

УДК 001.891.57

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В УЩЕЛЬЕ

Е. С. Каменецкий, А. А. Радионов

При помощи двумерной математической модели рассмотрены суточные изменения аэродинамики Кармадонского ущелья Северной Осетии при различных направлениях геострофического ветра. Показано, что изменение направления геострофического ветра приводит к существенным отличиям в суточных изменениях течения воздуха.

Ключевые слова: математическое моделирование, горное ущелье.

Суточные изменения атмосферных течений в горных ущельях и предгорных районах могут существенно отличаться от таковых на равнинных территориях.

Это обуславливается тем, что помимо горно-долинной циркуляции, связанной с изменением температуры подстилающей поверхности в течение суток и уклоном дна ущелья, существенное влияние на движение воздуха оказывает также образование в ущельях вихрей с осями ориентированными вдоль ущелья [1]. В течение суток в ущелье могут возникать сменяющие друг друга вихревые структуры, состоящие из одного, двух и даже трех вихрей [2]. Вид вихревых структур, их размеры и скорость движения воздуха в них зависят от размеров ущелья, формы его поперечного сечения, суточной амплитуды температуры подстилающей поверхности и географической ориентации ущелья. Также существенно влияют на течение воздуха мощные инверсионные слои, сохраняющиеся в ущелье днем на меньшей высоте, чем над равниной, а в некоторых случаях существующие и в течение всего дня [3].

Особенности движения воздуха оказывают существенное влияние на концентрацию загрязняющих веществ, выбрасываемых промышленными предприятиями и автотрассами — источниками, расположенными внутри ущелья. В результате при одинаковой интенсивности источников загрязнения, концентрация загрязняющих веществ в атмосфере горных ущелий, существенно выше, чем на равнине [3].

При определении оптимального положения и допустимой интенсивности источников загрязнения атмосферы в горных ущельях, а также совершенствовании методики мониторинга ее состояния необходимо учитывать вышеуказанные факторы. Поскольку проведение достаточно большого объема измерений метеовеличин с большим разрешением в горных условиях требует значительных затрат средств и времени и, зачастую, осложнено труднодоступностью, целесообразно использовать математическое моделирование атмосферы в сочетании с ограниченным объемом наблюдений. В случае, если на достаточно большом расстоянии вдоль ущелья его поперечное сечение меняется несущественно, можно для расчетов гидротермодинамики атмосферы использовать двумерную модель, рассматривая изменение метеовеличин только в поперечном сечении ущелья [4–7].

В численных экспериментах, результаты которых приведены в настоящей работе, рассматривалось Кармадонское ущелье, расположенное в северной части Большого Кавказского хребта и ориентированное приблизительно с востока на запад. Профиль ущелья был получен осреднением по массиву данных географических координат и высот, экспортированных из геоинформационной системы (рис. 1). Осреднение проводилось по трем сечениям трехмерной карты высот, проведенным параллельно на равных расстояниях приблизительно в 300 метров, перпендикулярно оси ущелья. Осреднение уклона ущелья проводилось аналогично и в центре ущелья уклон равнялся 5 градусам. Вне поперечного сечения ущелья уклон принимался равным нулю.

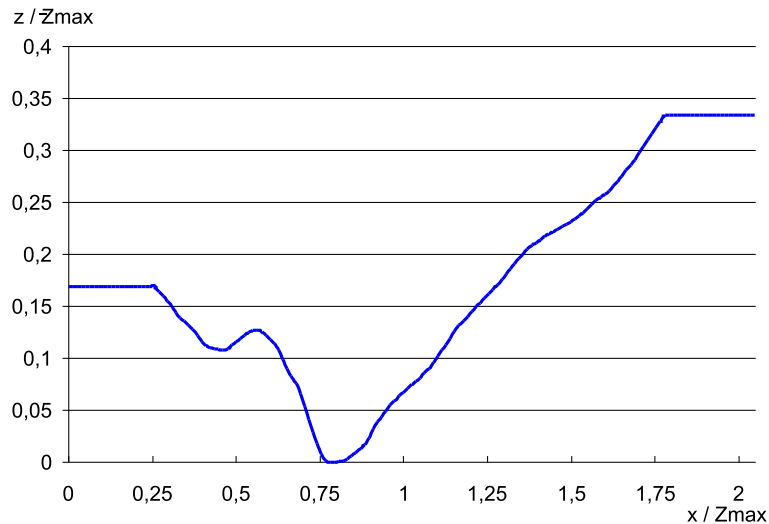


Рис. 1. Поперечное сечение Кармадонского ущелья.

