

ГИС технология прогноза рудных месторождений

В.Г.Гитис^{1,3}, Ю.К.Щукин², В.И. Старостин³

¹Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Российская академия наук, Москва, Россия,

²Институт динамики геосфер, Российская академия наук, Москва, Россия,

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редколлегию 29.04.2013

Аннотация — Рассматриваются элементы сетевой технологии геоинформационного исследования пространственных данных и ее применение к региональному прогнозу свинцово-цинковых и медных месторождений Болгарии. Существенными характеристиками технологии являются: сетевой доступ к данным, которые могут быть распределены на удаленных серверах и на компьютере пользователя, современные методы извлечения существенной информации из данных, реализованные с помощью операций, не требующих от специалиста предметной области углубленной подготовки в области геоинформатики, высокая интерактивность и наглядность анализа. Технология реализована в сетевой ГИС ГеоПроцессор. Приведенные примеры показывают эффективность применения этой системы для выполнения научных исследований и решения прикладных задач.

Ключевые слова: геоинформационные технологии, металлогения, прогноз рудных месторождений

1. ЗАДАЧИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПРОГНОЗА

Анализ пространственных данных составляет один из наиболее важных разделов геоинформационного моделирования. В данной работе мы рассматриваем современные методы геоинформационного анализа и их применение для решения задач регионального прогноза рудных месторождений полезных ископаемых: свинцово-цинковых и медных месторождений Болгарии. Эти задачи исследовались ранее с помощью ГИС Гео 2.5 в работах [Гитис и др., 1989-А, 1989-Б]. В статье рассматриваются новые результаты, полученные с помощью сетевой ГИС ГеоПроцессор 2.0.

Задача пространственного геоинформационного в науках о Земле прогноза состоит в том, чтобы по комплексу геолого-геофизических данных построить пространственное распределение числового или номинального свойства геологической среды, представить это свойство в виде прогнозной карты и найти формальное правило прогноза (прогнозирующую функцию). При решении предполагается, что в пределах изучаемой области прогнозирующая функция однозначно определяется характеристиками геологической среды. Это означает, что исследуемый регион должен представлять собой однородную в определенном смысле геологическую зону.

Обычно прогнозирующая функция заранее неизвестна. Для ее нахождения используются выборка прецедентов: объектов, для которых результаты прогноза известны. Иногда эта выборка дополняется экспертными оценками результатов прогноза.

В задачах геологического прогноза могут применяться две стратегии решений: экспертные и компьютерные. Обе стратегии могут использовать при решении методы аналогий с прецедентами или правила, чаще всего формулируемые в виде логических высказываний. В первом случае прогноз дается на основе сходства геолого-геофизических свойств объектов прогноза и прецедентов. Во втором случае прогноз дается на основании правил, которые устанавливают связь между значениями геолого-геофизических признаков объекта и прогноза. При решении по методу аналогий эксперт может использовать также невербализованное

интуитивное знание. Обычно для метода аналогий он не формулирует правило прогноза. Из-за этого экстраполяция его решения на другой регион с аналогичными геолого-геофизическими свойствами невозможна. Компьютерный прогноз всегда формален. При этом он может базироваться на предварительном решении задачи экспертом, используя экспертные решения в качестве выборки прецедентов. В этом случае прогнозирующая функция, найденная по выборке прецедентов, дает формализованное решение задачи, которое позволяет построить прогнозную карту, близкую к карте, построенной экспертом, и позволяет объяснить прогнозную карту в терминах причинно-следственной модели прогноза [Гитис и Ермаков, 2004]. Кроме того, прогнозирующая функция может быть использована для экстраполяции решения на регионы с близкими причинно-следственными моделями прогнозируемого явления.

