

ЦИФРОВЫЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ КАРТЫ И НЕКОТОРЫЕ ПРИЕМЫ ИХ ПОСТРОЕНИЯ В СРЕДЕ ГИС ARCGIS

*С.В. Лебедев**, *Е.М. Нестеров***, *М.А. Кулькова***, *Л.М. Зарина***
**Санкт-Петербургский государственный университет*
Санкт-Петербург, Россия, sergey-lebedev1950@yandex.ru
***Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена*
Санкт-Петербург, Россия, lzarina@mail.ru

DIGITAL GEOECOLOGICAL MAPS AND SEVERAL METHODS OF ITS CONSTRUCTING IN A GIS ARCGIS

*S.V. Lebedev**, *E.M. Nesterov***, *M.A. Kulkova***, *L.M. Zarina***
**Saint-Petersburg State University*
St.-Petersburg, Russian, sergey-lebedev1950@yandex.ru
***Herzen State University*
St.-Petersburg, Russian, lzarina@mail.ru

Abstract. This article is focused on methods of digital geoeological maps construction with using GIS ArcGIS technologies. The technique of GIS ArcGIS mapping is illustrated by examples of GIS maps of radioactive and chemical pollution in the snow cover on the territory of St. Petersburg's (Russia). The geostatistic and deterministic approaches were applied for interpolation of input data. The input data were presented by the coordinates of points located on territory according to the scheme of measurements. The most optimal amount of classification intervals describing the natural processes and the phenomena of all-over distribution on the geoeological GIS maps is the 3–5 intervals of the parameter that will be considered. The borders of classes of intervals are set in depend on existing normative of pollution in different components of environment and empirical character of study parameter distribution on territory under consideration.

Keywords: digital geoeological maps, GIS ArcGIS technologies, maps of radioactive and chemical pollution in the snow cover, statistical geoeological data manipulation.

Введение. В статье рассмотрены приемы создания цифровых оценочных геоэкологических карт с использованием ГИС-технологий. Методика картографирования в среде ГИС ArcGIS иллюстрирована примерами составления цифровых оценочных карт радиоактивного и химического загрязнения снежного покрова на территории центральных районов г. Санкт-Петербурга (Россия). Для интерполяции исходных данных, представленных распределенными по некоей схеме точками замеров (мониторинга) исследуемых параметров, использованы геостатистические и детерминистские способы. Для отображения на геоэкологических картах природных явлений, локализованных на площадях, и явлений сплошного распространения оптимальным количеством является 3–5 интервалов классификации регламентируемого параметра. Границы выделяемых классов задаются и обосновываются интерпретатором в зависимости от существующих нормативов на содержание поллютантов в компонентах исследуемой среды и эмпирически установленного характера территориального распределения изучаемого параметра.

Постановка проблемы. Для отображения на картах природных явлений, локализованных на площадях и явлений сплошного распространения (например, территориальное загрязнение поллютантами компонентов природной среды) используют такие общекартографические приемы интерпретации, как построение непрерывной поверхности. Построение непрерывной поверхности – одно из ключевых требований, предъявляемых к большинству ГИС-приложений. Главная проблема, с которой сталкиваются специалисты, занимающиеся моделированием в ГИС, – это обоснование наиболее точного из возможных методов построения проинтерполированных поверхностей на основе существующих точек наблюдений за экологической обстановкой.

Технология построения карты территориального распределения параметра включает следующие основные этапы: интерполяция раstra по определенному способу и выбор границ интервалов классификации. Суть интерполяции состоит в том, чтобы, используя в качестве исходных данных распределенные по некоей схеме точки замеров исследуемых параметров (в нашем случае содержание поллютантов в точках отбора проб), рассчитать значения параметров между точками измерений по более густой сети, определяемой требуемой точностью интерпретации исследуемого объекта (явления). Исходные точки, содержащие значения исследуемого параметра (свойства), могут быть распределены равномерно или случайным образом. В результате интерполяции вся исследуемая площадь разбивается регулярной сеткой ячеек относительно малого размера. Каждая ячейка имеет свои мировые координаты [3].

