

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К КОМПЛЕКСНОМУ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОМУ РАЙОНИРОВАНИЮ ТЕРРИТОРИЙ

Г. В. Зибров*, В. М. Умывакин, А. В. Пахмелкин*

* Военный авиационный инженерный университет, г. Воронеж

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 1 марта 2010 г.

Аннотация. Рассматриваются методологические аспекты совместного применения качественных и количественных методов комплексного геоэкологического районирования территорий на основе геоинформационно-аналитических технологий.

Ключевые слова: комплексное геоэкологическое районирование территорий, графо-аналитический подход, геоинформационно-аналитические технологии.

Abstract. Considered methodological aspects of the complex quality and mathematic methods for the aggregate geoeological division of territory on the base geoinformation-analitic technologes.

Key words: aggregate geoeological division of territory, graph-analitic approach, geoinformation-analitic technologes

Введение

В работе предлагается графо-аналитический подход к построению комплексных карт геоэкологического состояния территорий. Данный подход реализует принцип комплексности эколого-ландшафтного районирования территорий, который «требует, чтобы при районировании территории и разделении ее на физико-географические единицы учитывалось сходство и различие всех компонентов, входящих в ландшафтный комплекс» [1, с. 101], и учитывает основные исходные принципы качественного и количественного эколого-хозяйственного районирования [2–5]. Ключевым методологическим приемом является представление районирования через типологическую группировку (на основе геоинформационных технологий [6]) и многомерную классификацию геообъектов (на основе технологий геоаналитики – анализа геоданных [5, 7]).

Здесь и далее под объектом районирования (ОР) понимается площадной природно-антропогенный объект (геообъект), которому соответствует элементарный участок изучаемой территории, выделенный по определенному принципу (например, бассейновому) и геоэкологическое состояние которого описывается фиксированным набором эколого-хозяйственных показателей (признаков,

переменных). Под показателем понимается количественная (числовая) или качественная (нечисловая) характеристика геообъекта, которая может быть измерена или вычислена для каждого геообъекта, не принимает одного и того же значения для всех геообъектов, для каждого геообъекта имеет только одно значение.

Отличительной особенностью рассматриваемых задач комплексного геоэкологического районирования (картирования) территорий является необходимость одновременного учета при выделении районов (территориальных классов геообъектов) совокупности взаимосвязанных, неравноценных и измеренных в различных шкалах эколого-хозяйственных показателей (ЭХП). Причем геообъекты, образующие один район (класс), могут не иметь смежных границ. Результаты районирования позволяют рассматривать геообъекты, попавшие в один класс, с единой точки зрения и проводить в их отношении одинаковую стратегию управления устойчивым развитием территорий.

Графо-аналитический подход к комплексному геоэкологическому районированию

Рассмотрим методологические особенности комплексного эколого-хозяйственного районирования территорий на основе типологизации и многомерной классификации геообъектов в рамках графо-аналитического подхода.

Вначале приведем несколько определений терминов «район» и «районирование», используемых в эколого-географических исследованиях.

А. Ф. Фортунатов в 1896 г. в «Трудах Вольного экономического общества» дал такую формулировку: «Районом следует называть точно обозначенную на карте часть земной поверхности, отличающуюся от других частей какими-нибудь признаками» (цит. по: [2, с. 352]).

Д. Б. Григ [2, с. 177–178] также считает, что «район означает часть земной поверхности, которая по определенным признакам отличается от окружающей территории». Он приходит к выводу, что можно успешно применять классификационные приемы и принципы при районировании, т. к. «классификация и районирование – это аналогичные процедуры», и поэтому необходимо «рассматривать методы районирования в свете принципов классификации и группировки, принятых в формальной логике». В. С. Тикуновым [5, с. 9] «районирование определяется как процедура вычленения целостных территориальных систем, когда внимание исследователей концентрируется на различиях между ними...». При этом «если рассматривать район как некоторое единство (не сводящееся лишь к однородности) слагающих систему элементов с их процессами взаимодействий, то само районирование можно считать специфической формой классификаций в широком понимании. В отличие от районирования, типология и оценка могут приводить к образованию территориально расчлененных таксонов, свойства которых определяются содержательной сущностью задачи».

Рассмотрим «классические» методы природно-хозяйственного районирования территории региона. В качестве примера процедуры типологической группировки может быть приведен метод ведущего фактора – традиционный метод районирования, «рекомендующий учитывать в первую очередь основной, ведущий фактор, определяющий в значительной мере все другие компоненты географического комплекса» [3, с. 91]. При этом «каждой таксономической единице присущ свой комплекс ведущих факторов». Например, «для района это геоморфологические особенности территории в сочетании с почвенно-растительными взаимосвязями...».

Методу ведущего фактора соответствует типологическое районирование (типологическая группировка), т. е. процедура разбиения классифицируемых ОР на типы (классы более высокого таксо-

номического ранга). Отметим, что традиционные приемы районирования – «наложение схем покомпонентного районирования, ведущего фактора, сопряженного анализа компонентов, генетический – позволяют решать многие вопросы, связанные с изучением бесконечного разнообразия природно-территориальных объектов» [4, с. 28].

Таким образом, традиционный подход к геоэкологическому районированию основан на определенной последовательности одномерных классификаций – типологических группировок по отдельным (частным) эколого-хозяйственным показателям ОР. При этом на языке геоинформационных технологий [6] осуществляется типологизация ОР отдельно по каждому ЭХП (создается отдельный тематический слой цифровой карты), а затем формируются группы (типы) геообъектов путем последовательного наложения соответствующих одномерных классификаций (тематических слоев). Очевидно, что здесь комплексное районирование осуществляется классическими методами наложения (сопоставления контуров) частных видов районирования (геоморфологического, почвенного и др.). Причем «линии совпадения или близкого расположения границ частных видов районирования принимаются за границы географических комплексов», что «позволяет охватывать все наиболее существенные черты и особенности ландшафта территориальных единиц» и что делает методы наложения «необходимым, первоначальным этапом всякого физико-географического районирования» [1, с. 92]. При этом ОР, отнесенные в один тип (район определенного таксономического ранга), характеризуются тем, что их нечисловые показатели принимают одинаковые значения, а количественные – из определенного интервала их диапазона изменения.

