

С.М. КОШЕЛЬ
МГУ им. Ломоносова
Географический факультет
Кафедра картографии и геоинформатики
skoshel@geogr.msu.ru

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ГЕОПОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА "МАГ"¹

Одно из приоритетных направлений в научных исследованиях лаборатории автоматизации кафедры картографии и геоинформатики с момента ее создания составляет разработка и совершенствование алгоритмов цифрового моделирования и анализа геополей. Начало этому положено в 80-х годах в трудах С. Н. Сербенюка, Ю. В. Свентэка, В. С. Тикунова, Б. А. Новаковского и других. Полученный опыт обобщен в работах [6,7,11,13,14,19], где описаны некоторые методы создания цифровых моделей геополей, способы их обработки для получения производных моделей (углы наклона, экспозиция склонов и др.), методы построения изолинейных карт по цифровым моделям на регулярной сетке. Тогда же С.Н. Сербенюком было введено понятие "географическое поле" и сформулировано определение цифровой модели геополя, ставшее в настоящее время уже классическим: "Под цифровой моделью какого-то географического объекта мы будем понимать определенную форму представления исходных данных и способ их структурного описания, позволяющий "вычислять" (восстанавливать) объект путем интерполяции, аппроксимации или экстраполяции"[7]. Отметим, что работы в этой области велись и в практическом плане, было создано программное обеспечение для компьютеров Grafixi, Pericolor, MicroVAX, которое активно использовалось при решении исследовательских и практических задач. В частности, в 1986 году была создана серия оперативных карт радиационной обстановки в районе Чернобыльской АЭС, а в 1987-88 гг. была построена трехмерная цифровая модель поверхности Фобоса, признанная лучшей среди

аналогичных работ других научных учреждений.

К сожалению, данное программное обеспечение не могло быть широко использовано из-за высокой стоимости и малой распространенности перечисленных выше компьютерных систем. С появлением первых персональных компьютеров С.Н. Сербенюк поставил перед сотрудниками лаборатории задачу обобщить накопленный опыт в области моделирования и анализа геополей и создать универсальное программное обеспечение, которым могли бы пользоваться специалисты географы и негеографы. В результате был разработан пакет программ "МАГ" [12], название которого расшифровывается как "Моделирование и Анализ в Геонауках". В первую версию пакета вошли программы для моделирования геополей по данным в нерегулярно расположенных точках методами D-сплайнов (сплайны Дюшона), средневзвешенной интерполяции (включая метод обратных расстояний), полиномиальной интерполяции на основе триангуляции Делоне, кусочно-полиномиального сглаживания. Для пересчета цифровых моделей с сетки на сетку другой размерности можно было использовать средневзвешенную интерполяцию, бикубические сплайны и B-сплайны, а также билинейные функции. Кроме того, в пакет была включена возможность вычисления моделей углов наклона и экспозиции склонов. В блоке графического отображения построенных цифровых моделей были реализованы способы изолиний и послойной окраски, а также построения блок-диаграмм (проекций поверхности). Дополнительно была предусмотрена возможность получения профиля поверхности вдоль произвольной кривой и создания схематической карты градиентного поля способом, предложенным С.Н. Сербенюком, где величина уклона показывается не длиной стрелки, а ее толщиной. Необходимо отметить, что пакет базировался на библиотеке подпрограмм "МАГ", но многие возможности, реализованные в библиотеке, в силу различных причин не были включены в пользовательский интерфейс пакета. К таким возможностям относятся построение линий тока и кратчайших путей на поверхности, определение зон видимости из заданной точки по цифровой модели рельефа с учетом кривизны Земли, вычисление длин линий на поверх-

¹ Кошель С.М. Цифровое моделирование и анализ геополей с помощью пакета "МАГ" // Взаимодействие картографии и геоинформатики (ред. А.М. Берлянт, О.Р. Мусин). – М.: Научный мир, 2000. – с. 41-49.

ности, вычисление площадей и объемов внутри заданного контура. Не вошла в пакет и программа моделирования на топологически регулярных сетках (в некоторой специальной метрике на плоскости), которая с успехом применялась при составлении батиметрических карт рельефа дна русел рек [4].

