

Интерполяция оперативных данных буев ARGO для ассимиляции данных в модели циркуляции Мирового океана

Н.Б. Захарова^{1,2}, С.А. Лебедев³

¹Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, ул. Профсоюзная 84/32

²Институт вычислительной математики РАН,
119333 Москва, ул. Губкина, 8

E-mail: zakharova_nb@inm.ras.ru

³Геофизический центр РАН,
119296 Москва, ул. Молодежная д.3

E-mail: lebedev@wdcb.ru.

В работе основное внимание уделено данным наблюдений системы буев ARGO. В работе представлено описание этих данных наблюдений и их характеристик, поставлена задача обработки и интерполяции данных на регулярную сетку, предложено несколько алгоритмов интерполяции этих данных. Описан комплекс программ, реализованный для решения поставленной задачи, и представлены результаты численных экспериментов, проведенных Комплексом программ.

Ключевые слова: интерполяция, данные наблюдений, буи ARGO, температура, соленость, Мировой океан.

Введение

В последние годы непрерывно возрастает интерес к задачам ассимиляции (усвоения) и обработки данных наблюдений. Эти задачи фактически представляют собой обратные задачи [1] (или задачи управления) для сложных математических моделей, описываемых нелинейными уравнениями в частных производных. А процессы ассимиляции данных наблюдений являются процедурами замыкания данных задач. Наибольшие приложения они получили в метеорологии и океанологии, где данные измерений основных физических полей атмосферы и океана ассимилируются в математических моделях с целью получения начальных условий (или других параметров модели), более адекватного воспроизведения реальных физических процессов или прогноза состояния моделируемой среды.

Среди методов вычислительной математики, применяемых для решения задач усвоения данных наблюдений, значительную роль играют методы их предварительной обработки, анализа и алгоритмы интерполяции и экстраполяции, которые используются для реализации одного из основных этапов решения задач ассимиляции данных. В связи с этим, разработка таких алгоритмов и соответствующего программного обеспечения, основанных на современных подходах и учитывающих последние достижения в этом направлении, является актуальной проблемой.

Данная работа посвящена описанию некоторых методов обработки и интерполяции данных наблюдений международной системы буев ARGO.

Оперативные данные буев ARGO

Основными параметрами, характеризующими состояние Мирового океана, являются: температура, соленость, скорость и направление течений, уровень морской

воды, содержание кислорода, содержание нитратов, содержание фосфатов и т.д. [2]. До середины прошлого столетия эти параметры измерялись традиционными контактными методами измерений. С развитием приборостроения появились дистанционные методы зондирования поверхности океана как с борта самолета, так и искусственных спутников Земли (ИСЗ). Таким образом, данные о состоянии океана условно можно подразделить на два типа: контактные и дистанционные, оперативность поступления которых в несколько раз превышает поступление данных, измеряемых контактными методами.

Профилирующие буи ARGO представляют собой смешанный тип дистанционного измерения основных океанографических параметров. Профили температуры и солености (или электропроводность) измеряются контактными методами, но сами данные передаются с помощью ИСЗ. Таким образом, они дают уникальную оперативную информацию о состоянии океана.

Спущенный на воду буй дрейфует на поверхности в течение некоторого промежутка времени, достаточного для передачи данных на проходящие спутники (обычно 6-12 часов). После опускания на заданный горизонт буй дрейфует в течение 10 дней, после чего поднимается на поверхность с постоянной скоростью 1 м/с, проводя измерения давления, температуры и электропроводности, на основании которой в дальнейшем рассчитывается соленость морской воды (для горизонта 2000 м этот процесс обычно занимает около 6 часов), и с поверхности передаёт информацию на ИСЗ. Цикл повторяется до тех пор, пока не истощатся батареи или буй не будет выловлен рыбаками. Поймать буй специально довольно сложно – требуется сочетание многих условий: спутниковый телефон, пеленгационный контур и хорошая погода.

Целью проекта ARGO [3] создание и поддержание глобальной сети из 3000 буйев, что должно соответствовать более 100000 измерений различными зондами. Задачами проекта являются: размещение в Мировом океане заданного количества буйев; создание национальных центров ARGO; обеспечение свободного доступа к данным; передача в Глобальную сеть данных в течение 24 часов (требуемых на первичный контроль качества) с момента поступления.