Данному способу многомерной классификации ОР с геоинформационной точки зрения соответствуют комплексные карты эколого-хозяйственного состояния территории, полученные на основе операции оверлейного покрытия тематических слоев – картографических результатов частных видов геоинформационного тематического районирования [6]. Здесь выделение районов высокого таксономического ранга осуществляется на основе последовательных типологических группировок, задаваемых наиболее существенными (ведущими) нечисловыми или количественными независимыми ЭХП геообъектов.

Основным ограничением широкого практического применения методов типологизации (качест-

венных методов классификации) в задачах комплексного районирования (а следовательно, и стандартных геоинформационных технологий) является предположение о независимости ведущих ЭХП. Кроме того, традиционные методы районирования – метод наложения и метод ведущего фактора – могут вступать в противоречие друг с другом в рамках принципа комплексности [1, с. 101].

С точки зрения теории анализа данных [7], задачи комплексного геоэкологического районирования являются задачами классификации и снижения размерности. Априорный анализ содержательных представлений о типе ОР актуализирует следующие задачи: выбор адекватного исходного описания геообъектов; выбор адекватных математико-географических моделей и методов классификации; содержательный анализ и интерпретацию результатов классификации объектов геоэкологического районирования. При этом основная трудность подготовки и принятия обоснованных эколого-экономических решений по управлению устойчивым развитием территорий связана с ограниченными психофизиологическими возможностями человека по переработке и анализу большого объема разнородной информации.

Многомерная классификация геообъектов основана на построении количественного комплексного измерителя их сходства/различия по всему комплексу исходных ЭХП и применении методов кластер-анализа (таксономии, распознавания образов) и визуализации геоданных [3–7].

Эти методы геоаналитики позволяют в полном объеме реализовать принципы комплексности и многовариантности районирования. В рамках графо-аналитического подхода основное внимание уделяется методам анализа геоданных, которые применимы в том случае, когда отсутствует обучающая выборка, т. е. когда нет описания классов геообъектов на языке эталонов или их описания на языке вероятностных распределений ЭХП. Визуализация геоданных базируется на предположении о том, что может быть осуществлен предварительный переход к одному или нескольким «новым», обобщенным показателям геообъектов (например, полученных с помощью методов главных компонент и многомерного шкалирования, дискриминантного анализа [7]) в результате агрегирования взаимосвязанных исходных ЭХП. Методологическая особенность предлагаемого графо-аналитического подхода заключается в том, что выделение и

описание классов геообъектов производится на языке одного или небольшого числа синтезированных обобщенных ЭХП – своего рода ведущих природно-хозяйственных факторов. Это позволяет снизить размерность исходного пространства показателей геообъектов до визуального представления, т. е. представить анализируемые эколого-хозяйственные данные в наглядно-обозримой форме и, следовательно, активно использовать ГИС-технологии. Подчеркнем, что человек гораздо легче воспринимает графическую информацию, чем аналитическую.

Методы кластер-анализа и визуализации эколого-хозяйственных данных в задачах комплексного районирования территорий предназначены для выделения из неоднородной совокупности геообъектов наиболее сходных между собой ОР и для отражения существующих различий их геоэкологического состояния. Все это позволяет более качественно анализировать внутреннюю структуру геоданных и проводить содержательную интерпретацию результатов многомерной классификации ОР, что в конечном счете дает возможность повысить обоснованность эколого-экономических решений по устойчивому развитию территорий.

При любом районировании на основе классификации геообъектов в явном или неявном виде используется предположение о том, что ОР одного класса более сходны, близки между собой, чем объекты различных классов. Под «близкими» ОР понимаются геообъекты с аналогичными (подобными) природно-хозяйственными условиями. Они характеризуются перечнем исходных ЭХП, относительно которых должна быть получена информация, достаточная для описания выделенных классов геообъектов на языке этих показателей. Описание классов может содержать сведения о том, присущи или нет конкретному классу те или другие значения нечисловых ЭХП (показателей качественного характера), а также информацию о минимальных и максимальных значениях, диапазонах изменения («размахе»), средних значениях, стандартных (среднеквадратических) отклонениях и других описательных (дескриптивных) статистических характеристиках количественных ЭХП.

Любая классификация геообъектов всегда является субъективной и относительной, т. к. она направлена на достижение определенной цели районирования. «Классификация должна служить конкретной цели», данная «цель определяет характер выбранных критериев и число выделенных

районов» [2, с. 197]. Отметим, что цель классификации не всегда может быть определена достаточно точно, что обуславливает трудность и неоднозначность формализованного представления сходства/различия между ОР. В связи с этим формулировка конкретных задач многомерной классификации геообъектов зависит от ее цели, а их обоснованное решение можно получить лишь на основе глубокого содержательного (качественного) анализа и интерпретации всей имеющейся исходной (априорной) информации о природно-хозяйственных условиях изучаемой территории и информации, полученной в результате применения ГИАС-технологий – компьютерных технологий геоинформатики и геоаналитики.

Качество классификации, т. е. качество разбиения совокупности ОР на однородные классы, существенно зависит от выбора перечня ЭХП, который осуществляется, вообще говоря, экспертным путем [5].

Классификационные модели являются дискретными моделями, т. к. в результате их использования

генерируется нечисловая информация, т. е. формируются номинальные или ранговые показатели, которые являются дискретными величинами (в отличие от непрерывных, континуальных) и которые могут принимать определенное конечное число значений – наименований классов. Таким образом, результат любого комплексного геоэкологического районирования представляет собой определенный синтетический обобщенный нечисловой показатель, значениями которого для каждого ОР являются названия (имена) соответствующих классов геообъектов. Отметим, что нечисловая информация является более устойчивой, чем количественная (чем данные, измеренные в количественных шкалах) при построении многомерной классификации ОР.