Почти сразу же пакет "МАГ" нашел применение в такой казалось бы далекой от географии области, как генетика. Совместно с Институтом генетики РАН был разработан программный комплекс "GGMAG" (МАГ для геногеографии), предназначенный для составления генетического атласа России и сопредельных стран. Дополнительно к базовому комплексу "МАГ" в этот комплекс вошли практически все методы анализа карт, описанные в монографии [2].

С созданием первой версии пакета работы над его развитием и усовершенствованием не прекратились и продолжают в настоящее время. Позднее в пакет вошла программа построения цифровых моделей геополей по нерегулярно расположенным опорным точкам методом кригинга, включая вариографию (построение экспериментальной вариограммы по исходным данным и выбор наиболее подходящей модельной вариограммы из семи возможных вариантов). Кроме того, были добавлены методы интерполяции по точкам с использованием так называемых "радиальных" функций [16], частными случаями которых являются Д-сплайны и мультиквадриковые аппроксимации, причем в качестве трендовой составляющей используются не только полиномы, но и произвольные наборы линейно-независимых базисных функций от двух переменных, в том числе, заданных в виде цифровой модели на сетке. Например, при моделировании показателей, тесно связанных с рельефом, в качестве тренда можно использовать ранее построенную цифровую модель рельефа. Аналогичная возможность включена и в метод кригинга.

Существенным дополнением к пакету можно считать и добавление в него методов аппроксимации (средневзвешенной, аппроксимации с помощью радиальных функций, кригинга с ненулевым эффектом самородка). Толчком к этому послужил большой опыт по созданию карт полей геохимического загрязнения городов и других территорий (с некоторыми из

последних работ в этой области с использованием пакета "МАГ" можно познакомиться в [5, 15]). Выяснилось, что из-за существенной случайной ошибки измерений (обычно с гауссовским распределением) при получении исходных данных (концентрация загрязняющих веществ в пробах) использование интерполяционных методов зачастую приводит к неудовлетворительной с точки зрения специалистов модели. В таких случаях применение сглаживающих методов позволяет существенно улучшить результат. Присутствие измерительной ошибки в данных обычно хорошо видно на экспериментальных вариограммах, графики которых при приближении расстояния к нулю стремятся в этом случае к некоторой константе, отличной от нуля (эффект самородка). Часто именно эта константа и является дисперсией ошибки в исходных данных. Однако бывают ситуации, когда экспериментальная вариограмма не растет с увеличением расстояния, а колеблется вокруг уровня общей дисперсии данных. Это означает, что между значениями в близких точках нет никакой связи и названные выше методы моделирования, вообще говоря, неправомерны, поскольку все они основаны на использовании для интерполяции значений в соседних точках. Возможно, наилучшим выходом в таких случаях может быть применение кусочно-полиномиальной аппроксимации, подробно описанной в [11].

Заслуживает внимания опыт использования пакета "МАГ" при создании цифровых моделей рельефа по данным, полученным фотограмметрическим способом по наземным и аэроснимкам. Несмотря на строгую регулярность цифрования стереопар, плановое положение опорных точек после пересчета заметно отклоняется от регулярной сетки, особенно для наземных снимков, что ведет к необходимости использования для восстановления рельефа методов моделирования по нерегулярно расположенным опорным точкам. Наиболее подходящими в данном случае оказались методы радиальных функций и кригинга с индивидуальным подбором параметров для каждого конкретного участка. Подробнее методика создания цифровых фотограмметрических моделей рельефа изложена в работах [8 -10]. Кроме того, в работе [9] рассматривается опыт применения цифровой модели кривизны поверхно-

сти (точнее, кривизны горизонтальных сечений) для создания карт максимальных высот снежного покрова.

