

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК504.054; 504.064.2

В.С. Тикун¹, О.Ю. Черешня², М.В. Грибок³, В.М. Яблоков⁴

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РЕГИОНОВ РОССИИ ПО УРОВНЮ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

На примере интегральной оценки показателей загрязнения воздуха в субъектах РФ с 2004 по 2014 гг. приводятся два способа классификации регионов с учетом «нечеткости» описывающих их показателей. Рассматриваются особенности отображения «нечетких» с точки зрения классификации субъектов Федерации на карте при помощи разного вида штриховок, оттенков черного цвета или применения различных цветов. Дополнительные графические приемы улучшают наглядность классификаций, дают информацию о выраженности свойств отдельных административных территориальных единиц.

Ключевые слова: классификация, переходные единицы, нечеткие множества, интегральная оценка, загрязнение воздуха.

Введение. Различные аспекты загрязнения воздуха в разных территориальных масштабах широко анализируются в научной литературе [Федорова, 2002; Vityukova, 2011 и др.], мы же сосредоточились на получении интегральных индексов на региональном уровне с учетом как ярко выраженных, так и размытых характеристик загрязнения воздуха в субъектах РФ. Сразу же следует оговориться, что такие характеристики и сами носят сглаженный характер, в том числе за счет неоднородности загрязнения в разных частях особенно крупных административно-территориальных единиц, таких, например, как Красноярский край, где расположен Норильск и почти абсолютно чистая Эвенкия. Кроме того, выбранный принцип территориальной привязки может вести к серьезным, но часто неизбежным искажениям при оценке загрязнения воздуха, особенно в тех случаях, когда объем загрязнений, локализованных в точечных источниках или небольших ареалах, соотносится с территорией всей административной единицы. Для точной локализации загрязнения необходимо знать не только местоположение источника загрязнения, но и всесторонне учитывать перенос воздушных масс [Рубанов, Тикун, 2005]. Но оценка загрязнения воздуха на региональном уровне является важной задачей, несмотря на указанные допущения. Такой подход требуется и для лиц, принимающих решения на уровне всего субъекта в административных рамках.

Цель данного исследования – разработка методики классификации регионов по уровню загрязнения воздуха с выделением переходных типов и специальных приемов для их визуализации.

При классификации географических явлений часто встречаются случаи, когда их проявления на некоторых территориях имеют не ярко выраженный, размытый характер. Исходные показатели, свойственные той или иной группе в классификации, у таких единиц либо выражены слабо, либо наоборот, наблюдаются свойства сразу нескольких групп. При использовании математических методов классификации, такие единицы все равно относятся к той группе, чьи свойства ей присущи в большей степени. Нам представляется, что будет более правильно выделять и соответствующим образом показывать на картах такие «нечеткие» единицы. Они представляют особый интерес для исследования и позволяют более многогранно представить наблюдаемое явление. Возможность однозначно относить территориальные единицы не только к одному классу, но и в случае их переходного характера, одновременно к нескольким классам, нам дает теория, предложенная Л.А. Заде [Zadeh, 1965].

Материал и методы исследований. Проведенная нами классификация базируется на данных Федеральной службы государственной статистики (Росстата). Для иллюстрации различных подходов к нечетким классификациям авторы произвели оценку загрязнения воздуха по регионам Российской Федерации с 2004 по 2014 гг. Основой для оценки стал показатель выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, отходящих от стационарных источников. Данный показатель является важнейшим показателем техногенного воздействия на атмосферу, хорошо отражающим его динамику и территориальную структуру [Регионы и города ..., 2014]. Исход-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория комплексного картографирования, зав. лабораторией, докт. геогр. н., проф.; *e-mail:* tikunov@geogr.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, региональный центр мировой системы данных, вед. инженер; *e-mail:* chereshnya.o@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория комплексного картографирования, науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* marina.ary@gmail.com

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, региональный центр мировой системы данных, вед. инженер; *e-mail:* vasily.yablokov@gmail.com