О востребованности информации с профилирующих буйев ARGO говорит тот факт, что число корабельных измерений различными зондами сокращается по сравнению с измерениями данного типа буйев [2].

К преимуществам данных системы буйев ARGO относится тот факт, что каждая буйковая станция проводит измерения характеристик вод океана с большой частотой (примерно каждые 5 метров), тем самым мы получаем довольно точные профили температуры и солености, которые можно без внесения ошибок интерполировать на нужные уровни, что важно при описании верхнего квазиоднородного слоя в σ_t -системе координат.

Подготовка данных о профилях температуры и солёности с буйев ARGO для применения их в задаче ассимиляции данных сама по себе является достаточно сложной задачей. Она может быть реализована в два этапа. На первом этапе проводится интерполяция данных на расчетные уровни модели, на втором этапе – интерполяция на расчетную сетку модели по «горизонтальным переменным». В значительной степени целью настоящей работы было рассмотреть ряд алгоритмов решения этих двух этапов и реализации их в соответствующем комплексе программ.

Алгоритмы интерполяции и экстраполяции

В данном разделе представлены методы интерполяции данных наблюдений, которые были реализованы в Комплексе программ для обработки данных с буев ARGO.

Линейная интерполяция

Линейная интерполяция – интерполяция алгебраическим двучленом $P(z) = az + b$ функции одной переменной $f(z)$, заданной в двух точках z_0 и z_1 отрезка $[a, b]$ [4]. Геометрически это означает замену графика функции f прямой, проходящей через точки $(z_0, f(z_0))$ и $(z_1, f(z_1))$. Уравнение такой прямой имеет вид:

$$\frac{P(z) - f(z_0)}{f(z_1) - f(z_0)} = \frac{z - z_0}{z_1 - z_0},$$

следовательно для $z \in [z_0, z_1]$:

$$f(z) \approx P(z) = f(z_0) + \frac{f(z_1) - f(z_0)}{z_1 - z_0}(z - z_0).$$

Это и есть формула линейной интерполяции, при этом

$$f(z) = P(z) + R(z),$$

где $R(z)$ — погрешность формулы:

$$R(z) = \frac{f''(\psi)}{2}(z - z_0)(z - z_1), \quad \psi \in [z_0, z_1].$$

Алгоритм линейной интерполяции является одним из самых простых методов интерполяции данных. Этот алгоритм может быть реализован для интерполяции данных наблюдений, полученных с буёв ARGO по вертикальной переменной («по глубине») в Комплексе программ.

Метод обратных взвешенных расстояний

Метод обратных взвешенных расстояний [5] основан на вычислении весовых коэффициентов, с помощью которых взвешиваются значения данных измерений (\hat{Z}_k) в точках наблюдений при построении интерполяционной функции. Вес, присвоенный отдельной точке данных при вычислении значения в узле сетки, пропорционален заданной степени обратного расстояния от точки наблюдения до узла сетки. При вычислении интерполяционной функции в каком-то узле сетки сумма всех назначенных весов равна единице,

а весовой коэффициент каждой точки, где проводились измерения, является долей этого общего единичного веса. Если точка наблюдения совпадает с узлом сетки, то весовой коэффициент этой точки полагается равным единице, а всем другим наблюдаемым точкам присваиваются нулевые веса. Другими словами, в этом случае узлу сетки присваивается значение соответствующего наблюдения, и, следовательно, данный метод работает как «точный интерполятор».

Формула интерполяции, используемая в данном алгоритме, имеет вид:

$$Z_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m \frac{\hat{Z}_k}{r_{ijk}^\beta}}{\sum_{k=1}^m \frac{1}{r_{ijk}^\beta}},$$

где Z_{ij} – интерполяционное значение для (i,j)-го узла сетки; \hat{Z}_k – значение данных измерений в k-ой точке наблюдений; r_{ijk} – расстояние между (i,j)-ым узлом и k-ой точкой наблюдений; $m \equiv m(i, j)$ – число точек, учитывающихся при вычислении значения в (i,j)-ом узле; β – степень обратного расстояния.

