

АНАМОРФОЗЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

© **Л.Ф. Сердюцкая**, Е.А. Бахмацкий, А.В. Яцишин, 2008

Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины, Киев, Украина

The modeling of structural interconnection of several factors is taken into consideration in order to provide a visual analysis of spatially-distributed phenomena based on plane anamorphoses. A mathematical problem is set and an algorithm, which lies in the core of transformation of a pictured phenomenon, is described. Graphic texture of a programmed packet concerning anamorphosis formation is submitted. Pollutants emitted into the atmosphere on the territory of various Ukrainian regions could be taken as an example of the anamorphosis formation.

Постановка проблемы. Потребность взглянуть на мир с другой, непривычной точки зрения, не обусловленной устоявшимися канонами пространственных форм картографических изображений, для получения новых знаний, выводов и заключений давно привлекает специалистов, связанных с географическими, экологическими, математическими и другими методами исследования. Как известно, картография учит не только правильно строить изображения, но и передавать возникающие при этом искажения изображенных форм и размеров объектов. В работе [1] рассматриваются методы трансформации картографических изображений с целью построения так называемых анаморфоз. Анаморфоза – это трансформированное изображение явления, в основе которого лежит не топографическая метрика земной поверхности, а метрика картографируемого явления. Другими словами, анаморфозы можно определить как графические изображения, производные от традиционных карт, масштаб которых трансформируется и варьирует в зависимости от величины характеристики явлений на исходной карте [2].

Актуальность и основные понятия. Разработка специальных методов визуализации и средств математического моделирования систем с такими сложными многомерными характеристиками объектов, как экологические, актуальна для глубокого исследования структуры системы как единства компонентов и связей при одновременном учете большого количества разнородных параметров [3, 4].

В нашем многомерном мире возникает необходимость анализа и визуализации [5] варьирующих в пространстве и во времени характеристик сразу нескольких явлений. Задача существенно упрощается, если предположить, что одна из этих характеристик равномерно распределена, а остальные факторы свернуты в интегральные показатели [3, 4]. Последовательность анаморфоз передает временные изменения и их можно рас-

сматривать как отдельные временные срезы процесса или явления.

В работе [1] последовательно раскрываются секреты построения и использования анаморфоз в научной практике и повседневной жизни.

Среди анаморфированных изображений можно выделить линейные, площадные и объемные.

Линейные анаморфозы напоминают изображения графов, длина ребер которых позволяет изменять взаимную удаленность отображаемых объектов в зависимости от величин характеристик явлений, закладываемых в основу анаморфоз.

Площадные анаморфозы позволяют выравнять в пространстве какие-либо характеристики (например, плотность населения, территориальное распределения доходов, потребление некоторого продукта и т. д.), т.е. в этом случае площади изображаемых территориальных единиц становятся пропорциональными соответствующим им величинам закладываемого в основу анаморфозы показателя. При этом от анаморфированных изображений требуется максимально возможное сохранение взаимного расположения территориальных единиц, их формы и др.

Объемные анаморфозы дают возможность в сочетании с площадными анаморфозами и цветовыми градациями добавить еще один фактор к визуальному представлению характеристик явлений.

Наконец, можно указать на возможность создания анимированных анаморфированных изображений [2].

В данной статье численно реализован площадной алгоритм лаборатории Лоуренс Беркли построения анаморфоз, описанный в [1, 2], в среде программирования Delphi как отдельный модуль, встроенный в геоинформационную аналитическую систему визуализации данных медико-экологического мониторинга Украины (ГИАСВ МЭМУ) [6].

Математическая постановка задачи. Численные методы построения анаморфоз предназна-

ны в основном для реализации их на компьютере. Первая проблема, которая встречается при построении анаморфозы таким способом, состоит в методе описания исходной информации, т. е. исходного картографического изображения и плотности распределения рассматриваемого показателя. Существует несколько способов построения площадных анаморфоз, подробно описанных в работе [1].

