

МЕТЕОРОЛОГИЯ

УДК 551.51:551.46

К.Г. Шварц**МОДЕЛИРОВАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ И МЕЗОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ
В БАРОКЛИННОЙ АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ**

В статье представлен обзор работ по изучению крупномасштабных и мезомасштабных адвективных процессов в атмосфере и океане с помощью класса оригинальных квазидвумерных моделей, являющихся развитием теории «мелкой воды».

Ключевые слова: адвекция; крупномасштабные течения; мезомасштабные процессы; перенос примеси.

Вихревые течения являются одним из наиболее распространенных типов движений в атмосфере и океане. Эти явления характеризуются существенной трехмерностью движения, неизотермичностью происходящих процессов, влиянием вращения [40]. Одной из характерных особенностей является наличие продольного температурного градиента. Горизонтальный градиент температуры вызывает адвективные течения. Адвекция (от лат. *advection* – доставка) – это горизонтальное перемещение воздушных масс и влаги в атмосфере или водных масс в водоеме из одного района в другой. Различают адвекцию воздушных масс, тепла, водяного пара, адвективных туманов, гроз, заморозков. Адвекция тепла или холода – локальное повышение или понижение температуры воздуха под влиянием горизонтального переноса. Вместе с воздухом или водой происходит одновременно адвекция тепла, взвешенных и растворимых веществ. Адвекция проявляется обычно в форме разнообразных течений [13].

До сих пор не до конца понятна роль термодинамического воздействия на динамику течений в океане и атмосфере [19;20]. Сложность проведения и интерпретация численных экспериментов с трехмерными уравнениями побуждают к созданию более простых моделей, которые сохраняют наиболее характерные черты реальных явлений. Одним из методов исследования крупномасштабных и мезомасштабных процессов является использование квазидвумерных моделей. Они позволяют успешно применять аналитические методы исследования и сокращают затраты вычислительных ресурсов компьютера при численных расчетах.

Многие реальные атмосферные и океанические течения обладают пространственной анизотропией, когда один из геометрических масштабов движения – вертикальный – много меньше других. Такие течения называются крупномасштабными [17]. В силу естественных ограничений крупномасштабные течения почти плоские, что побуждает к построению двумерных моделей, из которых наиболее известны уравнения «мелкой воды» [10]. Классическая теория «мелкой воды» основывается на приближении крупномасштабности изучаемых процессов, когда характерный горизонтальный масштаб намного больше вертикального на длинноволновом характере течения. Из приближения крупномасштабности выводится условие гидростатики. Рассматривается двумерная модель для тонкого горизонтального слоя изотермической жидкости. Жидкость считается идеальной, в некоторых случаях учитывается турбулентная диффузия. Горизонтальные компоненты скорости считаются независимыми от вертикальной координаты. Учитываются сила Кориолиса, неровность нижней границы и наличие нестационарных волн на свободной верхней границе. В монографиях Н.Е. Вольцингера [10;11] с помощью модели «мелкой воды» изучаются длинные морские волны, приливы, сейши, штормовые нагоны. В работе [12] рассчитываются штормовые нагоны. Мелкая вода используется для описания вращающихся галактик [22] и моделирования распространения

© Шварц К.Г., 2013

Шварц Константин Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики и информатики Пермского государственного национального исследовательского университета; 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; kosch@psu.ru

загрязнений в мелких водоемах [21]. В работе [42] представлены расчеты течений жидкости в устьях рек и морских заливов.

В работах [1;7] и монографии [8] описана техника получения двумерных уравнений, пригодная для широкого класса граничных условий на горизонтальных границах и основанная на точных решениях уравнений Навье–Стокса. Этот класс моделей, являющийся развитием теории «мелкой воды», использовался для исследования бароклинных крупномасштабных явлений в океане и атмосфере. Можно также отметить еще один класс двумерных моделей [14;15], который был разработан для изучения процесса формирования тайфунов.

