

## Результаты измерений термической стратификации атмосферного пограничного слоя в каньонах и котловинах Гуамского хребта

Е.А. Воробьева, А.Н. Шапошников, В.В. Фоломеев, Е.Н. Кадыгров\*

*Государственное учреждение «Центральная аэрологическая обсерватория»  
141700, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3*

Поступила в редакцию 26.01.2010 г.

Представлены результаты измерений профилей температуры в котловине и узком каньоне, лежащем между Гуамским и Лагонакским хребтами (Северо-Западный Кавказ). Измерения проводились в сентябре 2009 г. с помощью новой современной аппаратуры — микроволновым температурным профилимером МТП-5НЕ, обеспечивающим практически непрерывные измерения профилей температуры атмосферы в диапазоне высот 0–1000 м от земной поверхности в любых метеорологических условиях. Получены данные о суточном ходе температуры на разных высотах в горной местности при различной орографии, рассчитаны характеристики температуры инверсий. Сделаны оценки потенциальных возможностей микроволновых профилимеров для исследования термической стратификации атмосферы в горных ущельях и каньонах. Полученные данные могут быть использованы для моделирования переноса загрязнений в горной местности и совершенствования локальных прогнозов погоды.

*Ключевые слова:* атмосферный пограничный слой, микроволновый температурный профилимер, горная метеорология; atmospheric boundary layer, microwave temperature profiler, mountains meteorology.

### Введение

Одной из фундаментальных задач физики атмосферы является установление зависимости всего комплекса метеорологических элементов атмосферного пограничного слоя (АПС) от внешних параметров. Особенный интерес подобные исследования представляют в условиях горизонтальной неоднородности АПС. Основными внешними факторами по отношению к АПС являются скорость геострофического ветра, параметр Кориолиса, радиационный баланс, шероховатость подстилающей поверхности и ее физические свойства (альbedo, влажность, теплоемкость и теплопроводность почвы) [1].

Наиболее сложный характер подстилающей поверхности наблюдается в горной местности, поэтому если термическая стратификация АПС на равнине не вызывает особых затруднений при моделировании, то для горных условий результаты моделирования не всегда дают устойчивый результат и особую ценность имеют экспериментальные данные [2–4]. Их получение, особенно для условий горных каньонов, ущелий и котловин, всегда было связано с большими трудностями. Запуски радиозондов не обеспечивают непрерывности измерений, применение привязных

аэростатов с контактными датчиками требует почти штатных условий, что практически никогда не наблюдается внутри каньонов за счет возникновения внутренних вихрей из-за неравномерного прогрева стен каньона и за счет внешних воздействий.

В сентябре 2009 г. специалистами ЦАО была проведена научная экспедиция с использованием новых технических средств — микроволновых температурных профилимеров, обеспечивающих непрерывные измерения профилей температуры атмосферы в диапазоне высот от земной поверхности до высоты 1000 м с шагом 50 м и среднеквадратической погрешностью измерений 0,5 °С [5, 6]. Измерения велись в районе Гуамского хребта (пос. Гуамка Апшеронского р-на Краснодарского края, 44,2° с.ш. и 39,9° в.д.) [7]. Профили температуры атмосферы измерялись внутри естественного горного каньона между пос. Гуамка и Мезмай (высота основания каньона 470 м над у.м., высота стен 400–450 м, направление — с северо-запада на юго-восток, длина каньона 3 км, ширина от 2 до 20 м, внутри каньона течет горная река Курджипс).

Стены каньона, частично абсолютно отвесные, из доломитизированного известняка, местами покрыты растительностью в виде кустов самшита и отдельных деревьев. Проводились также непрерывные измерения внутри горной котловины, на которой расположен в кольце гор пос. Гуамка (высота над у.м. 440 м, высота окружающих гор 800–900 м над у.м., диаметр долины ~4 км). Получены данные о суточном ходе температуры атмосферы на различных высотах

\* Екатерина Александровна Воробьева (src\_attex@mtu-net.ru); Александр Николаевич Шапошников (src\_attex@mtu-net.ru); Владимир Владимирович Фоломеев (src\_attex@mtu-net.ru); Евгений Николаевич Кадыгров (enkadygrov@gmail.com).

над поверхностью Земли в диапазоне 0–1000 м в различных синоптических ситуациях.