Предположим исходное картографическое изображение на плоскости R^2 с декартовыми координатами (x, y) ; при этом его проекция является равновеликой, т. е. не учитываются возможные исходные искажения площадей и расстояний.

Площадная анаморфоза должна выравнять плотность индекса. Алгоритмы построения анаморфоз с помощью компьютера [1] исходят из описания плотности, которое основано на делении территории на ячейки. Для каждой из этих ячеек определяется суммарное значение показателя, и его плотность в пределах ячейки предполагается постоянной. Выбор ячеек может быть разным. В некоторых случаях их роль могут играть различные простые геометрические фигуры (треугольники, квадраты и др.), которые априори не связаны с существующими территориальными делениями (например, с административно-территориальным). В частности, они могут образовывать регулярное разбиение плоскости. В других случаях в качестве ячеек могут быть единицы существующего деления (типа административно-территориального). Иногда подобные алгоритмы могут использоваться в обоих случаях. Различия обычно состоят в деталях их реализации в виде компьютерных программ (например, в определении границ территориальных ячеек, выборе их центров и т. д.).

Альтернативой такому подходу к описанию плотности может быть ее определение с помощью аналитического выражения (например, с использованием тренда некоторого порядка). В таком случае можно пытаться искать анаморфозу и в форме аналитического выражения. Подобный подход пока не реализован.

Пусть D — область на плоскости R^2 (картографическое изображение территории), из которой должна быть построена анаморфоза. Распределение показателя описывается функцией плотности $p(z)$, определенной априори на части D плоскости ($z = (x, y)$ — точка плоскости R^2). Без потери общности можно предполагать, что функция плотности $p(z)$ определена на всей плоскости R^2 . Для этого можно принять ее равной постоянной вне области D . В качестве постоянной можно, например, взять среднее значение \bar{p} функции плотности $p(z)$ по области D .

Анаморфоза как преобразование исходного картографического изображения может быть задана

отображением $h: R^2 \rightarrow R^2$ ($h: (x, y) \rightarrow (u, v)$) или двумя функциями двух переменных $U(x, y)$ и $V(x, y)$:

$$u = U(x, y), v = V(x, y). \quad (1)$$

Это преобразование должно быть непрерывным и взаимно-однозначным, дифференцируемым, по крайней мере, почти всюду.

Коэффициент изменения площади преобразованием h около точки (x, y) равен значению якобиана

$$J = J(U, V) = \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x}$$

преобразования h в этой точке. Условие того, что преобразование (1) делает плотность $p(x, y)$ постоянной (и равной \bar{p}), может быть записано как $J(U, V) = p(x, y) / \bar{p}$.

Таким образом, задача нахождения анаморфозы сводится к задаче нахождения решения уравнения:

$$\frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{p(x, y)}{\bar{p}} \quad (2)$$

(для которого пара $[U(x, y), V(x, y)]$ определяет взаимно однозначное преобразование).

Построение анаморфоз с помощью компьютера встречает трудности в основном двух типов. Первые из них связаны с компьютерной реализацией алгоритма. Это задачи преобразования исходного картографического изображения в форму, приспособленную для компьютерной обработки, численной реализации алгоритма с контролем сохранения взаимной однозначности преобразованного картографического изображения, представления результатов расчетов в форме картографического изображения.

Второй класс трудностей связан с крайне важной проблемой. Она должна учитываться, в частности, при сравнении анаморфоз, полученных с использованием различных методов, так как условие выравнивания заданной плотности не определяет анаморфозу однозначно: существует бесконечно много преобразований, удовлетворяющих этому условию. Для двух неизвестных функций $U(x, y)$ и $V(x, y)$, задающих анаморфозу, имеется только одно уравнение (2). Построенное анаморфированное изображение без нарушения постоянства плотности может быть изменено применением любого преобразования, сохраняющего площадь, например:

- 1) $(u, v) \rightarrow (k \cdot u, k^{-1} \cdot v)$ (растяжение вдоль одной из осей и сжатие вдоль другой с тем же коэффициентом);
- 2) $(u, v) \rightarrow (u + f(v), v)$; (сдвиг горизонтальных прямых вдоль самих себя на различные расстояния);
- 3) $(u, v) \rightarrow (u, v + g(u))$ и т. д.