Моделирование крупномасштабных адвективных течений в океане

В работах [1-3;26] представлена квазидвумерная модель, описывающая крупномасштабные течения в океане в терминах средней поперек слоя скорости и температуры. В уравнениях для скорости имеются слагаемые, описывающие воздействие ветрового напряжения и температурной неоднородности атмосферы на поверхности океана, действие термического ветра [23] на движение воды и перенос термическим ветром завихренности термического ветра. Исследовано влияние горизонтальной неоднородности температуры на крупномасштабные течения в мелком канале меридионального направления. Показано, что температурная неоднородность увеличивает скорость движения и может разрушать течение. Были также выведены линейные уравнения классической теории динамики крупномасштабных океанических течений [24], в которых дополнительно учитывается термический ветер:

$$A_M \Delta^2 \psi + rot_z \bar{\tau}_1 = 0 \text{ – неизотермическое уравнение Штокмана,}$$

$$\beta \partial_x \psi = rot_z \bar{\tau}_1 \text{ – неизотермическое уравнение Свердруп,}$$

$$\beta \partial_x \psi + \mu \Delta \psi = rot_z \bar{\tau}_1 \text{ – неизотермическое уравнение Стоммела,}$$

$$\beta \partial_x \psi - A_M \Delta^2 \psi = rot_z \bar{\tau}_1 \text{ – неизотермическое уравнение Манка.}$$

Здесь $\psi(t, x, y)$ – функция тока, вектор $\bar{\tau}_1 = \frac{1}{\rho_0 h} \bar{\tau} + \mu \bar{i}$, $\bar{\tau} = (\tau_x, \tau_y)$ – вектор тангенциальных напряжений ветра, ρ_0 – плотность морской воды, h – глубина слоя, вектор \bar{i} – термический ветер, μ – коэффициент экмановского трения о дно, $\Delta = \partial_x^2 + \partial_y^2$, rot_z – вертикальная компонента ротора, A_M – коэффициент горизонтального турбулентного обмена импульсом, β – параметр Кориолиса. С помощью этих уравнений можно исследовать не только влияние ветра на циркуляцию жидкости в океане, но и роль адвекции в этом процессе.

Неизотермическая ветровая циркуляция жидкости в средних широтах исследовалась с использованием двумерной модели крупномасштабной океанической циркуляции [5;8;26;38;39], моделировалось явление отрыва течения Гольфстрим от западного берега Американского континента. Показано, что неоднородный горизонтальный нагрев морской воды увеличивает величину расхода течения и является причиной его отрыва от западного побережья.

Известно, что в Черном море вдоль побережья на расстоянии 70–90 км от берега циркулирует Основное черноморское течение. В [9] было показано, что реальные перепады солености между Черноморской водой и водой Средиземного моря эквивалентны перепадам температур ~ 100 °С. В силу оценок в [9] была выдвинута гипотеза о возможном механизме формирования узкоструйных циклонических колец, возникающих вблизи берегов мелких внутренних водоемов типа Черного моря. В [6, с. 39] с помощью двумерной модели было показано, что основной причиной возникновения циклонической циркуляции полагается наличие солеобмена через пролив Босфор и распреснения жидкости за счет материкового стока (Дунай) и Керченского пролива.

Квазидвумерные модели, представленные в [8], ждут своего использования для изучения адвективных процессов в шельфовых и внутренних морях, неглубоких крупных озерах и водохранилищах.

Этот же подход был применен для исследования крупномасштабных и мезомасштабных процессов в атмосфере.

Моделирование крупномасштабных и мезомасштабных адвективных процессов переноса примеси в атмосфере

Процессы распространения примесей в атмосфере оказывают существенное воздействие на состояние природной среды. В силу сложности описываемого явления моделирование процессов

дальнего и регионального переноса загрязняющих веществ в атмосфере может быть произведено с помощью двумерных уравнений, описывающих средние поперек слоя поля скорости, температуры, концентрации примеси.

