

УДК 551.524.3(481.54)

Анализ результатов дистанционного мониторинга профиля температуры в нижних слоях атмосферы долины г. Берген (Норвегия)

И. Н. Эзау^{* **}, Т. Вольф^{*}, Е. А. Миллер^{***},
И. А. Репина^{**** * *****}, Ю. И. Троицкая^{** * *****},
С. С. Зилитинкевич^{** * *****}

Рассматривается возможность дистанционного мониторинга профиля температуры воздуха в планетарном пограничном слое (ППС) и нижнем километровом слое атмосферы с помощью метеорологического температурного профиломера МТР-5. Измерения проводили в течение 2011–2012 гг. в г. Берген, Норвегия. Массив профилей температуры был получен с разрешением по времени 5 мин и 50 м по высоте. Дистанционные измерения дополнены измерениями температуры и ветра на двух автоматических метеорологических станциях и данными регистрации интенсивности осадков с помощью метеорологического радара. Исследовано влияние метеорологических условий и осадков на показания прибора. Установлено, что основной проблемой мониторинга профиля температуры при помощи МТР-5 является осаждение пленки воды (льда и (в меньшей степени) мокрого снега) на радиопрозрачном покрытии приемника излучений. Исключение часов с интенсивными осадками (более 0,2 мм/ч) показало, что прибор является надежным инструментом мониторинга стратификации нижней тропосферы и ППС, в том числе в условиях с сильной устойчивой стратификацией и низкими средними температурами, которые могут приводить к значительному ухудшению качества воздуха в г. Берген.

Введение

При устойчивой стратификации атмосферы, когда менее плотные и соответственно потенциально более теплые слои воздуха располагаются над более плотными и холодными слоями, турбулентное перемешивание подавлено, что приводит к образованию тонких планетарных пограничных слоев (ППС), увеличению концентрации примесей в них и значительному понижению (повышению) температуры приземного слоя воздуха в случае отрицательного (положительного) баланса тепла на поверхности [8, 13]. Дополнительно высоту ППС ограничивает наложенная стратификация ат-

* Центр исследований окружающей среды и дистанционного зондирования атмосферы им. Ф. Нансена, Норвегия; e-mail: igore@nersc.no.

** Нижегородский государственный университет.

*** Центральная аэрологическая обсерватория.

**** Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук; e-mail: repina@ifaran.ru.

***** Российский государственный гидрометеорологический университет.

***** Институт прикладной физики Российской академии наук.

***** Финский метеорологический институт, Финляндия.

мосферы над ППС [15], которая может приводить к развитию ППС толщиной порядка 100 м даже при условии слабой устойчивости вблизи поверхности земли. Более того, возникнув по той или иной причине, устойчиво стратифицированный ППС имеет тенденцию к усилению устойчивости в верхней части, что еще больше ослабляет перенос момента количества движения из свободной атмосферы к нижележащим слоям ППС, подавляет турбулентность в ППС и приводит к дальнейшему усилению разных опасных метеорологических явлений в приземном слое воздуха [7]. Устойчивая стратификация достаточно широко распространена в природе. Прежде всего она формируется практически каждую ночь над поверхностью суши. Устойчивые ППС типичны для пространств, занятых водоемами с более низкой температурой поверхности, чем температура воздуха, что особенно характерно для областей холодных течений в океане и апвеллингов. В зимние месяцы устойчиво стратифицированные ППС типичны над покрытой льдом поверхностью Северного Ледовитого океана, а также в антициклонах, формирующихся над покрытыми снегом континентами. Тем не менее процессы в таких ППС еще недостаточно изучены, и, в частности, до сих пор не решена проблема адекватного описания турбулентного обмена в приземном слое [4].