Возникает проблема выбора среди различных таких преобразований того (или тех), которое следует рассматривать как подходящее.

Алгоритм построения анаморфоз. В основе программного пакета построения площадных анаморфоз, созданного в ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины, лежит алгоритм, разработанный в лаборатории Лоуренса Беркли и детально описанный в работе [7], где полученные анаморфозы использовались для показа эпидемиологических данных (в основном — для территории г. Сан-Франциско).

Ниже дано краткое описание алгоритма, блок-схема работы которого показана на рис. 1.

Пусть \bar{p} — средняя плотность рассматриваемого показателя по всей территории. На каждом шаге алгоритма выбирается одна из рассматриваемых

территориальных ячеек, например A . Пусть p_A — плотность рассматриваемого показателя в ячейке A ; C_A — центр масс ячейки. Этот центр может лежать вне самой ячейки A ; если она имеет сложную форму (невыпуклая или неодносвязная). Затем определяется деформация h_A картографического изображения, которая сохраняет центр C_A , изменяет площадь ячейки A требуемым образом и не меняет площади остальных ячеек. Для того чтобы описать эту деформацию, возьмем систему полярных координат (r, θ) с центром в точке C_A . Пусть $Q_i = (r_i, \theta_i)$ — одна из точек шифрования картографического изображения. Обычно это одна из точек границ рассматриваемых ячеек (террито-