Уравнения модели, использованной для изучения динамики атмосферы в Кармадонском ущелье, приведены в работе [7]. В негидростатической двумерной модели воздух предполагался несжимаемым, принималось приближение Буссинеска, достаточно реалистичное для множества атмосферных процессов и часто принимаемое исследователями [4, 5]. Для решения уравнений использовался метод конечных разностей, уравнение для отклонения давления от равновесного решалось по схеме «чехарда» [8], для прогностических уравнений использовались неявные итерационные схемы. Конвективные слагаемые аппроксимировались противопоточными разностями. Для моделирования турбулентности использовалась модель с одним уравнением для энергии турбулентных пульсаций, масштаб которых задавался по эмпирической формуле [4, 5]. По вертикальной координате выбиралась неравномерная сетка, содержащая $N = 30$ узлов, сгущающаяся к поверхности земли по закону $z_i^{1,5}$, где $z_i = 1/N$ — средний шаг по вертикальной координате, который также использовался в качестве шага по равномерной горизонтальной координате, содержащей 120 точек сетки. По горизонтальной координате вычислительная область была в 4 раза больше. Шаг по времени в расчетах принимался приблизительно 1 сек.

Были использованы такие же начальные и граничные условия как и в работе [7]. В качестве граничных условий на верхней границе расчетной области задавались компоненты скорости ветра, производные потенциальной температуры, энергии турбулентности и концентрации загрязняющих веществ по вертикали принимались равными нулю. На входной и выходной границах метеовеличины рассчитывались из соответствующих уравнений, в которых принималось равенство нулю первой производной по горизонталь-

ному направлению при потоке, направленном внутрь расчетной области, а при направлении потока из расчетной области дополнительно принималось равенство нулю и второй производной по горизонтальному направлению. На нижней границе температура вычислялась из уравнения теплового баланса. Для получения необходимой суточной амплитуды перепада температуры менялся поток падающей коротковолновой радиации. Все расчеты выполнены для летних условий. Нижнее граничное условие для энергии турбулентных пульсаций задавалось пропорциональным квадрату динамической скорости трения, вертикальная скорость ветра на этой границе принималась равной нулю, значения горизонтальных компонент скорости ветра вычислялись с использованием условия прилипания, что можно обосновать значительной суточной изменчивостью направления и амплитуды приземных скоростей ветра, а также необоснованностью применения эмпирических функций для определения скоростей ветра в случае многовихревых течений в приземном слое атмосферы ущелья. Для концентрации загрязняющего вещества на нижней границе использовалось равенство нулю первой производной по вертикальной координате. В качестве начального условия применялся расчет скорости ветра и турбулентности над равниной при нейтральной стратификации.

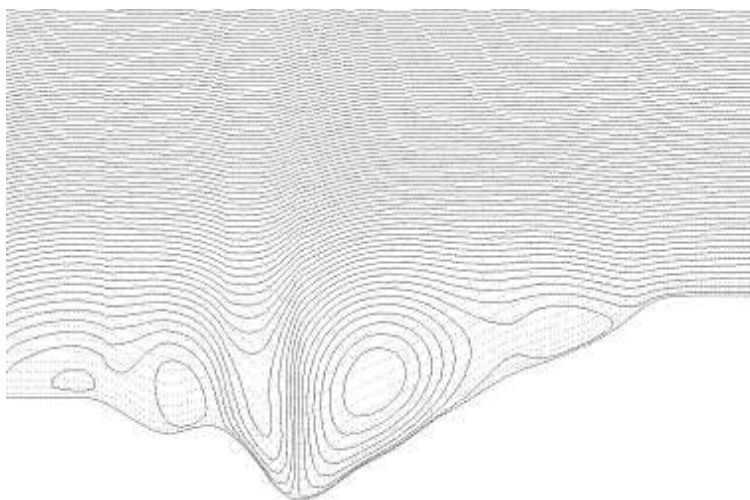


Рис. 2 а. Линии тока утром в Кармадонском ущелье.
Наветренная сторона ущелья ниже.

