



УДК 528.946

ББК 26.8

РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИИ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ¹

А.В. Плякин, В.Н. Козырева

В статье с позиции геоинформационного и геостатистического подходов показана актуальность активного применения современных методов пространственного анализа данных в решении задач оценки геоэкологического состояния территории. Использование методов геостатистики на платформе геоинформационных систем (ГИС) способно расширить представления о территориальной структуре геоэкологических проблем, негативном состоянии природной среды и факторах, вызывающих ее пространственную неоднородность.

Ключевые слова: геостатистика, геоэкологическая оценка, геоинформационная система, пространственный анализ, пространственные данные.

Разработка и реализация комплексных программ устойчивого развития региона и входящих в его состав муниципальных образований требуют реализации геоэкологических исследований и активного использования ресурсов пространственных данных (геоданных) о геоэкологическом состоянии их территории. Важнейшим средством геоэкологических исследований является оценка геоэкологического состояния территории, включающая выявление факторов экологической опасности (природных и антропогенных), а также оценку масштаба и интенсивности их проявления. Комплексная геоэкологическая оценка предполагает реализацию пространственно-временного анализа природно-экологических и социально-

экономических условий, а также причин возникновения и проявления экологических проблем.

По мнению Б.И. Кочурова, геоэкологическая оценка территории проводится с целью выявления основных геоэкологических проблем, характерных для исследуемой территории, и определения остроты каждой отдельно взятой из них, а также их совокупности [7]. В свою очередь, уровень и масштаб проявления каждой геоэкологической проблемы оценивается в соответствии с совокупностью критериев, отражающих нарушения отдельных компонентов ландшафта: атмосферного воздуха, поверхностных вод, почвенного и растительного покровов, животного мира и экосистем. В ходе геоэкологической оценки следует также учитывать состояние здоровья населения и социально-экономическое состояние территории в связи с ее геоэкологическим состоянием.

Сочетание картографического, геостатистического, а также геоинформационного подходов способно обеспечить создание совершенных информационных систем, призванных поднять процесс геоэкологической оценки на качественно новый уровень. Бурное развитие ГИС-технологий в последнее десятилетие позволило создать уникальную по своим аналитическим возможностям технологическую платформу для реализации алгоритмов и схем геоэкологической оценки на основе электронного атласного картографирования. «За относительно короткий срок электронные версии атласов уже вышли из стадии эксперимента и стали обычным явлением во многих странах... Основное назначение таких атласов – информационное обеспечение оперативного решения научных и прикладных задач: учет и контроль состояния территориальных ресурсов, экологическая экспертиза и нормирование проектов по созданию хозяйственных объектов в пределах как индустриально-аграрных зон исследуемых регионов, так и отдельных районов и ареалов – проблемных или интенсивно осваиваемых» [11, с. 16]. Разрабатываемый в ВолГУ электронный атлас (ГИС-атлас) геоэкологического состояния Волгоградской области интегрирует имеющуюся информацию о природных ресурсах, хозяйственной деятельности, экономике и социальной сфере, которую можно использовать для решения проблем устойчивого социально-экономического и хозяйственного развития. В числе приоритетных задач выполняемой работы инвентаризация и обобщение геоэкологической, ресурсно-экологической, экономической и иной информации по территории Волгоградской области. При этом электронный атлас геоэкологического состояния территории должен характеризоваться системностью и многовариантностью представления данных, масштабируемостью картографических изображений, оперативностью пространственного анализа и тиражирования данных.

В процессе создания ГИС-атласа принципиальное значение имеет его структура. В связи с этим представляется важным решение нескольких проблем определения и выбора: 1) логико-теоретической модели интеграции первичных данных и результатов их анализа; 2) наиболее приемлемых методов гео-

статистической обработки и моделирования геоданных. Такой подход позволит вплотную приблизиться к созданию объективных тематических электронных карт, главным признаком которых станет их логическая преемственность на основе интегрирующих теоретических моделей.