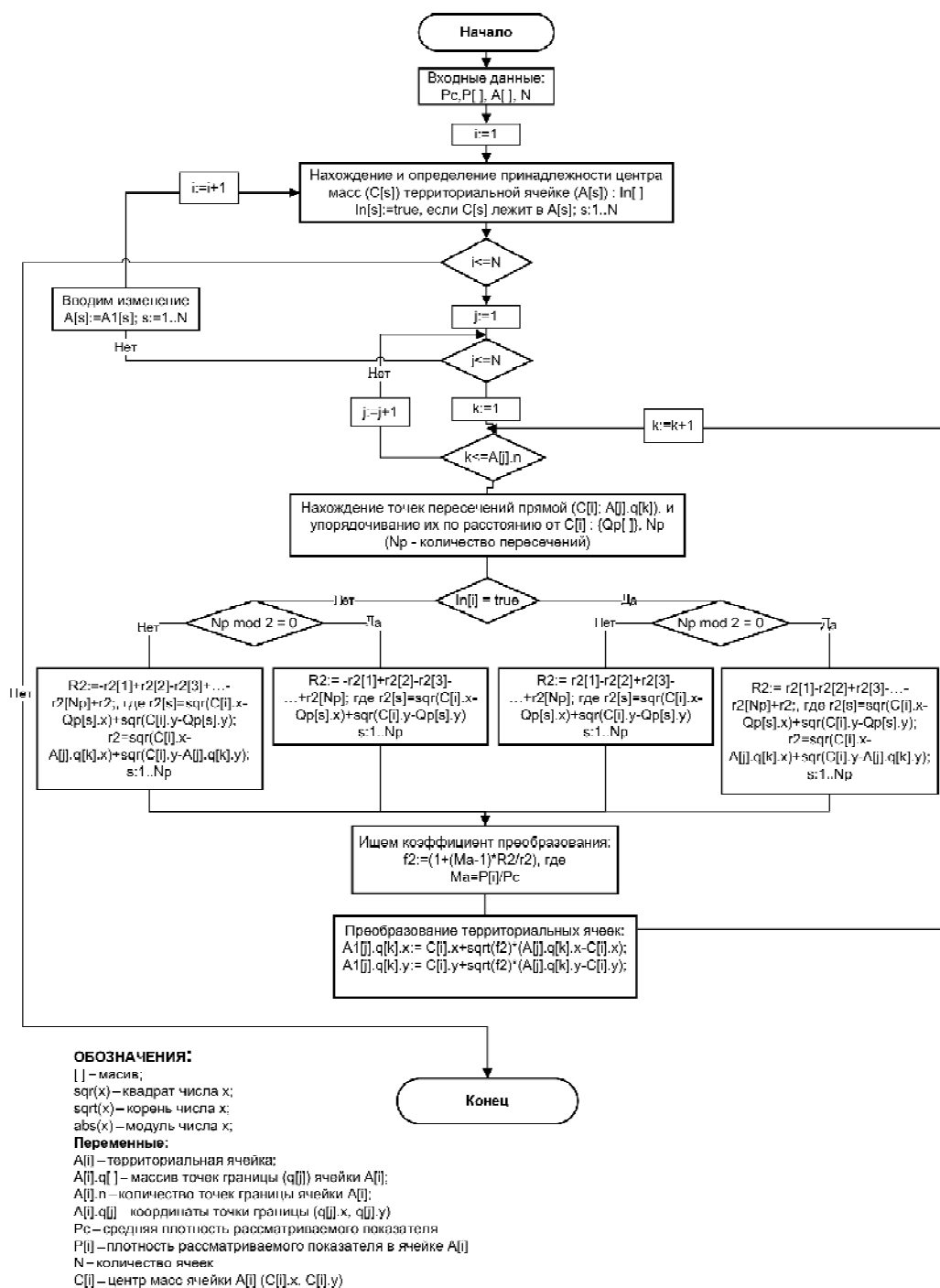


Рис. 1. Схема алгоритма площадных анаморфоз

риальных единиц), лежащая вне A , но необязательно: априори это может быть произвольная точка плоскости, в частности, какая-нибудь характерная точка плоскости, например, соответствующая большому городу. Рассмотрим прямую, соединяющую точки C_A и Q_p и пусть $Q_j = (r_j, \theta_j)$ ($j = 1, 2, \dots, n$; $\tau_1 < \tau_{1,2} < \dots < \tau_{i,n}$) – точки пересечения прямой с границей ячейки A . В простейшем случае (ячейка A имеет простую форму, например выпуклая, точка P_i лежит вне A) есть только одна точка пересечения ($n = 1$). Образ \tilde{Q}_i точки Q_i под действием деформации h_A определяется как (\tilde{r}_i, θ_i) , где \tilde{r}_i равно $f \cdot r_i$; $f^2 = (1 + (M_A - 1) \cdot R_i^2 / r_i^2)$, $M_A = p_A / p$; определение R_i (точнее, R_i^2) зависит от геометрии области A и расположения точки Q_i :

- если центр C_A лежит внутри A , а точка Q_i – снаружи (и, следовательно, n нечетно), то

