: *а* – 13.12.2012 г.; *б* – 26.01.2013 г.

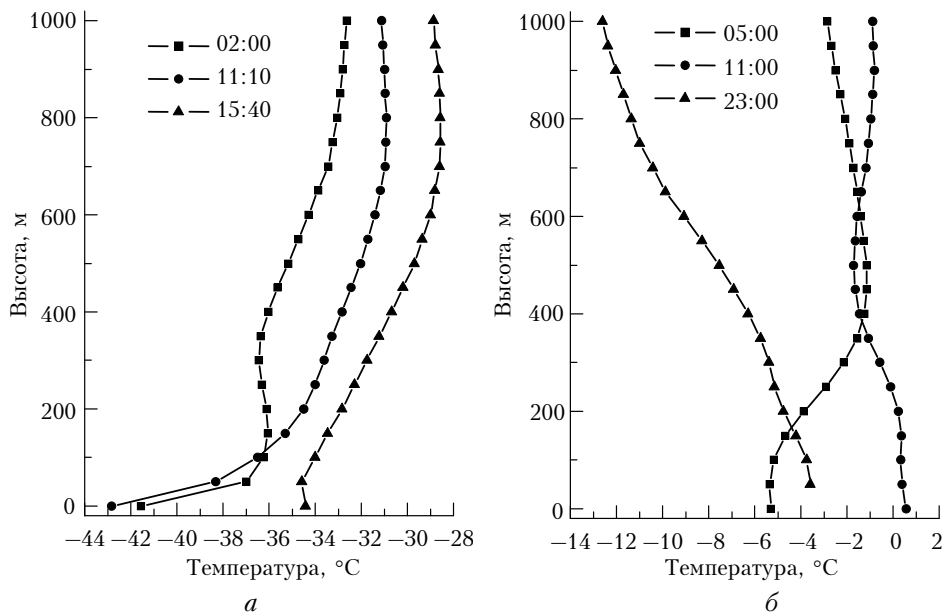


Рис. 3. Динамика профиля температуры: *а* – 13.12.2012 г.; *б* – 26.01.2013 г.

По данным Аэродромной метеорологической информационно-измерительной системы АМИС-РФ в аэропорту на протяжении суток наблюдались дымка и туман с видимостью от 650 м (с 05 до 13 ч 13 декабря и ночью 14 декабря), что ниже минимума погоды (800 м) для аэропорта г. Томска. Одновременно в Томске наблюдался туман с видимостью от 200 м [10].

Интенсивная инверсия в нижнем слое может привести к изменению условий пилотирования (необходимости существенного увеличения оборотов двигателей и к повышению расхода топлива). Считается, что при повышении температуры на 10 °С от стандартной скороподъемность самолета уменьшается на 10–20%, а время набора высоты увеличивается на 6–10%. На этом основании можно сделать вывод, что интенсивная и мощная инверсия, которая наблюдалась в течение дня в километровом слое, является существенной для полета авиации. Отметим, что за счет инверсии велика вероятность сильного вертикального сдвига ветра, при котором усложняются взлет и посадка самолетов.

Из рис. 2, *б* и 3, *б* видно, что с начала суток до 8 ч отмечается приподнятая инверсия с постепенно

снижающейся нижней границей от 200 м до поверхности земли мощностью 200–400 м и интенсивностью до 4 °С. С 9 до 14 ч она становится более высокой с нижней границей до 500 м, мощностью 300–400 м и незначительной интенсивностью – от 0 °С (изотермия) до 1,5 °С. Начиная со второй половины дня инверсия разрушилась. По профилю температуры видно, что суточный ход температуры нарушен (она растет начиная с 0 ч, утренний минимум не выражен), рост температуры отмечается до 14 ч, что подтверждается синоптическими данными и условиями погоды.

Исходя из анализа профилей температуры, с привлечением погодных условий и синоптической обстановки, можно утверждать, что вертикальный профиль температуры обусловлен поступлением теплого воздуха примерно до 18–20 ч и небольшими суточными изменениями. После 20 ч отмечается постепенное понижение температуры, начиная с более высоких уровней (около 1000 м). Более холодный воздух постепенно перемещается вниз. К концу суток температура опустилась до –6 °С, на верхней границе измерений до –14 °С.