В середине 90-х в пакет "МАГ" была включена программа для моделирования геополей по данным в виде изолиний (включая и отдельные точки, рассматриваемые как ломаные с нулевым количеством звеньев), основанная на модификации алгоритма, изложенного в [18]. Ранее этот алгоритм был реализован на системе "Pericolor-2000" для растрового задания изолиний и с успехом применялся при моделировании рельефа. Идея алгоритма состоит в следующем. Для каждого узла сетки определяются расстояния до двух ближайших изолиний разного уровня, причем они вычисляются вдоль кривых, не пересекающих изолинии. Значение в узле сетки получается с помощью линейной интерполяции по двум найденным расстояниям и значениям уровней. Главное достоинство метода – быстрый волновой итерационный алгоритм вычисления расстояний одновременно для всех узлов сетки. В тех узлах, где удается найти только одну ближайшую изолинию (в областях вокруг локальных экстремумов и граничных областях), принимается значение уровня этой изолинии, то есть поверхность в таких областях является горизонтальной плоскостью. Во избежание таких случаев приходится вводить в исходные данные дополнительные точки с подходящими значениями, причем это помогает только в случае локальных экстремумов, в граничных же областях достичь удовлетворительного результата не удастся. Для пакета "МАГ" была разработана модификация этого алгоритма, позволяющая использовать изолинии в векторном виде и вычислять значения на произвольных прямоугольных сетках. Кроме того, была решена и задача избавления от "плоских" участков, что позволяет автоматически моделировать поверхность вокруг локальных экстремумов и в граничных областях разумным образом, не вводя дополнительных точек [17]. Отметим, что изолинии, построенные по такой цифровой модели, практически совпадают с исходными изолиниями соответствующего уровня.

Формально изолинию можно рассматривать как набор точек со значениями, равными ее уровню, и использовать для моделирования перечисленные выше методы интерполирова-

ния по точкам. Однако качество построенной таким образом модели будет на порядок хуже (в случае редко расположенных изолиний), либо время счета окажется на два порядка больше (в случае большой плотности изолиний, например для горного рельефа, где общее количество точек может достигать нескольких сотен тысяч). Кстати, Геологическая съемка США (USGS) для выполнения принятой в этой стране национальной программы (Elevation Program) по созданию цифровых моделей рельефа на всю территорию США с шагом в две угловые секунды после долгих исследований остановила свой выбор именно на методе моделирования по изолиниям, используя в качестве источника топографические карты соответствующего масштаба. К недостаткам описанного метода можно отнести не очень хорошее моделирование кривизны поверхности (в случае редкого расположения изолиний), а также не совсем корректное поведение модельной поверхности в долинах рек, где изолинии имеют форму вытянутой петли. В настоящее время в лаборатории автоматизации ведутся работы по усовершенствованию алгоритма с целью устранения этих недостатков.

Использование изолиний в виде исходных данных для моделирования не ограничивается только рельефом. В качестве примера можно привести использование пакета "МАГ" при создании ГИС "Черное Море" [3]. Основная часть базы данных в ГИС состоит из цифровых моделей геополей (температура, влажность, количество осадков, соленость, плотность, концентрация кислорода, сульфидов, нитратов, фосфатов и др.). Исходные данные поступали от участников проекта не только в виде наборов значений показателя в нерегулярно расположенных точках, но и в виде изолинейных карт. Отметим, что и модель рельефа дна Черного моря тоже строилась по изолиниям, оцифрованным по карте из Морского Атласа в масштаба 1:2 000 000.

Все методы моделирования по точкам в пакете "МАГ" исходят из условия анизотропии, когда взаимовлияние между точками зависит не только от расстояния между ними, но и от направления вектора, соединяющего эти точки. Анизотропия задается с помощью главного направления влияния и коэффициента сжатия в этом направлении. Таким образом, на плоско-

сти задается новая метрика, в которой множество точек, равноудаленных от данной, представляет собой не окружность, а эллипс, сплюснутый вдоль главного направления влияния. В перпендикулярном к нему направлении взаимовлияние между точками будет наименьшим. В качестве примера можно привести опыт моделирования полей радиоактивного загрязнения при создании карт для атласа [1], подготовленного в Институте глобального климата и экологии РАН. После ряда экспериментов выбор был остановлен на методе средне-взвешенной интерполяции с использованием анизотропии, параметры которой подбираются индивидуально для каждого участка. Заслуживает внимания и специально разработанный для этого проекта алгоритм гладкой "склейки" цифровых моделей на небольших участках в разных проекциях в единую цифровую модель на регулярной сетке в географических координатах, покрывающую всю картографируемую территорию. Это позволяет легко пересчитывать построенные изолинии в проекцию результирующей карты.