ные абсолютные показатели загрязнения воздуха информативны при рассмотрении их вклада в общее загрязнение, но так как регионы России крайне неоднородны, как по населению и территории, так и по производственному потенциалу, для более глубокой оценки абсолютных показателей недостаточно. Поэтому авторы обратились к оценке нагрузки, создаваемой выбросами, на территорию, на душу населения и по отношению к природоёмкости производства. Индикатор природоёмкости производства рассчитывается, как валовые выбросы загрязняющих атмосферу веществ, отходящие от стационарных источников, на единицу валового регионального продукта (ВРП) [Индикаторы устойчивого ..., 2001]. Он позволяет оценить интенсивность загрязнения воздушного бассейна. Величина показателя напрямую зависит от степени малоотходности технологии, природоохранных мероприятий, структуры производства, используемой энергии. Снижение интенсивности загрязнения воздушного бассейна является одним из условий устойчивого развития.

Исходя из этого, оценка производилась на основе трех относительных показателей: показателя выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных источников, отнесенного к площади субъектов РФ, численности населения, проживающего в них, и ВРП регионов.

Для расчета использовался оценочный алгоритм, разработанный одним из авторов [Тикун, 1997]. Он включает нормировку системы исходных показателей по формуле (1):

$$\hat{x}_{ij} = \frac{|x_{ij} - \overset{\circ}{x}|}{|\max/\min x_j - \overset{\circ}{x}|} \quad I = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (1)$$

где $\overset{\circ}{x}$ – наихудшие значения (по каждому показателю) из всех встречающихся с точки зрения их влияния на экологическую ситуацию в регионах России, то есть с наименьшими относительными величинами выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных источников; $\max/\min x_j$ – наиболее отличающиеся от $\overset{\circ}{x}$ значения показателей; n – количество исследуемых территориальных единиц (субъектов РФ); m – число показателей, использованных для расчетов, равное 3.

Путем сравнения показателей всех территориальных единиц с условной, характеризующейся значениями $\overset{\circ}{x}$, произведено их ранжирование. Оно осуществлялось с использованием евклидовых расстояний (d°) как меры близости всех территориальных единиц к условной, имеющей наихудшие значения по всему комплексу показателей. Применение данной меры потребовало обработки информационного массива по методу главных компонент с целью ортогонализации и «свертки» системы показателей.

Полученные значения d° интегральных оценочных характеристик для удобства дальнейшего анализа были дополнительно нормированы по формуле (2):

$$\hat{d}_i^\circ = \frac{d_i^\circ - \min d^\circ}{\max d^\circ - \min d^\circ}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (2)$$

Величина d° варьирует в пределах от нуля до единицы. Ноль соответствует наилучшей комплексной оценке выбросов загрязняющих веществ, а единица – наихудшей. Полученные значения интегральной оценки рассчитывались отдельно для каждого года (с 2004 по 2014 гг.).

Кроме возможности ранжирования полученных значений индекса, используемый алгоритм позволяет выделять однородные в оценочном отношении группы территорий и проводить их классификацию. Достигается это с помощью разделения соответствующих значений ряда евклидовых расстояний (d°) на однотипные ступени. Эта процедура может быть многовариантна, что позволяет получать целый спектр группировок территорий при разном их числе. Качество разбиения ряда на группы оценивалось с помощью коэффициентов канонической корреляции, а также коэффициентов неоднородности [Тикун, 1997], что позволило выбрать из множества результатов группировки один окончательный вариант, оптимальный со статистической точки зрения. В результате на шкале интегральных оценочных показателей загрязнения воздуха, округленных до сотых долей единицы, выделено 5 интервалов: 0,00–0,039 (наиболее благоприятная экологическая ситуация); 0,04–0,07; 0,08–0,11; 0,12–0,21; 0,22–1,00 (наиболее неблагоприятная ситуация).

Наиболее удобно экспериментировать со способами расчетов и приемов визуализации в рамках создаваемой нами атласной информационной системы (АИС) [Яблоков, Тикун, 2016]. Принципы создания таких систем сформулированы в главе «Атласные информационные системы для принятия решений» учебного пособия «Основы геоинформатики» [Тикун, 2004], которые реализуются в когнитивности, блочности, эволюционности, многовариантности, интеллектуальности и мультимедийности. Перечисленные принципы позволяют визуализировать геопространственные данные и проводить разнообразный анализ, в том числе разрабатывать сценарии развития, в данном случае на примере загрязнения атмосферного воздуха. Основу таких атласных систем составляет клиент-серверная архитектура.