Весь рассматриваемый период является опасным для возникновения обледенения как взлетно-посадочной полосы, так и самого самолета. Согласно [5] особенно неблагоприятным временем для обледенения взлетно-посадочной полосы считается период, когда температура в слое атмосферы по высоте от отрицательных значений переходит к положительным. Ливневые осадки (снег, а в 15 ч и дождь) и высокая влажность в атмосфере у земли в сочетании с переходом температуры от отрицательных значений к положительным, которые наблюдались в этот день, способствуют более интенсивному обледенению. Как следует из рис. 1, б и 2, б, этот период продолжался приблизительно с 7 до 19 ч. По данным АМИС-РФ, обледенение взлетно-посадочной полосы фиксировалось с 7 до 18 ч.

Кроме осадков и высокой влажности на обледенение самолета влияет наличие облачности. Измерения профиля температуры в аэропорту в первой половине суток 26 января показывают, что в атмосфере наблюдался переход температуры от отрицательных значений к положительным, а по данным АМИС-РФ фиксировалась облачность, что привело к обледенению самолета на высоте 400–500 м. Ливневые осадки, усиление ветра и порывы до 20 м/с указывают на смену воздушных масс (прохождение фронта) после 18 до 24 ч. Вертикальный профиль температуры по МТР-5РЕ в конце суток четко указывает время прохождения холодного фронта начиная с 22 ч.

3. Результаты численного прогноза

Прогностические расчеты были проведены на рассмотренные даты по двум мезомасштабным метеорологическим моделям высокого разрешения: модели, разрабатываемой в ТГУ, и модели Weather Research&Forecasting (WRF) [6–9]. При расчетах характеристик атмосферного пограничного слоя использовались результаты оперативного численного прогноза, полученные на основе глобальной модели Гидрометцентра РФ ПЛАВ.

На рис. 4 представлены вертикальные профили температуры в нижней части атмосферного пограничного слоя, измеренные температурным профиломером МТР-5РЕ и рассчитанные на кластере ТГУ Cyberia с использованием рассматриваемых моделей высокого разрешения, в районе аэропорта Богашево в ночное время 13 декабря 2012 г. и 26 января 2013 г. Сопоставляя результаты расчетов с измерениями, можно отметить высокий уровень количественного и качественного совпадения результатов. Максимальное расхождение не превышает 3 °С. Для сильного похолодания (рис. 4, а) и модели, и наблюдения фиксируют наличие изотермического участка в распределении температуры на высоте 50–300 м над поверхностью Земли. При оттепели (рис. 4, б) график температуры почти линейен с высотой, как следует из результатов расчетов и измерений.

