

ОБЪЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛЕЙ «ОБЛАЧНОГО ВЕТРА»

М.С. Пермяков¹, В.П. Тунеголовец², Н.П. Маликова¹

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690014 Владивосток, Балтийская, 43
E-mail: permyakov@poi.dvo.ru

² Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт
(ДВНИГМИ)
690950, Владивосток, ул. Фонтанная, 24
E-mail: tunegolovets@hidromet.com

Рассматриваются методы и алгоритмы восстановления полей ветра по хаотично распределенным спутниковым данным об «облачном ветре» или ветре в «поле водяного пара». Реализуются два подхода: скалярный, в котором скорость ветра и его составляющие представляются как скалярные, независимые величины; и гидродинамический, в котором компоненты вектора ветра находятся из решения уравнений Пуассона для вихревой и дивергентной составляющих ветра. В обоих подходах для восстановления скалярных полей, расчета вихря и дивергенции используются различные методы аппроксимации на конечных элементах, образуемых при триангуляции области данных. Алгоритмы обработки предусматривают процедуры геометрического анализа пространственного распределения данных, оценки качества триангуляции и ее оптимизации. Для оценок погрешностей восстанавливаемых полей используется процедура «скользящий контроль», при которой поочередно из массива данных удаляются точки и пересчитываются триангуляция и поля. По полученному набору полей в точках данных или узлах заданной сетки проводится статистический анализ погрешностей восстановления. Рассматриваются различные методы оценок для вихря и дивергенции. В численных экспериментах по восстановлению полей ветра из выборок хаотично распределенных точек данных с проекциями ветра в них, рассчитанных из заданных модельных функций координат, получены оценки погрешностей восстановления полей ветра и его кинематических характеристик для разных методов. Приводятся примеры восстановленных полей из данных по «облачному ветру» спутника GMS-5 для северо-западной части Тихого океана при прохождении тропических циклонов.

Введение

Восстановление полей метеорологических параметров на заданной регулярной сетке по спутниковым данным является одной из актуальных задач объективного анализа метеорологических полей в связи с развитием спутниковых методов мониторинга атмосферы и океана. Задачи объективного анализа спутниковых данных для целей исследования структуры полей атмосферы и океана имеют ряд особенностей, которые связаны с измерениями над плохо освещенными стандартными наблюдениями обширными акваториями морей и океанов, с пространственной нерегулярностью и асинхронностью исходных данных. Это не позволяет прямо использовать известные методы и алгоритмы объективного анализа и требует их существенной доработки или адаптации.

В работе для векторных полей «облачного ветра» и «ветра в поле водяного пара» развивается метод и алгоритмы, в которых реализуются скалярный и гидродинамический подходы к задаче восстановления. В первом подходе зональная и меридиональная компоненты вектора скорости ветра рассматриваются как скалярные величины. Во втором подходе поля ветра восстанавливаются из полей вихря и дивергенции путем решения уравнений Пуассона.

Исходные спутниковые данные о ветре

Качество любой процедуры объективного анализа определяется, прежде всего, числом и качеством данных, их распределением в пространстве. В связи с этим проанализированы срочные и среднемесячные данные по «облачному ветру» и «ветру в поле водяного пара» ИЗС GMS-5 для северного полушария. Данные покрывают область от экватора до чуть более 50 градусов северной широты и от 80 градусов западной долготы до 170 градусов восточной. В отдельный синоптический срок может оказаться от 25 до 110 точек данных (отметим, что имеются дни и сроки без данных) по облачному ветру на нижнем уровне (850 мб). Данных по «облачному ветру» на верхнем уровне и в «поле водяного пара» за месяц оказалось на порядок меньше, чем данных по нижнему уровню. Точки данных в отдельные сроки в ветре нижнего уровня имеют очень неравномерное распределение, а плотность их колеблется от 10-15 на 10 градусную трапецию до нуля. Данные в «поле водяного пара» распределены более равномерно, но плотность очень мала.