В соответствии с концепцией строения географического ландшафта А.А. Минца структура геоэкологического ГИС-атласа может быть представлена в виде шести тематических блоков, характеризующих шесть ключевых направленных взаимодействий в системе «природа (М) – человек (Н) – производство (Т)»: природно-ресурсный (МТ); производственно-экологический (ТМ); рекреационный (НМ); медико-биологический (МН); трудовой (НТ); социально-экономический (ТН) [1, с. 95]. Указанные блоки представлены на рисунке 1.

В соответствии с технологической схемой формирования ГИС-атласа геоэкологическая оценка территории в ГИС предполагает следующий алгоритм ее реализации:

1. Анализ существующих источников геоданных о геоэкологическом и социально-экономическом состоянии территории.

2. Выбор критериев и показателей для оценки геоэкологического состояния территории с учетом существующей структуры регионального природопользования и геоэкологических проблем.

3. Планирование проекта ГИС, включающее: определение цели и задач проекта, создание базы геоданных, формирование модели анализа, представление результатов анализа.

4. Выбор инструментов пространственного анализа и визуализации геоданных (ГИС, геоинформационные атласные системы).

5. Создание математико-картографических моделей на основе средств пространственного анализа и геостатистического моделирования.

7. Компоновка полученного картографического материала и представление результатов геоэкологической оценки территории, построение целевых тематических и комплексных геоэкологических карт.

8. Выработка рекомендаций и мер по оптимизации природопользования в регионе.

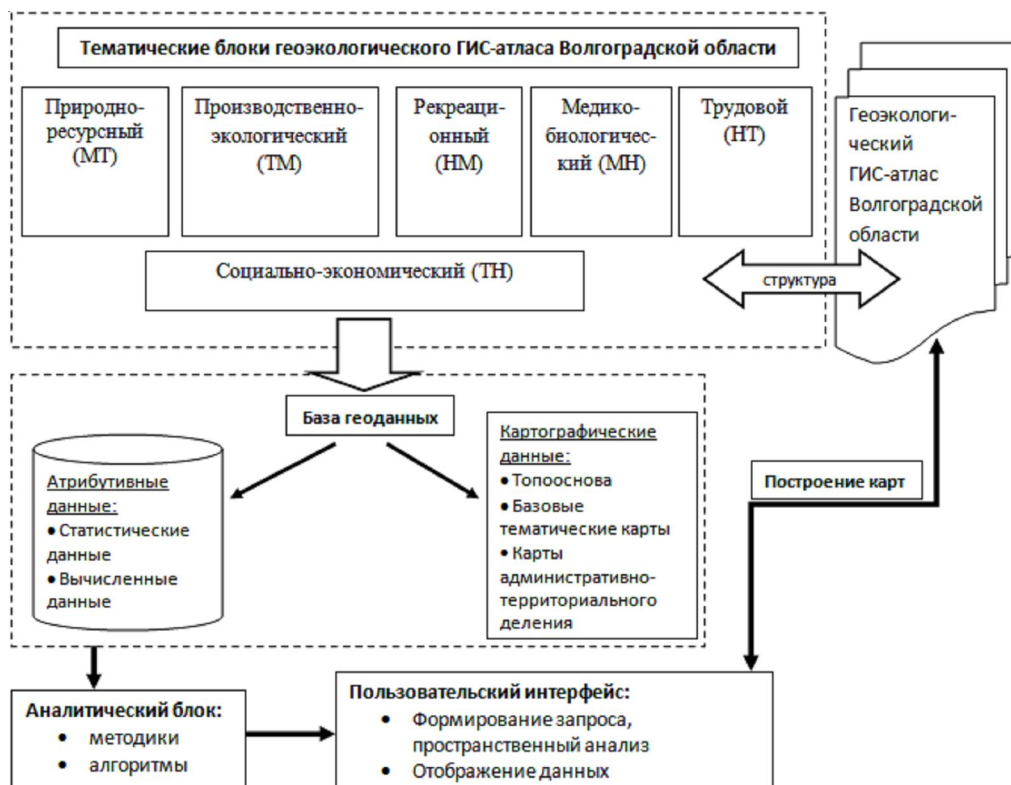


Рис. 1. Тематическая структура и схема формирования геоэкологического ГИС-атласа Волгоградской области *

* Составлено авторами.