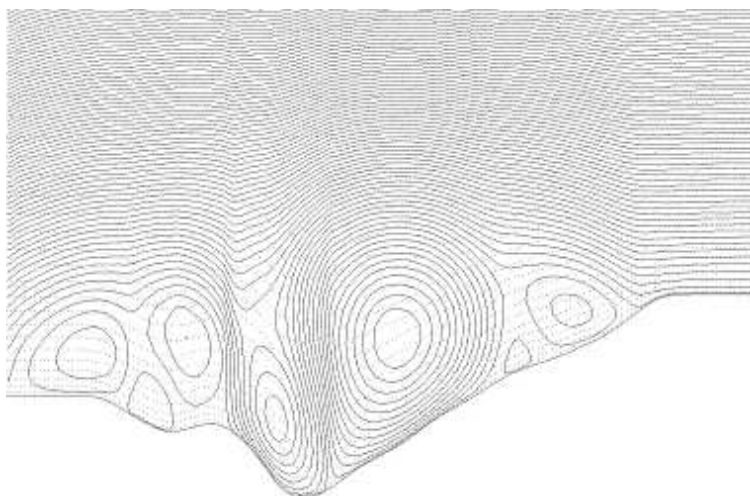


Рис. 2 б. То же, что на рис. 2 а через 5 мин.

В расчетах, при постоянном направлении и скорости геострофического ветра над ущельем, вихревые структуры, возникающие в поперечном сечении ущелья, могут существенно изменяться в течение суток, причем эти изменения зависят от направления геострофического ветра и суточной амплитуды температуры стенок ущелья. В Кармадонском ущелье, при суточной амплитуде температуры стенок равной 10 градусам и юго-югозападном направлении геострофического ветра утром стационарные вихри в поперечном сечении ущелья не возникают. С восходом Солнца вихри зарождаются, растут, а затем выносятся из ущелья. Периодичность этого процесса составляет примерно десять минут. Типичные картины линий тока с разницей по времени в пять минут приведены на рис. 2а и 2б. Отметим, что в этом случае наветренная сторона ущелья ниже, чем подветренная. При северо-северовосточном направлении геострофического ветра, когда наветренная сторона ущелья выше, вихревая картина значительно более стабильна. Большую часть дня в ущелье находится один или два вихря. Соответствующие линии тока приведены на рис. 3.

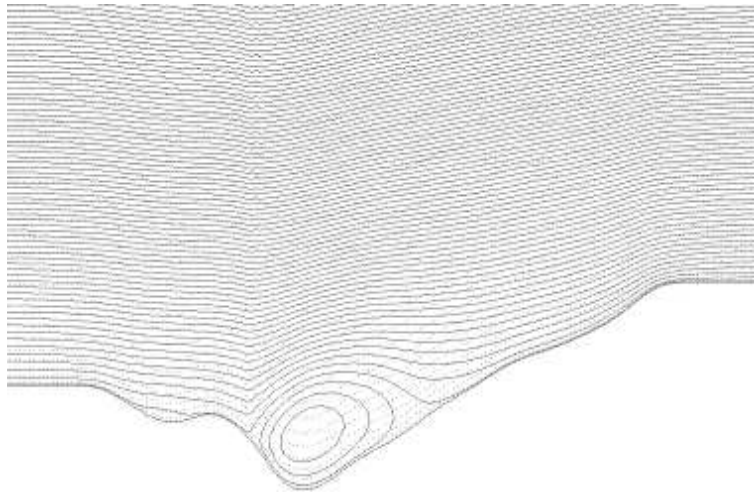


Рис. 3. Линии тока дном в Кармадонском ущелье.
Наветренная сторона ущелья выше.