Существует две основные группы методов интерполяции: детерминистские и геостатистические. Детерминистские методы используют для интерполяции математические функции. Геостатистика опирается как на статистические, так и на математические методы, которые могут быть использованы для построения поверхности и для оценки ошибки интерполяции. Нами применялись и те и другие методы интерполяции в зависимости от характеристики исходных данных.

Выбор границ интервалов классификации при построении цифровых карт не поддается строгому математическому обоснованию, и в конечном итоге определяется квалификацией интерпретатора в данной области тематической картографии. Практика показывает, что для характеристики загрязнения природных сред оптимальным количеством является 3–5 интервалов классификации исследуемого параметра, а границы выделяемых классов задаются и обосновываются интерпретатором в зависимости от существующих нормативов на содержание поллютантов в компонентах исследуемой среды и эмпирически установленного характера территориального распределения изучаемого параметра. Особенности приемов картографирования в среде ГИС ArcGIS рассмотрены на примерах составления цифровых оценочных геоэкологических карт загрязнения снежного покрова долгоживущими радионуклидами ^3H , ^{14}C и тяжелыми металлами на территории центральных районов Санкт-Петербурга.

Материалы и методы исследований.

Объект исследования. Одними из основных загрязнителей урбанистических территорий в настоящее время являются тяжелые металлы и радионуклиды. Источниками долгоживущих радиоактивных изотопов ^{14}C и ^3H служат ядерные взрывы и выбросы предприятий ядерной энергетики. Повышение концентраций таких радионуклидов в компонентах природной среды может свидетельствовать о неблагоприятии экологической обстановки. Для мониторинговых исследований распределения тяжелых металлов, а также трития и радиоуглерода в снежном покрове Санкт-Петербурга были выбраны точки наблюдения в центральных районах города, т.к. в них сосредоточена наибольшая плотность населения, расположены основные автомобильные и железнодорожные транспортные узлы и промышленные объекты.

В настоящей работе в качестве исходных данных для картографирования используются материалы пилотных мониторинговых определений содержания поллютантов в снежном покрове центральных районов Санкт-Петербурга. Концентрацию долгоживущих радионуклидов ^3H и ^{14}C определяли в пробах снега в пределах границ административного Фрунзенского района.

Фрунзенский район расположен на юго-востоке Санкт-Петербурга между Обводным каналом (на севере), КАД (на юге) и Витебской и Московской линиями Октябрьской железной дороги. Площадь района равна 37,5 км², т.е. почти 6 % территории города. Здесь проживает 401,8 тысяч человек (2010 г). Для определения загрязнения снега радионуклидами ^3H и ^{14}C в марте 2014 г. проводили опробование территории района по сети 1 x 1 км. Для координатной привязки точек отбора использовался GPS-навигатор eTeex VentureHC. Всего было отобрано и проанализировано 48 проб. Методика измерений на содержание долгоживущих радионуклидов ^3H и ^{14}C описаны в работе [2]).

Опробование снежного покрова на содержание тяжелых металлов в 2011 г. проводили в границах полигона «Центр», который расположен на территории исторического центра Санкт-Петербурга, имеет площадь 13,6 км² и содержит 45 пунктов мониторинга (Адмиралтейский административный район – 40 пунктов, Центральный район – 5 пунктов). Методика и техника определения тяжелых металлов в снежном покрове описаны в работе [2].

Картографическая основа, модуль Geostatistical Analyst. В качестве исходной карты применяли цифровую карту Санкт-Петербурга масштаба 1:10 000, построенную в формате шейп-файлов ГИС ArcGIS и используемую как базовую Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Администрации Санкт-Петербурга. Карта построена в зональной проекции Гаусса-Крюгера с центральным меридианом 30° и смещенным началом координат в соответствии с системой координат Пулково-1963.

В качестве слоев топоосновы использовали (перечислены сверху вниз по порядку расположения в вертикальной *Таблице содержания* документа ArcMap): проезды, мосты, административные районы, акватория, зеленые насаждения, кварталы, острова, территория.

Текстовый файл с координатами точек и данными опробования добавляли в документ карты и отображали по команде *DisplayXYData*. При этом данные сначала отображали в географической системе координат WGS-84, а потом перепроектировали в проекцию рабочей карты (Гаусса-Крюгера с центральным меридианом 30°).