Развитие геоинформационных систем (ГИС) и технологий с начала 1980-х годов привело к появлению геостатистики и развитию геостатистических методов анализа данных. Значительный вклад в развитие теоретических основ геостатистики внесли зарубежные ученые Д. Криге (1951 г.), Ж. Матерон (1968 г.), Ч. Хьюбрегтс (1978 г.), Е. Исаакс, Р. Шривастава (1989 г.), П. Гувретс (1997 г.), С. Дитч и А. Жорнел (1998 г.) и др. [10]. Первые попытки осветить в отечественной научной литературе проблемы использования геостатистического подхода к оценке общественного развития и состояния окружающей среды были независимо предприняты С.А. Бурцевой (1998 г.) и коллективом авторов из Института проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ) РАН (1999 г.) [2; 6; 9]. Эти же авторы, спустя годы, опубликовали свои фундаментальные труды по теории геостатистики и ее практическому применению [3; 5]. В настоящее

время геостатистика активно развивается в России и за рубежом [8].

Картографический метод исследования на платформе современных ГИС в сочетании с геостатистическими методами анализа пространственных данных способен существенно улучшить современные представления о характере взаимодействия природной среды и производительных сил в системе «природа – человек – производство». Сочетание геостатистического и геоинформационного подходов способно обеспечить создание информационных систем регионального и муниципального уровней, призванных поднять процесс геоэкологической оценки и управления устойчивым развитием территорий на качественно новый уровень.

Геостатистика – наука и технология для анализа, обработки и представления пространственно-распределенной (и пространственно-временной) информации с помощью статистических методов [5]. Геостатистика моде-

лирует распределение объектов, явлений и процессов природного и антропогенного происхождения в географическом пространстве. В связи с этим система показателей геоэкологического состояния территории может быть представлена в виде комплекса геостатистических показателей, характеризующих территориальные экологические, природно-климатические, почвенно-ландшафтные и другие условия. Поскольку с понятием о геостатистическом показателе связано представление о центре территории, имеющей границы, то система муниципальных геостатистических показателей должна быть сопряжена с совокупностью районных центров, в числе которых: географический центр муниципального образования – геоцентр, районный демографический центр – демоцентр, центр расселения жителей района – урбоцентр, экономические центры МО по важнейшим видам производимой продукции (промышленный центр) и другие виды центров, адекватно отражающих экологическое, экономическое, демографическое состояние муниципального района [3, с. 352]. Определение местоположения центров разных типов предполагает наличие статистических данных по населенным пунктам (городам, поселкам, сельским поселениям). Однако современная практика формирования статистических данных в России такова, что все имеющиеся официальные данные статистики агрегируются по территории муниципальных образований в целом и именно в таком виде предоставляются конечным пользователям. В связи с этим все статистические данные по каждому муниципальному образованию (экологические, демографические, социально-экономические и др.) могут быть отнесены только к его геоцентру, который в этих условиях имеет свойства геостатистического центра и характеризуется средней геостатистической (пространственной) величиной. Определяя содержание геостатистической средней величины, отметим, что сущность последней «состоит в обобщении распределения геостатистической совокупности по поверхности земного шара, по его отдельным регионам... а внутри страны – по административно-территориальным единицам» [там же, с. 308].

Применительно к нашему объекту исследования геостатистическая совокупность –

это множество реальных явлений в природной среде и природопользовании, объединенных общим законом развития и имеющих характерные черты качественной однородности единиц геостатистической совокупности и варьирования изучаемых признаков в пространстве и во времени. Определение однородных частей предполагает выявление характера отношений между частями геостатистической совокупности с определением пространственно-временной структуры распределения исследуемых явлений. Единицами геостатистической совокупности могут быть реальные природные и социально-экономические процессы и явления в пределах административно-территориальных единиц государства, к числу которых относятся населенный пункт, муниципальный район, область, округ и т. д. Таким образом, единица геостатистической совокупности выступает объектом наблюдения и содержит две составляющие: географическую и статистическую.