Для восстановления сглаженных фоновых полей может быть использован метод оптимальной интерполяции [1,2]. Для его реализации необходимо знать двумерные корреляционную и кросскорреляционную функции для меридиональной, зональной, а так же для продольной и поперечной компонент ветра. Расчет корреляционных функций требует достаточно большого объема исходных данных и всегда в метеорологии представляет значительные трудности. В ходе работы разработан алгоритм расчета корреляционных двумерных функций с использованием при сортировке по градам расстояний и углов скользящего окна, что позволяет получить достаточно большое число оценок функций и получить их приемлемую аппроксимацию. Проведенные оценки показали, что для облачного ветра нижнего уровня двумерные корреляционные функции с достаточной точностью могут быть построены по данным за четыре срока (сутки) с числом в каждом около 100. На рис.1 представлены для примера двумерные корреляционные функции зонального и меридионального облачного ветра на нижнем уровне для всех данных в северном полушарии по месячной выборке. Из рисунков видна характерная анизотропия корреляционных функций, связанная с преобладающими зональными потоками.

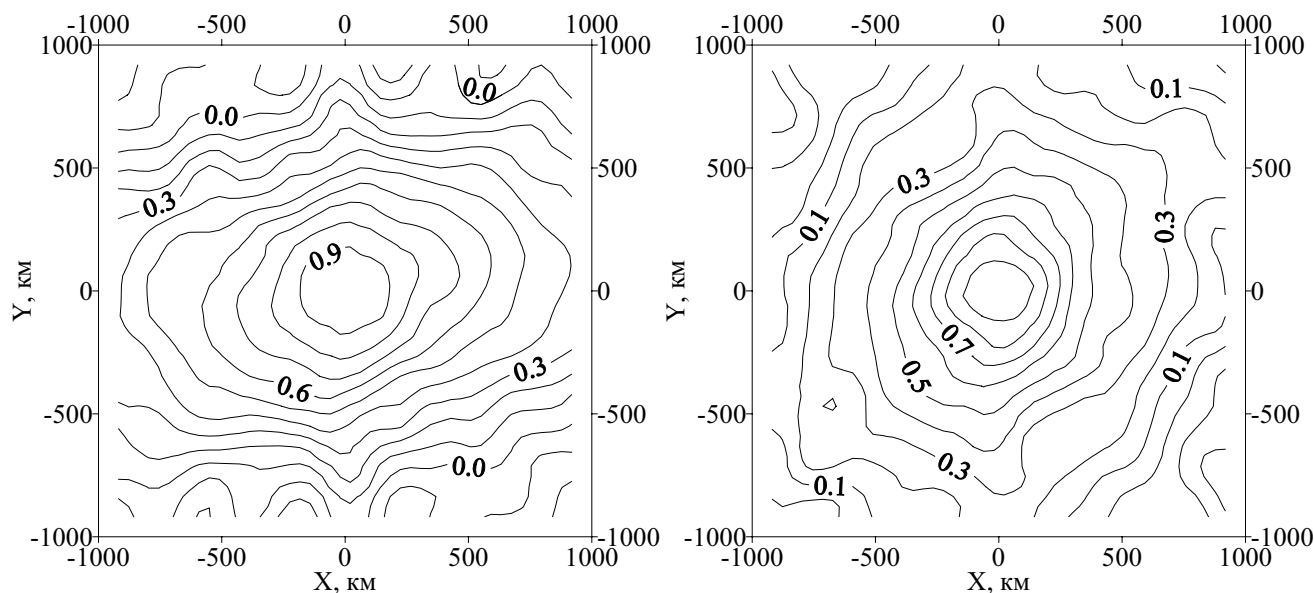


Рис. 1. Двумерные корреляционные функции зонального (слева) и меридионального (справа) облачного ветра на нижнем уровне (850 мб).

Алгоритмы численного анализа срочных полей ветра

Для анализа срочных полей ветра в работе реализуются два подхода: скалярный, в котором составляющие вектора скорости ветра интерполируются или аппроксимируются отдельно, как независимые скалярные величины; и гидродинамический, в котором для восстановления поля ветра используются поля вихря и дивергенции, вычисляемые по исходным данным об "облачном ветре". Оба подхода используют методы восстановления полей ветра и его кинематических характеристик с помощью аппроксимаций на конечных элементах, полученных триангуляцией Делоне набора точек данных и двойственной с ней сеткой ячеек, образованных центрами тяжести треугольников или вершинами полигонов Дирихле-Вороного [3,4,5,6]. В разработанных процедурах предусматривается возможность оптимизации триангуляции и расчет характеристик ее качества для компенсации недостатков неравномерного распределения данных. Так, объединение близких точек в одну и селекция треугольников по параметру «вытянутости» позволяют существенно снизить погрешность аппроксимации. В качестве вспомогательной информации, необходимой для оценок погрешностей и определения весов точек данных в процедурах пространственного и временно-го сглаживания, рассчитывается их плотность в окрестности с радиусом 250-500 км.