Элементы, относящиеся к клиенту, – собственный браузер и интернет-портал веб-атласа, который подгружает необходимые элементы с веб-картографического и мультимедийного сервера. Веб-картографический сервер в свою очередь связан с ГИС-сервером, который служит распределителем пространственных данных. Пространственные данные на ГИС-сервер поставляются посредством настольных ГИС-приложений и другого обеспечения через системы управления базами данных, которые администрируются экспертами.

Структура АИС отражает три направления работы: анализ, визуализацию и принятие решений. Основу предложенной методики проектирования атласных информационных систем представляет так

называемая кастомизация – пользователь самостоятельно настраивает внешний вид системы, используемые алгоритмы и инструменты геоанализа. В случае экспериментов по классификации с выделением нечетких групп территорий при оценке загрязнения воздуха регионов нами использовались алгоритмы, описанные выше, но с возможностью изменений параметров и быстрого просмотра результатов. Такой подход позволял оперативно оценивать адекватность применяемой методики классификации исходя из формируемых картографических изображений и возможности их визуального сравнения. Благодаря принципу интеллектуальности АИС выявлялись наилучшие параметры классификации, а на основе работы системы поддержки принятия решений, встроенной в АИС, стало возможным предложить варианты развития для регионов, относящимся к различным нечетким группам.

Результаты исследования и их обсуждение. В результате проведенной классификации за каждый из рассматриваемых 11 лет выделено 5 групп регионов по уровню загрязнения воздуха. При анализе полученных результатов можно заметить, что некоторые регионы находятся в одной и той же группе на протяжении всего исследуемого периода, другие же переходят из одной группы в другую. Это свидетельствует о возможности нечеткой принадлежности к той или иной группе или же о пограничных интегральных значениях для некоторых территориальных единиц, которые могут быть описаны дополнительно. Для поиска таких нечетких принадлежностей исходные показатели за весь исследуемый период были усреднены и проведена классификация по сред-

ним значениям. В каждой группе была определена типичная единица.

Пограничными можно назвать такие территории, в которых одновременно ярко выражены свойства нескольких групп, в нашем случае двух. Для их выявления использованы евклидовы расстояния в условном трехмерном пространстве значений признаков для каждого региона к типичным единицам групп. Регионы, обладающие характеристиками одной группы, будут близки только к ее типичной единице. Но если расстояние до других типичных единиц незначительно выше, можно говорить о том, что такой регион переходный (рис. 1).

При картографировании переходных регионов их характер можно подчеркнуть с помощью сочетания цветов от двух ближайших для каждого из регионов типичных единиц. Полученные оценки с переходными группами представлены на рис. 2.

Выделение нечетких территориальных единиц решает и другую задачу. Методика позволяет выявить объекты, которые обладают слабо выраженными свойствами своей группы, но не обязательно они будут сколько-нибудь похожи на регионы другой группы. Такие единицы называются периферией, а единицы с ярко выраженными свойствами – ядром группы.

Алгоритм определения ядра и периферии группы следующий [Тикунов, 1997]: значения исходных показателей для каждой группы отдельно пересчитываются с помощью оценочного алгоритма (формулы 1 и 2, которые были приведены ранее). Из полученных значения d^o были выделены однородные ступени, по принципу выявления наибольших разрывов в ранжированном ряду. Причем заметим, что