Мониторинг стратификации нижней атмосферы и, особенно, ППС является важным компонентом систем диагностики и предсказания метеорологических явлений и качества воздуха. В настоящее время такие системы строятся на базе численных моделей атмосферной циркуляции и переноса примесей. В этих моделях используют параметризацию турбулентного перемешивания и высоты ППС с помощью набора крупномасштабных параметров и универсальных функций, в частности — законов сопротивления, которые подробно рассмотрены в работах [5, 14—16]. Законы сопротивления позволяют определять профили характеристик ветра и температуры в ППС, однако имеется ряд внешних параметров, которые должны быть определены из независимых наблюдений или получены из крупномасштабных метеорологических моделей. Одним из важнейших внешних параметров, в частности, является градиент потенциальной температуры в свободной атмосфере над ППС, т. е. наложенная стратификация.

Представляется затруднительным определение стратификации в верхней части ППС и в нижнем слое атмосферы традиционными средствами наблюдения. Регулярные аэрологические данные начинают поступать с высоты, большей, чем типичная толщина устойчиво стратифицированных ППС. Вертикальное разрешение этих данных, как правило, недостаточно для того, чтобы разрешить инверсию в верхней части ППС. В то же время метеорологические мачты высотой 200—500 м являются уникальными объектами, которые не могут быть установлены в произвольном месте, где возникает потребность в мониторинге ППС. В этих условиях применение дистанционного зондирования с помощью усовершенствованной версии метеорологического температурного профилера МТР-5 [6, 11] позволяет решить задачу мониторинга профиля температуры до высоты 1000 м с высоким пространственным и временным разрешением.

При эксплуатации МТР-5 одна из основных трудностей связана с появлением пленки воды (льда или мокрого снега) на поверхности радиопрозрачной защиты приемника излучений. Известно, что при этих условиях

по результатам измерения получается более изотермический профиль температуры, чем реально наблюдаемый с помощью термометров на метеорологической мачте. В работе [9] приведено сравнение показаний МТР-5 и термометров на метеорологической мачте в Обнинске для нескольких случаев с интенсивными осадками, которые наблюдались в течение лета 2009 г. Было выделено три типичных случая искажения профиля температуры, причем для интенсивных осадков искажение достигало 2°C для верхних уровней измерений.

Хотя физическая природа искажения профиля температуры, измеряемого МТР-5, достаточно ясна, метеорологическая, и тем более климатическая, значимость искажений в конкретных условиях эксплуатации до сих пор остается неясной. В частности, для параметризаций ППС в численных моделях прогноза и для построения статистических регрессионных моделей качества воздуха желательно было бы оценить результаты дистанционного зондирования профиля температуры в разных метеорологических условиях, а также оценить вклад искажений профиля температуры в осредненные значения стратификации ППС.

В данной работе представлены результаты анализа дистанционного мониторинга профиля температуры в нижних слоях атмосферы в долине, в которой расположен г. Берген (Норвегия). Анализ выполнен по данным мониторинга температуры за период 2011—2012 гг. Хорошее метеорологическое оснащение долины Бергена позволяет не только провести анализ климатологии профилей температуры, но и сравнить данные МТР-5 с независимыми наблюдениями температуры у поверхности земли и на более высоких уровнях на склонах долины. Более того, одновременный мониторинг осадков с помощью метеорологического радара позволяет исследовать чувствительность данных МТР-5 к наличию и интенсивности осадков.

Краткое описание прибора МТР-5, места и условий наблюдений

Модифицированный метеорологический температурный профилемер МТР-5 (производства российской компании “НПО “АТТЕХ”; www.attex.net) был установлен на измерительной площадке Геофизического института Университета Бергена 8 февраля 2011 г. МТР-5 имеет свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.32.002.A № 45688 и международный сертификат безопасности СЕ. Он разработан для измерения профилей температуры от уровня установки до высоты 1000 м вне зависимости от условий погоды. Прибор прошел серию международных сравнений с разными альтернативными измерительными системами: с радиозондами, с RASS, с метеовышками и т. п. [6, 12]. По результатам серии сравнений и испытаний в 2011 г. прибор представлен в “Руководстве обеспечения качества по сбору метеорологических данных с использованием пассивных радиометров”, подготовленном Агентством по охране окружающей среды США [10]. Технические характеристики МТР-5 приведены в таблице.