Для построения поля ветра в первом приближении реализуется скалярный подход с использованием полиномиальной аппроксимации на конечных элементах, дополненный некоторыми процедурами. Во-первых, интерполяция составляющих ветра дополняется интерполяцией его модуля, что эквивалентно интерполяции скалярной величины – кинетической энергии. Во-вторых, при использовании простейших (полиномиальных) методов интерполяции для восстановления поля и оценок погрешности аппроксимации применяется процедура «скользящий контроль». Для интерполяции на триангуляционной сетке используются полиномы степени не выше пятой. Полиномы в соседних треугольниках согласуются по значениям и частным производным на разделяющем их ребре. Тестировались также процедуры различных вариантов сплайновой аппроксимации полей [7]. Результаты тестовых расчетов показывают, что в целом картина восстановленного ветра вполне соответствует исходным данным. Точность восстановления около 1-1,5 м/с, что сравнимо с погрешностью оценки ветра по облачным маркерам.

В задачах гидродинамики и метеорологии традиционно двумерные скорости представляются суммой вихревой и потенциальной составляющих. При известных пространственных распределениях вихря и дивергенции составляющие скорости находятся решением уравнений Пуассона для функции тока и потенциала. Эффективным средством их решения является использование метода функций Грина [8,9]. При достаточно хорошей точности полей вихря и дивергенции и численных методах высокого порядка на прямоугольной сетке этот метод позволяет восстанавливать довольно тонкие детали поля ветра – фронты и фронтальные волны [8,9]. Мы используем простейший вариант метода функций Грина с использованием конечных элементов для расчета полей вихря и дивергенции и решения уравнения Пуассона на регулярной прямоугольной сетке.

В численных экспериментах по восстановлению полей ветра по хаотично распределенным данным были изучены возможности скалярного и гидродинамического подходов к задаче аппроксимации полей ветра и его кинематических характеристик в узлах регулярной сетки. Однако, было отмечено, что полиномиальная интерполяция пятого порядка на элементах триангуляции (используется в подпрограмме SURF библиотеки IMSL) в ряде случаев дает большие погрешности в расчете как самих полей, так и их производных по координатам. Это приводит к недопустимо большим погрешностям оценок полей вихря и дивергенции. Поэтому были изучены возможности алгоритмов глобальной сплайновой аппроксимации и локальной с использованием метода наименьших квадратов. Для этого были использованы подпрограммы GRADL (локальная аппроксимация) и GRADG (глобальная) из библиотеки TOMS, что позволило построить гладкие (в классе функций с непрерывной первой производной) аппроксимирующие функции и сделать оценки их первых частных производных.

Некоторые результаты тестирования алгоритмов

Для оценки точности алгоритмов и программ интерполяции полей скорости ветра и величин ротора и дивергенции в узлах регулярной сетки были разработаны аналитические тесты, моделирующие вихревое и потенциальное поля. В первом формируется векторное поле с ненулевым ротором (волна в зональном направлении и вихрь), а во втором с ненулевой дивергенцией. При этом поля зональной и меридиональной составляющих ветра задаются как функции от координат x и y . В тестах генерировались случайные множества точек данных двумя способами - равномерное ($N=200$) и неравномерное ($N=85$), имитирующее распределение спутниковых данных. По ним восстанавливались поля ветра, ротора и дивергенции в регулярной сетке узлов и сравнивались с аналитическими значениями. В качестве меры оценки качества восстановленных данных принято отношение среднего вектора ошибок к диапазону значений, полученных аналитически. В таблице 1 представлены оценки точности интерполяции скоростей, величин ротора и дивергенции.