Для построения карт распределения содержания поллютантов в пределах исследованной территории использовали модуль *Geostatistical Analyst GIS ArcGIS* [7]. Этот модуль предназначен для усовершенствованного моделирования поверхности с использованием детерминистских и геостатистических методов. Детерминистские методы используют для интерполяции математические функции. Геостатистика опирается как на статистические, так и на математические методы. Ниже рассматриваются примеры использования тех или иных методов в зависимости от конкретного массива данных по загрязнению снежного покрова в пределах городской территории. Также с помощью инструментов блока *Исследовательский анализ пространственных данных* (ESDA) модуля *Geostatistical Analyst* проанализированы основные статистические показатели по совокупности точек опробования.

Результаты исследований и их обсуждение.

Интерполяция по геостатистическому методу – кригинг. Для интерпретации данных наблюдений за содержанием поллютантов в компонентах природной среды, как правило, используют геостатистический метод – кригинг. Этот метод производит интерполяцию в два этапа: (1) определение функции вариограммы (пространственной автокорреляции) и (2) интерполяции неизвестных значений. Поскольку суще-

ствуют две отдельные задачи в геостатистике данные используются дважды: сначала для оценки пространственной автокорреляции, а затем для выполнения интерполяции.

На рисунке 1 показана эмпирическая вариограмма, полученная по данным измерения трития в пробах снежного покрова Фрунзенского района в 2014 г.

Вариограмма (расстояние h) = $0,5 * \text{среднее} [(\text{значение в точке } i - \text{значение в точке } j)^2]$ для всех пар точек, удаленных на расстояние h . В формулу входит вычисление половины квадрата разности между значениями пар точек. Пары точек группируются в бины (классы) для определенных лагов (расстояний). Например, средняя дисперсия вычисляется для всех пар точек, расположенных далее, чем в 40 м, и ближе, чем 50 м, друг от друга. Эмпирическая вариограмма – это график, на котором по оси y отложены усредненные значения вариограммы, а по оси x – расстояние (или лаг).

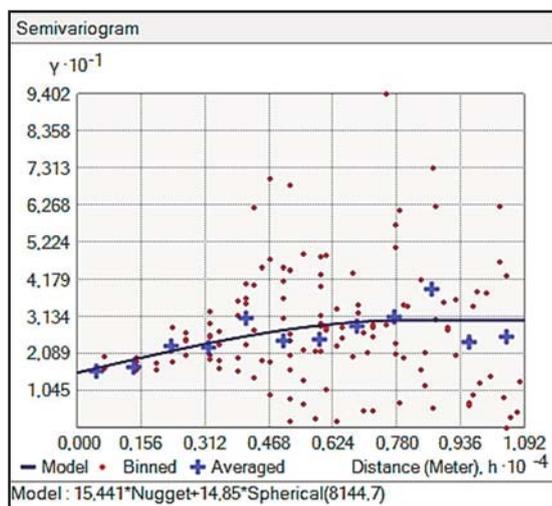


Рис. 1. Пример эмпирической вариограммы

Для построения функции вариограммы использовали сферическую модель. При определенном расстоянии кривая, описывающая модель, выравнивается. Расстояние, при котором модель начинает выравниваться, называется *радиусом влияния*. В нашем случае это 7 800 м. Опорные точки, отстоящие друг от друга на расстояние, меньшее, чем радиус влияния, пространственно коррелируют, в то время как точки, отстоящие друг от друга на расстояние, большее, чем радиус влияния, – нет. Значение, которое вариограмма, принимает в точке радиуса влияния (значение по оси y) носит название «порога».

Теоретически, если расстояние между точками равно нулю, значение вариограммы также должно быть равно нулю. Однако, при бесконечно малых расстояниях, разница между измерениями зачастую не стремится к нулю. Этот факт носит название *эффект самородка*. В нашем случае самородок = 15,44.

Эффект самородка может быть отнесен за счет ошибок измерений или пространственных составляющих дисперсии на расстояниях меньших, чем интервал выборки (или за счет обоих явлений).

Следующий важный этап построения карты распределения исследуемого параметра является выбор способа отображения, количества интервалов классификации и их границ.