В работах [29;46] представлена квазидвумерная модель, описывающая процессы переноса и диффузии примеси в свободной атмосфере, полученная с помощью усреднения поперек слоя трехмерных уравнений гидротермодинамики атмосферы и переноса примеси. Для замыкания системы использовалось точное решение исходной трехмерной задачи для случая линейной зависимости температуры и геопотенциала на границах слоя. Модель является асимптотически верной для длинноволнового приближения. Показано влияние адвекции на перенос примеси над Европейской территорией Российской Федерации.

Цикл работ [27;28;43;45] посвящен моделированию мезомасштабных атмосферных процессов над крупным промышленным городом с учетом рельефа подстилающей поверхности, шероховатости и неоднородности температуры почвы. Расчеты, сделанные для городов Пермь и Березники, показали, что при моделировании необходимо учитывать не только динамическую неоднородность подстилающей поверхности, но и ее термодинамическую неоднородность, возникающую за счет шероховатости. Под действием термической неоднородности и неровности подстилающей поверхности в нижнем слое атмосферы над рассматриваемыми «площадками» возникает локальная мезомасштабная циркуляция воздуха, определяющая распределение примеси от наземных и высотных источников.

В [30;36;31] разработана модель переноса примеси в пограничном слое атмосферы при наличии мощного источника холода, образующегося в результате разлива большого объема испаряемой жидкости. На основании численных экспериментов было выявлено, что при сильном охлаждении образуются вихревые структуры с вертикальной осью вращения, количество которых изменяется от двух до четырех. Турбулентная диффузия примеси усиливается при увеличении горизонтальных градиентов температуры и концентрации загрязняющего вещества. В [32–37;47] представлены результаты численных расчетов, полученных на основе выведенной квазидвумерной модели распространения примеси от мощного теплового источника (на примере возгорания нефти) с учетом неоднородности турбулентной диффузии над источником и вне его. Расчеты показали, что в результате линейного и нелинейного взаимодействия неоднородного горизонтального градиента температуры в области воздействия теплового факела в нижней атмосфере формируется мощное вихревое движение над местом возгорания нефти. Формируемое поле ветра может существенно изменять характер распространения примеси в окрестности источника.

В работе [25;43] представлена модель мезомасштабных атмосферных процессов второго поколения, в которой величины коэффициентов уравнений движения зависят от числа Экмана, что позволяет учитывать не только неоднородность турбулентной диффузии над источниками тепла или холода на подстилающей поверхности, но и механизмы переноса термическим ветром завихренности и переноса завихренности термического ветра, а также «нелинейное» трение о подстилающую поверхность. Модель использовалась для расчетов распространения биотехнологической примеси в окрестности города Кирова. Расчеты производились с помощью распараллеленных алгоритмов на кластерном суперкомпьютере Вятского государственного университета. Они показали, что в результате воздействия неоднородного горизонтального градиента температуры в нижней атмосфере над населенными пунктами формируются вихревые движения. Возмущенное поле ветра заметно влияет на характер распространения примеси в окрестности источников.

В статье [35] представлены результаты численного моделирования процессов переноса загрязняющих веществ, выделяющихся при горении торфа. Для этого на основе трехмерной модели гидротермодинамики мезомасштабных процессов в нижнем слое атмосферы выведена новая квазидвумерная модель распространения многокомпонентной примеси от источника с учетом термической неоднородности подстилающей поверхности. Показано, что большая мощность источника тепла искривляет первоначальную траекторию переноса примеси, влияя на общее направление переноса примеси.

Работа выполнена в рамках тематического плана НИР ПГНИУ №5.5061.2011 «Математическое моделирование мезомасштабных атмосферных процессов переноса вредных примесей от нестационарных тепловых источников».

