

## Моделирование вертикальной структуры ночного пограничного слоя над шероховатой поверхностью

А.Ф. Курбацкий<sup>1,2</sup>, Л.И. Курбацкая<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН  
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

<sup>3</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6

Поступила в редакцию 9.06.2008 г.

Представлены результаты численного моделирования некоторых особенностей структуры ночного атмосферного пограничного слоя над урбанизированной поверхностью. Мезомасштабная модель включает улучшенную нелокальную параметризацию турбулентности, разработанную на основе трехпараметрической модели турбулентности. Турбулентное число Прандтля оказывается устойчиво зависимым от градиентного числа Ричардсона, а вертикальный турбулентный перенос тепла носит противоградиентный характер. Показано, что в устойчивом атмосферном пограничном слое фиксируются структурные особенности «перевернутого обратно» (*upside-down*) пограничного слоя.

**Ключевые слова:** атмосферный пограничный слой, устойчивая стратификация, моделирование.

### Введение

В атмосферном пограничном слое идентифицируются два типа вертикальной структуры турбулентности. Один из них — «традиционный» пограничный слой, в котором турбулентность генерируется вблизи поверхности и транспортируется наверх, контрастирует со вторым типом, где турбулентность транспортируется вниз к поверхности из источника, расположенного наверху в пограничном слое. Последний был назван [1] «перевернутым обратно (*upside-down*)» пограничным слоем. В этом случае турбулентность может переноситься вниз, по направлению к поверхности, например как случайный процесс. В последнее время ряд структурных особенностей горизонтально-однородного устойчивого атмосферного пограничного слоя выявлен путем анализа баз данных, полученных в исследовательских проектах, таких как, например, проект CASES-99 (Cooperative Atmosphere-Surface Exchange Study 1999 campaign) и полевой проект Lamar (см., например, [1–3]).

Лабораторные примеры перевернутых пограничных слоев могут быть найдены также в [4], где структура турбулентности устойчивого пограничного слоя исследовалась в аэродинамической трубе. В этом исследовании пограничный слой классифицировался как перевернутый пограничный слой, если турбулентность возрастала с высотой и пере-

нос энергии турбулентности оказывался направленным к поверхности.

Возможно, подобная структура может развиваться при течении воздуха над поверхностью с крупномасштабной шероховатостью (городом), когда горизонтальный градиент температуры между нагретым воздухом над городом и воздухом над примыкающей к нему более холодной поверхностью окружения генерирует турбулентную термическую циркуляцию. Если турбулентность этой циркуляции существенно больше, чем турбулентность, обусловленная процессами вблизи поверхности, вертикальный перенос энергии турбулентности может быть направлен к поверхности. Ситуация, когда урбанизированные поверхности оказываются, вообще говоря, теплее, чем примыкающие к ним окрестности, известна как «городской остров тепла» [6]. Аэродинамическая шероховатость и городской остров тепла создают значительные возмущения полей ветра и температуры из-за интенсивного восходящего течения нагретого неустойчивого воздуха, индуцируемого горизонтальным градиентом температуры между более нагретым воздухом над урбанизированной поверхностью и менее нагретым воздухом над ее окрестностями [7]. При этом вертикальный турбулентный перенос тепла носит нелокальный, противоградиентный характер [8, 9].

В настоящем исследовании мезомасштабное моделирование эволюции атмосферного пограничного слоя над термически неоднородной поверхностью с крупномасштабной аэродинамической шероховатостью выполнено с помощью улучшенной

\* Альберт Феликсович Курбацкий, Людмила Ивановна Курбацкая (kurbat@nsu.ru).