По мнению С.А. Бурцевой, важнейшим признаком геостатистической совокупности является геовариация, то есть качественное и количественное изменение в пространстве составляющих геостатистическую совокупность единиц. Задача обобщения геовариации признаков реальных совокупностей решается с помощью геостатистической средней величины, агрегирующей в пространстве с учетом веса качественно однородные и количественно отличающиеся геостатистические величины. Для расчета геостатистической средней величины, характеризующей степень распределения геостатистической совокупности по всей территории России, целесообразно выделить пять территориально-иерархических уровней (муниципальное образование, субъект РФ, экономический район, федеральный округ, Российская Федерация), при этом первому уровню соответствует неделимая территориальная единица: муниципальный район, город, поселок, сельские администрации. Геостатистическая средняя величина изображается точкой на географической карте и называется центральной, поскольку характеризует основную тенденцию в распределении единиц геостатистической совокупности [3, с. 316]. Используя геостатистические показатели и изображая их на

географической карте, получаем центрограммы, то есть карты, на которых можно изобразить точкой значение геостатистического центра. Рассмотрим это подробно на примере оценки распределения плотности выбрасываемых в атмосферный воздух загрязняющих веществ от стационарных источников по муниципальным районам Волгоградской области (см. рис. 2).

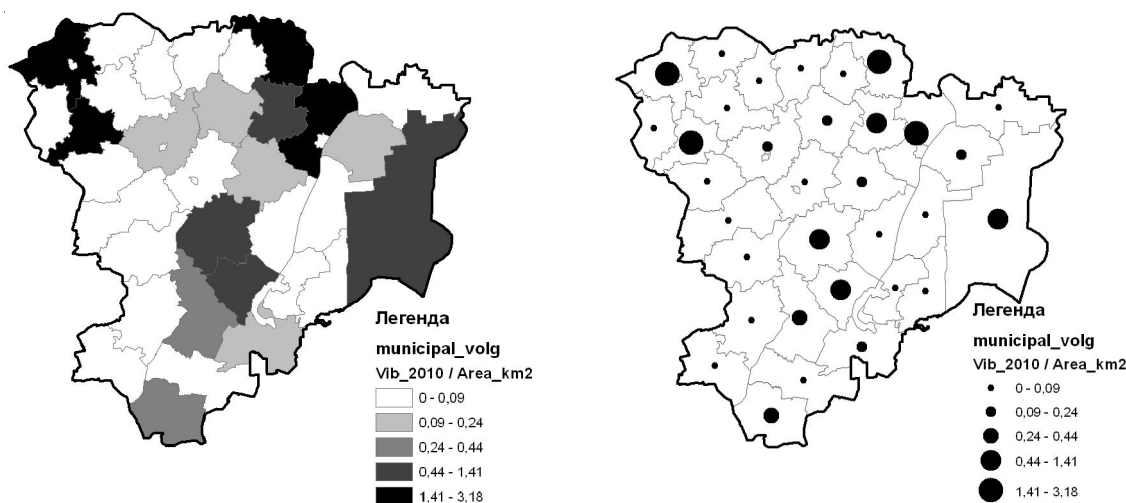


Рис. 2. Представление плотности промышленных выбросов в атмосферу в расчете на единицу площади (1 км^2) по муниципальным районам Волгоградской области в 2010 г. ($\text{т}/\text{км}^2$) в виде статистической картограммы (слева) и центрограммы (справа) *

* Составлено по: [4].

В арсенале методов современной геостатистики имеется большой набор статистических моделей и инструментов для анализа пространственно-распределенных данных: визуализации и описания данных; структурного анализа (вариографии); кросс-валидации, пространственной интерполяции, визуализации результатов в виде карт ошибок, оценок, вероятностей и риска; картографирования в ГИС [6]. Тем не менее, важно определить перечень методов и этапов, образующих замкнутый поэтапный цикл исследования геостатистических данных от начального анализа базовых статистических закономерностей в геостатистических данных до вероятностного картирования на основе нелинейных моделей кригинга. Так, на первом этапе геостатистического анализа выполняется исследовательский анализ пространственных данных (ESDA) в ГИС ARCGIS 9.3.1, позволяющий выявить базовые геостатисти-

В отличие от традиционной статистической картограммы, маскирующей тенденции геоэкологического состояния территории во внутрирегиональном географическом пространстве, центрограмма становится объектом дальнейшего углубленного пространственно-временного моделирования и объектом применения методов геостатистического анализа.