Библиографический список

1. *Аристов, С.Н., Фрик П.Г.* Динамика крупномасштабных течений в тонких слоях жидкости. Свердловск: Изд-во ИМСС, 1987. 47 с.
2. *Аристов С.Н., Шварц К.Г.* Численное моделирование адвективной циркуляции в океане / Перм. ун-т. Пермь, 1987. 43 с. Деп. в ВИНТИ №7183-В87 9.10.87.
3. *Аристов С.Н., Шварц К.Г.* Двумерная модель крупномасштабных течений в океане / Перм. ун-т. Пермь, 1989. 17 с. Деп. в ВИНТИ №3003-В89.
4. *Аристов С.Н., Шварц К.Г.* Двумерная модель крупномасштабных течений в океане // Океанология. 1989. Т.29, вып.6. С. 951.
5. *Аристов С.Н., Шварц К.Г.* Эволюция ветровой циркуляции в неизотермическом океане // Океанология. 1990. Т.30, вып.4. С. 562–566.
6. *Аристов С.Н., Шварц К.Г.* О влиянии солеобмена на циркуляцию жидкости в замкнутом водоеме // Морской гидрофизический журнал. 1990. №4. С. 38–42.
7. *Аристов С.Н.* и др. Вихревые течения в вязкой жидкости: двумерные модели и точные решения // Информационный бюллетень РФФИ. 1999. Т. 7, № 1. С. 12.
8. *Аристов С.Н., Шварц К.Г.* Вихревые течения в тонких слоях жидкости. Киров: ВятГУ, 2011. 207 с.
9. *Булгаков С.Н.* Исследование роли халинных факторов в формировании циркуляции и структуры вод Черного моря: дис. ...канд. физ.-мат. наук; АН УССР, Мор. гидрофиз. ин-т. Севастополь, 1986. 155 с.
10. *Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В.* Основные океанические задачи теории мелкой воды. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 300 с.
11. *Вольцингер Н.Е.* Длинные волны на мелкой воде. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 160 с.
12. *Вольцингер Н.Е., До Нгок Кунь, Клеванный К.А.* Расчет морских наводнений на вьетнамском побережье Южно-Китайского моря // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1990. Т.26, №7. С. 763–770.
13. *Геоэкология и природопользование. Понятийно-терминологический словарь / авт.-сост. В. В. Козин, В. А. Петровский.* Смоленск: Ойкумена, 2005. 576 с.
14. *Зимин В.Д., Левина Г.В., Моисеев С.С., Шварц К.Г.* Моделирование крупномасштабных вихревых процессов в подогреваемом снизу вращающемся слое // ДАН СССР. 1990. №6. С.1372–1374.
15. *Зимин В.Д.* и др. Об одном физическом механизме генерации крупномасштабных структур при турбулентной конвекции // Известия РАН. Механика жидкости и газа, 1996. № 5. С. 20–29.
16. *Калинин Н.А.* Связь аномалий среднесуточной температуры воздуха в г. Перми с формами атмосферной циркуляции Каца // Уч. зап. Казан. ун-та. Серия Естественные науки. 2012. Т. 154; № 1. С. 224–231.
17. *Калинин Н.А., Ветров А.Л.* Генерация доступной потенциальной энергии вследствие крупномасштабной конденсации в циклонах умеренных широт // Метеорология и гидрология. 2002. № 4. С. 17–27.
18. *Калинин Н.А., Ветров А.Л., Смирнова А.А.* Мезомасштабный анализ и сверхкраткосрочный прогноз погоды // Учен. зап. Казан. ун-та. Серия Естественные науки. 2009. Т. 151, № 4. С. 209–216.
19. *Калинин Н.А., Ермакова Л.Н., Аликина И.Я.* Особенности формирования высокой температуры воздуха в сентябре–октябре 2003 г. на Среднем и Южном Урале // Метеорология и гидрология. 2005. № 5. С. 82–89.
20. *Калинин Н.А., Кислов А.В., Бабина Е.Д., Ветров А.Л.* Оценка качества воспроизведения моделью MM5 температуры воздуха в июле на Урале // Метеорология и гидрология. 2010. № 10. С. 15–22.
21. *Крукиер Л.А., Муратова Г.В., Чикин А.Л.* ППП «POLLUTION» для расчета распространения загрязнения в мелком водоеме // Вычислительные технологии. 1993. Т.2, №6. С. 133–146.
22. *Морозов А.Г.* и др. Моделирование процесса генерации спиральной структуры галактик на установке с вращающейся жидкостью // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1984. Т.39, вып.11. С. 504–507.
23. *Сеидов Д.Г.* Моделирование синоптической и климатической изменчивости океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 207 с.