Принцип действия МТР-5 детально описан в работах [1, 11]. Метод основан на измерении собственного теплового излучения молекулярного кислорода на частоте 60 ГГц (длина волны 5 мм) с помощью сканирующе-

**Технические характеристики профилера МТР-5 производства
компании “НПО “АТТЕХ”**

Характеристика	Значение
Диапазон высот измерения профиля температуры	0—1000 м
Шаг представления данных в слое	
0—100 м	25 м
100—1000 м	50 м
Чувствительность (при постоянной времени измерений 1 с)	Не более 0,1 К
Точность измерений (среднеквадратическое отклонение (СКО))	$\pm(0,2—1,2)^\circ\text{C}$
Точность по высоте	25%
Рабочий диапазон температуры	$-50...40^\circ\text{C}$
Стандартный интервал измерений	5 мин
Вес	25 кг
Питание	220 В, 2 А, 50—60 Гц
Мощность потребления	
максимальная	120 Вт
средняя	60 Вт
Выходное напряжение блока питания	13,8 + 2 В, I _{вых} 6 А
Связь с персональным компьютером	RS232
Калибровка	Автоматическая
Диагностика	Автоматическая

го радиометра. Излучение измеряется в терминах радиояркой температуры, которая преобразуется в температуру атмосферы из решения уравнения Фредгольма 1-го рода. Данная задача является математически некорректной, что ведет к неустойчивости решения, устраняемого методами статистической регуляризации. В угломестном методе, использованном в МТР-5, для корректного восстановления профиля температуры необходимо, чтобы излучение приходило из слоя атмосферы, предварительно заданного для каждого из углов измерения. В противном случае вследствие регуляризации математический алгоритм будет работать с излучением, которое приходит с более близкого расстояния и не несет в себе информацию о температуре слоя. При длине волны 5 мм излучение на пути к приемнику должно испытывать эффекты отражения, поглощения и рассеивания на частицах воды и снега в атмосфере. Эти эффекты были замечены и частично охарактеризованы ранее [12]. Они, как правило, вносят небольшую (порядка 0,1 С) ошибку в результат измерений. Более серьезные проблемы создает покрытие пленкой воды поверхности защиты приемника излучения в МТР-5.

Рисунок 1 дает представление о внешнем виде, расположении и ориентации приемника микроволнового излучения МТР-5 во время проведения измерений. Измерительная площадка расположена на высоте 45 м над уровнем моря и на высоте 33 м над уровнем площадки метеорологической станции в Бергене (условное название Флорида). Измерительная площадка и станция оснащены множеством измерительных приборов, что позволяет проводить перекрестный анализ качества измерений и их чувствительности к разным метеорологическим условиям. В данной работе качество оценивалось путем сравнения независимых измерений температуры с помощью МТР-5 и датчиков температуры компании “Ондеро” (“Aanderaa



Рис. 1. Профилемер метеорологический температурный производства российской компании “НПО “АТТЕХ” (www.attex.net).

Прибор установлен на измерительной площадке Геофизического института Университета Бергена на высоте 45 м над уровнем моря. Фотография сделана 8 февраля 2011 г.

Data Instruments”). Чувствительность измерений изучалась по отношению к количеству и интенсивности осадков, измеренных с помощью метеорологического осадкомерного радара (Micro rain radar), и по отношению к средней температуре воздуха в час наблюдений. Более подробная информация о приборах, установленных в Геофизическом институте, приведена на веб-странице <http://veret.gfi.uib.no/>.

Помимо измерений на площадке Флорида, для анализа данных в работе использованы измерения температуры на склонах горы Ульрикен (станция с условным названием Ульрикен расположена на высоте 602 м над уровнем моря или 557 м над уровнем прибора), что дало возможность изучить качество алгоритма восстановления профиля температуры в МТР-5 на базе длинных рядов наблюдений на двух уровнях.

Для статистического анализа использовали данные, полученные с помощью МТР-5 с 10 февраля 2011 г. по 1 сентября 2012 г. В этот период велись измерения в непрерывном режиме с пространственным разрешением 50 м (диапазон высот 45—1045 м) и временным разрешением 5 мин (12 профилей температуры в час, 288 профилей в сутки). Поскольку другие измерения температуры имеют часовое разрешение, данные МТР-5 были также усреднены за каждый час наблюдений. При этом часовые интервалы, в которые был обнаружен хотя бы один сбой в работе прибора, были исключены из базы данных.