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод, что комплексное геоэкологическое районирование территорий на основе графо-аналитического подхода необходимо осуществлять в две стадии (рис. 1).

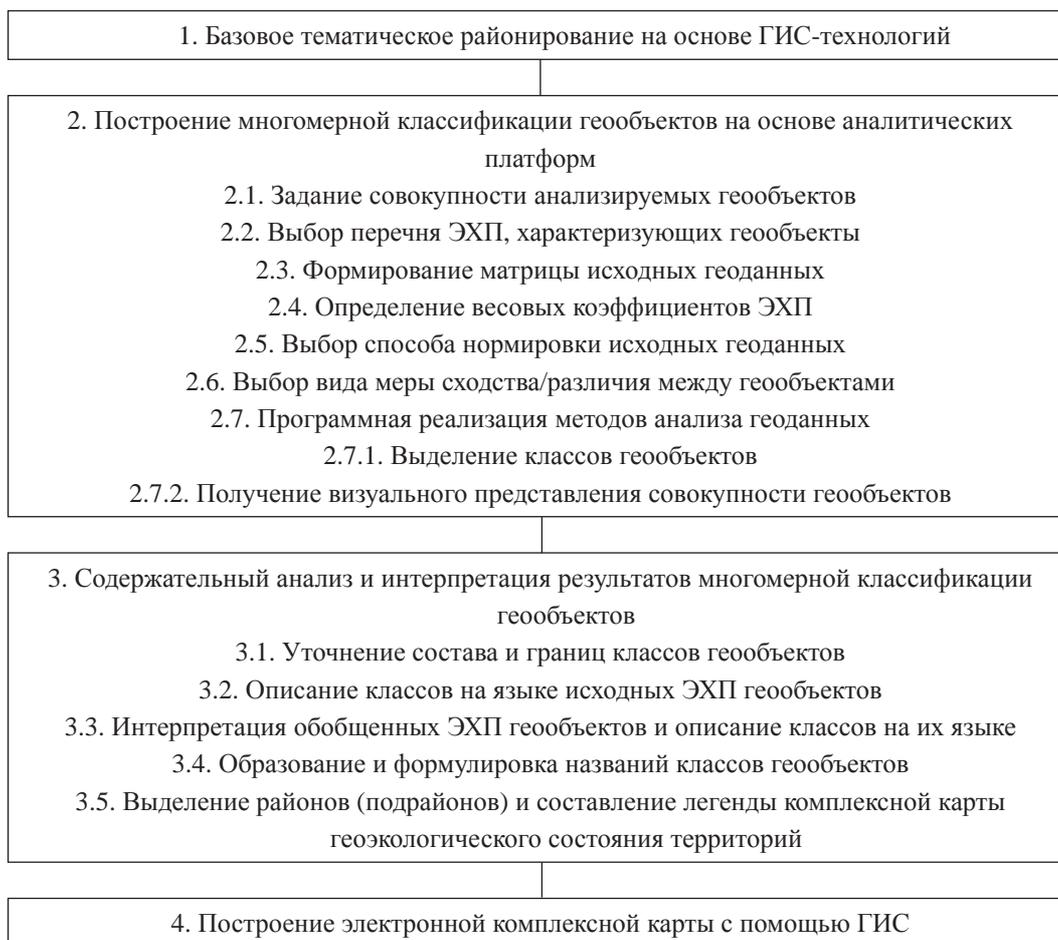


Рис. 1. Основные этапы комплексного геоэкологического картирования территорий на основе ГИАС-технологий

1. Построение «базовой» тематической карты («базовое» геоэкологическое районирование). Здесь для выделения районов (типов геообъектов) определенного таксономического ранга используются традиционные (качественные) методы районирования (метод ведущего фактора, метод наложения контуров) и стандартные ГИС-технологии. Как отмечалось выше, данная процедура базируется на последовательности одномерных типологических группировок, задаваемых наиболее существенными ЭХП (ведущими факторами) и позволяет реализовать принцип соотношения и сочетаемости [1]. На этой стадии могут активно использоваться современные ГИС-технологии для выполнения операций покрытия (наложения) соответствующих тематических слоев (карт) и построения электронной «базовой» тематической карты с выделением на ней границ районов «базового» таксономического ранга и границ объектов районирования – элементарных территориальных единиц, соответствующих самому низкому таксономическому рангу.

2. Выделение классов (подрайонов) внутри базовых районов с помощью процедур анализа многомерных геоданных. На данной стадии применяются собственно геоинформационно-аналитические технологии (ГИАС-технологии), обеспечивающие совместное использование программных систем геоинформатики и геоаналитики. В качестве системообразующего ядра геоинформационно-аналитических систем (ГИАС) используются стандартные программные оболочки ГИС, с помощью которых многоаспектное описание совокупности анализируемых геоэкообъектов органично связывается с их картографическим представлением [6].

Функциональные возможности современных ГИС и аналитических платформ позволяют собрать разнородные геоданные, в едином виде их хранить, обновлять, анализировать, производить любые операции, следить за всеми изменениями, получать самые разные карты и таблицы. Так, ГИС позволяют выделять границы речных водосборов по данным о высотах рельефа, определять уклоны склонов, строить изолинии и многое другое.

Объединение подобных возможностей со стандартными средствами базового набора ГИС обеспечивает подготовку полноценных эколого-хозяйственных данных для математических моделей многомерной классификации и визуального представления геообъектов внутри ГИАС.

Программные системы анализа многомерных данных позволяют при реализации ГИАС-технологий использовать новые мощные средства статистического и графического моделирования задач комплексного геоэкологического картирования территорий. При этом целесообразно проводить вычислительные эксперименты и расчеты с использованием различных моделей анализа эколого-хозяйственных данных (факторного анализа, кластер-анализа, многомерного шкалирования [7] и др.). Возможность выбора различных способов нормировки данных, видов меры сходства/различия геообъектов, значений весовых коэффициентов эколого-хозяйственных показателей и методов геоаналитики позволяет реализовать принцип многовариантности при построении многомерной классификации объектов геоэкологического районирования [3, 5]. Пути проявления многовариантности разнообразны и охватывают все стадии классификационного моделирования начиная с анализа различных подходов при формулировке задач и целей классификации.