24. *Фельзенбаум А.И.* Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений М.: Изд-во АН СССР, 1960. 127 с.
25. *Шатров А.В., Шварц К.Г.* Численное моделирование атмосферных мезомасштабных процессов переноса примесей в окрестности города Кирова // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т.3, №3. С. 117–125.
26. *Шварц К.Г.* Модели геофизической гидродинамики: учеб. пособие по спецкурсу. Изд. 2-е, доп. и испр. Пермь, 2006. 66 с.
27. *Шварц К.Г., Шкляев В.А.* Моделирование мезомасштабных атмосферных процессов над большим городом // Метеорология и гидрология. 1994. №9. С. 29-38.
28. *Шварц К.Г.* Двумерная модель мезомасштабных атмосферных процессов над крупным промышленным городом // Вычислительные технологии: сб. науч. тр. ИВТ РАН. Новосибирск, 1995. №13. С. 326-335.
29. *Шварц К.Г., Шкляев В.А.* Моделирование процессов переноса примеси в свободной атмосфере с помощью квазитрехмерной модели // Метеорология и гидрология. 2000. №8. С. 44–54.
30. *Шкляев В.А., Шварц К.Г. и др.* Моделирование регионального переноса примеси в атмосфере в результате аварий и катастроф техногенного и природного характера. Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований. Пермь, ПНЦ УрО РАН, 2003. С. 300–304.
31. *Шварц К.Г., Шкляев В.А.* Особенности распространения загрязняющих веществ в атмосфере при наличии мощного источника испаряемой жидкости // Вестник Удмуртского университета. Серия 6. Биология. Науки о Земле. 2010. Вып. 4. С. 174–176.
32. *Шварц К.Г., Шкляев В.А., Шварц Ю.А.* Математическое моделирование процессов распространения примеси от мощного источника тепла при промышленных авариях или природных катастрофах // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований. Пермь: ПНЦ УрО РАН, 2008. Ч.1. С. 157–159.
33. *Шварц К.Г., Шкляев В.А.* Численное моделирование мезомасштабных вихревых структур вблизи мощного горячего источника примеси в пограничном слое атмосферы // Вычислительная механика сплошных сред. 2009. Т.1, №1. С. 96–106.
34. *Шварц К.Г., Шкляев В.А., Шварц Ю.А.* Математическое моделирование процессов распространения примеси от мощного источника тепла при промышленных авариях или природных катастрофах // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований, полученных в 2007–2009 гг.: сб. ст. Пермь: ПНЦ УрО РАН, 2010. Ч.1. С. 190–194.
35. *Шварц К.Г., Шкляев В.А.* Численное моделирование атмосферных мезомасштабных процессов переноса многокомпонентной примеси при торфяном пожаре // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т.5, № 3. С. 274–283.
36. *Шкляев В.А., Шварц К.Г. и др.* Моделирование регионального переноса примеси в атмосфере в результате аварий и катастроф техногенного и природного характера. Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований, полученных в 2003 г.: аннотационный отчет. Пермь: ПНЦ УрО РАН, 2004. С. 246–249.
37. *Шкляев В.А., Шварц К.Г.* Моделирование процессов переноса примеси в нижнем слое атмосферы, связанных с выбросами большой мощности при аномальном температурном нагреве // Вестник Удмурт. ун-та. Серия 6. Биология. Науки о Земле. 2010. Вып. 4. С. 156–159.
38. *Aristov S.N., Shvarts K.G.* Evolution of wind circulation in a nonisothermal ocean // *Oceanology*. 1990. Vol.30, № 4. P. 414–416.
39. *Aristov S.N., Schwarz K.G.* New two-dimensional model of large-scale oceanic circulation. Proc. of 2nd International Conference of Computer Modelling in Ocean Engineering'91, Barcelona (30 September- 4 October 1991). Rotterdam: Balkema, 1991. P. 49–54.
40. *Kalinin N.A.* Spatial structure of kinetic energy transformation and flux under the effect of eddy formation in cyclones // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2000. № 9. С. 11–15.
41. *Kalinin N.A., Vetrov A.L., Kislov A.V., Babina E.D.* Estimation of air temperature reproduction quality by the MM5 model in the Urals in July // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2010. Vol. 35. № 10. P. 659–664.
42. *Lin B.* Formation of Tidal Bore in Shallow-water Flow // *Journal of Hydrodynamics*. Ser. A. 1988. Vol.3, № 1.4. P.63–69. URL: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-SDLJ198804007.htm (дата обращения: 31.08.2011).
43. *Shatrov A.V., Shvarts K.G.* Numerical Modeling of Mesoscale Atmospheric Impurity Transport