Поле составляющей скорости ветра, направленной вдоль ущелья, связано с вихревой структурой и максимальная величина этой составляющей локализуется в центре вихря. Горно-долинная циркуляция в Кармадонском ущелье существенна только в случае, когда наветренная сторона ущелья ниже, чем подветренная. По всей видимости это связано с сложением потока вдоль ущелья, индуцированного вихревым течением и потока обусловленного горно-долинной циркуляцией. Приземная составляющая скорости ветра, направленная вдоль ущелья, в нижней точке ущелья приведена для этого случая на рис. 4. Развивающийся утром долинный поток является порывистым, что вызвано его взаимодействием с пульсирующим вихревым течением в поперечном сечении ущелья. Если же наветренная сторона ущелья выше, то приземный ветер вдоль ущелья большую часть суток имеет только горную составляющую, т. е. направлен под уклон и только к концу дня ненадолго меняет свое направление.

Расчеты поля концентрации загрязняющих веществ для Кармадонского ущелья в случае линейного источника, расположенного на дне ущелья, имитирующего автотрассу дают заметно отличающиеся результаты для разных ветровых условий. Если наветренная сторона ущелья более низкая, утром возникают заметные пульсации концентрации с частотой порядка нескольких минут. Ночью, в этом случае распределение концентрации

загрязняющего вещества стабильно (рис. 5). Осреднение концентрации загрязняющего вещества за десять минут, которое обычно применяется при измерениях, сглаживает результаты, полученные во время существования пульсаций. Таким образом, нестационарность вихревой структуры в ущелье интерпретируется при измерениях как влияние крупномасштабной турбулентности и будет зависеть от времени суток и направления геострофического ветра так как в случае, когда наветренная сторона ущелья выше пульсации концентрации не возникают. Очевидно влиять на результаты осреднения будет также суточная амплитуда температуры стенок ущелья.

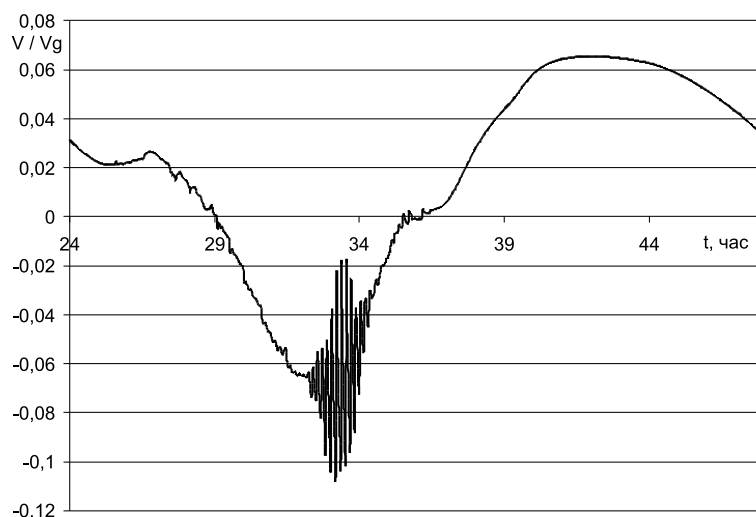


Рис. 4. Изменение составляющей скорости ветра, направленной вдоль ущелья, в нижней точке поперечного сечения Кармадонского ущелья. Наветренная сторона ущелья ниже.