Для показа размещения качественных и количественных характеристик экологических сюжетов, их взаимосвязей и динамики чаще всего, пожалуй, используется изолинейный способ с отображением методом послойной окраски. Территория делится на количественно однородные контуры (выделы), которые окрашиваются или штрихуются в соответствии с количественной характеристикой [1].

Техническим средством реализации изолинейного способа с отображением методом послойной окраски в модуле Geostatistical Analyst является инструмент «Контуры с заливкой». Контуры с заливкой – это полигональное представление геостатистического слоя [7]. При таком графическом отображении предполагается, что все точки, находящиеся внутри полигона, имеют одно и то же значение.

Особое место в методике построения геоэкологических карт занимает проблема выбора и обоснования интервалов классификации исследуемого параметра (например, содержание поллютантов в различных природных средах) [4].

Когда вы осуществляете классификацию данных, вы группируете сходные пространственные объекты в классы путем присвоения одного и того же символа каждому объекту, попадающему в один и тот же класс. Объединение пространственных объектов в классы позволяет вам легче опознавать участки данных. Диапазоны значений определяют, какие пространственные объекты попадут в класс, что в свою очередь влияет на отображение данных на карте.

Меняя границы класса, вы можете создавать карты, на которых одни и те же пространственные явления будут выглядеть по-разному. Вы можете установить границы классов вручную или воспользоваться стандартной схемой классификации.

По умолчанию при построении интерполированной карты с модулем Geostatistical Analyst данные классифицируются по десяти интервалам величины исследуемого параметра. При всей внешней привлекательности картографического изображения с относительно плавными переходами цветовой окраски между интервалами классификации для создания оценочной карты количество классов задается и обосновывается интерпретатором в зависимости от существующих нормативов на содержание поллютантов в компонентах исследуемой среды и эмпирически установленного характера территориального распределения изучаемого параметра.

Выбор границ интервалов классификации при построении цифровых карт не поддается строгому математическому обоснованию, и в конечном итоге определяется квалификацией интерпретатора в данной области тематической картографии. Практика показывает, что для характеристики загрязнения природных сред оптимальным количеством является 3–5 интервалов исследуемого параметра [4].

Пример карты распределения трития в снежном покрове. На рисунке 2 показана карта распределения трития в снежном покрове Фрунзенского района Санкт-Петербурга, построенная по результатам опробования в марте 2014 г. Как уже говорилось, здесь для интерполяции использован метод ординарного кригинга. В качестве способа отображения выбран способ качественного фона с отображением методом послойной окраски. Точками на карте показаны пункты опробования, рядом с которыми в тритиевых единицах (ТУ) даны значения трития в пробе.



Рис. 2. Карта распределения трития в снежном покрове Фрунзенского района

Исходя из диапазона полученных величин исследуемого параметра и данных мониторинга содержания трития в снежном покрове центральных районов Санкт-Петербурга в 2011–2013 гг. [2] нами было установлено три интервала классификации с границами, показанными в легенде карты.

Как видно из рисунка 2 по степени загрязнения трития территория района делится на три части. Наиболее чистой (от 1 до 6 ТУ) является северная половина района. Более загрязненной (от 6 до 12 ТУ), хотя и в пределах фоновых значений для Санкт-Петербурга (менее 12 ТУ), оказалась южная половина территории района. Наконец, самым «грязным» по концентрации трития (по результатам интерполяции от 12 до 25 ТУ) стал снег территории, примыкающий к станции метро «Купчино».

Интерполяция по детерминистскому методу обратно взвешенных расстояний (ОВР). Для интерполяции данных наблюдений за содержанием радиоуглерода нами выбран детерминистский метод обратно взвешенных расстояний (ОВР). Отказ от метода кригинга обусловлен тем, что для данных по ^{14}C для исследуемой территории не удалось подобрать вариограмму, т.е. рассчитать статистически обоснованную функцию пространственной автокорреляции. В свою очередь метод ОВР хорошо зарекомендовал себя при интерполяции таких экологических параметров, как загрязнение природной среды тяжелыми металлами или радионуклидами.