Рис. 1. Евклидовы расстояния регионов от двух типичных единиц

Fig. 1. Euclidean distances of regions from two typical units

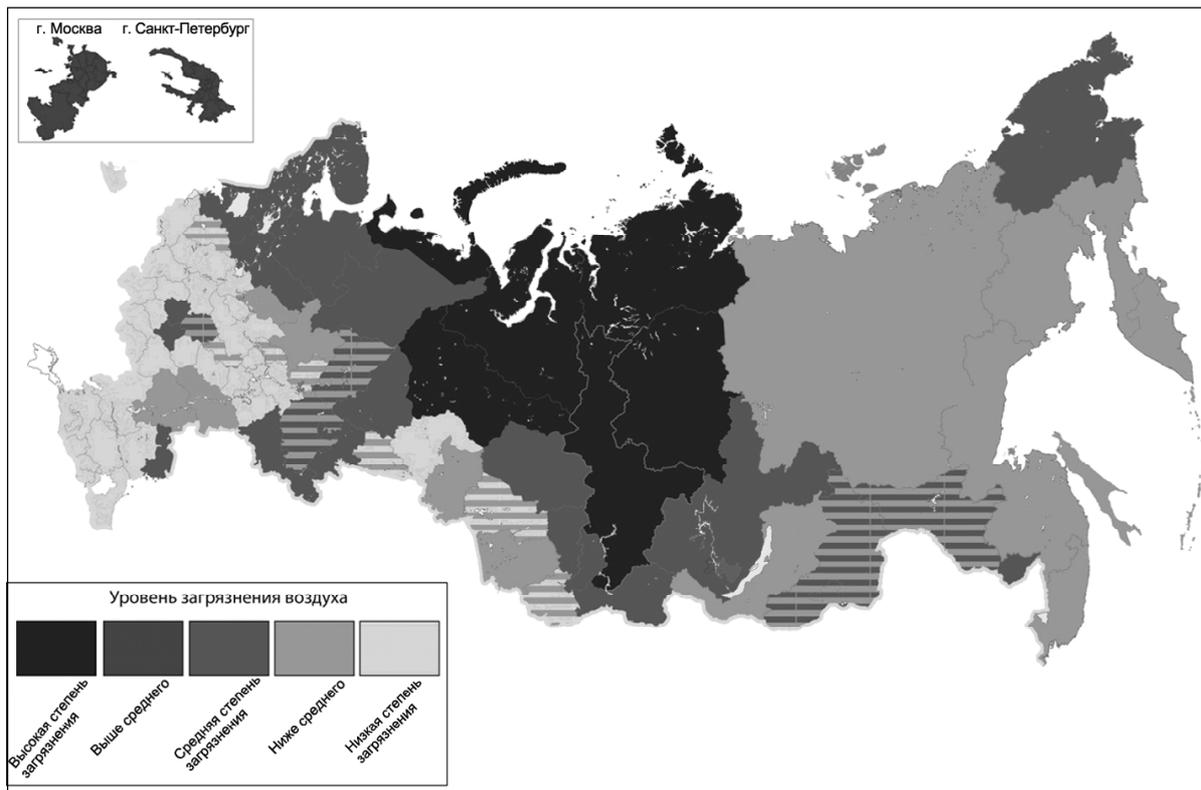


Рис. 2. Классификация уровня загрязнения воздуха регионов России с выделением переходных групп
 Fig. 2 Classification of air pollution levels in the regions of Russia with the identification of transition groups

мы не ограничивали количество выделяемых групп, но в силу достаточной однородности показателей у соответствующих регионов внутри группы, оптимальным со статистической точки зрения было разделение на две группы – ядро и периферию. Нанесенные на график значения d° , наглядно показывают степень их отличия (рис. 3).

Результат такой классификации показан на карте. При картографировании ядра группы дополнительно

выделялись сплошными штриховками, а периферия – только цветом или оттенками черного цвета (рис. 4).

Выводы:

– выявление переходных типов территориальных единиц позволяет подчеркнуть тот факт, что регионы не однородны, не статичны и зачастую не могут быть однозначно отнесены только к одной классификационной группе. Отображение переходных групп на карте позволяет наглядно показать ди-