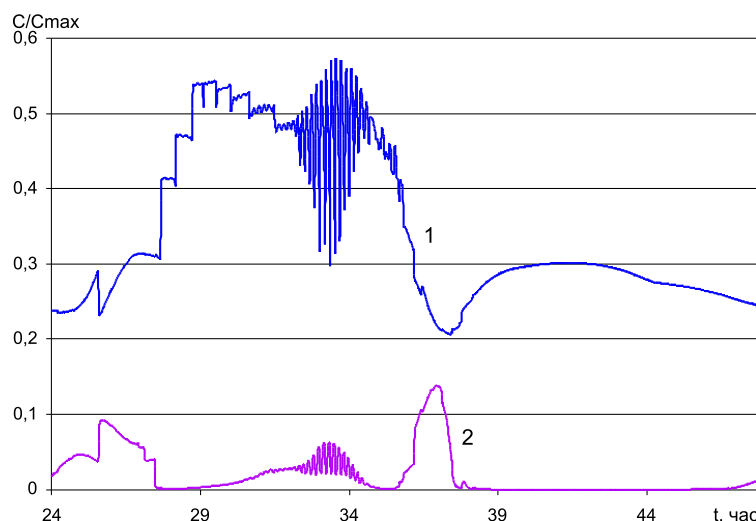


Рис. 5. Суточный ход концентрации загрязняющего вещества вблизи поверхности земли в Кармадонском ущелье, если наветренная сторона ущелья более низкая. Кривая 1 — в точке, смещенной от источника к подветренному склону ущелья, кривая 2 — к наветренному склону.

Существенные отличия течений в Кармадонском ущелье, полученных при различных направлениях геострофического ветра, при прочих равных условиях позволяют говорить о трудностях переноса результатов на другие ущелья, даже близкие по профилю поперечного сечения и географической ориентации. Полученные результаты показывают, что

профиль поперечного сечения ущелья, его ориентация и суточная амплитуда изменения температуры его стенок, связанная с временем года, облачностью и наличием или отсутствием растительности на склонах приводят не только к количественному, но и качественному изменению полей скорости ветра и распределению концентрации загрязняющих веществ в ущелье.

Литература

1. *Шелковников М. С.* Мезометеорологические процессы в горных районах и их влияние на полеты воздушных судов.—Л.: Гидрометеиздат, 1985.—208 с.
2. *Gallander B. A.* Short range dispersion within a system of regular valleys // Air pollution modeling and it's application. V NATO Challengers of Modern Society. Plenar press.—New York, 1986.—Vol. 10.—P. 253–265.
3. *Барри Роджер Г.* Погода и климат в горах.—Л.: Гидрометеиздат, 1984.—311 с.
4. *Yamada T., Bunker S.* Development of a Nested Grid // Second Moment Turbulence Closure Model and Application to the 1982 ASCOT, Brush Creek Data Simulation. J. Appl. Meteorology.—1988.—Vol. 27, № 5.—P. 562–578.
5. *Enger L., Korasin D., Yang X.* A numerical method of boundary-layer dynamics a mountain valley // Boundary-Layer Meteorology—1993.—Vol. 66.—P. 357–394.
6. *Kamenetsky E. S., Radionoff A. A.* Aerodynamics of mountain valleys with varying cross sections // Boundary-Layer Meteorology.—1999.—Vol. 91, № 2.—P. 191–197.
7. *Каменецкий Е. С., Радионов А. А.* Распространение загрязняющих веществ в горных ущельях // Владикавк. мат. журн.—2003.—Т. 5, вып. 2.—С. 24–33.
8. *Роч П.* Вычислительная гидродинамика.—М.: Мир, 1980.—616 с.

Статья поступила 4 мая 2010 г.

КАМЕНЕЦКИЙ ЕВГЕНИЙ САМОЙЛОВИЧ
зав. лаб. математических проблем геофизики
Южный математический институт ВНЦ РАН и РСО-А
РОССИЯ, 362027, ул. Маркуса, 22
E-mail: esk@smath.ru

РАДИОНОВ АНАТОЛИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ
старший научный сотрудник
лаб. математических проблем геофизики
Южный математический институт ВНЦ РАН и РСО-А
РОССИЯ, 362027, ул. Маркуса, 22
E-mail: aar200772@mail.ru

MATHEMATICAL MODELING OF ATMOSPHERIC PROCESSES AT NORTH OSSETIA CARMADON'S VALLEY

Kamenetsky E. S., Radionoff A. A.

Diurnal behaviors of Carmadon's valley aerodynamics with different directions of geostrophic wind are investigated by means of two-dimensional mathematical model. The development of vortex field in valley found to be depending on this direction.

Key words: mathematical modeling, mountain valley.