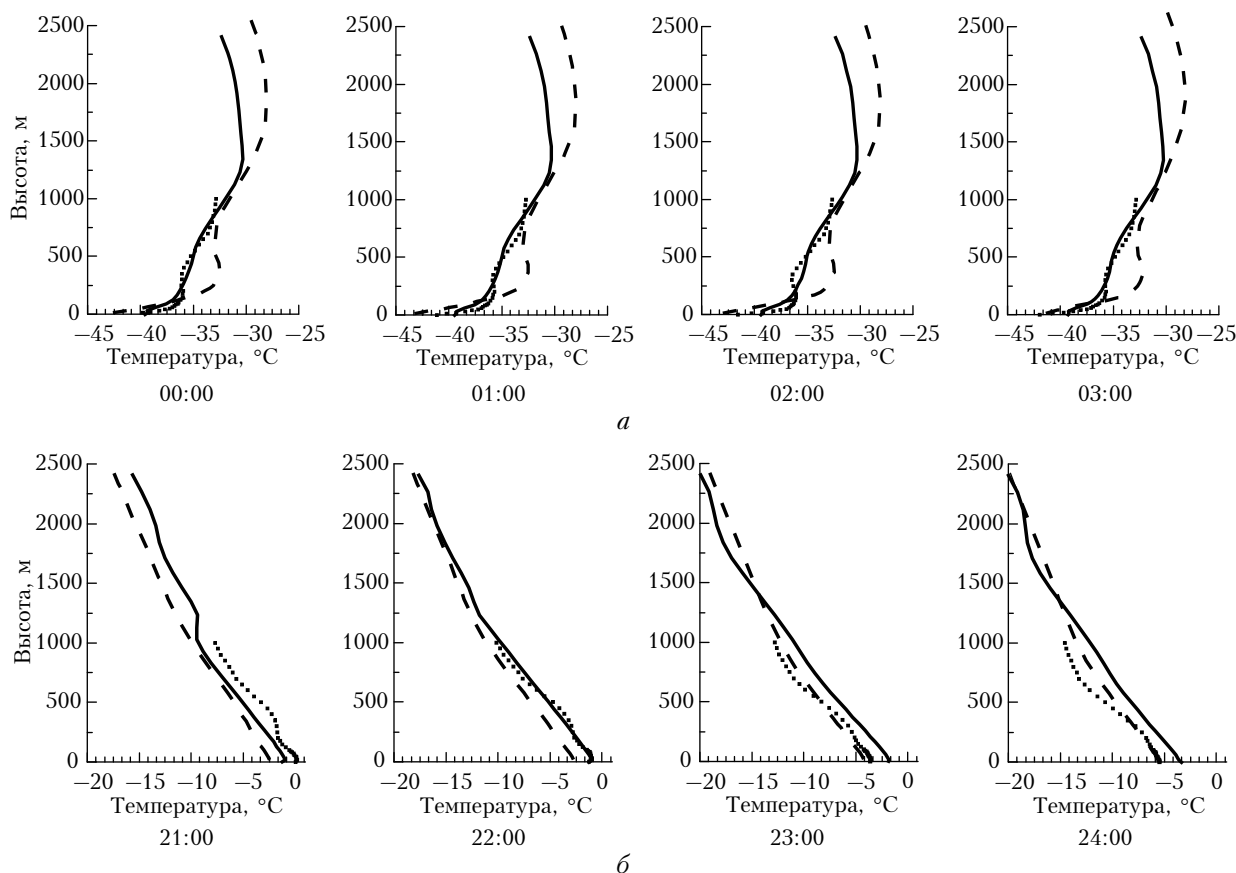


Рис. 4. Вертикальный профиль температуры над аэропортом Богашево во время сильного похолодания (а) и оттепели (б). Точки – измеренные значения, сплошная линия – расчет по модели [8], штриховая – расчет по модели [9]

Заклучение

Приведено описание измерительно-вычислительного комплекса для мониторинга и прогноза метеорологической ситуации в аэропорту. В основу комплекса положены метеорологический температурный профилемер МТР-5РЕ, универсальная метеостанция Vaisala WXT520, терминал для работы и управления измерительными приборами, а также две метеорологические модели, сервер, сетевое хранилище данных и кластер ТГУ СКИФ Cyberia.

Представлены результаты мониторинга и прогноза температурного профиля атмосферы и приземных значений скорости и направления ветра, давления, влажности и температуры для декабря 2012 г., когда наблюдались аномальные холода, и для января 2013 г., когда в аэропорту Богашево отмечалась оттепель с положительными значениями температуры. Было установлено, что в течение суток 13.12.2012 г. наблюдалась исключительно устойчивая погода с аномально низкой температурой воздуха, которая привела к интенсивной и мощной инверсии и наличию изотермий. Такая ситуация способствовала сильному загрязнению атмосферы, наблюдались дымка и туман с видимостью, которая значительно ниже допустимого минимума для аэропорта г. Томска, а интенсивная и мощная инверсия могла привести к изменению условий пилотирования и усложнить взлет и посадку самолетов.