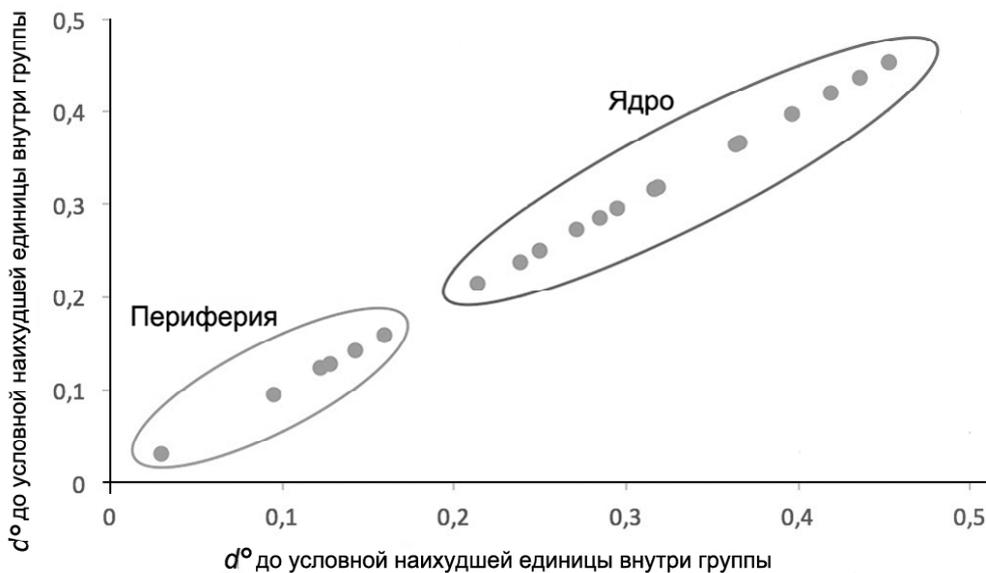


Рис. 3. Ранжирование d° внутри группы с уровнем загрязнения ниже среднего
 Fig. 3 Ranking d° within a group with below average pollution level