## Результаты измерений температурной стратификации атмосферы в горной котловине

Пос. Гуамка находится в горной котловине, окруженной отрогами Гуамского и Лагонакского хребтов. Измерения профилей температуры проводились с 07.09 по 14.09.2009 г. Восход солнца во время проведения измерений был в 7.00 утра, а заход – в 19.00. Как известно, в горах термическая стратификация атмосферы зависит от многих факторов:

высоты места, вида подстилающей поверхности (луг, лес, снег, скалы), от экспозиции склонов относительно солнца, от общего влияния горной страны на воздушные потоки. Данная котловина имеет примерный диаметр 4 км, пересекается р. Курджипис и расположена на высоте 440 м над у.м., с типичной горно-долинной циркулирующей атмосферой. Измерения проводились примерно в центре котловины, профили температуры измерялись круглосуточно каждые 5 мин. При этом 7 и 9 сентября наблюдались антициклонические условия при безоблачной атмосфере, а 9, 10, 11 и 12 сентября – в основном разрывная облачность; 13 и 14 сентября – осадки интенсивностью до 8 мм/ч. На рис. 1 представлены данные измерений (ход температуры на разных высотах от поверхности Земли до 1000 м, поле температур

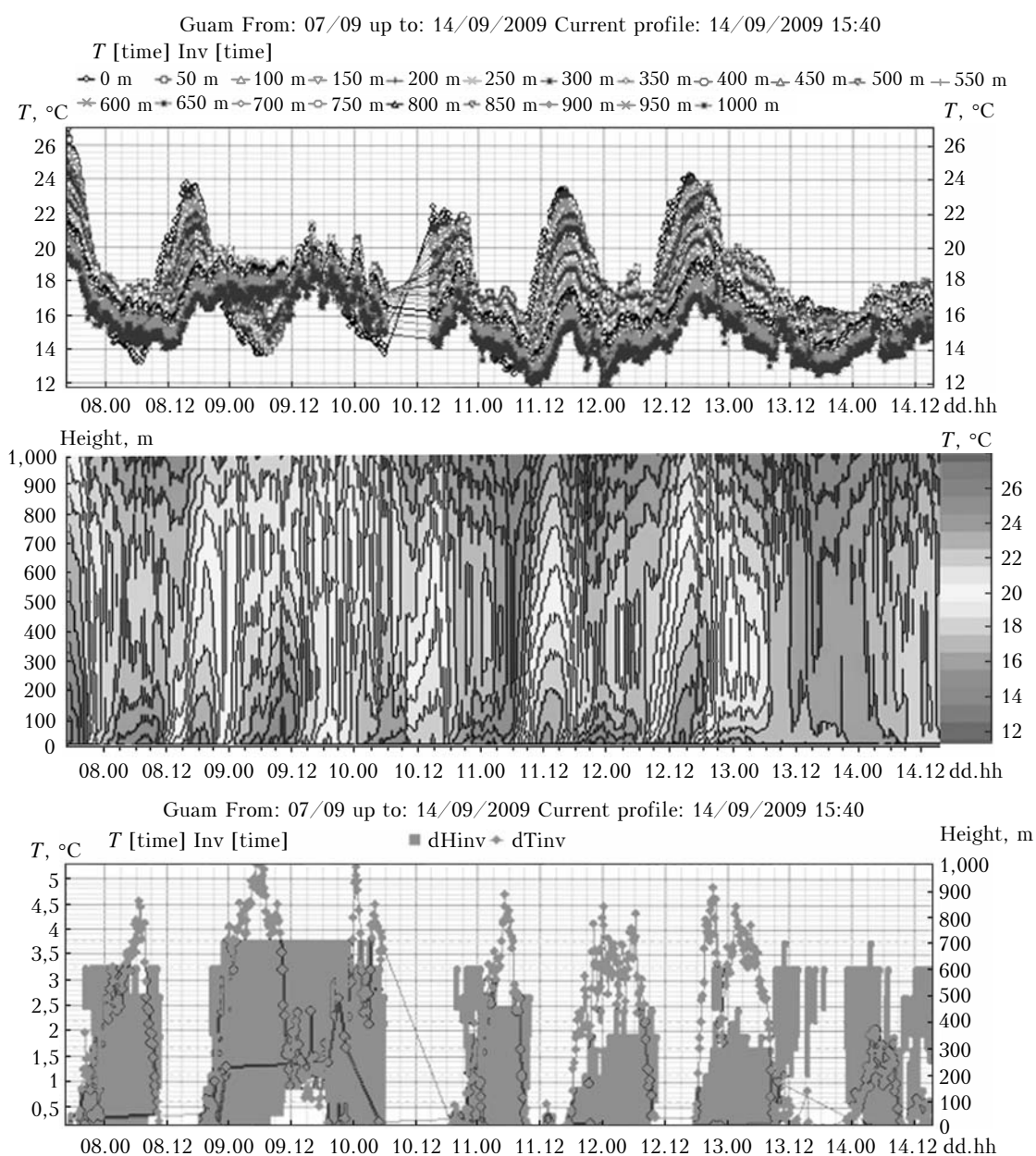


Рис. 1. Ход температуры на разных высотах, температурные поля и характеристики температурных инверсий в горной котловине (пос. Гуамка, 7–14 сентября 2009 г.)

и расчетные характеристики температурных инверсий), на рис. 2 более подробно представлены суточные данные за 8 сентября с примерами профилей,

а в табл. 1 — рассчитанные по этим данным характеристики суточного хода температуры. Перепад температур в суточном ходе составил 10 °C у земной