ческие закономерности на территории исследуемого региона [12]. Каждый инструмент ESDA предоставляет возможность исследовать данные с различных точек зрения.

Инструмент гистограммы в ESDA дает одномерное (по одной переменной) описание геостатистических данных, а именно – показывает плотность распределения исследуемого набора данных и подсчитывает суммарную статистику (рис. 3).

Все значения величины промвыбросов по муниципальным районам Волгоградской области объединены в 10 классов. Высота столбцов пропорциональна количеству муниципальных районов области, величина промышленных выбросов ($\text{т}/\text{км}^2$) в которых попадает в каждый класс. В целом важными характеристиками распределения являются среднее значение, его среднеквадратичное отклонение и симметрия. Среднее и медиана распреде-

ления величины промвыбросов в регионе различаются по величине (0,52 и 0,08 т/км²), и это является одним из признаков того, что данные не подчиняются закону нормального распределения. Это же подтверждает гистограмма, поскольку данные являются односторонними и асимметричными. Значение коэффициента асимметрии (1,9) свидетельствует о положительной асимметрии распределения. Правый хвост распределения указывает на присутствие относительно небольшого количества муниципальных районов с высокими значениями величины промвыбросов в них (от 2 до 3 т/км²), а левый – о преобла-

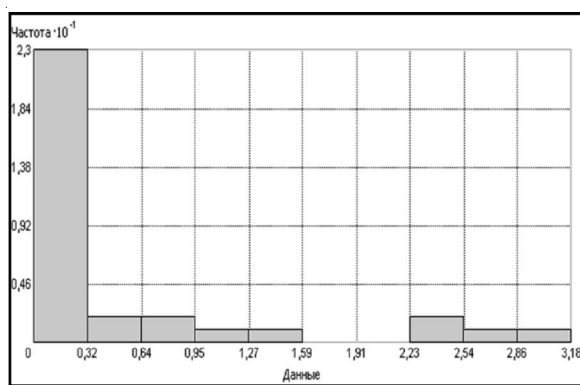


Рис. 3. Гистограмма распределения плотности промышленных выбросов (т/км²) по муниципальным районам Волгоградской области в 2010 г.*

* Составлено по: [4].

Нормальный график QQ (квантиль – квантиль) обеспечивает проверку нормальности распределения геостатистических данных. Он строится путем нанесения на соответствующие оси координат значений из набора данных и значений, полученных по кривой нормального распределения, соответствующих одинаковому значению кумулятивного распределения (см. рис. 4). График QQ позволяет сравнить распределение данных со стандартным нормальным. Чем более точно по точкам можно построить прямую линию, тем ближе распределение к нормальному. На графике QQ видно, что график исследуемых значений плотности промвыбросов существенно отклоняется от прямой линии, свидетельствуя об их несоответствии нормальному закону распределения. Последнее имеет решающее значение в процессе последующего выбора

методов геостатистического анализа, в частности – методов интерполяции. Карта Вороного позволяет выполнить анализ стационарности и пространственной изменчивости набора геостатистических данных. Эти карты строятся на основе центрограммы из серии полигонов, образуемых вокруг геоцентров. На картах Вороного может быть выполнена оценка исследуемых геостатистических показателей на уровне локального сглаживания (среднее, мода, медиана), локальных отклонений (среднеквадратичное отклонение, диапазон между квантилями, энтропия), локальных выпадающих значений (кластер), локальных влияний (простое значение). Каждая карта характеризует пространственную изменчивость показателя по муниципальным районам и позволяет выделить однородные группы районов.

| | |
|--|------|
| Количество муниципальных районов (ед.) | 33 |
| Мин кол-во выбросов по районам (т/км ²) | 0 |
| Мак кол-во выбросов по районам (т/км ²) | 3,18 |
| Среднее кол-во выбросов (т/км ²) | 0,52 |
| Среднее квадратичное отклонение (т/км ²) | 0,89 |
| Коэффициент асимметрии | 1,9 |
| Коэффициент эксцесса | 5,27 |
| Медиана (т/км ²) | 0,08 |

Например, локальное среднее плотности промышленных выбросов может быть найдено как среднее из значений плотности, попадающих в ближайшие полигоны, окружающие центральный полигон. Затем это среднее значение присваивается центральному полигону. После того как эта операция будет выполнена для всех полигонов и их соседей, с помощью шкалы, имеющей пять классов,

будут показаны значения локальных средних и, тем самым, визуализированы районы высоких и низких значений плотности промышленных выбросов. В нашем примере выделены три группы однородных районов, сгруппированных по значению локальной средней в диапазоне значений (т/км²): 0,85–3,18 (выделены более темным цветом); 0,22–0,85; 0,058–0,22 (см. рис. 5а).