Представленный в этом разделе метод реализован в Комплексе программ, разработанном с целью решения задачи обработки и интерполяции данных, поступающих с буев ARGO, для интерполяции данных наблюдений по «горизонтальным переменным».

Результаты численных экспериментов

На основе описанных выше алгоритмов, которые составляют теоретическую основу разработанного авторами программного обеспечения, реализованы методы и процедуры обработки и интерполяции данных наблюдений, поступающих с буев ARGO. Задача осуществления процесса обработки и интерполяции данных делится на две большие подзадачи. Первая – интерполяция данных наблюдений по вертикальной переменной (глубине), для построения вертикальных профилей температуры и солёности. Вторая – интерполяция по «горизонтальной плоскости по широте и долготе, – для построения полей температуры и солёности на заданных уровнях (глубинах).

Данные каждой буйковой станции ARGO представляют собой набор данных по вертикальной переменной (по глубине). Задача интерполяции данных наблюдений с буев ARGO по глубине заключается в интерполяции данных, разбросанных хаотически по всей глубине измерений, на заданные уровни. Более полная информация о профилях характеристик, получаемых с буев ARGO, и их обработке представлена в работе [6].

Данные наблюдений, поставляемые с буев ARGO, представляют собой полезную информацию в плане получения оперативных сведений о состоянии вод Мирового океана. Сравнительно малое количество данных с буйковых станций и их хаотическое распределение по пространству усложняют задачу моделирования полной и точной картины поведения характеристик вод в океане. Тем не менее, хочется иметь представление об измеряемых величинах не только в точках измерений буюми, но и по всему Мировому океану. В связи с этим, возникает задача об интерполяции данных наблюдений по «горизонтальной плоскости» (по широте и долготе).

Для иллюстрации работы метода, применяющегося для обработки и интерполяции по широте и долготе данных наблюдений, в данном разделе представлены некоторые ре-

зультаты. Численные эксперименты проводились на данных наблюдений буев ARGO на Мировом океане за 2008 год. С помощью специально реализованного Комплекса программ были обработаны данные наблюдений и построены поля температур и солёности на акватории Мирового океана. В качестве примера на Рис.1а, Рис.2а, Рис.3а приведены поля температуры вод океана на сетке с шагом 1° по долготе и 0.5° по широте на различных глубинах. Для сравнения на Рис.1б, Рис.2б и Рис.3б приведены среднемесячные поля температуры по данным из электронного атласа Мирового океана С. Левитуса [7] на тех же глубинах (шаги сетки 1° по долготе и 1° по широте).

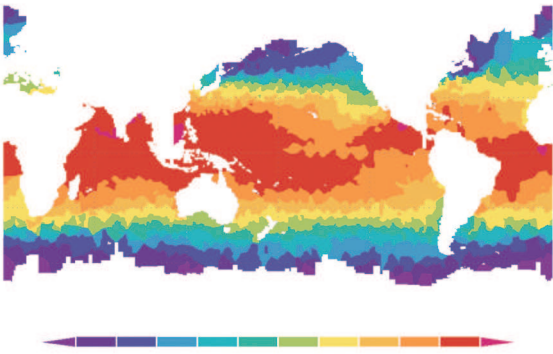


Рис. 1а. Поле температур по данным буев ARGO за первые десять дней мая 2008 года, глубина 10 метров, пространственное разрешение $1.0^\circ \times 0.5^\circ$

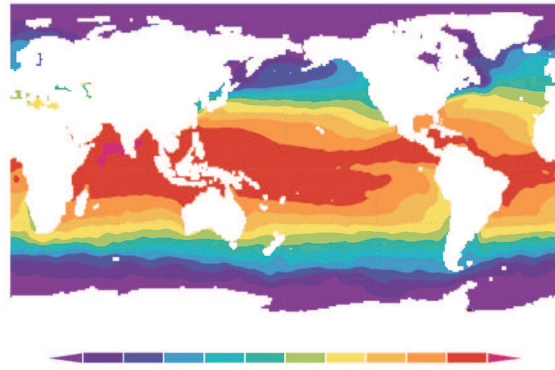


Рис. 1б. Поле температур по данным С. Левитуса за май, глубина 10 метров, пространственное разрешение $1.0^\circ \times 1.0^\circ$

