

Д.П. Зинин, Г.М. Тептин, О.Г. Хуторова

Исследование влияния квазиравнинного рельефа на локальную неоднородную структуру нижнего атмосферного слоя на основе моделирования и многолетнего эксперимента

Казанский государственный университет

Поступила в редакцию 26.01.2006 г.

Рассмотрены результаты численного моделирования возмущений атмосферного потока реальным квазиравнинным рельефом. Дается сравнение с многолетними ежеминутными измерениями скорости ветра и концентрации аэрозоля на сети станций атмосферного мониторинга, разнесенных на расстояния 0,8–5,2 км. Сравнение модельных и экспериментальных результатов для поля скорости указывает на качественную адекватность модели (влияние рельефа) и измерений в интервале локальных и мезомасштабов 0,8–5,2 км.

Введение

Одним из факторов, влияющих на процессы в приземном слое атмосферы, является рельеф местности [1]. Рельеф влияет в первую очередь на поле скоростей ветра и, как следствие, обнаруживается в поле концентрации аэрозоля и иных параметров атмосферы. Естественно ожидать заметного проявления такого влияния в горной местности [4]. Однако в ряде работ [2, 3] говорится о возможности того, что такое влияние существенно для квазиравнинной местности и может обнаруживаться как в мезомасштабных волновых процессах, так и в устойчивых постоянных возмущениях. Представляет интерес исследование особенностей такого влияния для реального квазиравнинного рельефа восточной области Среднерусской возвышенности по многолетним измерениям на сети станций атмосферного мониторинга в масштабах 0,8–5,2 км.

Для обнаружения влияния рельефа желательно исключить иные возмущающие факторы (антропогенные, сезонные зависимости и т.п.). Одним из методов решения задачи является метод трехмерного компьютерного моделирования [1, 4, 5]. Методы моделирования позволяют получать результаты исследования влияния отдельных факторов, а также выполнять прогностическую функцию. Как и при любом моделировании, ставится вопрос об адекватности модели.

Постановка задачи

Мы исследовали влияние рельефа в районе г. Альметьевска (53° с.ш., 51° в.д.) на атмосферный поток моделированием для области с горизонтальными размерами 25 × 25 км (рис. 1). Такие локальные масштабы, наряду с мезомасштабами, вызывают

все больший интерес со стороны модельных исследований [5]. В рамках поставленной задачи исследовалась модель воздушного потока. На фоне общего движения воздушных масс в некотором выбранном направлении единственным возмущающим фактором являлся рельеф местности. (В целом местность характеризуется изрезанной холмистостью и проходящей с северо-запада на юго-восток ложбиной. Рельеф имеет выраженную анизотропность по направлениям.) Мы произвели исследование отдельно для восьми направлений среднего ветра (северный, северо-восточный, восточный и т.д.) в рассматриваемой области. В каждом случае моделировалось установившееся течение нижнего слоя (до 2 км) атмосферы над квазиравнинным рельефом реальной географической местности.

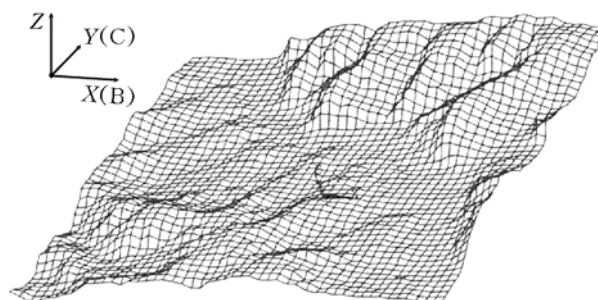


Рис. 1. Рельеф в районе г. Альметьевска (город в центре области). Перепад высот около 250 м (квазиравнинный рельеф). Масштаб высот 10 : 1

Подобный расчет можно провести на основе методов моделирования общей гидродинамики. Наиболее распространенными подходами среди них являются метод конечных элементов и метод конечных объемов. Но наиболее физичным и отве-

чающим уравнениям сохранения и непрерывности признается метод конечных объемов [7], на основе которого и были произведены численные расчеты в нашей модели.