В начале сентября 2012 г. разрешение прибора было улучшено до 25 м в нижних 100 м ППС. Хотя предварительный анализ показывает, что качество восстановления профиля температуры, по меньшей мере, не ухудшилось, авторы не располагают достаточной статистикой для более детального количественного анализа.

Анализ результатов мониторинга в период 2011—2012 гг.

Одной из основных проблем при мониторинге профиля температуры воздуха с помощью МТР-5 является экранирование излучения молекул кислорода каплями воды, находящимися на поверхности радиопрозрачной защиты приемника излучения и (в какой-то мере) вдоль направления измерения во время интенсивных или продолжительных осадков. Климат Бергена характеризуется большим количеством осадков (годовая норма 2260 мм) с максимумом в осенние месяцы (283 мм осадков в сентябре). При этом осадки в основном выпадают из фронтальной облачности с нижней границей ниже 1000 м. Использование моделей поглощения радиоволн показывает, что вклад мощной облачности с водозапасом 2 кг/м^2 и нижней границей 300 м в общую ошибку восстановления профиля температуры по МТР-5 составляет всего 0,07 С, что соизмеримо с ошибками самих измерений [2], при этом пленка воды на поверхности защиты может исказить их весьма значительно.

На рис. 2 представлен суточный ход профиля температуры при наличии осадков. Рассматриваемые сутки 6 сентября 2011 г. достаточно типичны, что дает возможность понять качественные изменения в данных МТР-5,

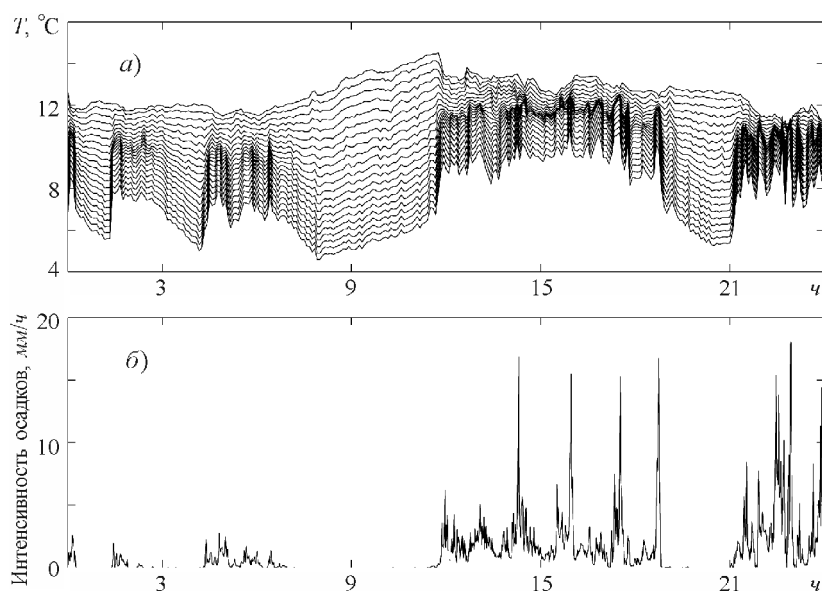


Рис. 2. Чувствительность профиля температуры с МТР-5 к факту и интенсивности осадков.

a) суточный ход температуры 6 сентября 2011 г. на заданных уровнях (верхняя кривая — 45 м над уровнем моря, далее вверх через каждые 50 м); *б)* суточный ход интенсивности осадков в тот же день.