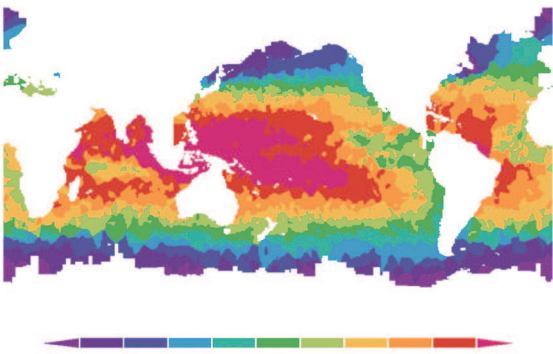


Рис. 2а. Поле температур по данным буев ARGO за первые десять дней мая 2008 года, глубина 75 метров, пространственное разрешение $1.0^\circ \times 0.5^\circ$

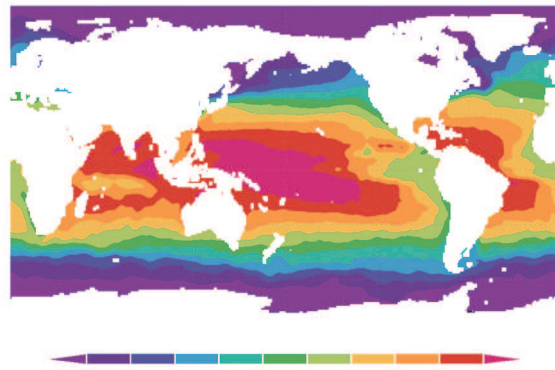


Рис. 2б. Поле температур по данным С. Левитуса за май, глубина 75 метров, пространственное разрешение $1.0^\circ \times 1.0^\circ$

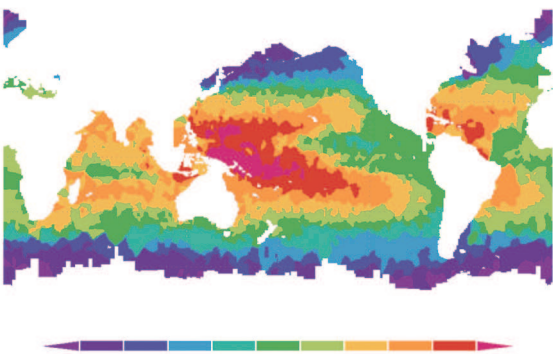


Рис. 3а. Поле температур по данным буев ARGO за первые десять дней мая 2008 года, глубина 125 метров, пространственное разрешение $1.0^\circ \times 0.5^\circ$

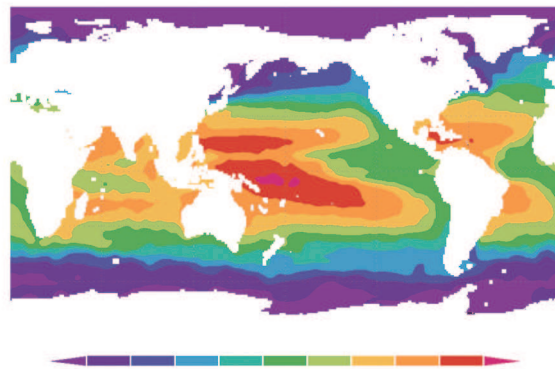


Рис. 3б. Поле температур по данным С. Левитуса за май, глубина 125 метров, пространственное разрешение $1.0^\circ \times 1.0^\circ$

Также в качестве примера на Рис.4а, Рис.5а, Рис.6а приведены поля солёности на сетке 2.5° по долготе и 2.0° по широте на различных глубинах. И аналогично для сравнения представлены поля солёности по данным электронного атласа Мирового океана С. Левитуса (Рис.5б, Рис.5б, Рис.6б).