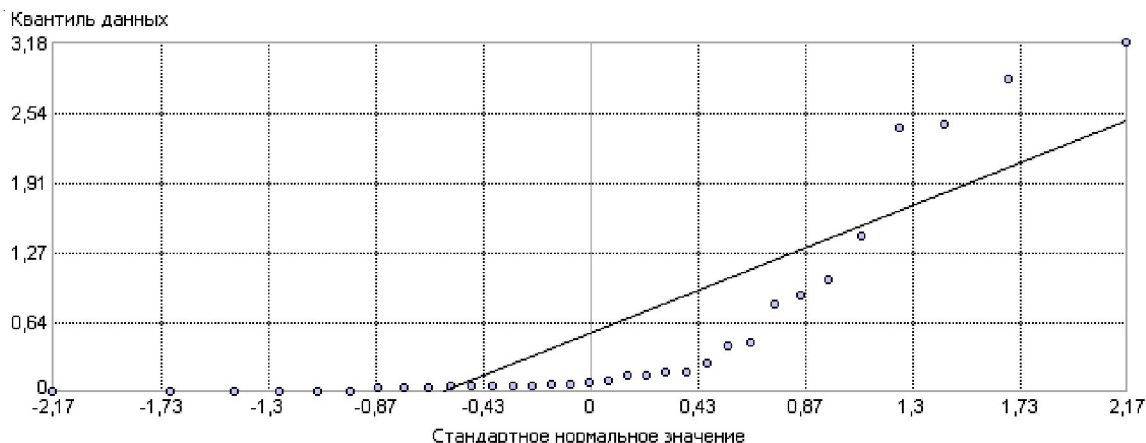


Рис. 4. Нормальный график QQ распределения величины промышленных выбросов (т/км²) в Волгоградской области по муниципальным районам в 2010 г.*

* Составлено по: [4].

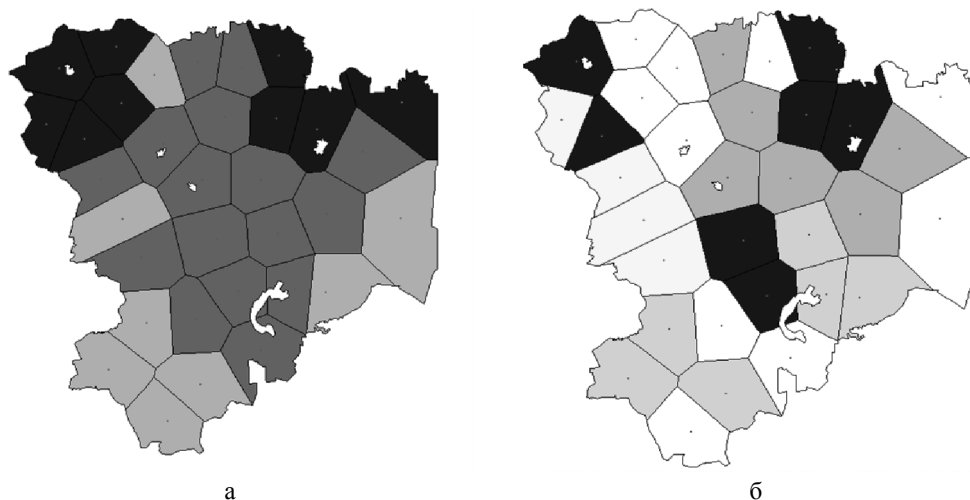


Рис. 5. Карты Вороного по показателю плотности промышленных выбросов (т/км²) в муниципальных районах Волгоградской области в 2010 г.*

- а) локальная средняя величина плотности промышленных выбросов по полигонам;
- б) кластеризация районов по плотности промышленных выбросов.