Интерполяция по методу обратных взвешенных расстояний – ОВР использует предположение, что объекты, расположенные ближе к другу в большей степени похожи, чем удаленные друг от друга. Чтобы

найти значение в какой-либо точке, метод ОВР использует опорные точки, находящиеся в окрестностях искомой. Эти опорные точки будут оказывать большее влияние на интерполируемое значение, чем те, которые от нее удалены на значительное расстояние. Точкам, находящимся в окрестностях искомой, присваиваются весовые значения большие, чем удаленным от нее точкам. Отсюда и пошло название метода: метод обратных взвешенных расстояний.

Метод ОВР – это жесткий интерполятор, при котором максимальные и минимальные значения на проинтерполированной поверхности могут иметь только точки наблюдений (опробования, мониторинга). ОВР лучше работает, если точки равномерно распределены по территории и если они не объединены в кластеры. Среди достоинств метода следует назвать то, что для данных нет никаких ограничений, а интерпретатору необходимо принять небольшое количество решений по параметрам модели. Главным недостатком является возможность образования «бычьих глаз» вокруг опорных точек.

Пример карты распределения радиоуглерода в снежном покрове. На рисунке 3 показана карта распределения радиоуглерода в снежном покрове Фрунзенского района, построенная по результатам опробования в марте 2014 г.



Рис. 3. Карта распределения радиоуглерода в снежном покрове Фрунзенского района

Интервалы классификации здесь установлены исходя из фактически полученных результатов и обоснованных ранее границ классификации данных мониторинга снежного покрова центральных районов города в 2011–2013 гг. [2].

Как видно из рисунка 4, основные величины загрязнения радиоуглеродом (от 0,4 до 0,8 Бк/л) равномерно распределены по территории района. При этом лишь отдельные участки характеризуются более низким уровнем загрязнения снега (менее 0,4 Бк/л) или, наоборот, более высоким – от 0,8 до 1,07 Бк/л (в основном в южной половине района).

Пример карты распределения суммарного показателя загрязнения снега тяжелыми металлами. Для интерполяции данных наблюдений за суммарным показателем загрязнения (Zc) [6], с учетом плотности пунктов сети мониторинга и общего их количества, нами выбран детерминистский метод обратно взвешенных расстояний (ОВР). Отказ от метода кригинга также как и в случае опробования радиоуглерода, обусловлен тем, что для данных по Zc не удалось подобрать вариограмму, т.е. рассчитать статистически обоснованную функцию пространственной автокорреляции.

На рисунке 6 показана цифровая карта мониторинга загрязнения снега тяжелыми металлами в 2011 г. в границах полигона «Центр», который расположен на территории исторического центра Санкт-Петербурга. Для изображения исследуемого параметра Zc выбран способ качественного фона (контуры с заливкой оттенками серого цвета). Точками на карте показаны пункты опробования, рядом с которыми даны значения Zc в пробе.

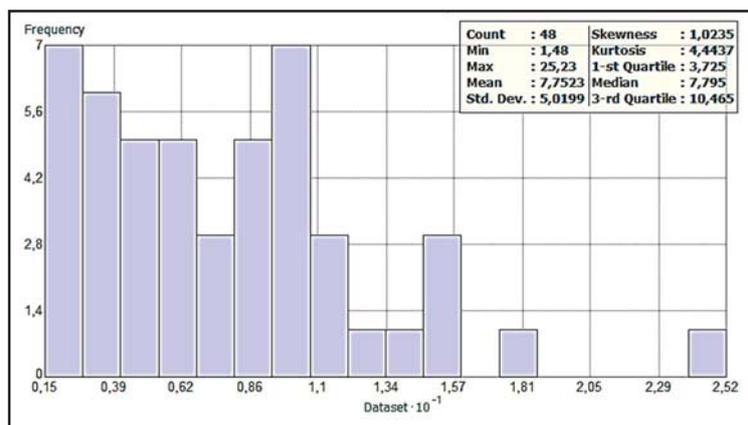


Рис. 5. Частотная характеристика распределения трития в пробах снега

Формально среднее значение содержания трития составило 7,7, медиана – 7,8; 75% квартиль – 10,5 триевых единиц. Однако, учитывая отличный от нормального характер распределения и наличие явного тренда в изменении содержания трития с юга на север (рис. 2), названные цифры могут быть сугубо оценочными.