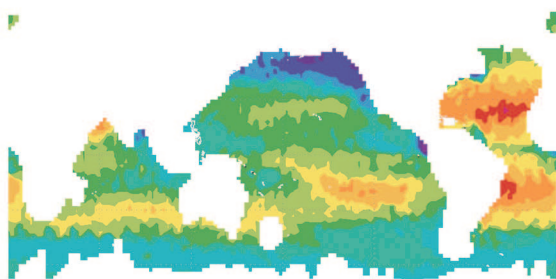


Рис. 4а. Поле солёности по данным буев ARGO за май 2008 года, глубина 10 метров, пространственное разрешение $2.5^\circ \times 2.0^\circ$

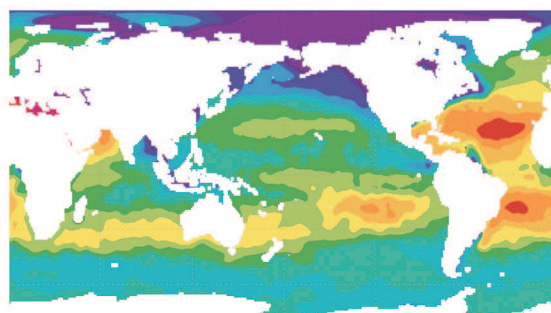


Рис. 4б. Поле солёности по данным С. Левитуса за май, глубина 10 метров, пространственное разрешение $1.0^\circ \times 1.0^\circ$

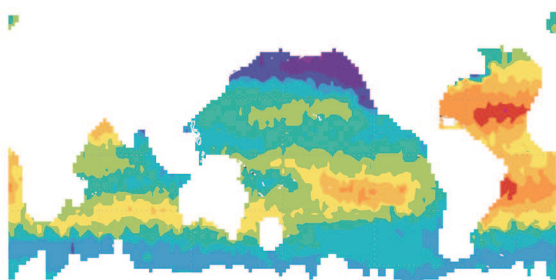


Рис. 5а. Поле солёности по данным буев ARGO за май 2008 года, глубина 50 метров, пространственное разрешение $2.5^\circ \times 2.0^\circ$

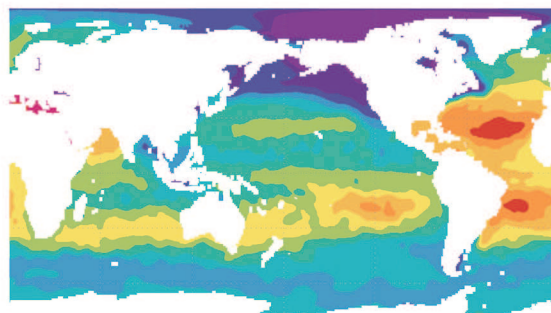


Рис. 5б. Поле солёности по данным С. Левитуса за май, глубина 50 метров, пространственное разрешение $1.0^\circ \times 1.0^\circ$

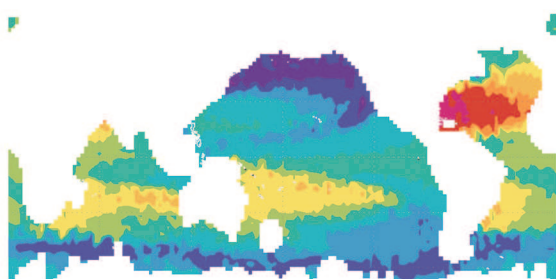


Рис. 6а. Поле солёности по данным буев ARGO за май 2008 года, глубина 250 метров, пространственное разрешение $2.5^\circ \times 2.0^\circ$

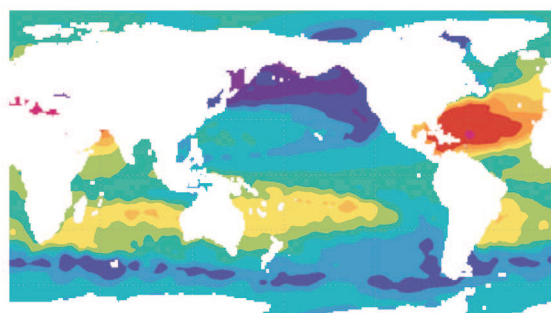


Рис. 6б. Поле солёности по данным С. Левитуса за май, глубина 250 метров, пространственное разрешение $1.0^\circ \times 1.0^\circ$

Из рисунков видно, что поля построены вполне правдоподобные, следует отметить, что точность измерений буев ARGO значительно выше точности спутниковых измерений и, в отличие от последних, буи представляют информацию о поведении характеристик на глубине Мирового океана и могут использоваться для построения полей характеристик вод океана.