$$R_i^2 = r_{i,1}^2 - r_{i,2}^2 + r_{i,3}^2 - \dots + r_{i,n}^2;$$

- если и центр C_A , и точка Q_i лежат внутри A (n четно), то

$$R_i^2 = r_{i,1}^2 - r_{i,2}^2 + r_{i,3}^2 - \dots - r_{i,n}^2 + r_i^2;$$

- если и центр C_A , и точка Q_i лежат вне A (n четно), то

$$R_i^2 = -r_{i,1}^2 + r_{i,2}^2 - r_{i,3}^2 + \dots + r_{i,n}^2;$$

- если центр C_A лежит вне A , а точка Q_i – внутри (n нечетно), то

$$R_i^2 = -r_{i,1}^2 + r_{i,2}^2 - r_{i,3}^2 + \dots - r_{i,n}^2 + r_i^2.$$

Эта деформация довольно слабо меняет форму выбранной ячейки (если ячейка выпуклая, то деформация действует на ней как гомотетия). Формы остальных ячеек меняются более существенно. Данная операция повторяется для второй ячейки, третьей и так далее вплоть до последней. В результате получается деформация, которая обладает требуемыми свойствами. Полученная деформация не делает плотность в точности постоянной, поскольку прямолинейные отрезки границ ячеек (между узлами цифрования) должны преобразовываться в кривые линии, однако их образы также заменяются прямолинейными отрезками. Преобразования, соответствующие областям, не принадлежащим рассматриваемой территории, но лежащим внутри нее (таким, как озера), зависят от формы, в которой хотелось бы видеть их. Можно их полностью сжать, приняв для них $M_A = 0$, либо можно сохранить их площади при $M_A = 1$. Описанный метод позволяет получить анаморфозы довольно хорошего качества. Реализация его относительно проста. Единственным относительно сложным элементом является вычисление пересечений прямых, соединяющих центр C_A ячейки A с точками Q_p с границей ячейки A .

Краткое описание программного пакета. Данный пакет предназначен для построения анаморфированных изображений, в некоторых случаях целесообразного для моделирования структуры взаимосвязей нескольких факторов с целью визуального анализа пространственно-распределенных явлений.

Головная форма математического пакета по построению площадных анаморфоз представлена на рис. 2. Стрелками обозначены следующие функции: 1 – окно наименования загруженной карты; 2 – открыть диалоговое окно загрузки списка оцифрованных карт; 3 – обновить изображение в закладке «Карта»; 4 – открыть меню «Настройки»; 5 – открыть диалоговое окно загрузки базы данных для анаморфирования; 6 – окно с названием загруженных данных, подлежащих анаморфированию; 7 – среднее значение данных для анаморфирования; 8 – провести анаморфирование; 9 – обновление изображения в закладке «Анаморфоза»; 10 – открыть окно «Зарисовка»; 11 – залить по данным для анаморфирования/ по дополнительным данным; 12 – открыть диалоговое окно загрузки дополнительных данных для заливки; 13 – окно названия загруженных дополнительных данных; 14 – залить/не залить карту и анаморфозу; 15 – таблица загруженных данных (возможно редактирование); 16 – включить/выключить «карандаш»; 17 – цвет «карандаша»; 18 – толщина «карандаша»; 19 – открыть диалоговое окно сохранения текущего изображения; 20 – сделать закладку с текущим изображением; 21 – удалить закладку; 22 – масштаб изображения; 23 – закладка с изображением изначальной карты; 24 – закладка с изображением анаморфированной карты;

На рис. 3 показано меню «Зарисовки», которое позволяет вводить нужное количество цветовых градаций для анализа, например, дополнительных данных, наложенных на анаморфированные. Стрелки обозначают: 1 – открывает меню выбора цвета для начала градации; 2 – открывает меню выбора цвета для конца градации; 3 – открывает меню выбора цвета фона карты; 4 – выбранные цвета; 5 – длина легенды в пикселах; 6 – ширина легенды в пикселах; 7 – делить/не делить легенду на участки; 8 – количество участков, на которые делится легенда; 9 – обновить изображение легенды; 10 – открыть диалоговое окно выбора шрифта надписей; 11 – цвет шрифта; 12 – цвет границы легенды; 13 – открыть меню выбора цвета границы легенды; 14 – показывать/не показывать легенду на карте; 15 – изображение легенды;

На рис. 4 показан пример работы пакета по построению анаморфозы на основе выбросов загрязняющих веществ в атмосферу по регионам Украины за 2001 год. Цветовыми градациями представлена ожидаемая продолжительность жизни (2001 год) мужского населения по регионам,