В период оттепели 26.01.2013 г. отмечалась приподнятая инверсия с постепенно снижающейся нижней границей, которая со второй половины дня разрушилась. Вечером было понижение температуры, начиная с более высоких уровней, более холодный воздух постепенно перемещался вниз и к концу суток температура опустилась до -6°C , на верхней границе измерений до -14°C . Переход температуры от отрицательных значений к положительным в различных слоях атмосферы и прохождение холодного фронта в сочетании с осадками, высокой влажностью и облачностью привели в этот день к опасным явлениям, таким как обледенение взлетно-посадочной полосы, самолета и усиление ветра, что также фиксировалось аэродромными службами.

Таким образом, результаты численных расчетов показали, что вертикальные профили температуры в нижней части атмосферного пограничного слоя, измеренные температурным профилемером МТР-5РЕ и рассчитанные на кластере ТГУ Cyberia с использованием рассматриваемых моделей высокого разрешения, имеют высокий уровень количественного и качественного совпадения результатов.

V.V. Zuev, A.P. Shelekhov, E.A. Shelekhova, A.V. Starchenko, A.A. Bart, N.N. Bogoslovsky, S.A. Prokhanov, L.I. Kizhner. The complex of measurement and computation system for monitoring and forecasting the meteorological situation at the airport.

The description of the complex measurement and computation system for monitoring and forecasting the meteorological situation at the airport is presented. The system consists of the meteorological temperature profiler MTR-5PE, Vaisala Weather Transmitter WXT520, main and remote control terminals, network data storage, two high-resolution meteorological models, server, and SKIF Cyberia complex at Tomsk State University. The paper presents the results of the measurements and forecasts of the atmospheric temperature profile and surface values of the wind velocity and direction, pressure, humidity and temperature of the previous winter, characterized by various extreme weather events observed at the airport Bogashevo. It is shown that the measured and calculated temperature profiles for the lower part of the atmospheric boundary layer have a good qualitative and quantitative agreement of the results.

Представленный измерительно-вычислительный комплекс позволяет осуществлять мониторинг и прогноз метеорологической ситуации в аэропорту при экстремальных погодных явлениях.

Работа выполнена по проекту VIII.77.1.2 программы фундаментальных исследований СО РАН, в рамках «Программы стратегического развития Алтайского государственного университета» и при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (Соглашение № 14.В37.21.0667).

1. Кузнецова И.Н., Кадыгров Е.Н., Миллер Е.А., Нахаев М.И. Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое по данным дистанционных измерений приборами МТП-5 // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 877–883.
2. Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., Leuskiy V., Kadygrov E.N., Viazankin A.S. Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison Experiments // Atmos. and Ocean. Technol. 1999. V. 16. July. P. 805–818.
3. Kadygrov E.N., Pick D.R. The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons with *in situ* observations // Meteorol. Application. 1998. V. 5, N 4. P. 393–404.
4. Смирнова М.М., Рубинштейн К.Г., Юшков В.П. Оценка воспроизведения региональной моделью характеристик пограничного слоя атмосферы // Метеорол. и гидрол. 2011. № 12. С. 5–16.
5. Методические рекомендации по использованию данных профиломеров МТП-5. М.: Росгидромет, 2010. 45 с.
6. Барт А.А., Старченко А.В., Фазлиев А.З. Информационно-вычислительная система для краткосрочного прогноза качества воздуха над территорией г. Томска // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 7. С. 594–601.
7. Старченко А.В., Барт А.А., Дези Д.В., Зуев В.В., Шелехов А.П., Барашкова Н.К., Ахметшина А.С. Численное и экспериментальное исследование состояния атмосферного пограничного слоя вблизи аэропорта Богашево // Вестн. КузГТУ. 2012. № 6. С. 3–8.
8. Старченко А.В. Численное исследование локальных атмосферных процессов // Вычислительные технологии. 2005. № 10. С. 81–89.
9. Старченко А.В., Беликов Д.А., Вражнов Д.А., Есаулов А.О. Применение мезомасштабных моделей MM5 и WRF к исследованию атмосферных процессов // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 455–461.
10. Гидрометцентр России. О погоде из первых рук. 2013. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://meteoinfo.ru/>