Таким образом, при комплексном геоэкологическом картировании территорий с помощью ГИАС-технологий сначала с помощью ГИС проводится базовое эколого-хозяйственное районирование средствами тематического картографирования, потом осуществляется кластеризация и визуализация геоданных с помощью аналитических платформ, а затем осуществляется трансляция результатов компьютерного моделирования обратно в ГИС для создания электронных комплексных карт (см. рис. 1).

Отметим, что анализ и содержательная интерпретация выходной информации ГИАС осуществляются по специально разработанной методике.

Применение геоинформационно-аналитических технологий для комплексного геоэкологического картирования территорий

Рассмотрим пример практической реализации ГИАС-технологий для комплексного районирования территории Белгородской области по интенсивности развития почвенно-эрозионных процессов (рис. 2). Основной целью данного геоэкологического картирования является оценка интенсивности водной эрозии земель для эколого-экономического обоснования комплекса водорегулирующих противозерозионных мероприятий на уровне речного бассейна [8].

1. Базовое геолого-геоморфологическое районирование региона. При изучении факторов, влияющих на развитие эрозионных процессов, в первую очередь необходимо выявить районы с наиболее высокой интенсивностью эрозионных процессов. Для этого необходимо провести геоэкологическое картирование территории Белгородской области по интенсивности развития почвенно-эрозионных процессов (рис. 2). Основной целью данного геоэкологического картирования является оценка интенсивности водной эрозии земель для эколого-экономического обоснования комплекса водорегулирующих противозерозионных мероприятий на уровне речного бассейна [8].

яющих на развитие эрозионных процессов, было установлено, что интенсивность овражной эрозии и смыва почв в значительной степени определяются особенностями рельефообразующих пород и почвенного покрова, глубиной местных базисов эрозии и расчлененностью территории долинно-балочной сетью. При этом на территории Белгородской области выделено три района: I. *Район верхнемеловых рельефообразующих пород*. Он характеризуется значительным развитием плоскостного смыва и особенно линейной эрозии. II. *Район четвертично-палеогеновых песчано-глинистых и верхнемеловых мело-мергельных рельефообразующих пород*. Здесь процессы смыва почв развиты сильно, а овражная эрозия менее распространена, что связано с небольшими местными базисами эрозии и относительно высокой облесенностью территории (16 %). III. *Район четвертичных ледниковых глинисто-суглинистых, палеогеновых песчано-глинистых и мело-мергелистых верхнемеловых рельефообразующих пород*. Он отличается большой интенсивностью овражной эрозии и плос-

костного смыва. Этому способствует большая глубина местных базисов эрозии и незначительная облесенность (8 %) территории.

На данном этапе комплексного районирования применяются ГИС-технологии для выполнения операций оверлейного покрытия соответствующих тематических слоев (карт) и построения электронной «базовой» тематической карты.

2. Многомерная классификация геообъектов (объектов районирования) по набору существенных ЭХП. В соответствии с бассейновой концепцией в качестве объектов районирования приняты водосборы малых и средних рек Белгородской области (см. рис. 2). На территории региона выделено 24 речных водосбора площадью от 0,8 до 3,6 тыс.км²: 1 – Илек, 2 – Пена, 3 – Ворскла, 4 – Лопань, 5 – Ивня, 6 – Псел, 7 – Сеймица, 8 – Харьков, 9 – Северский Донец, 10 – Сейм, 11 – Осколец, 12 – Короча, 13 – Нежеголь, 14 – Волчья, 15 – Козинка, 16 – Оскол, 17 – Усердец, 18 – Потудань, 19 – Камышенка, 20 – Тихая Сосна, 21 – Валуй, 22 – Черная Калитва, 23 – Ураева, 24 – Айдар.