вносимые осадками. Во-первых, можно заметить, что даже небольшие осадки (например, в первой половине суток) существенно и резко искажают профиль температуры, хотя и не приводят полностью к изотермической стратификации. Лишь осадки интенсивностью более 2 мм/ч вызывают практически полную изотермию по данным МТР-5. Во-вторых, как видно на рисунке, интенсивность осадков изменчива, что приводит к частичному восстановлению профиля температуры в периоды осадков малой интенсивности. Такое восстановление, однако, требует несколько последовательных сканирований (в данном примере до 3 сканирований, или до 15—20 мин). Поэтому в дальнейшем авторы разделили время наблюдений на часовые интервалы без осадков (сухо), т. е. полное отсутствие осадков в течение часа наблюдений, интервалы с небольшими осадками (влажно), когда сумма осадков была меньше 0,2 мм, и интервалы с осадками.

Действительно, на рис. 3 видно, что ошибки измерений можно разделить на четыре класса в зависимости от интенсивности осадков. При метеорологических условиях без осадков среднее значение разности между показаниями станции и МТР-5 минимально для всего массива данных и составляет 0,83 С, что неплохо согласуется с результатами других исследований. При небольших осадках эта разность увеличивается и достигает максимального значения при интенсивности осадков более 2 мм/ч. Таким образом, можно утверждать, что при такой интенсивности осадков поверхность радиопрозрачной защиты смачивается полностью за время между последовательными сканированиями профиля температуры.

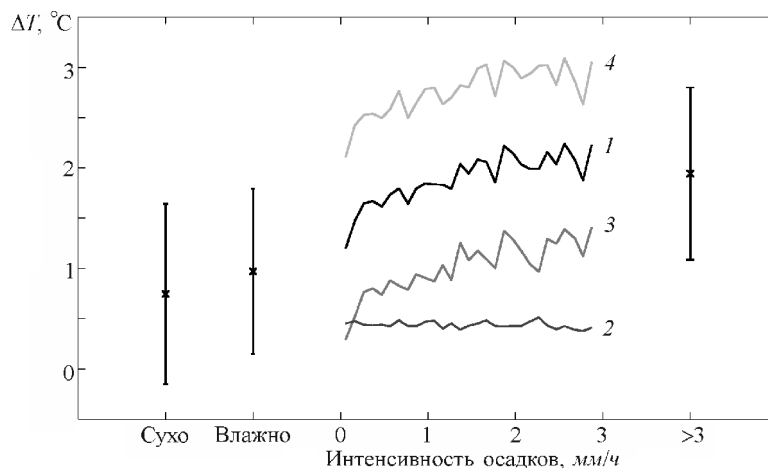


Рис. 3. Статистический анализ влияния факта и интенсивности осадков на разность $T = T_{\text{МТР-5}} - T_{\text{ст}}$ на уровне станции Ульрикен (602 м над уровнем моря, 557 м над уровнем прибора).

Условия без осадков (сухо) определяют среднее (1) и дисперсию разности температуры между МТР-5 и станцией, обусловленные расположением станции у поверхности земли. 2) среднеквадратическое отклонение (приведено значение СКО/2) для данного диапазона интенсивности осадков. 3, 4) соответственно среднее минус и плюс СКО. Условия без осадков (сухо), с интенсивностью осадков менее 0,2 мм/ч (влажно) и более 3,0 мм/ч выделены в отдельные категории и показаны знаками и вертикальными линиями, определяющими одно среднеквадратическое отклонение.

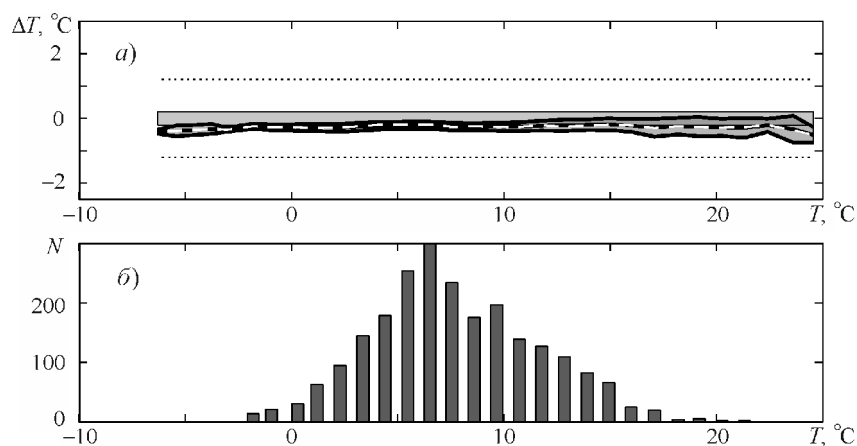


Рис. 4. Зависимость разности температуры $T = T_{\text{МТР-5}} - T_{\text{ст}}$ по измерениям МТР-5 и на станции Флорида (45 м над уровнем моря) от средней температуры в час наблюдений.