Таблица 1. Относительные ошибки восстановления полей скорости, ротора и дивергенции с использованием программ сплайновой аппроксимации *GRADL* и *GRADG*. Min, Max, Mean – минимальное, максимальное, среднее значения относительных ошибок интерполяции по узлам регулярной сетки

Равномерное распределение данных				Неравномерное		
		<i>GRADL</i>	<i>GRADG</i>		<i>GRADL</i>	<i>GRADG</i>
Безвихревое Поле	V	Min 0.002 Max 49 Mean 2.4	Min 6.7E-5 Max 42 Mean 1.6	V	Min 0.007 Max 83 Mean 7	Min 5.E-4 Max 79 Mean 11
	Div V	Min 0.004 Max 72 Mean 3	Min 0.001 Max 56 Mean 2.2	Div V	Min 0.002 Max 88 Mean 8	Min 0.01 Max 93 Mean 7
Вихревое поле	V	Min 6E-5 Max 22 Mean 0.7	Min 0.002 Max 21 Mean 1	V	Min 2.E-4 Max 16 Mean 2	Min 7.E Max 13 Mean 1
	Rot V	Min 4.E-4 Max 37 Mean 1.2	Min 2.E-4 Max 37 Mean 1	Rot V	Min 0.005 Max 60 Mean 4	Min 2.E-4 Max 40 Mean 3

В таблице 2 приведены относительные ошибки восстановления поля скорости гидродинамическим методом по данным тестов для случаев равномерного и неравномерного распределения исходных точек данных.

На рис. 2 показаны результаты расчета поля скорости в аналитическом тесте, моделирующем бездивергентное поле для равномерного случайного распределения точек исходных данных, полученных скалярным и гидродинамическим методами. Необходимо отметить качественное различие восстановления полей ветра этими методами, которое проявилось в тестовых расчетах. Гидродинамический метод воспроизводит области слабой завихренности в аналитическом тесте (левый нижний и верхний правый углы). Скалярный же метод дает в этих областях равномерный поток. Таким образом, гидродинамический метод может сохранять качественные особенности полей кинематических характеристик полей ветра, однако, точность восстановления при этом существенно зависит от плотности и равномерности распределения исходных данных.