На рисунке 6 показана частотная характеристика концентрации радиоуглерода по выборке из 48 проб.

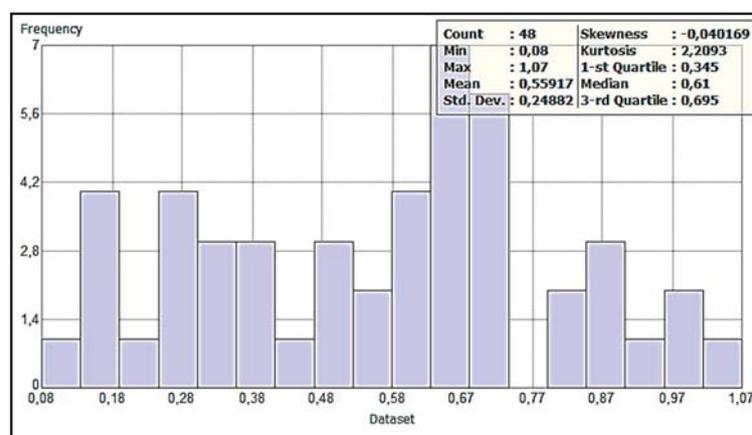


Рис. 6. Частотная характеристика распределения содержания радиоуглерода в пробах снега

В данном случае распределение может быть интерпретировано как близкое к нормальному: сопоставимые величины среднего и медианы, асимметрия отличается от нуля только в сотых долях показателя. Правда эксцесс (2,2) выходит за рамки допустимого для нормального распределения. Среднее значение содержания радиоуглерода составило 0,56, медиана – 0,61; 75% квартиль – 0,7 беккерелей.

Как видно из рисунка 7, на котором показана частотная характеристика суммарного показателя загрязнения тяжелыми металлами снежного покрова полигона «Центр» по выборке из 45 проб, распределение по главному показателю не является нормальным ввиду различия в значениях среднего и медианы.

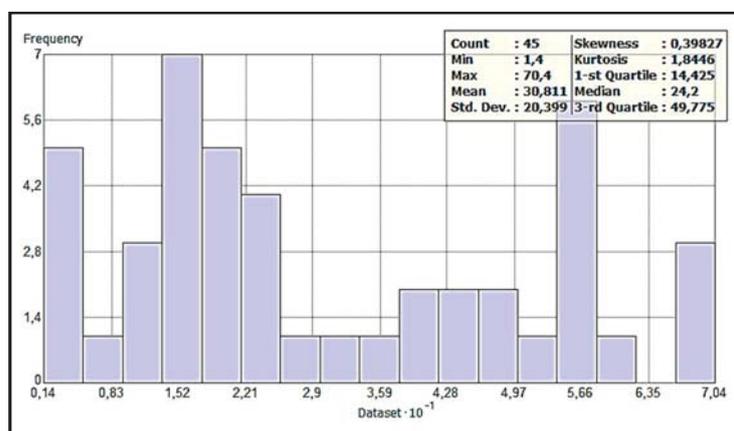


Рис. 7. Частотная характеристика распределения Z_c в пробах снега по полигону «Центр»

Среднее значение Zc, медиана и 75% квартиль по полигону «Центр» составили: 30,8; 24,2; 49,8, соответственно. Такие показатели характеризуют в целом низкий уровень загрязнения снега, при незначительном количестве проб со средним уровнем загрязнения.

Следует отметить, что приведенные выше оценки статистических показателей по выборкам из показателей загрязнения по совокупности распределенных по территории отдельных точек опробования не являются строгими с точки зрения классической статистики. Эти данные полезно использовать для сравнения частотных характеристик распределений на различных площадях (полигонах) или в разное время [2].

Выводы. Рассмотренные в работе примеры составления цифровых оценочных геоэкологических карт загрязнения снежного покрова радионуклидами ^3H , ^{14}C и тяжелыми металлами на территории мегаполиса могут быть использованы для обоснования общих приемов картографирования в среде ГИС ArcGIS явлений, локализованных на площадях и явлений сплошного распространения. Методика предусматривает выбор метода интерполяции – геостатистического (кригинг) или детерминистского (обратно взвешенный расстояний). Важным моментом интерпретации данных является обоснование количества интервалов классификации (3–5 для отображения геоэкологической обстановки) и границ выделенных классов. Последние устанавливаются, по возможности, с учетом существующих нормативов.