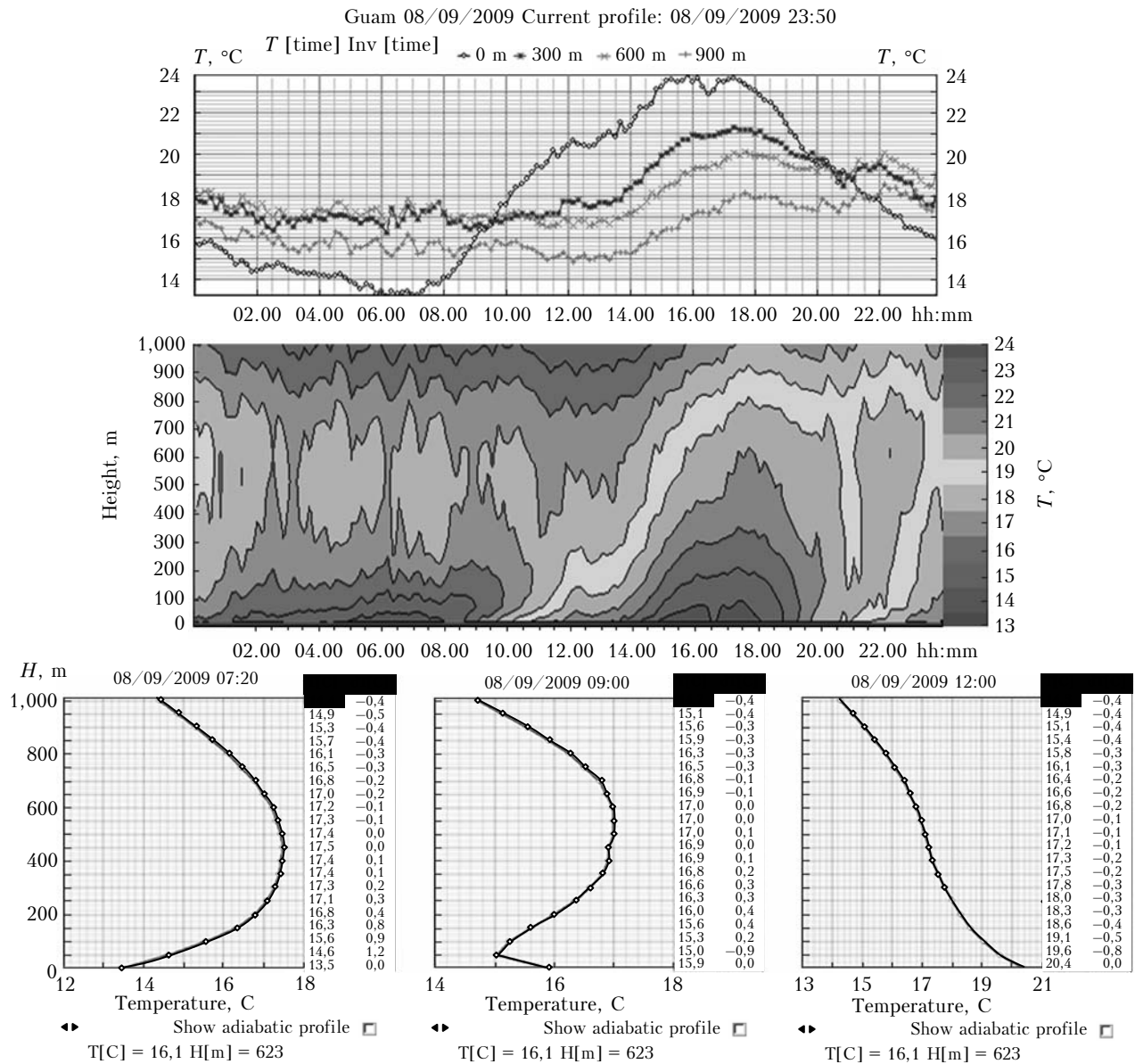


Рис. 2. Суточный ход температуры на разных высотах, температурное поле и примеры профилей температуры атмосферы внутри горной котловины (пос. Гуамка, 8 сентября 2009 г.)

Таблица 1

Данные о суточном ходе температуры атмосферы над горной котловиной (пос. Гуамка, 10 сентября 2009 г.)

H, м \ T, °C	00	02	04	06	08	10	12	14	16	18	20	22	24	Δ, °C*
0	15,7	14,4	14,2	13,4	14,1	17,6	20,4	21,3	23,4	23,0	19,5	17,8	15,8	10
100	17,2	15,7	15,7	15,1	15,3	16,3	19,1	20,0	22,6	22,5	20,0	19,2	16,8	7,5
200	17,6	16,4	16,5	16,0	16,5	16,6	18,3	19,1	21,7	21,7	20,0	19,4	17,5	5,7
300	17,9	16,8	17,0	16,6	17,2	17,0	17,8	18,4	20,9	21,0	19,8	19,5	18,1	4,4
400	18,0	17,1	17,2	16,9	17,4	17,1	17,3	17,9	20,2	20,4	19,5	19,5	18,5	3,5
500	18,3	17,3	17,3	17,1	17,4	17,2	17,1	17,5	19,7	20,1	19,4	19,6	19,1	3,0
600	18,3	17,4	17,3	17,1	17,2	17,1	16,8	17,1	19,3	19,9	19,2	19,6	19,6	3,1
1000	16,1	15,2	15,0	14,8	14,6	14,8	14,3	14,4	16,2	17,0	16,4	17,2	17,8	3,5

\* Максимальная величина изменения температуры для данной высоты.

Результаты измерений термической стратификации атмосферного пограничного слоя...

поверхности и 3,2 °C на высоте 100 м. Температурные инверсии наблюдались в основном в период с 21.00 до 09.30, достигали глубины 3,5 °C и имели максимум в диапазоне высот 500–700 м над земной поверхностью.