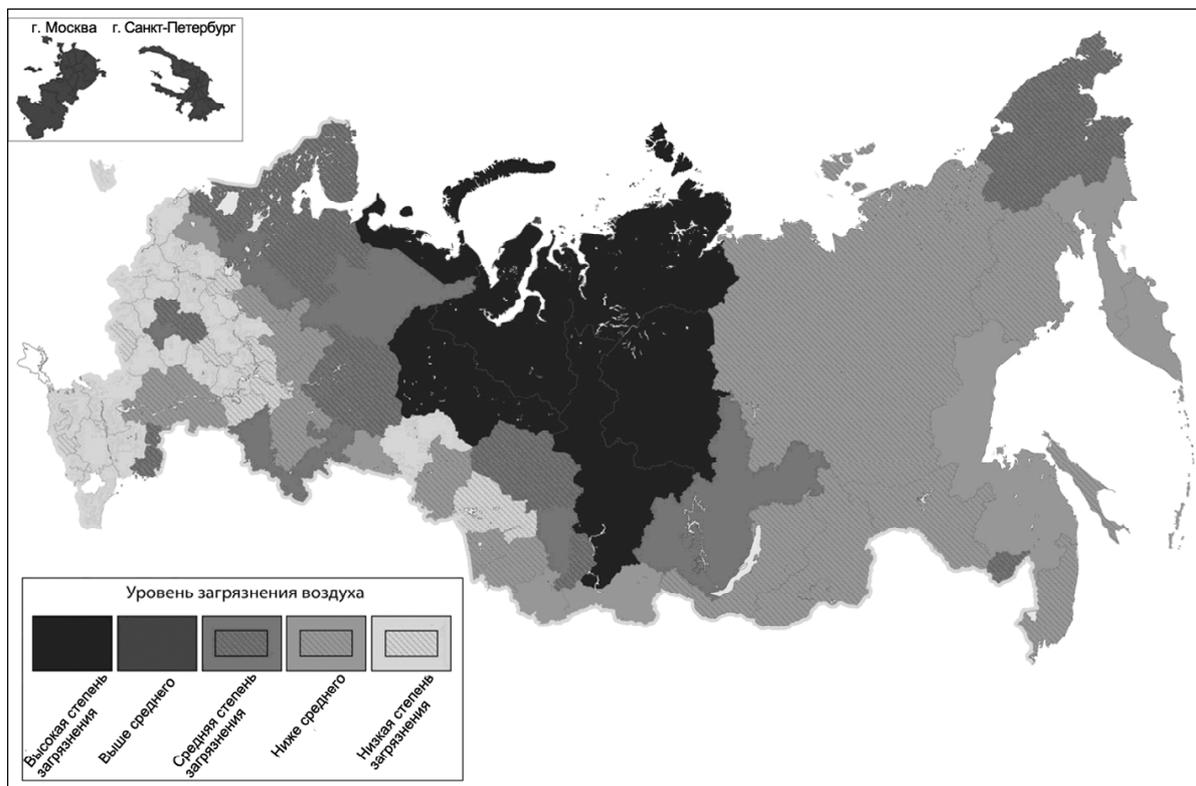


Рис. 4. Классификация уровня загрязнения воздуха регионов России с выделением характера выраженности свойств группы

Fig. 4 Classification of air pollution levels in the regions of Russia, highlighting the nature of the manifestation of group features

наличие исследуемого показателя, которая может проявляться в улучшении или ухудшении рассматриваемой ситуации. В данном случае – в загрязнении атмосферного воздуха;

– способ классификации с выявлением переходных типов регионов наилучшим образом подходит в том случае, когда необходимо разделить на группы ряд значений оценочных количественных показателей, не имеющих ярко выраженной интервальности. В данном случае на карте, представленной на рис. 2, при помощи пяти цветов (или оттенков серого цвета, как в нашем случае) фактически выделено не 5, а 7 групп регионов. То есть информативность карты выше, чем без выделения переходных регионов. При этом карта легко воспринимается и не перегружена количеством используемых цветов;

– способ классификации с обозначением ядер и периферии (четких и нечетких единиц внутри группы регионов) дает дополнительные возможности для анализа территорий внутри группы, подчеркивая степень их близости к эталонным единицам соответствующих групп. Такой способ классификации территориальных единиц представляется наиболее подходящим в тех случаях, когда необходимо выделение относительно однородных групп на основе полиструктурных наборов показателей, которые могут быть не связаны между собой напрямую, – например, при оценке различных характеристик социально-экономического развития регионов. Дополнительная штрихов-

ка (как на рис. 4) фиксирует внимание пользователя карты на субъектах РФ, где свойства выделенных групп выражены наиболее четко;

– при использовании различных способов и алгоритмов классификаций результаты группировки исследуемых территориальных единиц могут быть весьма разнообразными. Выбор оптимального способа классификации зависит от особенностей исходных данных, задач исследования и множества других факторов. Картографирование результатов классификаций позволяет увидеть полученные группировки регионов и их территориальное распределение, что дает дополнительные возможности для оценки адекватности выбранного способа классификации;

– совмещение нескольких графических приемов при картографировании результатов классификаций существенно повышает не только информативность карты, но и дает возможность наглядно показать смысловые особенности проведенной классификации;

– использование атласных информационных систем при проведении классификаций территориальных единиц существенно расширяет возможности пользователя, обеспечивая его инструментами анализа и визуализации информации, а также системой поддержки принятия решений. Применение АИС позволяет использовать возможности искусственного интеллекта для оперативной оценки адекватности различных методик классификации и выбора оптимальной из них.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-17-30009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Индикаторы устойчивого развития России (эколого-экономические аспекты) / Под ред. С.Н. Бобылева, П.А. Макеенко. М.: ЦПРП, 2001. 220 с.

Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / Под ред. Н.С. Касимова. М.: ИП Филимонов М.В., 2014. 560 с.

Рубанов И.Н., Тикун В.С. Методология оценки экологической составляющей устойчивого развития и состояния окружающей среды в российских условиях. ИнтерКарто/ИнтерГИС-11 «Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт». Мат-лы междунар. конф. (Ставрополь, Домбай, Будапешт). Ставрополь: Изд-во СГУ, 2005. С. 206–214.

Тикун В.С. Атласные информационные системы для принятия решений. Основы геоинформатики. Уч. пособие. М.: Академия, 2004. Т. 2. С. 285–304.

Тикун В.С. Классификации в географии: ренессанс или увядание? (Опыт формальных классификаций). М. - Смоленск: Изд-во Смол. ун-та, 1997. 367 с.

Федорова А.И. Биоиндикация загрязнения городской среды // Изв. РАН. Сер. геогр. 2002. № 1. С. 72–80.