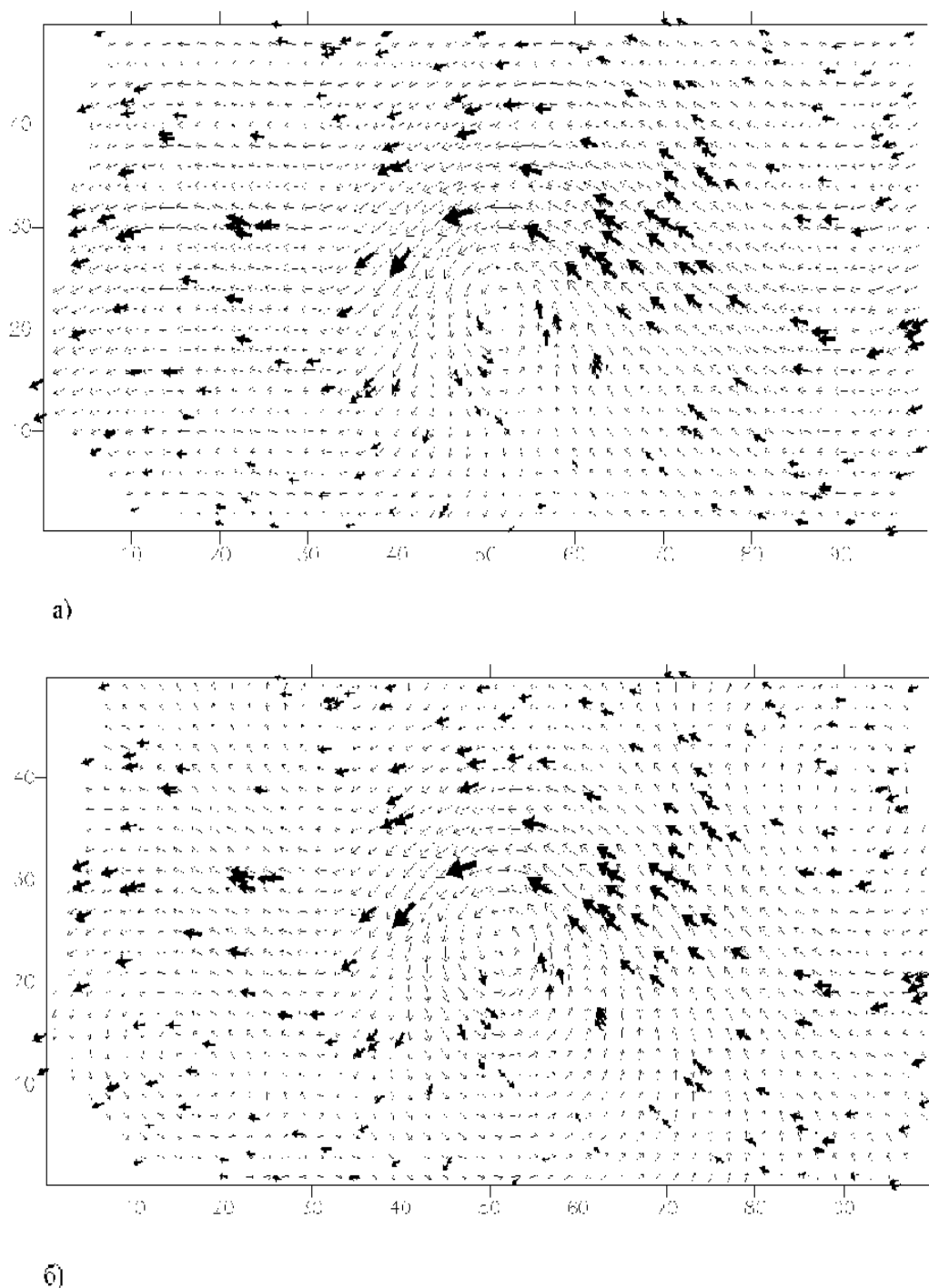


Рис. 2 Восстановленное поле скорости в тесте бездивергентного поля при равномерном распределении точек данных: а) – скалярный метод, б) – гидродинамический. Толстые стрелки – аналитические значения скорости ветра в исходных точках, тонкие – восстановленные значения.

Таблица 2. Таблица относительных ошибок расчета модуля скорости в узлах регулярной сетки в тестах по гидродинамическому методу.

Распределение данных	Равномерное	Неравномерное
<i>Безвихревое поле</i>	Min 0.02 %	Min 0.4 %
	Max 79 %	Max 90 %
	Mean 17 %	Mean 25 %
<i>Вихревое поле</i>	Min 0.03 %	Min 0.04 %
	Max 39 %	Max 44 %
	Mean 14 %	Mean 18 %

В качестве примера практического применения описанных выше методов на рис. 3 показаны восстановленные поля ветра в области тайфуна Winnue 12.08.97 23:33 UTS скалярным и гидродинамическим методами.

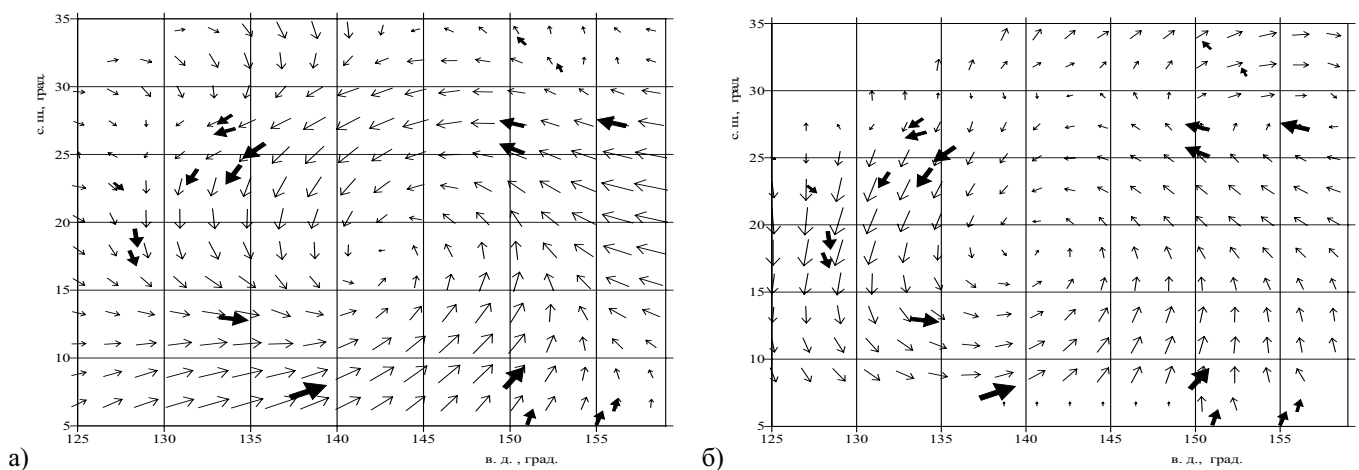
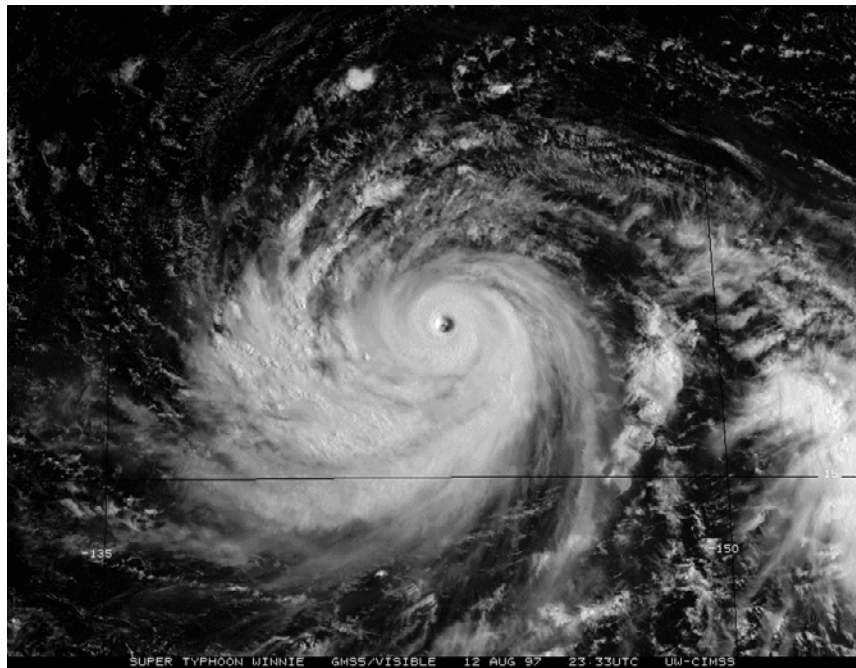