### Результаты измерений температурной стратификации атмосферы в узком горном каньоне

Горные хребты Гуама и Лагонакский образуют уникальный каньон длиной 3 км и шириной от 2 до 20 м, резко обрываясь 400-м стенами к долине р. Курджиис. Одной из сложностей проведения измерений с помощью микроволнового температурного профилера в таком узком каньоне был тот факт, что на всем 3-км протяжении каньона нет прямолинейных участков, превышающих по длине

300 м, что дает некоторую потерю точности измерений [5, 6]. Второй сложностью был тот факт, что по принципу углового сканирования, используемому в профилимере, атмосфера должна быть достаточно однородной в горизонтальном направлении, что не обеспечивается, когда один из склонов каньона освещается солнцем. Третья сложность – для измерений в таком узком каньоне желательно иметь диаграмму направленности антенны прибора шириной порядка 1° (такая имеется у громоздкой и дорогостоящей полярной версии профилера – МТП-5П), в то время как в экспедиции использовалась только стандартная версия – МТП-5НЕ, имеющая ширину диаграммы 2,5°. Поэтому при сканировании на верхних углах в диаграмму направленности антенны попадала часть собственного излучения склона, что искажало приемный сигнал при освещенных лучами солнца склонах (внизу правый профиль на рис. 3).