Яблоков В.М., Тикун В.С. Принципы создания атласной информационной системы на базе интернета для устойчивого развития территорий // Вестн. Моск. ун-та. Сер. геогр. 2016. № 1. С. 29–38.

Bityukova V.R. Dynamics of atmospheric pollution by stationary sources // Regional Research of Russia. 2011. V. 1. № 4. P. 416–420.

Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. V. 8. P. 338–353.

Поступила в редакцию 05.03.2017

Принята к публикации 04.05.2017

V.S. Tikunov¹, O.Yu. Cheresnaya², M.V. Gribok³, V.M. Yablokov⁴

ASSESSMENT OF RUSSIAN REGIONS IN TERMS OF THE AIR POLLUTION LEVEL

Basing on the integrated assessment of air pollution in the Russian Federation from 2004 to 2014, two methods are suggested for classifying regions with due account of fuzzy units. Specific features of mapping fuzzy units using different types of hatching, shades of black or various colors are discussed. Additional graphical techniques increase the visibility of classifications and provide information about specific features of individual territorial units.

Key words: classification, transition units, fuzzy sets, integral estimation, air pollution.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project № 15-17-30009).

REFERENCES

Bityukova V. R. Dynamics of atmospheric pollution by stationary sources // Regional Research of Russia. 2011. V. 1. № 4. P. 416–420.

Fedorova A.I. Bioindikaciya zagryazneniya gorodskoj sredy [Bioindication of urban pollution] // Izvestiya RAN. Ser. Geogr. 2002. № 1. P. 72–80.

Indikatorы ustojchivogo razvitiya Rossii (ekologo-ekonomicheskie aspekty) [Indicators of sustainable development in Russia (ecological and economic aspects)] / Pod red. S.N. Bobileva, P.A. Makeenko. M.: CPRP, 2001. 220 p. (in Russian).

Regiony i goroda Rossii: integral'naja ocenka ekologicheskogo sostoyaniya [Regions and cities of Russia: an integrated assessment of the environmental state] / Pod red. N.S. Kasimova. M.: IP Filimonov M.V., 2014. 560 p.

Rubanov I.N., Tikunov V.S. Metodologiya ocenki ekologicheskoy sostavlyayushhej ustojchivogo razvitiya i sostoyaniya okruzhayushhej sredy v rossijskih usloviyah [Methodology for assessing the environmental component of sustainable development and the state of the environment in Russian

conditions] // InterCarto/InterGIS-11 «Ustojchivoe razvitie territorij: teoriya GIS i prakticheskij opyt»: materialy mezhdunar. konf. (Stavropol', Dombaj, Budapesht). Stavropol': Izd-vo SGU, 2005. P. 206–214.

Tikunov V.S. Atlasnye Informacionnye Sistemy dla prinyatiya reshenij [Atlas Information systems for decision-making] // Textbook Basics of Geoinformation / Ed. V.S. Tikunov, 2004, Academia Publ. House. V. 2. P. 285–304 (in Russian).

Tikunov V.S. Klassifikacii v geografii: renessans ili uvyadanie? (Opyt formal'nyh klassifikacij) [Classifications in geography: Renaissance or fading? (The experience of formal classifications)]. M.; Smolensk: Izd-vo Smol. un-ta, 1997. 367 p. (in Russian).

Yablokov V.M., Tikunov V.S. Principy sozdaniya atlasnoj informacionnoj sistemy na baze interneta dlya ustojchivogo razvitiya territorij [Principles of developing an Internet-based atlas information system for sustainable development of territories] // Vestnik Mosk. Un-ta, Seriya Geografiya. 2016. № 1. P. 29–38 (in Russian).

Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control, 1965. V. 8. P. 338–353.

Received 05.03.2017

Accepted 04.05.2017

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Integrated Mapping Laboratory, Head, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: tikunov@geogr.msu.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, World Data Centre for Geography, Leading Engineer; e-mail: cheresnaya.o@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Integrated Mapping Laboratory, Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: marina.ary@gmail.com

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, World Data Centre for Geography, Leading engineer; e-mail: vasily.yablokov@gmail.com