Мы располагаем уникальными рядами данных многолетнего (1995–1999) ежеминутного синхронного измерения атмосферных параметров (температура, скорость ветра, концентрация аэрозоля и др.) в исследуемой области [6]. Синхронные измерения на системе станций, расположенных друг от друга на расстоянии от 0,8 до 5,2 км и на высоте 2,4 м над уровнем земли, получены при непрерывном мониторинге в течение 38 мес. Станции расположены в городской черте. На основе этих данных мы можем провести экспериментальное исследование проблемы и проверку модели на адекватность.

Эксперимент

Длинные ряды экспериментальных данных позволяют произвести осреднение по всему времени наблюдения, избавиться от многих нерегулярных возмущений, а также сезонных и суточных вариаций и получить экспериментальную картину устойчивых течений в исследуемой области. Хотя могут существовать и иные возмущения (макротурбулентность, влияние близлежащих строений и др.), которые лишь частично устраняются при осреднении, но рельеф является существенно постоянным во времени регулярным возмущающим фактором. Соответственно и получаемая после осреднения картина течения в основном должна определяться рельефом, особенно вблизи поверхности (экспериментальные замеры произведены на высоте 2,4 м).

Предварительно синхронные замеры данных были отсортированы по различным случаям направления среднего ветра в исследуемой области. Каждое синхронное измерение по своей средней скорости ветра было отнесено к одному из 8 направлений (северный ветер, северо-восточный и т.д.) с допуском на отклонение $\pm 10^\circ$. Некоторые измерения в пределах допуска не соответствовали ни одному из направлений и в дальнейшем рассмотрении не участвовали. Усреднение данных по времени производилось для каждого из указанных 8 случаев отдельно. Таким образом, мы получили характерную картину устойчивого течения для каждого из 8 направлений среднего ветра в области.

При анализе данных будем использовать функцию вида

$$V_K(m, n) = | \langle K(\mathbf{r}_m) - K(\mathbf{r}_n) \rangle_t | = | \langle K(\mathbf{r}_m) \rangle_t - \langle K(\mathbf{r}_n) \rangle_t |, \quad (1)$$

где $| |$ — абсолютное значение; $\langle \rangle_t$ — усреднение по времени наблюдений; K — параметр, для которого рассчитывается функция; $\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_n$ — координаты станций мониторинга ($m, n = 1, 4$). В дальнейшем, ссылаясь на данную функцию, будем называть ее псевдоструктурной функцией (по подобию определения со структурной функцией). Эта разностная функция позволяет уменьшить влияние атмосферных неоднородностей с характерным размером

больше, чем расстояния между станциями, а также возможных погрешностей, связанных с описанной процедурой сортировки по направлению (в частности, как показал опыт, получаются лучшие результаты для доверительного интервала). Отметим, что полученные таким образом результаты практически совпали для сортировки по направлениям с допуском 10° и 5° . Это говорит о высокой стабильности и достоверности получаемой картины возмущения потока.

Для невозмущенного потока значения псевдоструктурной функции будут нулевыми. Для возмущенного потока порядок значений псевдоструктурной функции и их вариаций будет таким же, как и у возмущений.

Первый важный результат. Как видно из рис. 2, псевдоструктурная функция обнаруживает возмущения в полученной экспериментальной картине устойчивого течения. То есть устойчивые неоднородности, которые должны быть обусловлены рельефом, наблюдаемы в эксперименте. Ниже мы исследуем данный вопрос компьютерным моделированием.

