

УДК 528.8.04

Л. Ф. Даргейко, В. И. Лялько, А. Д. Федоровский, Ю. В. Костюченко, И. Г. Артеменко

Науковий центр аерокосмічних досліджень землі Інституту геологічних наук
Національної академії наук України, Київ

ОПТИМИЗАЦИЯ ДАННЫХ ГЛОБАЛЬНОГО СПУТНИКОВОГО ГЕОМОНИТОРИНГА МЕТОДОМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ КОЛМОГОРОВА НА ПРИМЕРЕ ИЗМЕРЕНИЙ АТМОСФЕРНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ CO₂

Обґрунтовується використання методу просторової інтерполяції Колмогорова для оптимізації даних глобального супутникового геомоніторингу для розв'язування задач охорони навколишнього середовища, природокористування, контролю кліматичних і екологічних змін. Використовувалась карта глобального розподілу концентрації CO₂ в атмосфері, отримана сенсором SCIAMACHY супутника «Envisat-1».

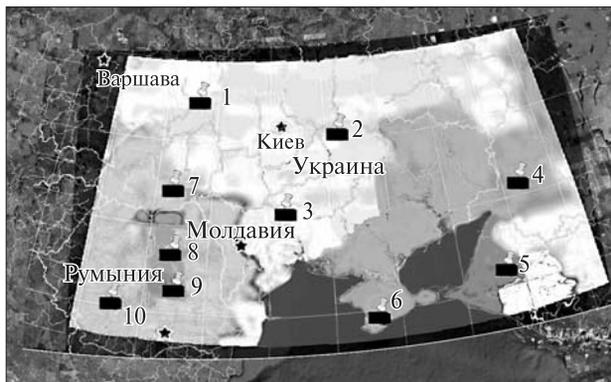
ВВЕДЕНИЕ

Основными проблемами, присущими системам наблюдения, являются нерегулярность сетки, по которой производятся измерения, и их относительно низкая разрешающая способность. Большинство моделей, применяемых для описания процессов на земной поверхности, требуют входных данных на регулярной географической сетке. Однако для наземных наблюдений это не всегда возможно. Проблема разрешающей способности в большей мере присуща дистанционным системам сбора информации. Модели, применяемые для анализа явлений и процессов на региональном, и тем более на локальном уровне, требуют входных данных с соответствующей плотностью, которую не всегда обеспечивают системы наблюдения. В такой ситуации, естественно, происходит постоянное совершенствование систем наблюдения, разработка новых методик сбора данных, развитие систем экспериментальных калибровочно-заверочных полигонов.

В то же время в последнее десятилетие активно разрабатываются методики предварительной

обработки данных наблюдений, которые позволили бы получать массивы данных в том виде, который оптимально отвечает потребностям моделирования. Как правило, эти методики базируются на использовании различного рода математических методов аппроксимации, интерполяции, экстраполяции и т. п. Совокупность таких методов, направленных на получение регуляризированных, равномерно распределенных в заданной системе координат данных получила в последние годы название даунскейлинга (downscaling) или «уменьшения размерности». Использование методов даунскейлинга позволяет получить из неравномерно распределенных данных низкого разрешения регуляризованные массивы данных, которые соответствуют заданным требованиям моделирования и минимизации ошибок, присущих системам наблюдения.

Особое значение методики даунскейлинга обретают в контексте анализа климатических изменений. В настоящее время наиболее актуальной проблемой в этой области является разработка моделей региональных изменений климатических показателей, что требует получения массивов входных данных, которые сейчас пока еще не могут быть предоставлены современными системами сбора информации. В первую очередь это касается данных о балансе атмосферных



Распределение атмосферного CO_2 над территорией Украины и в прилегающих регионах, созданной IUP на основе информации сенсора SCIAMACHY спутника «Envisat-1» (на фоне изображения земной поверхности по данным Google Планета Земля). Числами 1–10 обозначены исследуемые участки

концентраций парниковых газов, прежде всего — углекислого газа [2]. Современные системы глобального спутникового измерения атмосферных концентраций парниковых газов обеспечивают точность на уровне глобальных оценок около одного градуса дуги по поверхности Земли, в то время как региональные модели требуют точности от $30 \times 30'$ до $20 \times 20''$. В такой ситуации разработка корректных проблемно ориентированных методов предварительной обработки данных, в частности методов даунскейлинга, становится чрезвычайно актуальной задачей.