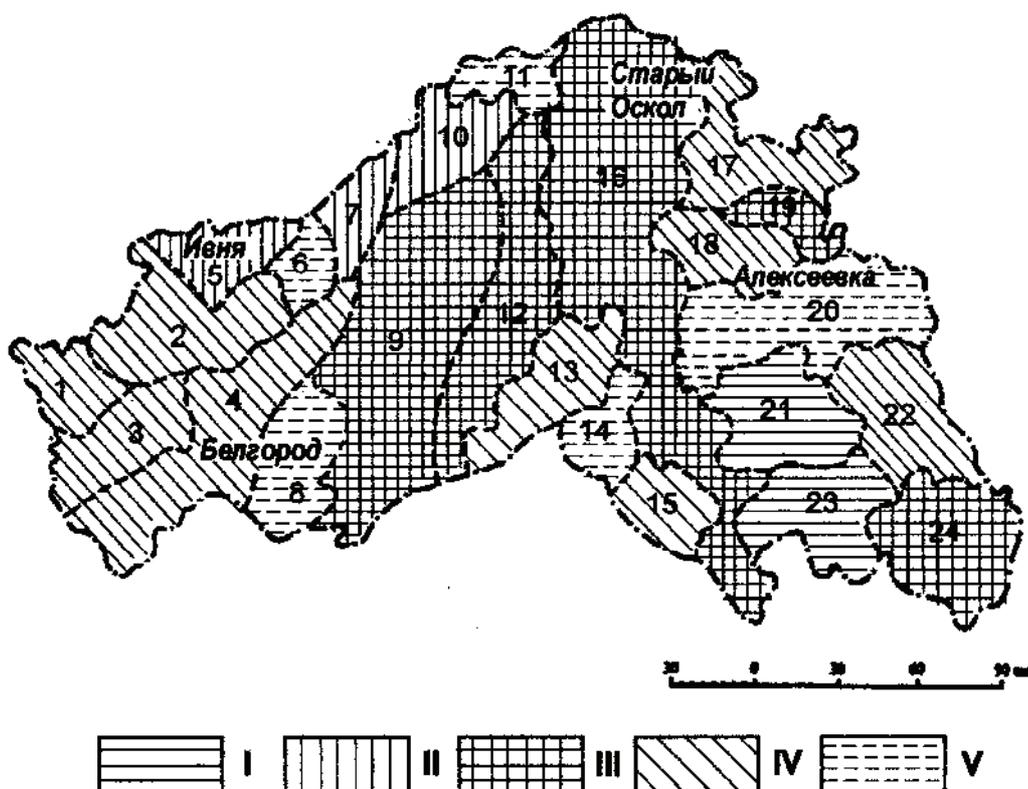


Рис. 2. Комплексное районирование Белгородской области по интенсивности почвенно-эрозионных процессов. Подрайоны (классы): I – интенсивность сильная, преобладает овражная эрозия; II – интенсивность сильная, преобладает плоскостной смыв; III – интенсивность сильная, овражная эрозия и плоскостной смыв развиты в равной степени; IV – интенсивность средняя, овражная эрозия и плоскостной смыв развиты в равной степени; V – интенсивность слабая, преобладает плоскостной смыв

Речные водосборы представляют собой объекты геоэкологического районирования территории региона, в пределах которых формируется водный режим, почвенно-растительный покров и развиваются процессы плоскостного смыва и овражной эрозии. В перечень существенных ЭХП включены: y_1 – «смывость почв с площади с.-х. угодий, %»;

y_2 – «густота оврагов, км/км²», и y_3 – «плотность действующих вершин оврагов, шт./км²».

На втором этапе внутри каждого района (типа) были выделены подрайоны (классы) на основе количественной меры сходства/различия объектов районирования по всем ЭХП (рис. 3).

Матрица исходных данных приведена в табл. 1.

Таблица 1

Матрица исходных данных и значения обобщенных показателей интенсивности эрозионных процессов в Белгородской области

Номер объекта	Смывость почв, y_1	Густота оврагов, y_2	Плотность оврагов, y_3	Плоскостная эрозия, Φ_1	Овражная эрозия, Φ_2	Эрозионная опасность, d
1	48,27	0,35	1,12	0,5775	0,3389	0,1836
2	37,53	0,55	0,54	0,4654	0,4868	0,1895
3	42,30	0,48	1,13	0,5442	0,4418	0,2204
4	40,75	0,48	0,80	0,5133	0,4315	0,1727
5	34,80	0,27	0,55	0,4488	0,2920	0,0747
6	34,80	0,10	1,10	0,5015	0,1518	0,0935
7	21,97	0,38	0,58	0,3726	0,3715	0,0965
8	8,68	0,11	0,92	0,3255	0,1586	0,0416
9	33,34	0,67	1,28	0,4930	0,6074	0,3986
10	33,15	0,25	0,72	0,4596	0,2680	0,0782
11	51,00	0,10	0,96	0,5900	0,1658	0,1073
12	37,46	0,60	1,12	0,5178	0,5411	0,2732
13	39,82	0,39	0,50	0,4675	0,3714	0,1194
14	8,17	0,17	0,64	0,3003	0,2142	0,0359
15	54,80	0,47	0,98	0,6173	0,4258	0,2264
16	41,82	0,73	1,15	0,5439	0,6313	0,3860
17	38,19	0,50	0,90	0,5040	0,4547	0,1896
18	49,90	0,54	1,20	0,5961	0,4911	0,2896
19	23,80	0,90	0,80	0,3992	0,7385	0,6460
20	19,45	0,10	1,00	0,3971	0,1478	0,0609
21	67,60	0,37	0,95	0,6916	0,3568	0,7756
22	49,79	0,59	0,77	0,5740	0,5184	0,2522
23	64,13	0,37	0,98	0,6701	0,3553	0,3408
24	28,34	0,61	0,80	0,4285	0,5355	0,2310

Нормировка геоданных осуществлялась следующим способом: $\tilde{y}_j^i = (y_j^i - y_j^{\min}) / (y_j^{\max} - y_j^{\min})$. Здесь \tilde{y}_j^i и y_j^i – соответственно нормированное и исходное значения j-го ЭХП i-го ОР; y_j^{\min} и y_j^{\max} – соответственно минимальное и максимальное значение j-го ЭХП для всей совокупности ОР, $j = 1, 2, 3; i = 1, 2, \dots, 24$. В качестве комплексной меры сходства/различия («расстояния») между i-м и l-м ОР использовалась взвешенная «городская» метрика («city-block»):

$$\rho_{il} = \sum_{j=1}^3 \beta_j |\tilde{y}_j^i - \tilde{y}_j^l|, \quad i, l = 1, 2, \dots, 24,$$

где $\beta_1 = 0,35, \beta_2 = 0,55, \beta_3 = 0,10$ – экспертные оценки весов ЭХП.

Для углубленного анализа внутренней структуры эколого-хозяйственных данных использовались метод восходящей (агломеративной) иерархической классификации [7] и метод классификации в нечетких множествах [5]. В результате вычисли-

тельных экспериментов, проведенных в рамках многовариантного подхода к построению многомерной классификации геообъектов, выделено пять территориальных классов – почвенно-эрозийных районов Белгородской области (табл. 2, рис. 2).

Графическое представление водосборов, полученное с помощью методов многомерного шкалирования (средств компьютерной визуализации) [7], имеется на рис. 3.

Таблица 2

Районы Белгородской области с различной интенсивностью почвенно-эрозийных процессов

Район	Площадь, тыс. км ²	Смытость почв, %	Густота оврагов, км/км ²	Плотность оврагов, шт./км ²
I	13,20	23,80–41,82	0,39–0,90	0,50–1,28
		34,10	0,65	0,94
II	2,04	64,13–67,60	0,37–0,37	0,95–0,98
		65,87	0,37	0,97
III	7,60	38,19–54,80	0,35–0,59	0,54–1,20
		45,79	0,49	0,93
IV	1,05	21,97–35,15	0,25–0,38	0,55–0,72
		30,64	0,30	0,62
V	3,36	8,17–51,00	0,10–0,17	0,63–1,10
		24,42	0,11	0,92

Примечание: вверху приведены экстремальные, внизу – средние значения ЭХП.