Из последних научно-исследовательских работ с использованием пакета "МАГ" хотелось бы выделить совместную с Институтом проблем экологии и эволюции РАН работу по прогнозированию пространственно-временной динамики нарушенных экосистем на примере составления прогнозных карт опустынивания пастбищных экосистем Черных земель Калмыкии. В этой работе нами впервые на практике был опробован метод кригинга от трех переменных, где в качестве третьей координаты используется время. Значения показателя (относительная площадь разбитых песков и дефлированных поверхностей) были получены по снимкам и представлены в нерегулярно расположенных точках за период с 1954 по 1993 год с интервалом приблизительно в 10 лет (всего пять временных срезов). Целью исследования было составление прогнозных карт на 30 лет вперед, а также получение промежуточных карт (с периодом в пять лет) с целью изучения динамики опустынивания.

Для составления карт рассчитывалась цифровая модель показателя на регулярной сетке пространственных координат при фиксированном значении времени. Кроме того, по построенным моделям вычислялись площади

земель, относящихся к четырем выделенным классам экологического состояния, что позволило изучить их динамику и делать выводы об изменении экологического состояния. Так, анализ прогнозных карт показал устойчивое сокращение площади в 1993-2003 гг., а затем и полное исчезновение зоны экологического бедствия и прекращение сильного опустынивания в Черных землях. График же площади нормального опустынивания имеет фоновый уровень в начале 1954-1959 гг., затем его площадь катастрофически снижается в течение 1964-1979 гг., достигает минимума около 1984 г. и медленно повышается, не достигая даже и половины начальной площади, что подтверждает практическую необратимость экологической катастрофы. К сожалению, данное исследование остановилось на уровне предварительного анализа результатов из-за безвременной кончины ее вдохновителя профессора Б.В. Виноградова.

Кроме блока моделирования геополей в современную версию пакета "МАГ" входит и большой блок, предназначенный для цифрового анализа построенных моделей, в том числе, картометрического и морфометрического. В дополнение к уже упомянутым возможностям построения цифровых моделей углов наклона и экспозиции склонов, различного вида кривизны поверхности (горизонтальных сечений, вертикальных сечений, гауссовой), блок анализа содержит большое количество методов вычислений показателей по скользящему окну заданной формы и размера (среднее значение, линейное и квадратичное среднее, дисперсия, медиана, вертикальная и горизонтальная расчлененность и др.). Для сравнения двух показателей можно использовать коэффициент корреляции по скользящим блокам, либо разность показателей, нормированных на дисперсию внутри блока. Кроме того, имеется возможность производить арифметические операции над цифровыми моделями, то есть синтезировать с помощью формул новые показатели. Результатом работы алгоритмов скользящего окна, является новая цифровая модель некоторого абстрактного, сконструированного географического поля, которую также можно отображать в изолиниях. Для правильного восприятия и анализа карт подобных показателей, по всей видимости, необходимо показывать в легенде

или на самой карте блок, с использованием которого данный показатель был вычислен.

Пакет "МАГ" активно используется не только для решения практических и научно-исследовательских задач, но и в учебном процессе. Он является базовым при обучении студентов кафедры картографии и геоинформатики практическим навыкам моделирования и анализа геополей (в рамках курса "Высшая математика с основами программирования"). Теоретический курс постоянно пополняется последними разработками в этой области, прошедшими апробацию в пакете "МАГ". За последние пять лет в курс дополнен такими разделами, как алгоритмы построения цифровых моделей геополей по данным в нерегулярно расположенных опорных точках и по изолиниям, алгоритмы для построения изолинейных карт по цифровым моделям на регулярной сетке, алгоритмы для карто- и морфометрического анализа рельефа, алгоритмы построения блок-диаграмм (проекций) поверхности. На практических занятиях по программированию студенты самостоятельно реализуют некоторые наиболее простые алгоритмы, например построения цифровой модели углов наклона, вычисление различных показателей по скользящим блокам (среднее, дисперсия, размах, коэффициент корреляции и др.).

В качестве заключения отметим, что в пакете "МАГ" реализованы самые современные методы моделирования и анализа геополей и его алгоритмическая часть постоянно пополняется как новыми разработками сотрудников лаборатории автоматизации, так и последними идеями в этой области других специалистов, в том числе и за рубежом. Пакет "МАГ" с успехом был использован и продолжает использоваться как при решении практических и научно-исследовательских задач, так и в учебных целях.