Известны различные методы детализации метеорологических полей: статистические, физические, динамические, динамико-статистические [1]. Все эти методы обладают своими достоинствами и недостатками. Например, методы интерполяции полиномом (увеличение степени полинома с увеличением количества точек) приводит к значительным скачкам приближающей функции, что может расходиться с поведением моделируемой функции. Интерполирование сплайнами имеет достаточно громоздкий вид результирующей функции, кроме того, объем сплайн коэффициентов иногда превышает объем исходных данных и т. д. [6]. Естественно, что выбор того или иного метода должен определяться поставленной задачей.

С нашей точки зрения для задач детализации данных содержания концентраций парниковых газов в атмосфере, полученных на основе глобального спутникового мониторинга, наиболее приемлемым является метод оптимальной пространственной интерполяции А. Н. Колмогорова. Этот метод относится к разряду статистических, которые основаны на корреляционных связях внутри исследуемых полей.

Цель данной работы заключается в обосновании методики оптимизации данных глобального спутникового геомониторинга методом пространственной интерполяции Колмогорова на примере детализации спутниковых данных атмосферных концентраций углекислого газа.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В Научном центре аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины (ЦАКИЗ) была исследована информативность различных данных спутникового наблюдения Земли для определения содержания CO_2 в атмосфере [5]. В результате было установлено, что для решения рассматриваемой задачи наиболее перспективной является регистрирующая система SCIAMACHY, установленная на спутнике «Envisat-1» и используемая для измерения глобального распределения парниковых газов в атмосфере. Принцип действия этой аппаратуры основан на регистрации излучения в отдельных диапазонах спектра, в частности в области линий поглощения CO_2 . Детальное описание прибора и принципов его функционирования содержится в работе [7].

С помощью указанной аппаратуры Институтом физики окружающей среды Бременского университета в Германии впервые были получены карты глобального распределения CO_2 в атмосфере [http://www.esa.int/esaCP/SEM1DUQ-08ZE_index_0.html]. Необходимо отметить, что именно IUP был главным исполнителем проекта SCIAMACHY и имел преимущественное право обработки данных глобальной концентрации парниковых газов в атмосфере [http://www.iup.uni-bremen.de/sciamachy/NIR_NADIR_WFM_DOAS/index.html]. Результаты этих исследований в виде фрагмента карты распределения ат-

мосферного CO₂ над территорией Украины и прилегающими регионами площадью 1521 × 886 км (рисунок) мы будем использовать в качестве исходной информации.

МЕТОД

Для оптимизации данных глобального спутникового геомониторинга предлагается использовать метод пространственной интерполяции Колмогорова, который состоит в том, что точка (участок), в которой определяется значение интерполируемой функции $f^*(x)$, взаимосвязана с базовыми точками f_i ($i = 1, \dots, n$) статистически. $f_1 = f_1(x_1), f_2 = f_2(x_2), \dots, f_n = f_n(x_n)$, n — количество точек, которые являются базовыми. При этом коэффициенты интерполяции $\lambda_1(x), \lambda_2(x), \dots, \lambda_n(x)$, в соответствии с принципом Колмогорова, в первом приближении пропорциональны коэффициентам корреляции между значениями функции в точке интерполяции и базовых точках. Таким образом, коэффициент взаимной корреляции учитывает влияние на значение функции в точке интерполяции значений функции во всех связанных с ней базовых точках. Для каждой исследуемой точки x вычисляются коэффициенты интерполяции $\lambda_1(x), \lambda_2(x), \dots, \lambda_n(x)$ и формируется линейная комбинация известных базовых значений функции f_i в известных точках с соответствующими коэффициентами интерполяции для каждой базовой точки [4]:

$$f^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x) f_i. \quad (1)$$

Ниже рассматривается последовательность поиска значений коэффициентов интерполяции λ_i для уравнения (1), которые обеспечат минимум математического ожидания квадрата погрешности решения уравнения (1) относительно истинного ее значения, то есть минимум величины [3]

$$\varepsilon^2 = E\{(f^*(x) - f(x))^2\} \quad (2)$$

в соответствии с принципом Колмогорова.