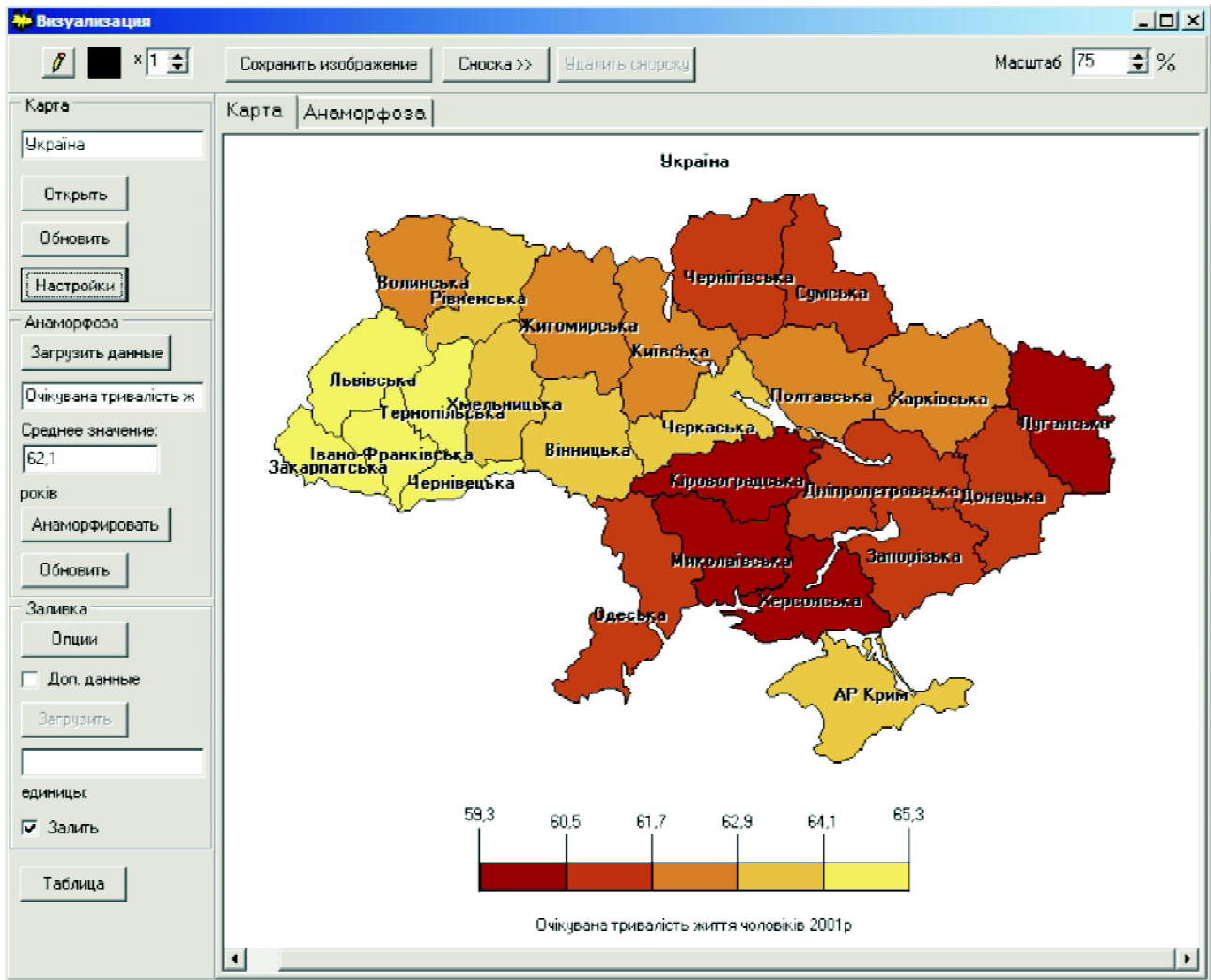


Рис. 2. Главная форма математического пакета по построению площадных анаморфоз

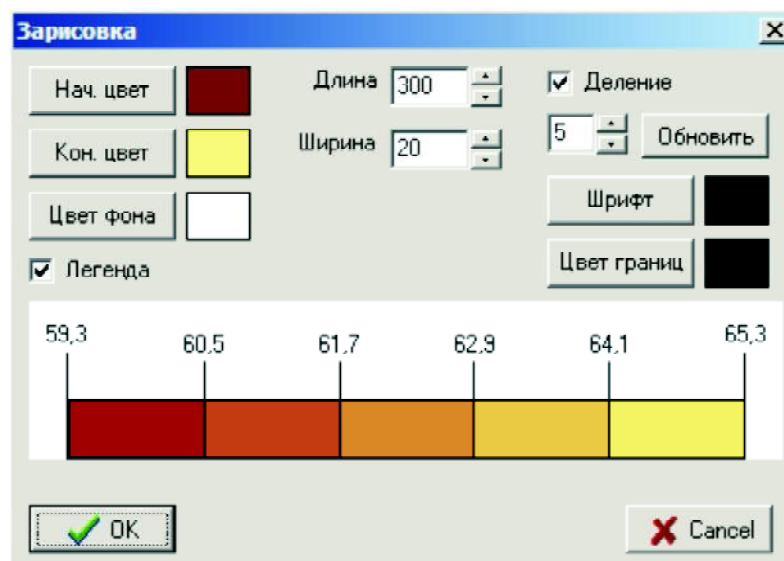


Рис. 3. Форма меню «Зарисовки»

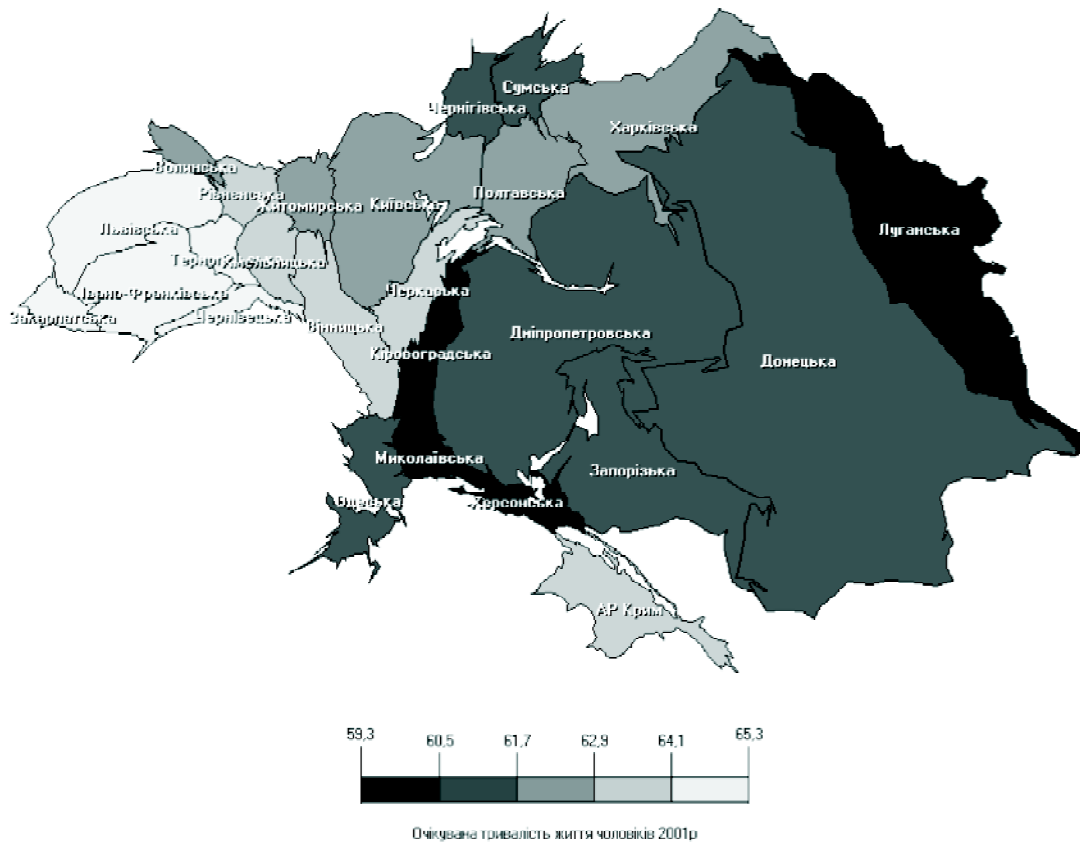


Рис. 4. Анаморфоза, створена на основі викидів забруднюючих речовин в атмосферу по регіонах України за 2001 г. Цветовая градація – по очікуваній тривалості життя чоловічого населення

нанесена на анаморфозу. Нанеся на отриману анаморфозу зв'язані з чисельністю населення характеристики, наприклад, забезпеченість продуктами харчування, медичними койками, навчальними закладами і пр., можна отримати більш правильне враження про їх дефіцит, віднесені не до території, як на звичайних картах, а більш коректно – по відношенню до проживаючого в них населення.