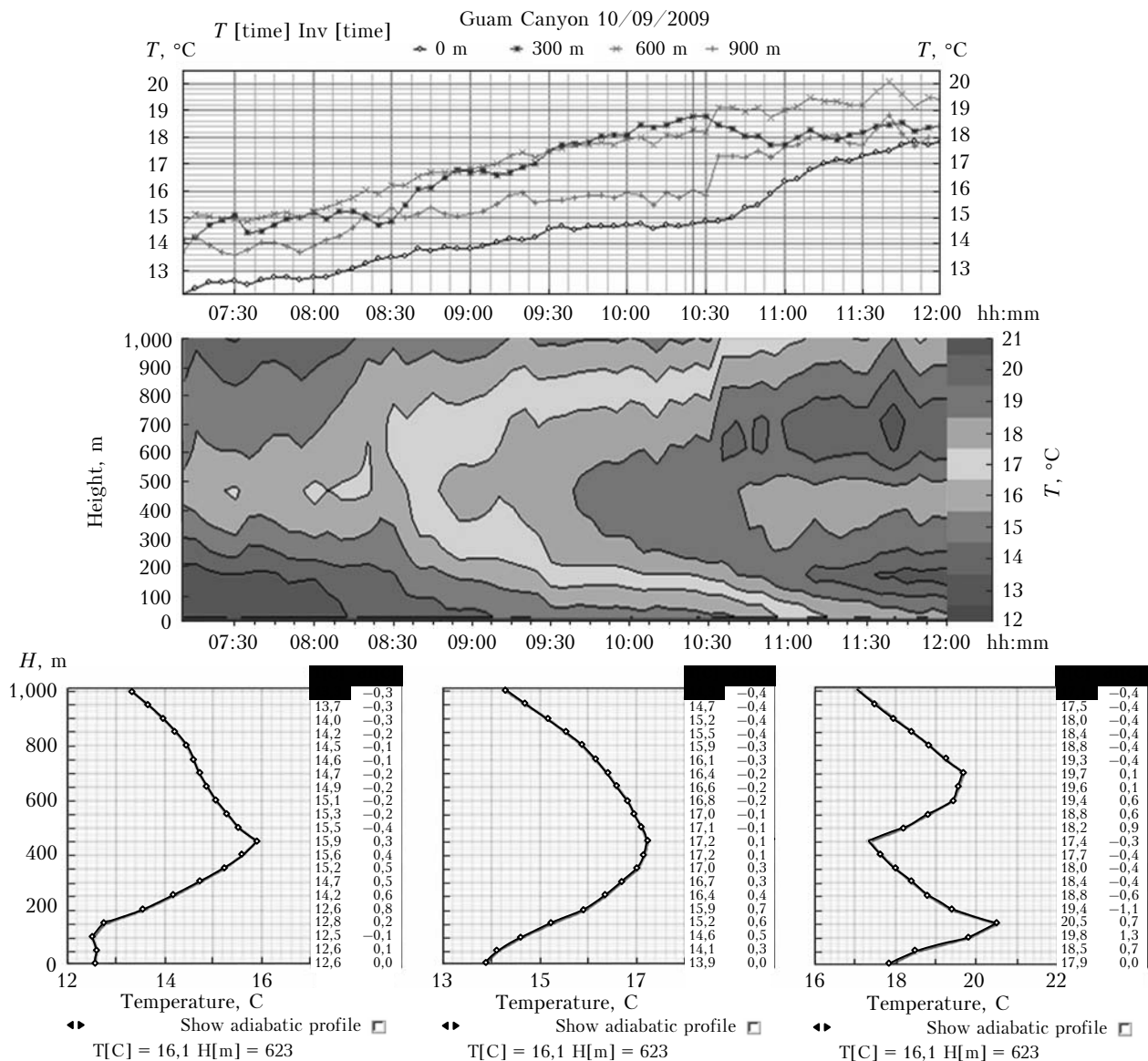


Рис. 3. Ход температуры в узком горном каньоне, поле температуры и пример профилей температуры внутри каньона (Гуамский хребет, 10 сентября 2009 г.)

Кроме того, дополнительная сложность заключалась в том, что дистанционные измерения в таком узком каньоне и с такими высокими стенами проводились впервые и некоторые методические вопросы пришлось решать непосредственно по ходу измерений.

В табл. 2 показан ход температуры на разных высотах в каньоне в период с 7.00 до 10.00 (измерения проводились каждые 5 мин).

Т а б л и ц а 2

Ход температуры внутри узкого каньона и над ним  
(Гуамский хребет, 10 сентября 2009 г.).