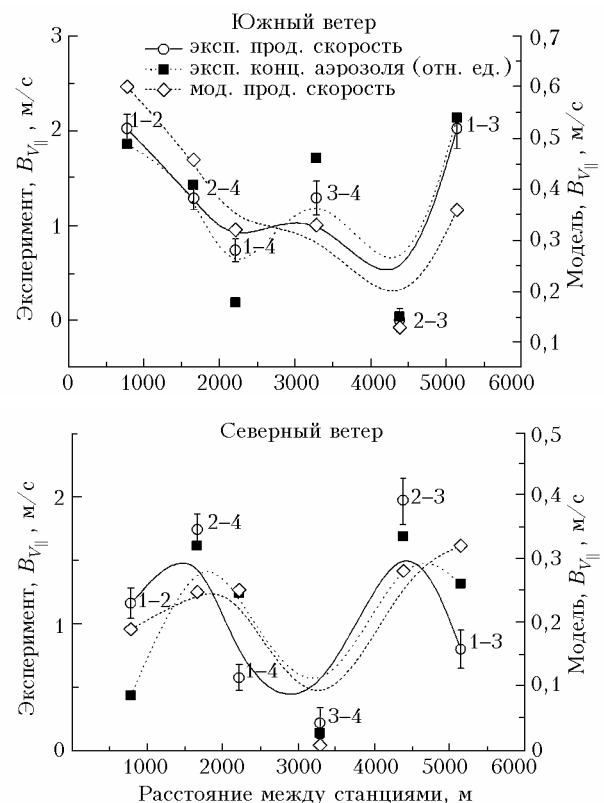


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования. При представлении значений псевдоструктурных функций в виде графиков по горизонтальной оси откладывается расстояние между соответствующими парами станций. Номера станций указаны рядом с маркерами значений. Значения для концентрации аэрозоля приведены в относительных единицах. Приведен доверительный интервал для псевдоструктурной функции экспериментальной продольной скорости V_{\parallel} с уровнем доверия 0,997

Заметим, что для случаев встречного направления ветра (северный и южный) псевдоструктурные функции скорости ветра ведут себя по-разному: картина течения, при обращении направления ветра, меняется достаточно сильно и не сводится к простому обращению всех скоростей (иначе псевдоструктурные функции были бы одинаковы).

Второй важный результат. Для северного и южного ветров видна явная корреляция наблюдаемых в эксперименте концентрации аэрозоля и проекции вектора скорости ветра на направление основного воздушного потока. Подобная корреляция обнаружилась также для направлений северо-восточного и юго-восточного ветров. Наличие искажений и отсутствие указанной закономерности для других направлений среднего ветра могут быть объяснены близостью значимых локальных возмущающих факторов (близлежащие строения и источники загрязнения) и сложностью реальных атмосферных процессов. Кроме того, в разных ситуациях различные атмосферные процессы в формировании возмущений концентрации аэрозоля могут играть более или менее важную роль, чем рельеф. Выше уже была упомянута существующая выраженная анизотропность рельефа, что, вероятно, также приводит к различной степени влияния рельефа на поток в зависимости от направления среднего ветра.

Моделирование

Моделировались такие общие параметры атмосферы, как скорость ветра, давление, температура и др. Единственным возмущающим фактором являлся рельеф, что соответствует предположению о природе устойчивых неоднородностей в экспериментальной усредненной картине течения. Восемь случаев направления течения в исследуемой области (северный ветер, северо-восточный и т.д.) задавались соответствующими граничными условиями.

Численная аппроксимация и решение производились методом конечных объемов [7]. Для этого над исследуемой областью был выделен объем, который разбивался регулярной трехмерной сеткой. Рельеф задавался сложной формой нижней грани исследуемой области. В качестве граничных условий на данной грани применялось условие прилипания.

Воздушный поток полагался изначально невозмущенным, т.е. на боковых гранях трехмерной области моделирования он имел скорость в некотором заданном направлении и менялся с высотой по единому выбранному типичному профилю (от 0 вблизи поверхности до 20 м/с на высоте 2 км). Соответственно задавались типичные вертикальные профили для некоторых других параметров на границах (интенсивность турбулентности и т.п.) [8].

При расчетах использовались следующие физические приближения и аппроксимации. Моделировался воздушный поток идеального газа, подчиняющийся усредненным уравнениям Навье–Стокса [6]. Для замыкания уравнений использовалась мо-

дель турбулентности из одного уравнения [9]. Рассчитывалась стационарная трехмерная картина течения с учетом нелинейности процесса, молекулярной и турбулентной вязкости, в приближении сжимаемости газа, адиабатичности процесса (температура стагнации – 300 К). Высота шероховатости поверхности [10] полагалась равной 10 см.

Окончательное моделирование осуществлялось для области размерами 25 × 25 км и высотой 2 км. Горизонтальное разрешение модели составило ~100 м (сетка 240 × 240 узлов). Вертикальный шаг сетки переменный, от 0,2 м вблизи поверхности до 200 м вблизи верхней грани области.

Расчет модели производился на кластере физического факультета Казанского государственного университета.

Результаты моделирования

В процессе моделирования были получены детальные трехмерные картины течения в области для каждого из направлений среднего ветра. На данных картинах четко наблюдалось влияние рельефа.