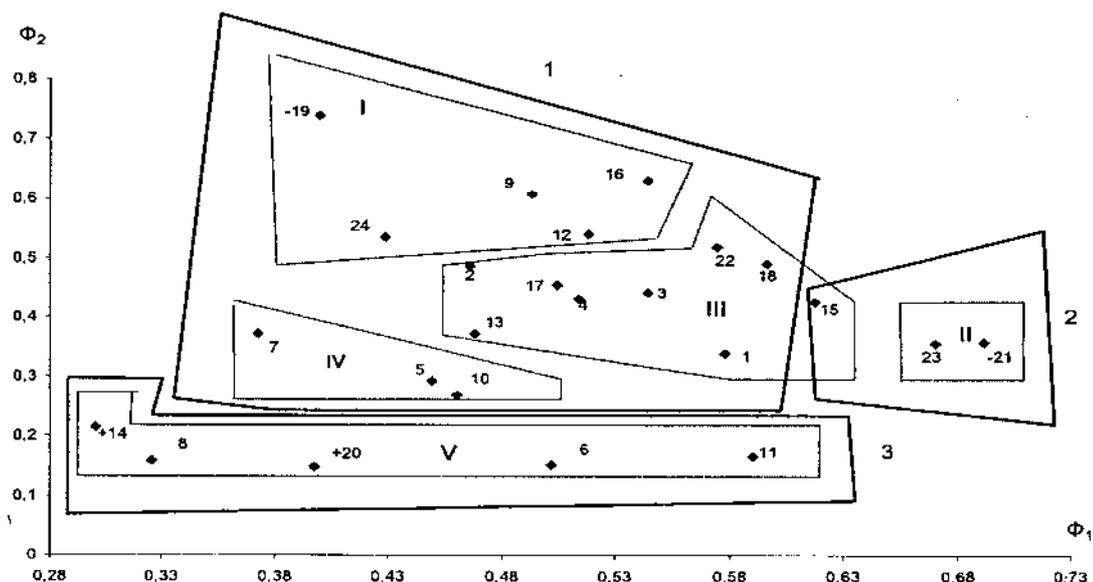


Рис. 3. Компьютерная кластеризация и визуальное представление речных водосборов Белгородской области. Φ1 – обобщенный показатель плоскостной эрозии; Φ2 – обобщенный показатель овражной эрозии
 ——— граница района при классификации в нечетких множествах;
 - - - - - граница района при восходящей иерархической классификации

При этом качество отображения 24 точек (ОР) из трехмерного пространства исходных ЭХП на плоскость, образованную обобщенными показателями (ведущими факторами), оценивалось с помощью критерия вида

$$S = (1 / \sum_{i \in I} \rho_{il}) \sum_{i \in I} (\rho_{il} - d_{il})^2 / \rho_{il},$$

где d_{il} – расстояние между i -й и l -й точками (ОР) в пространстве ведущих факторов.

Применение методов многомерного шкалирования геоданных позволило построить ведущие факторы Φ_1 и Φ_2 интенсивности почвенно-эрозионных процессов на речных водосборах Белгородской области (см. рис. 3). Их значения имеются в табл. 1.

Анализ результатов компьютерной кластеризации и визуализации геоданных позволил уточнить состав районов (водосбор № 13 перенесен из первого района в третий) и дать их содержательную интерпретацию.

В связи с тем что распределение точек по оси Φ_1 определяется в основном смытостью почв, а по оси Φ_2 – преимущественно густотой и плотностью оврагов, фактор Φ_1 является обобщенным ЭХП плоскостной эрозии, а фактор Φ_2 – обобщенным ЭХП овражной эрозии. Все районы отличаются величиной фактора Φ_2 . В первом районе этот обобщенный ЭХП достигает наибольшего значения, а в пятом – минимального. Таким образом, при комплексном районировании Белгородской области по интенсивности развития почвенно-эрозионных процессов ведущую роль играет обобщенный показатель овражной эрозии.

Наиболее сильное проявление овражной эрозии отмечается в первом подрайоне, находящемся в центральной и юго-восточной части Белгородской области. Его площадь равна 13,2 тыс. км². Густота оврагов в районе достигает 0,9 км/км² (в среднем 0,65), плотность – 1,28 шт./км² (в среднем 0,94). Во втором подрайоне, который включает западную, северо-восточную и южную часть региона, плоскостная и овражная эрозия проявляются в равной степени сильно. Здесь преобладает плоскостной смыв (от 64,13 до 67,90 % от площади с.-х. угодий). В пятом подрайоне (площадь 3,36 тыс. км²) смытые почвы в среднем занимают 24,42 % площади с.-х. угодий, средняя густота оврагов составляет 0,11 км/км², а плотность оврагов – 0,92 шт./км².

Выбор комплекса противоэрозионных мероприятий на основе построения интегральной оценки геоэкологической опасности территорий

Ухудшение экологического состояния окружающей среды, с одной стороны, и необходимость экономического роста – с другой, образуют основное противоречие в реализации стратегии устойчивого развития территорий.

В данной ситуации для измерения экономической, социальной и экологической эффективности результата хозяйственной и иной деятельности предлагается использовать интегральную оценку экологической опасности территорий в рамках двухкритериального подхода к управлению качеством территорий [9].

Анализ современного эколого-хозяйственного состояния территорий показывает, что до сих пор мы имеем дело с количественными (экономическими) критериями территориального развития, позволяющими ответить на вопрос, сколько нужно платить за результат. В то же время необходимо отвечать на вопрос, сколько и чем придется расплачиваться за неучет требований к качеству результата (за неучет экологической безопасности/опасности территорий) и неопределенности экологических, социальных и экономических последствий хозяйственной деятельности.