Висновки.

1. Розроблена початкова версія програмного математичного пакета побудови площинних анаморфированих зображень. Пакет містить оцифровані карти регіонів України і районів Києва.
2. Створення анаморфированих зображень в багатьох випадках цілком обґрунтовано для моделювання структури взаємозв'язів декількох факторів з метою візуального аналізу просторово-розподілених явищ.
3. Проведена серія розрахунків анаморфоз по регіонах України (атмосферне забруднення, очікувана тривалість життя для чоловіків і жінок, дитяча смертність, пожежна безпека і т. д.) і по районах Києва окремо.

Перспективи. Практична цілком обґрунтована і перспективи використання анаморфоз заключається в наступному.

1. Візуальне представлення неочевидних фактів з можливістю побачити деякі приховані природно-географічні закономірності.
2. Використання анаморфоз для оптимізації розміщення мережі навчальних закладів, лікарень, установ обслуговування, які в вирівненому демографічному просторі в загальному випадку повинні розподілятися рівномірно.
3. Наглядний аналіз взаємозв'язів між явищами на фоні визначаючих їх характеристик, закладених в основу проекції.
4. Прогноз розвитку дифузійних процесів, що відбуваються в неоднорідній середі. Якщо протидія розвитку дифузії трансформувати в однорідну по досліджуваній території, то ймовірне розвиток дифузії буде відбуватися концентрично від вихідної точки. Завдяки цьому можна передбачити її розвиток в часі і легко представити в графічній формі. В результаті залишається лише повернути зображення до початкового вигляду, щоб отримати ізолінії етапності поширення дифузії в неоднорідній середі. Анаморфози можуть бути використані для вивчення дифузії забруднень в атмосфері і гідросфері.

Створення анаморфированих зображень в багатьох випадках цілком обґрунтовано для моделювання

ния структуры взаимосвязей и динамики эколого-географических явлений. Мы надеемся, что анаморфированные изображения привлекут внимание географов и экологов разных специальностей и станут не экстравагантной иллюстрацией, а инструментом настоящего пространственного анализа. Эта область может оказаться неподнятой научной целиной, которая при умелой ее обработке даст богатый урожай

1. *Гусейн-Заде С.М., Тикунев В.С.* Анаморфозы: что это такое? – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 168 с.
2. *Тикунев В.С.* Моделирование в картографии. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. – 405 с.
3. *Сердюцкая Л.Ф.* Математическое моделирование влияния техногенных нагрузок на экологические системы: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук по спец. 01.05.02. – Киев, 2004. – 42 с.
4. *Сердюцкая Л.Ф.* Математико-картографическое моделирование в задачах экологии // Геоинформатика. – 2005. – № 2. – С. 59–75.
5. *Суворов А.К.* Методология картографических анаморфоз // www-geology.univer.kharkov.ua/tik_rus.htm
6. *Serdjutskaia L.F., Yacishin A.V., Zuhin Y.V., Vasilyev D.G.* Geoinformation analytical system of visualization of the medicoecological monitoring of Ukraine // Материалы междунар. конф. "InterCarto11", Ставрополь – Домбай – Будапешт, 25 сент. – 3 окт. 2005 г. – С. 303–307.
7. *Selvin S., Merrill D., Sacks S., Wong L., Bedell L., Schulman J.* Transformations of maps to investigate clusters of disease. – Lawrence Berkeley Laboratory, Univ. of California, 1984. – 33 p.

Поступила в редакцию 14.02.2007 г.