С помощью дополнительного модуля GeostatisticalAnalystArcGIS построены не только карты проинтерполированных поверхностей, но и проведена статистическая обработка данных по совокупности точек опробования (мониторинга). Суммарная статистика позволяет оценить степень соответствия данного распределения нормальному (логнормальному), положение центра распределения, размах точек относительно среднего, форму распределения и другие полезные показатели. Такие характеристики могут быть использованы для сравнения характера распределения поллютантов на различных площадях и в разное время.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК REFERENCES

1. Берлянт А.М., Востокова А.В., Кравцова В.И. и др. Картоведение: Учебник для вузов. – М.: Аспект Пресс, 2003. 477 с.
Berljant A.M., Vostokova A.V., Kravcova V.I. et al. Kartovedenie: Uchebnik dlja vuzov, Aspekt Press, M.: 2003, 477 p. (in Russian).
2. Лебедев С.В., Кулькова М.А., Нестеров Е.М., Зарина Л.М. Экологическая оценка окружающей среды Санкт-Петербурга по данным мониторинга содержания долгоживущих радионуклидов (^3H , ^{14}C) и тяжелых металлов в снежном покрове // Вода и экология: проблемы и решения. 2015. № 1 (61). С. 63–80.
Lebedev S.V., Kul'kova M.A., Nesterov E.M., Zarina L.M. Jekologicheskaja ocenka okruzhajushhej sredy Sankt-Peterburga po dannym monitoringa sodержanija dolgozhivushhih radionuklidov (^3N , ^{14}S) I tjazhelyh metallov v snezhnom pokrove // Vodajekologija: problemyireshenija, 2015, No 1 (61), pp. 63–80 (in Russian).
3. Лебедев С.В., Нестеров Е.М. Цифровая модель геоэкологической карты в ГИС ArcGIS: учебник. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2012. 367 с.
Lebedev S.V., Nesterov E.M. Cifrovaja model' geojekologicheskoy karty v GIS ArcGIS: uchebnik, Herzen University, St.-Petersburg, 2012. 367 p. (in Russian).
4. Лебедев С.В., Нестеров Е.М., Зарина Л.М. Оценочные типы цифровых карт в методологии геоэкологического картографирования // Проблемы региональной экологии. 2013. №5. С. 53–57.
Lebedev S.V., Nesterov E.M., Zarina L.M. Ocenochnye tipy cifrovyh kart v metodologii geojekologicheskogo kartografirovanija // Problemy regional'noj jekologii, 2013, No 5, pp. 53–57 (in Russian).
5. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве / Ревич Б.А., Сает Ю.Е., Смирнова Р.С. (Утв. 15 мая 1990 г. № 5174-90) – М.: ИМГРЭ, 1990.
Metodicheskie rekomendacii po ocenke stepeni zagryznenija atmosfernogo vozduha naseleennyh punktov metallami po ih sodержaniju v snezhnom pokrove i pochve / Revich B.A., Saet Ju.E., Smirnova R.S. (Utv. 15 maja 1990. No 5174-90), IMGRE, M.: 1990 (in Russian).
6. Сает Ю. Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. 335 с.
Saet Ju.E., Revich B.A., Janin E.P. Geohimija okruzhajushhej sredy, Nedra, M.: 1990, 335 p. (in Russian).
7. ArcGIS 9 Geostatistical Analyst. Руководство пользователя. – М.: DATA+, 2001. 278 с.
ArcGIS 9 Geostatistical Analyst. Rukovodstvo pol'zovatelja, DATA+, M.: 2001, 278 p. (in Russian).
8. Zarina L.M., Lebedev S.W., Nesterov E.M. Ecological Geochemical Investigations of the Contents of Heavy Metals in the Snow Cover in the Saint-Petersburg Region with Application of GIS Technologies. International Journal of Chemical Engineering and Applications. Vol. 2 No. 2, April 2011. pp. 117–120.