Принцип двухкритериальности управления качеством территорий заключается в необходимости измерения эффективности результата хозяйственной деятельности в количественном и качественном аспектах, т. е. на языке двух основных противоречивых обобщенных критериев: «экономического» – «количество» и «экологического» – «качество» или «риск недостижения цели устойчивого развития территорий». Другими словами, любая количественная оценка (критерий) эффективности результата должна быть дополнена «качественной» оценкой (конечно, в формализованном виде) – оценкой экологической безопасности/опасности территорий.

Предлагаемая методология двухкритериального подхода к принятию обоснованных эколого-экономических решений с самого начала ориентирована на использование нелинейной интегральной оценки экологической опасности (риска недостижения качества) территорий [8].

Рассмотрим вопросы применения результатов комплексного эколого-хозяйственного районирования по интенсивности развития почвенно-эрозионных процессов и интегральной оценки эрозион-

ной опасности земель на речных водосборах Белгородской области (см. рис. 2 и табл. 1).

Борьба с водной эрозией является важнейшей составляющей мероприятий по комплексному использованию и охране земель в ЦЧР. При этом основная цель заключается в снижении интенсивности плоскостной и овражной эрозии. Первоочередность и состав комплекса противоэрозионных мероприятий (КПМ) предлагается устанавливать на основе интегральной оценки эрозионной опасности земель на речных водосборах [8]. Данный комплекс включает агролесомелиоративные мероприятия и строительство простейших гидротехнических сооружений и противоэрозионных водоемов. При выборе наилучших вариантов КПМ основными целями являются максимальное снижение интенсивности плоскостной и линейной эрозии при наименьших затратах на реализацию планируемой природоохранной деятельности. В число частных эколого-экономических критериев включены следующие показатели: y_1 – «смытость почв с площади с.-х. угодий, %»; y_2 – «густота оврагов, км/км²»; y_3 – «плотность действующих вершин оврагов, шт./км²»; y_4 – «затраты на противоэрозионные мероприятия, тыс. руб./ км²». Задача многокритериального выбора наилучших вариантов КПМ на речном водосборе заключается в том, чтобы значения показателей y_1 – y_4 сделать как можно меньшими. Ее решение обеспечивается достижением разумного компромисса между противоречивыми критериями, которые характеризуют эрозионную опасность земель, связанную со смывом почв и ростом оврагов, и экономический эффект, определяемый стоимостью КПМ.

В работе [5] описан процесс подготовки и принятия компромиссных (парето-оптимальных) эко-

лого-экономических решений на основе комплекса методов анализа многомерных геоданных и интегральной оценки геоэкологического состояния эродированных земель на водосборе р. Черная Калитва – типичного для Белгородской области. Здесь смытые почвы занимают 49,79 % площади с.-х. угодий, густота оврагов достигает 0,59 км/км², а плотность действующих вершин оврагов – 0,77 шт./км². Облесенность данного водосбора составляет всего лишь 3 % территории, глубина местного базиса эрозии – 148 м, что и предопределяет здесь интенсивное развитие почвенно-эрозионных процессов.

Для обоснования выбора комплекса природоохранных мероприятий на данном водосборе было получено 256 репрезентативных варианта КПМ, из которых выделено 92 парето-оптимальных. Эти варианты объективно лучше остальных сразу по всем четырем критериям y_1 – y_4 и именно поэтому среди них необходимо выбирать наилучшие варианты КПМ.

Агрегирование первых трех из четырех критериев y_1 – y_4 позволяет построить интегральную оценку эрозионной опасности земель, а четвертого – определить экономический эффект от реализации КПМ. Это позволяет перейти к обобщенной двухкритериальной задаче поиска наилучших вариантов КПМ.

В результате программной реализации методики интегральной оценки экологической опасности территорий [8] было установлено, что лишь 33 варианта из 92 отвечают установленным требованиям к качеству земель – нормативным уровням по каждому ЭХП. Визуальное представление этих вариантов показано на рис. 4.

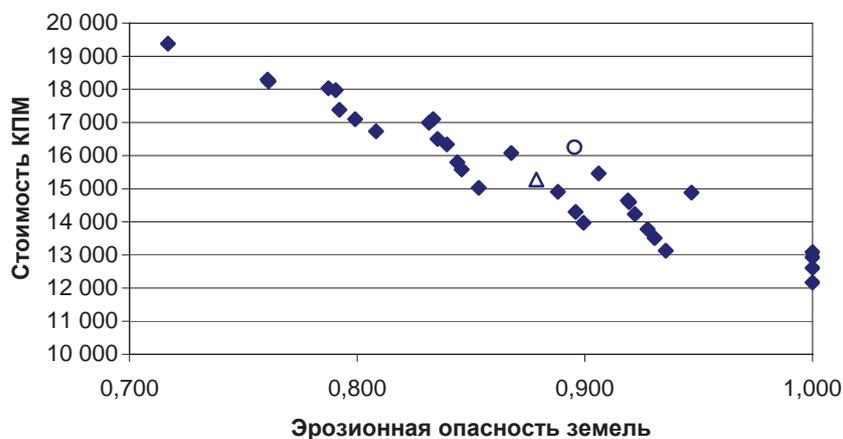


Рис. 4. Визуализация компромиссных вариантов КПМ на плоскости обобщенных критериев «эрозионная опасность земель» и «стоимость мероприятий»