Допустимые ошибки измерений прибора, указанные в таблице, даны в виде серого прямоугольника и пунктирных прямых. а) разность температуры для часов с осадками показана черными жирными линиями (среднее значение в интервале температуры — штриховой линией, среднее \pm СКО — сплошными линиями) и серым оттенком между ними. Разность температуры для часов без осадков показана белой линией (только среднее); б) число часовых интервалов N , в которых были зафиксированы осадки более 0,2 мм, для каждого заданного интервала температуры.

Зависимость между разностью температуры по измерениям МТР-5 и независимым датчиком температуры на том же уровне и средней температурой в час наблюдений представлена на рис. 4 (уровень станции Флорида, 45 м над уровнем моря) и рис. 5 (уровень станции Ульрикен, 602 м над уровнем моря). Как видно, существует небольшое среднее отклонение ($T = T_{\text{МТР-5}} - T_{\text{ст}} = (-0,24 \pm 0,15 \text{ } ^\circ\text{C})$) в показаниях МТР-5 на нижнем уровне. Причем это отклонение, а также его дисперсия для часовых данных практически не зависят от температуры и осадков. Полученное отклонение сравнимо по величине с паспортной точностью прибора (0,2 $^\circ\text{C}$, см. таблицу), однако эти две величины имеют разное происхождение. Ошибка прибора получена для идеальных условий калибровки, в то время как полученное отклонение характеризует влияние специфических местных условий установки прибора, в частности, образование приземных инверсий на наклонной поверхности долины. Из-за наклона поверхности долины первый уровень измерений профиля температуры будет иметь меньшую высоту от поверхности, чем сам прибор. Таким образом, прибор будет принимать излучение с уровней, фактически более близких к поверхности и потому более холодных, что и приводит к отрицательной разности температуры прибора и независимого датчика, особенно при низкой средней температуре.

На уровне станции Ульрикен средняя разность температуры $T = (0,66 \pm 0,9) \text{ } ^\circ\text{C}$ для условий без осадков и $T = (1,2 \pm 1,0) \text{ } ^\circ\text{C}$ для условий с осадками более 0,2 мм/ч, т. е. МТР-5 регулярно показывает более высокую температуру, чем станция. Для условий с осадками увеличение разности

может достигать 5 C/км , т. е. фактически разности между реальным влажно-адиабатическим и полученным изотермическим градиентами температуры. Эта разность объяснима увеличением доли изотермических профилей температуры при осадках. Климат Бергена характеризуется достаточно четким разделением на два погодно-циркуляционных режима [3]: режим зонального переноса с большим количеством осадков и умеренной температурой воздуха и режим атмосферного блокинга, когда осадков практически не бывает, а температура воздуха может быть или низкой (зимой), или высокой (летом). Эта особенность климата Бергена отражается в характере зависимости разности температуры от средней температуры часа. На рис. 5а хорошо виден характерный “прогиб” зависимости в сторону больших значений разности в диапазоне температуры $0\text{—}10 \text{ C}$. В то же время при температуре ниже 0 C , когда осадки выпадают в основном в виде снега и пленка воды не закрывает приемник излучения, разность температуры перестает зависеть от осадков. Это наблюдение хорошо согласуется с результатами работы [12], хотя при налипании и быстром замерзании мокрого снега прибор выдает изотермический профиль температуры.