Рис. 3 Тайфун WINNUE 12.08.97 23:33 UTS, уровень 850 мб, «облачный ветер», толстые стрелки – исходные данные, тонкие стрелки – рассчитанные скорости в узлах сетки : а) скалярный метод, б) гидродинамический.

Заключение

Предложены методы и процедуры восстановления полей ветра по хаотично распределенным спутниковым данным по облачному ветру и ветру в поле водяного пара. Проведено тестирование методов в

численных экспериментах с различными заданными аналитически полями и генерацией случайных наборов точек данных. Показано, что возможно восстановление полей ветра с относительной точностью от 2 до 10%. Однако, погрешности возрастают в два и более раз при имитации неравномерного распределения реальных спутниковых данных. В экспериментах на реальных данных погрешности достигают 15-25%. При этом при существующей плотности данных облачного ветра оба подхода (скалярный и гидродинамический) дают примерно одинаковые погрешности восстановления. Но гидродинамический метод позволяет сохранять качественные особенности полей кинематических характеристик полей ветра, такие как области слабой завихренности.

Литература

1. *Беляев В.И.* Обработка и теоретический анализ океанографических наблюдений // Киев: Наукова думка, 1973. 296с.
2. *Гандин Л.С., Каган Р.Л.* Статистические методы интерпретации метеорологических данных // Л.: Гидрометеиздат, 1976. 360с.
3. *Ласло М.* Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++ // М.: БИНОМ, 1997. 301 с.
4. *Препарата Ф., Шеймос М.* Вычислительная геометрия // М.: Мир, 1989. 478 с.
5. *Коннор Дж., Бреббиа К.* Метод конечных элементов в механике жидкости // Л.: Судостроение, 1979. 263 с.
6. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов // М.: Мир, 1979. 392 с.
7. *Де Бор К.* Практическое руководство по сплайнам // М.: Радио и связь, 1985. 392с.
8. *Bishop C.H.* Domain-Independent Attribution. Part I : Reconstructing the Wind from Estimates of Vorticity and Divergence Using Free Space Green's Functions // J. Atmos. Sci. 1996, v. 53, No 2. P.241-252.
9. *Bishop C.H.* Domain-Independent Attribution. Part II : Its Value in the Verification of Dynamical Theories of Frontal Waves and Frontogenesis // J. Atmos. Sci. 1996, v. 53, No 2. P.253-262.