Processes in the Environs of the City of Kirov // Fluid Dynamics. 2011. Vol.46, № 2. P. 332–339.

44. *Shvarts K.G., Shklyayev B.A.* Modeling of mesoscale atmospheric processes over a large town // Russian Meteorology and Hydrology. 1994. № 9. P. 21–29.

45. *Schwarz K.G.* Mesa-Scale Flows over Large City // Progress in Fluid Flow Research: Turbulence and Applied MHD // AIAA Progr. Ser. 182. 1998. P. 271–279.

46. *Shvarts K.G., Shklyayev V.A.* Modeling the pollution transport in the free atmosphere with a quasi-3D model // Russian Meteorology and Hydrology. 2000. № 8. P. 18–26.

47. *Shvarts K.G., Shklyayev V.A.* Role of vortical structure generated by a powerful heat source in propagation of an impurity in atmosphere // International Conference «Fluxes and structures in Fluids», July 2–7, 2007. St.-Petersburg, Selected Papers, 2008. P. 185–190.

48. *Zimin V.D., Levina G.V., Moiseev S.S., Shvarts K.G.* Modeling of large-scale vortical processes in a rotating layer heated from below // Sov. Phys. Dokl. 1990. Vol.35, № 6. P. 563–564.

49. *Zimin V.D. etc.* A physical mechanism of large-scale structure generation in turbulent convection // Fluid Dynamics. 1996. Vol. 31, № 5. P. 563–565.

K.G. Shvarts

MODELING OF LARGE-SCALE AND MESO-SCALE PROCESSES IN THE BAROCLINIC ATMOSPHERE AND OCEAN

The paper presents a review of the works on the study of large-scale and meso-scale advective processes in the atmosphere and the ocean using the original quasi-two-dimensional models, which are the development of the theory of the «shallow water».

Key words: advection; large-scale flows; meso-scale processes; the transfer of impurities.

Konstantin G. Shvarts, Doctor of Physics and Mathematics, Professor of Department of Applied Mathematics and Computer Sciences, PermState National Research University; 15, Bukireva, Perm, Russia, 614990; kosch@psu.ru

УДК 551.589.6

А.Н. Шихов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ СИЛЬНЫХ ШКВАЛОВ И СМЕРЧЕЙ В ПЕРМСКОМ КРАЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В статье рассматриваются возможности применения данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для анализа последствий шквалов и смерчей, не зафиксированных наблюдательной сетью. Описаны методы и приведены результаты выявления массовых ветровалов в лесах Пермского края за период с 2001 по 2012 г. Проанализирован случай возникновения смерчей на северо-западе Пермского края 07.06.2009 г.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования Земли; опасные явления погоды; шквалы; смерчи; ветровалы.

Смерчи и сильные шквалы относятся к числу опасных метеорологических явлений (ОЯ), способных повлечь значительный материальный ущерб. Как и все конвективные явления, смерчи и шквалы имеют локальный характер и часто не фиксируются наблюдательной сетью, поэтому получение дополнительной объективной информации о них остается весьма актуальным.

© Шихов А.Н., 2013

Андрей Николаевич Шихов, ассистент кафедры картографии и геоинформатики; Пермского государственного национального исследовательского университета; 614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15; and3131@inbox.ru