Другой интересной особенностью на рис. 5а является в среднем большее значение температуры на уровне станции Ульрикен в измерениях МТР-5 даже в периоды без осадков. Причем при относительно низкой температуре зимой (ниже -5 C) не наблюдается смены знака разности, как можно было бы ожидать исходя из представления, что поверхность склона сильно охлаждает тонкий приземный слой воздуха при отрицательном зимнем балансе тепла. Такой эффект действительно наблюдается, но при скорости ветра меньше 5 м/с , случаи которых из анализа исключены. Таким образом, вероятно, имеет место некоторая систематическая ошибка профиля температуры, которая занижает градиент температуры примерно на 1 C/км . Занижение градиента температуры означает несколько большую устойчивость атмосферы по данным прибора по сравнению с реаль-

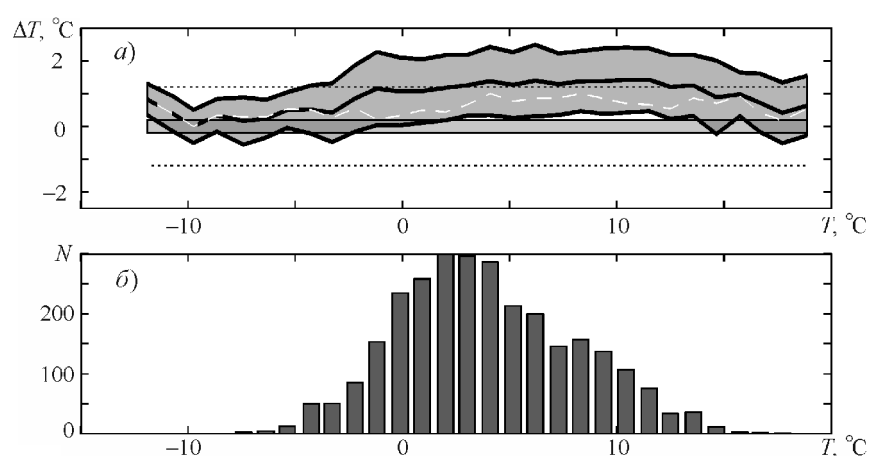


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для станции Ульрикен (602 м над уровнем моря).

но наблюдаемой. С другой стороны, надо учитывать, что полигоны Флорида и Ульрикен разнесены в пространстве, а атмосфера, особенно в местности со сложным рельефом, может быть не слоисто-плоской.

Заключение

Анализ большого числа профилей температуры, полученных при дистанционном зондировании атмосферы прибором МТР-5 в течение 2011—2012 гг., показал, что прибор является надежным инструментом мониторинга стратификации нижней атмосферы и ППС. Средняя разность между профилем температуры, восстановленным по данным измерения радиояростной температуры, и профилем, полученным по независимым наблюдениям, практически не зависит от метеорологических условий, кроме случаев сильных осадков. Средняя разность в значениях температуры была оценена в $(-0,24 \pm 0,15)$ С на уровне установки прибора и $(0,66 \pm 0,91)$ С на уровне станции Ульрикен (557 м над уровнем прибора). Сами по себе эти разности не превосходят ошибок измерений, приведенных в паспорте прибора (см. таблицу), но в сумме дают несколько более устойчивую, чем в действительности, стратификацию атмосферы. Поскольку толщина ППС может быть весьма чувствительна к стратификации свободной атмосферы [5, 15], то эту ошибку следует учитывать при использовании данных мониторинга профиля температуры для работ по прогнозу качества воздуха и калибровке параметризаций ППС в численных моделях.

Основной проблемой мониторинга профиля температуры при помощи МТР-5 является осаждение пленки воды (льда и (в меньшей степени) мокрого снега) на радиопрозрачном покрытии приемника излучений. Видимый эффект такой пленки в данных измерений — это внезапный переход к частично или полностью изотермической стратификации атмосферы. Поскольку при осадках нижняя атмосфера, как правило, хорошо перемешана, то ошибка профиля температуры зависит от высоты как влажная адиабата для данной температуры [7].

Авторы благодарны Йохиму Ройдеру, Яну-Асле Улсету и Уле-Эдварду Груву за предоставление архивов метеорологических данных.