Разработанный Комплекс программ может применяться специально для обработки, интерполяции и экстраполяции данных, передающихся с буйковых станций. Поля температур за различные года и интервалы времени (каждый месяц или каждые 10 дней) (также как и за 2008 год, 25 уровней, глубины от 10 до 1500 метров) могут быть использованы, например, для усвоения моделью (для дальнейшей её корректировки), восстановления начальных данных или для других исследовательских целей.

В заключение, авторы выражают благодарности Агошкову В.И. за постоянное внимание к работе и ценные замечания, Залесному В.Б. за консультации, Лавровой О.Ю. за поддержку работы и Реснянскому Ю.Д. за предоставленные данные буев ARGO.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 09-01-12029-ОФИ-м, 10-05-01123-а, 10-01-00806-а).

Литература

1. *Агошков В.И.* Методы оптимального управления и сопряженных уравнений в задачах математической физики// - М.: ИВМ РАН, 2003. 258 с.
2. *Лебедев С.А., Агошков В.И.* Структура базы данных «Мировой океан – ИВМ РАН» Института вычислительной математики Российской академии наук// - Сб.: Материалы международной конференции «50-летие Международного геофизического года и Электронный геофизический год», ГЦ РАН, Москва, 2007, doi:10.2205/2007-IGY50conf.
3. *Roemmich D., Owens W.* The Argo Project: Global ocean observations for understanding and prediction of climate variability// *Oceanography*, Vol. 13, No. 2/2000, pp. 45-50.
4. *Демидович Б.П., Марон И.А.* Основы вычислительной математики// – М.: Наука, 1970. 664с.
5. *Davis J.C.* Statistics and Data Analysis in Geology// – John Wiley and Sons, New York, 1986. 656 pp.
6. *Захарова Н.Б., Лебедев С.А.* Алгоритмы интерполяции и экстраполяции оперативных геофизических данных наблюдений, Сборник статей молодых ученых факультета ВМиК МГУ// – М.: Издательский отдел факультета ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова; МАКС Пресс, 2009. - Выпуск 6, 177-188 с.
7. *Stephens C., Antonov J.I., Boyer T.P., Conkright M.E., Locarnini R.A., O'Brien T.D. and Garcia H.E.* World Ocean Atlas 2001, Volume 1: Temperature. /Ed. S. Levitus. – NOAA Atlas NESDIS 49. – U.S. Government Printing Office, Wash., D.C., 2002. 176 pp.

Interpolation of on-line data of the ARGO buoy system for data assimilation in the World ocean circulation model

N.B. Zakharova¹, S.A. Lebedev²

¹*Institute of Numerical Mathematics, RAS
119333 Moscow, Gubkina st. 8.*

E-mail: zakharova_nb@inm.ras.ru

²*Geophysical center of RAS
119296 Moscow, Molodezhnaya st. 3.*

E-mail: lebedev@wdcbr.ru.

The basic parameters of the World ocean state are temperature, salinity, velocity and direction of currents, sea water level, content of oxygen etc. For many years these parameters were measured by traditional contact measurement methods that lacked efficiency and the ability to measure temperature much beneath the surface. The ARGO buoy system involves both contact and distance ocean parameter measurement methods. Temperature and salinity profiles are measured by contact methods, but data communication is made by satellites. So the ARGO buoy system has added efficiency and greater reliability to ocean parameter measurements.

In the meteorology and oceanology measurement data of basic physical atmosphere and ocean fields are assimilated in mathematical models for the purpose of finding initial conditions (or other parameters of the model) or more adequate reproduction of the real physical processes and their forecast.

Interpolation and extrapolation methods of input information are important among numerical mathematics methods used for solving the data assimilation problems. In this connection the development of such algorithms and programs based on up-to-date approaches and taken into account recent scientific results in that way is a timely problem.

Keywords: interpolation, observation data, ARGO buoy system, temperature, salinity, World ocean.