Для анализа картины возмущений на некоторой высоте над поверхностью мы использовали структурные функции:

$$D_K(\Delta x, \Delta y, h) = \langle [K(x, y, h) - K(x + \Delta x, y + \Delta y, h)]^2 \rangle_{x,y}, \quad (2)$$

где $\langle \rangle_{x,y}$ – усреднение по области моделирования; x, y – горизонтальные координаты (ось Ox направлена на восток, Oy на север, Oz – вертикально вверх). В качестве h мы использовали приведенную высоту над поверхностью земли, по своему поведению аналогичную общепринятым сигма-координатам ($h = 0$ м – сложная поверхность земли; $h = 2$ км – плоская верхняя граница области моделирования);

$$h/(z_t - \langle z_b \rangle_{x,y}) = h_r/(z_t - z_b), \quad (3)$$

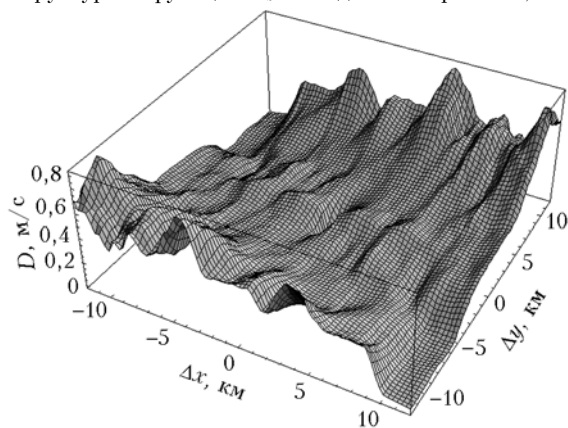
$z_t = \text{const}$ – z -координата верхней границы области моделирования, z_b – z -координата поверхности земли; h_r – реальная высота рассматриваемой точки над поверхностью земли. В нашем случае ($z_t - \langle z_b \rangle_{x,y}) = 2$ км. Везде далее под высотой над поверхностью понимается приведенная высота, если не оговорено иное. На рис. 3 в качестве наиболее показательного примера показана структурная функция вертикальной компоненты скорости ветра.

Структурные функции показывают схожее поведение и величины до высот 10–15 м, после чего начинают убывать с высотой, уменьшаясь на высоте 400 м в 4–5 раз (при этом структурные функции «сглаживаются»). Схожего поведения можно ожидать и от неоднородностей атмосферного потока.

При вариациях граничного направления ветра в зависимости от высоты оказалось, что для высот 2,4 м определяющим фактором качественной картины течения является нижний слой высотой около 100 м. Изменение направления ветра на большей высоте вплоть до 40° от основного оказывало малое

влияние и не меняло картину течения вблизи поверхности.

Структурная функция V_z . Западный ветер. $h = 2,4$ м



Структурная функция V_z . Западный ветер. $h = 400$ м

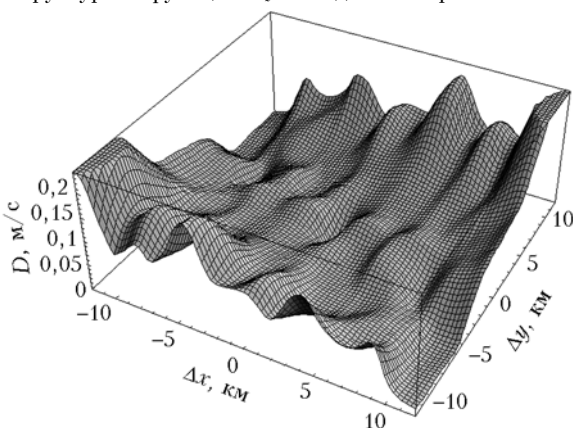


Рис. 3. Структурная функция вертикальной компоненты скорости при западном среднем ветре

Анализ зависимости результатов моделирования от горизонтального разрешения модели показал, что стабилизация результатов наступает при разрешении 80×80 узлов. В конечном моделировании мы имели возможность произвести расчет при разрешении 240×240 узлов, т.е. с большим запасом по данному показателю.