$H, \text{ м}$	$T, \text{ }^\circ\text{C}$	07	08	09	10	$\Delta, \text{ }^\circ\text{C}$
0		12,1	12,8	13,8	14,7	2,6
100		12,1	12,7	14,6	16,0	3,9
200		13,2	14,0	15,9	17,4	4,2
300		14,2	15,2	16,7	18,1	3,9
400		15,0	16,0	17,2	18,3	3,3
500		15,1	15,9	17,1	18,2	3,1
600		14,7	15,2	16,8	17,9	3,2

В это время солнечные лучи еще не попадали внутрь каньона, где атмосфера была стабильной и сохранялась температурная инверсия глубиной до 3 °С с максимумом на высотах 400–450 м. Позднее солнце стало освещать правый склон с растительностью, что дало мощный паразитный сигнал, и ошибка измерений резко увеличилась. При этом происходило разрушение температурной инверсии и возникли мощные вихревые потоки внутри каньона. К сожалению, ночные измерения в каньоне оказались невозможны из-за запрета местных властей на нахождение людей внутри каньона в ночное время.

### Заключение

Во время экспедиции в горных районах Краснодарского края в сентябре 2009 г. получены количественные оценки особенностей термической стратификации атмосферного пограничного слоя в каньоне и котловине, расположенных на высотах порядка 450 м над у.м. Измерения проводились с помощью дистанционного микроволнового температурного профилера МТП-5НЕ, обеспечивающего практически непрерывные измерения профилей температуры атмосферы в диапазоне высот 0–1000 м от земной поверхности с шагом 50 м и погрешностью измере-

ний 0,5 °С. Было выяснено, что для задачи исследования термического режима в горных котловинах и ущельях микроволновый профилимер является надежным и высокоточным средством измерений.

Полученные данные могут быть использованы в моделировании процессов распространения загрязнений в горной местности. Однако измерения в узких каньонах (до 50 м) достаточно точны и достоверны только при отсутствии попадания солнечных лучей в глубь каньона, так как возникающие из-за неравномерного освещения стен каньона мощные вихревые движения приводят к существенным пространственным мелкомасштабным неоднородностям, которые вызывают увеличение погрешности измерений с помощью интегральных приборов, основанных на приеме собственного теплового излучения атмосферы. Возможно более точные результаты в узком каньоне удастся получить с помощью лидаров или системы радиоакустического зондирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 08-05-00213а и 09-05-10003к.

1. *Smith R.B.* The influence of mountains on the atmosphere // *Adv. Geophys.* 1979. V. 21. P. 87–230.
2. *Allwine K.J.* Atmospheric dispersion and tracer ventilation in a deep mountain valley // *J. Appl. Meteorol.* 1993. V. 32. P. 1017–1037.
3. *Каменецкий Е.С., Радионов А.А., Созанов В.Г.* Моделирование распространения загрязняющих веществ в горных ущельях // *Математические модели и численные методы механики сплошных сред.* Новосибирск, 1996. С. 308–310.
4. *Пянова Э.А.* Моделирование атмосферного переноса примеси в горно-долинные областях // *Аэрозоли Сибири XV: Тезисы докл.* Томск: ИОА СО РАН, 2008. С. 35.
5. *Kadyrov E.N., Pick D.R.* The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparison with in city observation // *Meteorol. Appl.* 1998. V. 5. N 4. P. 393–404.
6. *Кадыров Е.Н.* Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя – метод, аппаратура, результаты измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22. № 7. С. 697–704.
7. *Кадыров Е.Н., Шапошников А.Н., Воробьева Е.А.* Результаты измерений термической стратификации атмосферного пограничного слоя в каньонах и котловинах Гуамского хребта // *Аэрозоли Сибири XVI: Тезисы докл.* Томск: ИОА СО РАН, 2009. С. 60–61.

#### *E.A. Vorobieva, A.N. Shaposhnikov, V.V. Folomeev, E.N. Kadyrov. Results of atmospheric boundary layer thermal stratification measurements in Guamsky canyon.*

Results of temperature profiles measurements in depression and narrow canyon are presented. The canyon is located between ridges Guamsky and Lagonaksky (the North-West Caucasus). Experiment was held in September 2009 with a new modern device – МТП-5НЕ microwave temperature profiler. This instrument provides for continuous measurements of atmospheric temperature profiles under any weather conditions up to 1000 m from the ground surface. Data on diurnal temperature distribution at different heights in mountain terrain were obtained. Characteristics of temperature inversions were calculated. Analysis of potential capabilities of the use of microwave temperature profilers for atmospheric thermal stratification studying in canyons and ravines were made. The obtained data can be used for pollution transfer models in mountains and local weather forecasting.