* Составлено по: [4].

При использовании метода кластера, позволяющего выявить локальные выпадающие значения плотности выбросов, все полигоны группируются в полигоны пяти классов соответственно значению интервала исследуемой характеристики (см. рис. 5б). Если интервал класса полигона отличается от интервалов класса соседних полигонов, каждый полигон окрашивается в соответствующий цвет (оттенок), чтобы отличить его от соседей. На карте результатов кластеризации районов Волгоградской области выделяются пять типов районных кластеров, плотность промвыбросов (т/км²) на территории которых имеет величину в интервале 0,85–3,18 (показаны черным цветом), 0,22–0,85 (темно-серый цвет) и т. д.

Важнейшим этапом исследования является определение глобальных трендов в наборе геостатистических данных, а также исследование вариограммы (ковариации), позволяющей выполнить анализ пространственных зависимостей. Последнее особенно важно, поскольку при отсутствии пространственной корреляции между исходными данными

получение оценки в геоцентре путем взвешивания соседних центров и применение геостатистических методов интерполяции (кригинга) не имеет смысла [11, с. 133].

В геоинформационной системе ARCGIS 9.3.1 возможно использование ряда методов интерполяции: обратных взвешенных расстояний, глобальной и локальной полиномиальной интерполяции, ординарного, простого, универсального, вероятностного, индикаторного и дизъюнктивного кригинга, наряду с дополняющим их кокригингом. Следует отметить, что методы кригинга не только строят поверхности интерполируемых значений и ошибок, но они могут быть также использованы для создания карт вероятности событий. Следует заметить, что метод кригинга не выдвигает к исходным данным требования нормальности распределения. Однако подчинение данных закону нормального распределения обязательно для создания карт вероятности для ординарного, простого и универсального кригинга. В нашем примере был использован метод обратных взвешенных расстояний (ОВР) (см. рис. 6).

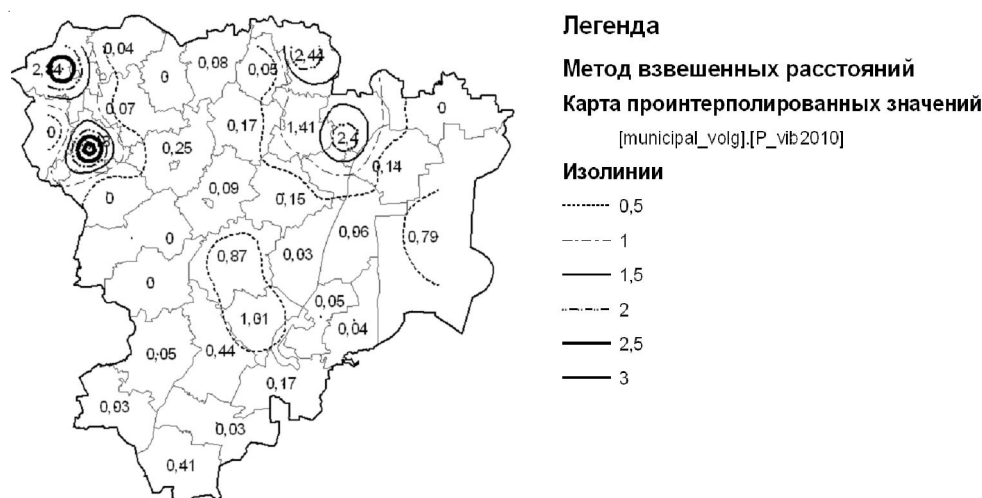


Рис. 6. Карта интерполированных методом ОВР значений плотности промышленных выбросов (т/км²) в муниципальных районах Волгоградской области в 2010 г. (без учета величины промвыбросов в крупных городах области; исходные значения интерполируемых значений отнесены к геоцентрам муниципальных районов) *

* Составлено по: [4].