Работа выполнена при поддержке грантов Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования: ГК № 11.G34.31.0048 и № 11.G34.31.0078, 7-й Рамочной программы Европейской комиссии (проект PBL-PMES, грант Европейского научного совета 227915), гранта Норвежского исследовательского фонда для поддержки двухстороннего сотрудничества с Российской Федерацией 196174/S30 и для поддержки фундаментальных исследований 191516/V30 и Министерства науки и образования Российской Федерации (соглашение 8833). Особую благодарность авторы выражают Рибер-фонду за многолетнюю поддержку исследований в области метеорологии г. Берген.

Литература

1. **Кадыгров Е. Н.** Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя — метод, аппаратура, результаты измерений. — *Оптика атмосферы и океана*, 2009, т. 22, № 7, с. 697—704.
2. **Троицкий А. В.** СВЧ-радиометрия земной атмосферы. /Автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук. — М., 1994, 30 с.
3. **Эзау И. Н.** Применение методов кластерного анализа для исследования неоднородностей геофизических полей. — *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 1998, т. 34, № 2, с. 222—234.
4. **Cheng Y. and Brutsaert W.** Flux-profile relationships for wind speed and temperature in the stable atmospheric boundary layer. — *Boundary-Layer Meteorol.*, 2005, vol. 114, pp. 519—538.
5. **EPA.** Quality Assurance Guidance for the Collection of Meteorological Data Using Passive Radiometers. — U. S. Environmental Protection Agency Region 10 Office of Environmental Assessment and U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards. — FINAL 0611, 2011.
6. **Esau I., Davy R., and Outten S.** Complementary explanation of temperature response in the lower atmosphere. — *Environ. Res. Lett.*, 2012, vol. 7, 044026, doi: 10.1088/1748-9326/7/4/044026.
7. **Esau I. and Zilitinkevich S.** On the role of the planetary boundary layer depth in the climate system. — *Adv. Sci. Res.*, 2010, vol. 4, pp. 63—69, doi: 10.5194/asr-4-63-2010.
8. **Esau I. and Zilitinkevich S. S.** Universal dependences between turbulent and mean flow parameters in stably and neutrally stratified planetary boundary layers. — *Nonlinear Processes in Geophysics (the special issue “Turbulent Transport in Geosciences”)*, 2006, vol. 13, pp. 122—144.
9. **Kadygrov E. N. and Pick D. R.** The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparison with in situ observations. — *Meteorol. Appl.*, 1998, No. 5, pp. 393—404.
10. **Koldaev A., Miller E., Troitsky A., and Sarichev S.** Experimental study of rain-induced accuracy limits for microwave remote temperature profiling. /In: WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation, Helsinki, Finland, 30 August — 1 September 2010, p. 2(7).
11. **Troitsky A.V., Gaikovich K. P., Gromov V. D., et al.** Thermal sounding of the atmospheric boundary layer in the oxygen band center at 60 GHz. — *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, vol. 31, No. 1, pp. 116—120.
12. **Westwater E. R., Han Y., Irisov V. G., et al.** Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison experiments. — *J. Atmos. and Ocean. Technol.*, 1999, vol. 16, No. 7, pp. 805—818.
13. **Zilitinkevich S. S. and Esau I.** Planetary boundary layer feedbacks in climate system and triggering global warming in the night, in winter and at high latitudes. — *Geography, Environment and Sustainability*, 2009, vol. 1, No. 2, pp. 20—34.
14. **Zilitinkevich S. S. and Esau I.** Resistance and heat transfer laws for stable and neutral planetary boundary layers: Old theory, advanced and re-evaluated. — *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2005, vol. 131, pp. 1863—1892.
15. **Zilitinkevich S. S. and Esau I.** Similarity theory and calculation of turbulent fluxes at the surface for the stably stratified atmospheric boundary layers. — *Boundary-Layer Meteorol.*, 2007, vol. 125, No. 2, pp. 193—205.
16. **Zilitinkevich S. S., Esau I., Kleeorin N., et al.** On the velocity gradient in stably stratified sheared flows. Part 1: Asymptotic analysis and applications. — *Boundary-Layer Meteorol.*, 2010, vol. 135, pp. 505—511.