Литература

1. Атлас радиоактивного загрязнения Европейской части России, Белоруссии и Украины. / Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. – М.: Федеральная служба геодезии и картографии РФ, 1998. – 134 с.
2. Берлянт А.М. Картографический метод исследования. М.: Изд-во МГУ, 2-е изд., 1988. 254 с.

3. Берлянт А.М., Мамаев В.О., Мусин О.Р., Аляутдинов А.Р., Калинин И.В., Кошель С.М. Реализация проекта ГИС "Черное море". // Геодезия и картография. 1997, №6, с.34-40.
4. Богомолов А.Л., Казанцева М.Н., Мусин О.Р. Методика автоматизированного составления батиметрических карт // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геогр. 1990. №4. с.37-40.
5. Жуков В.Т., Новаковский Б.А., Чумаченко А.Н. Компьютерное геоэкологическое картографирование. – М.: Научный мир, 1999. – 128 с.
6. Мусин О.Р., Новаковский Б.А., Сербенюк С.Н. Автоматизированное составление карт углов наклона и экспозиций склонов по аэрофотоснимкам // Геоморфология. – 1987. - № 4. - с. 30-36.
7. Мусин О.Р., Сербенюк С.Н. Цифровые модели "рельефа" континуальных и дискретных географических полей // Банки географических данных для тематического картографирования. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987.- с. 156-170.
8. Новаковский Б.А. Фотограмметрия и дистанционные методы изучения Земли: картографо-фотограмметрическое моделирование. – М.: - Изд-во МГУ. 1997. – 208 с.
9. Новаковский Б.А., Волков П.С., Кошель С.М. Автоматизированное создание карты высоты снежного покрова по материалам фототеодолитной съемки. // Геоинформационное картографирование. - Московский центр Русского Географического общества. - Москва.-1993. - с.166-181.
10. Новаковский Б.А., Кошель С.М., Сучилин А.А. Автоматизированное картографирование по материалам фототеодолитных съемок. // Геодезия и картография.-1992.-№8.-с.43-48.
11. Сербенюк С.Н., Кошель С.М., Мусин О.Р. Методы моделирования геополей по данным в нерегулярно расположенных точках // Геодезия и картография. – 1990. - № 11. - с. 31-35.
12. Сербенюк С.Н., Кошель С.М., Мусин О.Р. Программы МАГ для создания цифровых моделей геополей // Геодезия и картография. – 1991. - № 4. - с. 44-46.
13. Сербенюк С.Н., Мусин О.Р. Автоматизированное построение изолинейных карт и производных от них изображений // Геодезия и картография. – 1986. - № 7. - с. 42-45.
14. Сербенюк С.Н., Мусин О.Р. Математико-картографическое моделирование для автоматизированного решения карто- и морфометри-

ческих задач // Геодезия и картография. – 1989. - № 5. - с. 42-46.

15. Симонов Ю.Г., Кошель С.М., Кружалин В.И., Новаковский Б.А., Прасолов С.В. Использование ГИС-технологий и цифровых моделей рельефа при решении геоэкологических задач. // Экология и промышленность России, апрель 1998 г.

16. Alfeld P. Scattered data interpolation in three or more variables // Mathematical Methods in Computer Aided Geometric Design. Academic Press, Boston, 1989, pp.1-33.

17. Koshel, S., Kalinkin, I. Surface modeling for contour data. Proc. of Conference "GIS Frontiers in Business and Science", April 20-24, 1996, Brno, Czech Republic, pp.II-2-5.

18. Linn C.C., Chen A.J., Chern D.C. New approach to semi-automatically generate digital elevation data by using a vidicon camera. Proceedings of the 7th International Symposium (Enschede). 25-29 August, 1986, Commission UII. Rotterdam; Boston, 1986, v.26, Part 7/1.

19. Serbenyuk S.N., Koshel S.M., Musin O.R. Creation and usage of geofields digital models // Regional Conference on Asian Pacific countries Inter. Geogr. Union. August 13-20, 1990, Beijing, vol.2, p.13-22.