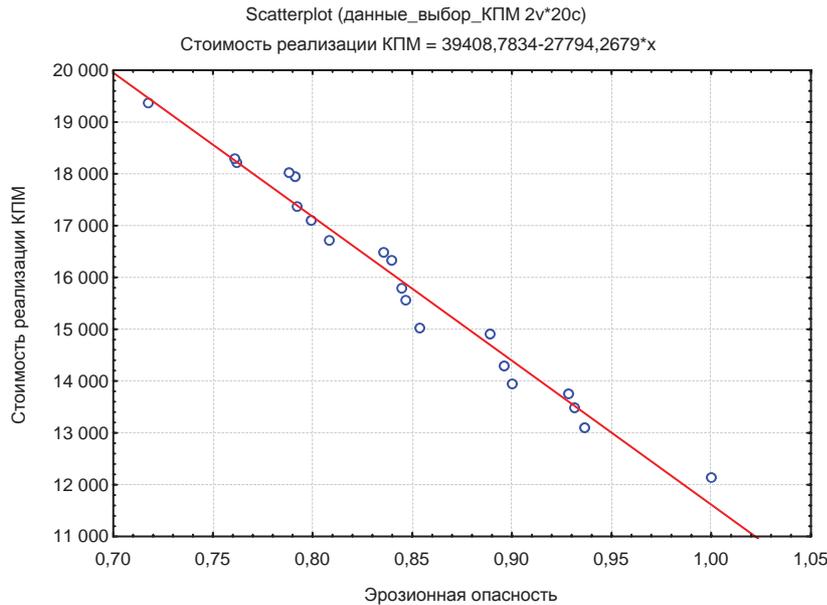


Рис. 5. Результаты построения регрессионной зависимости обобщенных критериев в программе Statistica

Подчеркнем, что в данной ситуации появляется возможность построить зависимость типа «затраты – качество», которая близка к линейной. Это подтверждает построение линейной регрессии в программе Statistica (рис. 5).

Таким образом, двухкритериальный подход к управлению качеством территорий позволяет визуализировать поиск и существенно сократить число анализируемых вариантов компромиссных эколого-экономических решений с одновременным контролем их качества и эффективности.

На основе содержательного анализа и интерпретации результатов компьютерного моделирования выбран вариант КПМ на водосборе р. Черная Калитва, который позволяет значительно снизить интенсивность водной эрозии земель с приемлемыми затратами. Ему соответствуют следующие оптимальные значения параметров модели: $x_1 = 11,65$ («облесенность территории водосбора, %») и $x_2 = 137,22$ («глубина местного базиса эрозии, м»). За счет создания полезационных и прибалочных лесополос, сплошного облесения балок, берегов прудов и рек, а также дополнения существующих лесополос облесенность водосборов необходимо увеличить на 8,65 %. Следует, кроме того, построить противоэрозионные пруды и водорегулирующие валы, осуществить залужение склонов балок. Объем гидротехнического строительства и агролесомелиоративных мероприятий на конкретной балке (процент увеличения облесенности, площадь залужения склонов, высота плотины

противоэрозионного водоема и т. д.) должен определяться исходя из общего объема КПМ на речном водосборе.

Заключение

На основе анализа методологических и методических особенностей графо-аналитического подхода к комплексному геоэкологическому районированию территорий предложены ГИАС-технологии, позволяющие «расширить» применение традиционных ГИС при обосновании эколого-экономических решений по управлению устойчивым развитием регионов.

ГИАС-технологии отличаются совместным использованием классических процедур тематического картографирования, реализуемых с помощью ГИС-технологий, и процедур геоаналитики (кластеризации и визуального представления геообъектов), реализуемых с помощью программных систем анализа многомерных геоданных. Применение ГИАС-технологий обеспечивает повышение качества результата комплексного геоэкологического районирования территорий и облегчает его содержательную интерпретацию.

Результаты комплексного эколого-хозяйственного районирования территорий являются входной информацией для интегральной оценки геоэкологической опасности территорий и эколого-экономического обоснования выбора комплекса природоохранных мероприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мильков Ф. Н. Словарь-справочник по физической географии / Ф. Н. Мильков. – М. : Географгиз, 1960. – 271 с.
2. Модели в географии. – М. : Прогресс, 1971. – 380 с.
3. Тикунов В. С. Классификации в географии: ренесанс или увядание? (Опыт формальных классификаций) / В. С. Тикунов. – М. – Смоленск : Изд-во СГУ, 1997. – 367 с.
4. Трофимов А. М. Количественные методы районирования и классификации / А. М. Трофимов [и др.]. – Казань : Изд-во КГУ, 1985. – 119 с.
5. Умывакин В. М. Интегральная эколого-хозяйственная оценка и управление земельными ресурсами в регионе / В. М. Умывакин. – Воронеж : ВГПУ, 2002. – 178 с.
6. Основы геоинформатики : в 2 кн. Кн. 1 / Е. Г. Капранов [и др.]. – М. : Академия, 2004. – 352 с.
7. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян [и др.]. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
8. Зибров Г. В. Квалиметрический анализ геоэкологической опасности территорий с интенсивной антропогенной деятельностью / Г. В. Зибров, В. М. Умывакин, Д. А. Иванов // Вест. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геол. – 2009. – № 2. – С. 180–186.
9. Умывакин В. М. Управление качеством территорий на основе интегральной оценки экологического риска / В. М. Умывакин // Экологическое планирование и управление. – 2007. – № 4 (5). – С. 14–18.

Рецензент И. И. Косинова

*Военный авиационный инженерный университет,
г. Воронеж*

Г. В. Зибров, начальник, доктор педагогических наук, профессор

Тел. 8 (4732) 264-667 (301)

zibrov@mail.ru

*Military Aviation Engineering University, Voronezh
G. V. Zibrov, a chief, Doctor of the Pedagogical Sciences, Professor*

Tel. 8 (4732) 264-667 (301)

zibrov@mail.ru

Воронежский государственный университет

В. М. Умывакин, профессор, доктор географических наук

Тел. 8 (4732) 208-282

umyvakin@mail.ru

Voronezh State University

V. M. Umyvakin, a Professor, Doctor of the Geographical Sciences

Tel. 8 (4732) 208-282

umyvakin@mail.ru

*Военный авиационный инженерный университет,
г. Воронеж*

А. В. Пахмелкин, преподаватель

Тел. 8 (4732) 264-667 (311)

pahmelkin@mail.ru

Military Aviation Engineering University, Voronezh

A. V. Pahmelkin, a lecturer

Tel. 8 (4732) 264-667 (311)

pahmelkin@mail.ru