Подставим (1) в (2), получим

$$\varepsilon^2 = E\{f^2(x)\} - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i E\{f(x_i) f(x)\} +$$

$$\begin{aligned} & + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \lambda_i \lambda_k E\{f(x_i) f(x_k)\} = \\ & = \sigma_f^2 + \bar{f}^2 - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i B(x - x_i) + \\ & + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \lambda_i \lambda_k B(x_k - x_i), \end{aligned} \quad (3)$$

где σ_f^2 — дисперсия, \bar{f}^2 — математическое ожидание неизвестного значения интерполируемой функции.

Для каждой фиксированной точки x , для которой строится оценка функции $f^*(x)$, можно представить значения автокорреляционной функции (АКФ) $B(x - x_i)$ неизвестного значения f в виде линейной комбинации значений АКФ для известных точек $B(x_k - x_i)$:

$$B(x - x_i) = \sum_{k=1}^n \lambda_k^*(x) B(x_k - x_i), \quad (4)$$

где $\lambda_k^*(x)$ — набор коэффициентов, который (для каждого x отдельно) может быть определен из решения системы уравнений (4).

Система уравнений (4) может быть представлена в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} B(x - x_1) \\ B(x - x_2) \\ \vdots \\ B(x - x_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1^*(x) \\ \lambda_2^*(x) \\ \vdots \\ \lambda_n^*(x) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & B(x_2 - x_1) & \dots & B(x_n - x_1) \\ B(x_1 - x_2) & 1 & \dots & B(x_n - x_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B(x_1 - x_n) & B(x_2 - x_n) & \dots & 1 \end{pmatrix}.$$

В системе уравнений (4) коэффициентами являются значения корреляционной функции как функции расстояний между точками. $B(x_k - x_i)$ — матрица значений корреляционной функции между каждой парой точек, в которых известно значение функции (между каждой парой базовых точек), а $B(x - x_i)$ — вектор значений корреляционной функции для расстояний от точки, для которой оценивается значение функции до каждой из базовых точек.

После несложных преобразований уравнение (3) принимает вид

$$\varepsilon^2 = \sigma_f^2 + \bar{f}^2 - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \lambda_i^*(x) \lambda_k^*(x) B(x_k - x_i) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (\lambda_i - \lambda_i^*(x)) (\lambda_k - \lambda_k^*(x)) B(x_k - x_i). \quad (5)$$

Видно, что минимум ε^2 будет соответствовать такому выбору коэффициентов $\lambda_1(x), \lambda_2(x), \dots, \lambda_n(x)$, который обращает последнее слагаемое уравнения (5) в ноль, т. е. $\lambda_i = \lambda_i^*(x)$, где $\lambda_i^*(x)$ определяются (для каждого узла x) из решения системы уравнений (4). Система уравнений (4) позволяет определить все необходимые коэффициенты интерполяции, минимизирующие ошибку расчета значения $f^*(x)$.

Таким образом, после определения коэффициентов интерполяции искомые значения концентрации CO_2 в атмосфере исследуемых участков территории вычисляются по формуле (1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для атмосферы над территорией Украины и прилегающих регионов (рисунок) нами были выполнены расчеты ежемесячного распределения углекислого газа в период с января 2003 по декабрь 2005 гг. включительно. Полученные значения усреднялись по временным и пространственным параметрам. В исследованиях использовались максимальные значения CO_2 , приходящиеся на июль месяц. Далее на полученной карте распределения CO_2 в атмосфере исследуемой территории было выделено 10 базовых точек-участков с соответствующими координатами и известными

Значения концентрации n CO_2 в атмосфере для 10 выбранных участков

Номер участка	φ	λ	$n_{\text{баз}}$	$n_{\text{выч}}$
1	51°16'	27°21'	382	378
2	50°09'	33°05'	381	383
3	48°00'	30°33'	382	381
4	48°06'	40°50'	385	380
5	45°38'	39°40'	384	383
6	44°50'	34°10'	385	388
7	48°45'	25°49'	380	381
8	46°55'	25°49'	379	379
9	45°53'	25°54'	378	376
10	45°31'	23°15'	381	378

значениями концентрации CO_2 в атмосфере. Для апробации метода интерполяции Колмогорова из выделенных участков было выбрано 10 (таблица), которые использовались для дальнейшего эксперимента. Значения содержания CO_2 на оставшихся 90 базовых участках использовались как эталонные для вычисления и интерполяции содержания CO_2 на 10 исследуемых участках. При этом ранее полученные значения концентрации CO_2 в атмосфере выбранных 10 участков играли роль «заверочных» для оценки достоверности результатов интерполяции.