Сравнение результатов моделирования и эксперимента

Мы можем построить псевдоструктурные функции по результатам моделирования, соответствующие псевдоструктурным функциям экспериментальных данных. Степень соответствия модельных и экспериментальных псевдоструктурных функций позволит сделать выводы об адекватности модели и степени влияния рельефа.

На рис. 2 приведен пример такого сравнения для северного и южного средних ветров в области. Приведены псевдоструктурные функции для проекции вектора скорости ветра на направление сред-

него ветра (модель и эксперимент). Также приведены данные для концентрации аэрозоля (эксперимент).

Наблюдается сходство поведения экспериментальных и модельных данных, которое здесь носит качественный характер. В целом модель дает меньшие величины возмущений, чем в реальности (различие в 4–5 раз), однако характер поведения возмущений предсказан правильно. Это подтверждает, что наблюдаемые устойчивые неоднородности обусловлены рельефом.

Аналогичное сходство для продольной скорости ветра обнаружилось для северо-западного и юго-западного среднего ветра. Что касается остальных направлений, то можно предположить, что наблюдаемые расхождения объясняются отсутствием учета в модели влияния строения города (все экспериментальные данные получены в городской черте), являющегося анизотропным фактором. Возможно также влияние анизотропности рельефа, когда оно становится больше или меньше влияния иных факторов в зависимости от направления. Отсутствие учета неоднородности альbedo подстилающей поверхности и нагрева не должно отражаться на результатах, так как их влияние становится малым при усреднении экспериментальных данных по многолетним наблюдениям и сезонам.

В целом полученную модель необходимо совершенствовать, однако с учетом вышесказанного результаты проверки модели на качественную адекватность можно признать хорошими. Выводы, сделанные для высоты 2,4 м, сравнивались с результатами экспериментов и, вероятно, они будут верны для более низких высот.

Заключение

Проведенные исследования показали, что влияние квазиравнинного рельефа на неоднородную структуру приземного слоя существенно при рассмотрении прогноза локальных вариаций метеопараметров и примесей. Создана модель, показавшая в ряде случаев качественную адекватность экспериментальным наблюдениям.

Работа частично поддержана грантами РФФИ: № 04-05-64194; 03-05-96211; НИОКР 09-9.5-187; «Университеты России» УР 01.01.074.

1. *Khoutorova O.G., Zinin D.P.* The effect of local orography in modelling of atmospheric parameters // ERAE. 2004. V. 10. N 2. P. 14–30.
2. *Хуторова О.Г., Теттин Г.М.* Временные вариации аэрозоля и малых газовых примесей в приземном городском воздухе // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2003. Т. 39. № 6. С. 782–790.
3. *Хуторова О.Г., Теттин Г.М.* О природе мезомасштабных вариаций концентрации приземных атмосферных примесей // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 5–6. С. 425–429.
4. *Шлычков В.А., Мальбахов В.М., Леженин А.А.* Численное моделирование атмосферной циркуляции и переноса загрязняющих веществ в Норильской долине // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 5–6. С. 490–496.

5. 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.
6. Хуторова О.Г. Волновые процессы в приземном слое по синхронным измерениям примесей и метеопараметров. Казань: Центр инновационных технологий, 2005. 275 с.
7. Chung T.J. Computational Fluid Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 1022 p.
8. Атмосфера: Справочник / Под ред. Ю.С. Седунова, С.И. Авдюшина, Е.П. Борисенкова, О.А. Волковицкого, Н.Н. Петрова, Р.Г. Рейтенбаха, В.И. Смирнова, А.А. Черникова. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 510 с.
9. Spalart P., Allmaras S. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows: Technical Report AIAA-92-0439. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 1992.
10. Cebeci T., Bradshaw P. Momentum Transfer in Boundary Layers. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1977. 391 p.

D.P. Zinin, G.M. Teptin, O.G. Khutorova. Investigation of influence of quasiflat relief on the local inhomogeneous structure of the ground atmospheric layer based on modeling and many-year experiment.

Outcomes of numerical modeling of atmospheric stream perturbation by real quasiflat relief are considered. Comparison with long-term every minute measurements of wind velocity and aerosol concentration at a chain of atmospheric monitoring stations spaced at intervals of 0.8–5.2 km is given. Comparison of modeling with experimental outcomes for a field of wind velocity reveal a qualitative adequacy of the model (relief effect) and measurements the local- and mesoscale of 0.8–5.2 km.