Сравнение традиционной картограммы (см. рис. 1) и геостатистической центрограммы с изолиниями равных значений исследуемой характеристики на территории Волгоградской области (см. рис. 6) свиде-

тельствует о дополнительных возможностях визуализации скрытых прежде особенностей пространственного распределения плотности промышленных выбросов на территории региона. На карте отмечается ядро

высокой плотности промвыбросов в северных муниципальных районах Волгоградской области. Полученная центрограмма с изолиниями, наглядно демонстрирующая лоскутный характер негативного воздействия промвыбросов на окружающую среду, может стать важной составляющей комплексного геоэкологического районирования территории региона.

Приведенный пример наглядно демонстрирует достоинства геоestatистических методов в случае их применения для исследования условий, ресурсов и факторов, определяющих геоэкологическое состояние территории муниципальных образований Волгоградской области. Геоestatистический анализ данных о всех видах региональных ресурсов, запасов, резервов (природно-экологических, демографических, трудовых, производственных и др.) способен существенно дополнить уже имеющиеся представления о геоэкологической ситуации в регионе и территориальной структуре факторов, вызывающих ее пространственную неоднородность.

В заключение отметим, что геоestatистический подход к реализации геоэкологической оценки в ГИС способен реально обеспечить решение важнейших задач управления экологически сбалансированным социально-экономическим развитием муниципальных образований с учетом существующего природно-экологического и социально-экономического потенциала территории.

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда и Администрации Волгоградской области (грант № 11-12-34015а/В).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алаев, Э. Б. Экономико-географическая терминология / Э. Б. Алаев. – М. : Мысль, 1977. – 199 с.
2. Бурцева, С. А. Геоestatистический подход к пространственно-временному развитию общества / С. А. Бурцева // Вопросы статистики. – 1998. – № 5. – С. 51–56.
3. Бурцева, С. А. Глобализация: геоestatистический подход / С. А. Бурцева. – М. : Финансы и статистика, 2005. – 448 с.
4. Городские округа и муниципальные районы Волгоградской области. Статистическое обозрение, 2010. – Волгоград : Террит. орган федер. службы гос. статистики по Волгоградской области, 2011. – 277 с.
5. Демьянов, В. Геоestatистика. Теория и практика / В. Демьянов, Е. Савельева. – М. : Наука, 2010. – 327 с.
6. Каневский, М. Ф. Введение в методы анализа данных по окружающей среде / М. Ф. Каневский, В. В. Демьянов // Элементарное введение в геоestatистику. Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 1999. – № 11. – С. 2–12.
7. Кочуров, Б. И. Геоэкология: экодиагностика и эколого-хозяйственный баланс территорий / Б. И. Кочуров – Смоленск : СГУ, 1999. – 154 с.
8. Обзор интернет-ресурсов по геоestatистике. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <https://sites.google.com/site/geostatistika/home/dopolnitelno/--1>. – Загл. с экрана.
9. Прогноз электропотребления: Анализ временных рядов, геоestatистика, искусственные нейронные сети / Р. В. Арутюнян [и др.]. – М. : Пре-принт ИБРАЭ, 1999. – 45 с. – (ИБРАЭ-99-05).
10. Рекомендуемые издания по геоestatистике на английском языке. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <https://sites.google.com/site/geostatistika/home/dopolnitelno/books>. – Загл. с экрана.
11. Электронное атласное картографирование для обеспечения устойчивого развития регионов Сибири / В. А. Снытко [и др.] // География и природные ресурсы. – 2003. – № 3. – С. 16–26.
12. ARCGIS 9. Geostatistical Analyst : Manual User. – ESRI, 2001. – 285 с.

**IMPLEMENTATION OF GEOSTATISTICAL METHODS
FOR GEOECOLOGICAL STATUS ASSESSMENT OF THE TERRITORY
IN THE GEOINFORMATIONAL SYSTEM**

A.V. Plyakin, V.N. Kozyreva

The authors of the article show the urgency of the active application of the modern spatial data analysis methods in a problem solving assessment of a geoecological status of the territory based on geoinformational and geostatistical approaches. Implementation of the geostatistical methods on the platform of geographic information systems (GIS) provides further extension of the knowledge about the territorial structure of geo-ecological problems, negative state of the environment and the factors causing certain spatial heterogeneity.

Key words: *geostatistics, geoecological assessment, geoinformational system (GIS), spatial analysis, geodata.*