В системе уравнений оптимальной интерполяции (4) используются коэффициенты корреляции между участком, куда выполняется интерполяция, и всеми эталонными участками, а также коэффициенты корреляции для соответствующих расстояний между эталонными участками. В соответствии с этим вначале вычислялись значения коэффициентов пространственной корреляции поля CO_2 для каждой пары эталонных участков, а затем попарно определялись значения коэффициентов пространственной корреляции для каждого из 10 интерполируемых участков со всеми 90 эталонными участками.

Исходя из особенностей атмосферных процессов, значения корреляционной функции оценивались не числом, а некоторой кривой, представляющей собой зависимость коэффициента корреляции от расстояния. В этом случае для определения коэффициента корреляции между двумя участками измерялось расстояние между ними, и на графике находилось значение корреляционной функции, соответствующее этому расстоянию.

Для моделирования содержания углекислого газа в атмосфере на основе изложенной теории была разработана специальная программа, которая использовалась в данной работе. В качестве базовых участков было выделено четыре различных набора по 100 участков, при этом в каждом наборе для интерполяции по методу Колмогорова сохранялись одни и те же 10 исследуемых участков. Вычисленные значения содержания CO_2 в атмосфере для выбранных 10 участков по всем четырем вариантам отличаются от «заверочных»

значений не более чем на 10 %, что вполне приемлемо для оперативного мониторинга содержания парниковых газов в атмосфере. Вычисленные значения $n_{\text{выч}}$ наиболее близкие к «заверочным» значениям $n_{\text{баз}}$, приведены в таблице.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования подтвердили возможность использования метода пространственной интерполяции Колмогорова для оптимизации данных глобального спутникового гео мониторинга.

1. *Заринов Р. Б.* Обзор современных методов повышения детализации метеорологических полей // *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата.* — 2010. — № 1. — С. 1—11.
2. *Изменения земных систем в Восточной Европе* / Отв. ред. В. И. Лялько. — Киев, 2010. — 582 с.
3. *Колмогоров А. Н.* Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей // *Изв. АН СССР. Сер. матем.* — 1941. — № 5. — С. 3—11.
4. *Колмогоров А. Н.* Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // *Доклады академии наук СССР.* — 1941. — 30, № 4. — С. 299—305.

5. *Лялько В. И., Артеменко И. Г., Жолобак Г. М. та ін.* Дослідження впливу змін CO_2 та CH_4 в атмосфері на клімат за матеріалами космічних зйомок // *Геолог. журн.* — 2007. — № 4. — С. 7—16.
6. *Масюков В. В., Шленкин В. И., Федоров В. В., Масюков А. В.* Методика об'єктивного порівняння методів інтерполяції // *Геофізический вестник.* — 2005. — № 1. — С. 17—21.
7. *Buchwitz M. R. de Beek, Noël S., et al.* Atmospheric carbon gases retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: version 0.5 CO and CH_4 and impact of calibration improvements on CO_2 retrieval // *Atmos. Chem. Phys.* — 2006. — N 6. — P. 2727—2751.

Надійшла до редакції 08.11.10

*L. F. Dargeyko, V. I. Lyalko, A. D. Fedorovsky,
Yu. V. Kostyuchenko, I. G. Artemenko*

GLOBAL SATELLITE OBSERVATIONAL DATA OPTIMIZATION USING KOLMOGOROV'S SPATIAL INTERPOLATION METHOD FOR MEASUREMENTS OF THE ATMOSPHERIC CO_2 CONCENTRATION

We substantiate the application of Kolmogorov's spatial interpolation method for the optimization of global satellite observational data for the environment and resource monitoring as well as for climate and ecological change control. As the initial data the global distribution of the atmospheric CO_2 concentration obtained with the ENVISAT-1/SCIAMACHY sensor are used.