В разделе 2 статьи кратко рассматриваются основы сетевой геоинформационной технологии пространственного прогноза геологических объектов и сетевая ГИС GeoПроцессор 2.0. В разделах 3 и 4 рассматривается применение ГИС технологии к решению двух задач региональной металлогении [Старостин, 2012]: региональному прогнозу гидротермальных свинцово-цинковых и медных месторождений Болгарии. ГИС GeoПроцессор 2.0 и геолого-геофизические данные для выполнения ГИС моделирования по этим задачам находятся по адресу <http://www.geo.iitp.ru/GeoProcessor-2/new/Bulgaria.htm>. Открытый доступ к инструментальным средствам и экспериментальному материалу предоставляет читателю возможность выполнить собственные исследования в области анализа и прогноза рудных месторождений. Следует отметить, что приведенные в разделах 3 и 4 примеры являются версиями решений прогнозной задачи, которые иллюстрируют рассматриваемую в статье технологию. Получение практических результатов прогноза безусловно требует детализации и пополнения геолого-геофизических данных, использования в выборке прецедентов данных об объеме запасов разведанных месторождений и уточнения используемых при прогнозе экспертных оценок.

2. ГИС ГЕОПРОЦЕССОР 2.0: СЕТЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

ГИС GeoПроцессор предназначена для пространственного анализа векторных и сеточных данных [Gitis et al, 1998, Гитис, 2011, Gitis et al, 2012]. Векторные данные представляют в ГИС географические объекты: линии, полигоны и точки. Сеточные данные представляют поля, такие как гравитационные аномалии, тепловой поток, высоты рельефа и т.д. ГИС реализована как Java апплет. Это обеспечивает возможность запуска ГИС независимо от веб-браузера и преимущества неограниченную интерактивность операций анализа данных. Для запуска ГИС необходимо, чтобы на ПК пользователя была установлена виртуальная Java машина версии не ниже 1.6. Доступ к системе и ряду региональных ГИС-проектов открыт по адресу: <http://www.geo.iitp.ru/GeoProcessor-2/new/index.htm>. Областями применения ГИС являются анализ пространственных данных, изучение геологической среды и поддержка принятия решений в таких задачах как оценка сейсмической опасности, прогноз природных ресурсов, экологическое районирование. Одной из важнейших сетевых функций системы является возможность динамически интегрировать геоданные, распределенные на удаленных серверах телекоммуникационных сетей и на ПК пользователя (последнее обеспечивает конфиденциальность данных пользователя). Система также поддерживает возможность сохранения результатов пользователя (ГИС слоев и ГИС-проекта).

Операции ГИС GeoПроцессор можно разбить на четыре группы: операции ввода/вывода, операции визуального анализа, аналитические преобразования и правдоподобный вывод.

Операции *ввода/вывода* поддерживают динамическую загрузку данных, сохранение данных и измененного при решении задачи XML-файла инициализации ГИС-проекта, а также вывод карты на печать в выбранной проекции и разрешающей способности изображения.

Наиболее важными операциями *визуального анализа* являются добавление и удаление слоев карты, изменение порядка отображения слоев, изменение масштаба и сдвиг карты, изменение закрашки и других параметров отображения слоя, построение модели освещенности сеточного слоя, картографические измерения значений нескольких сеточных слоев, выделение подмножеств объектов векторных слоев по SQL запросу и чтение атрибутов объектов векторного слоя, визуализация разреза нескольких сеточных слоев по произвольному сечению. В визуальном исследовании данных особую роль играют операции многомерного анализа

сеточных полей по сходству с прецедентами. Результатом анализа является карта значений функции сходства между указанной пользователем точкой (или несколькими точками) и всеми остальными точками региона по выбранному набору признаков. Интерактивный многомерный анализ с помощью функций сходства имитирует экспертный метод рассуждений по прецеденту. Поэтому он очень важен для понимания исследуемых данных.

Аналитические преобразования ГИС ГеоПроцессор 2.0. выполняются с сеточными и векторными картографическими слоями.

Сеточные вычисления поддерживаются двумя типами преобразований. Первый тип вычисляет сеточный слой как функцию от нескольких сеточных слоев. Функция преобразования конструируется пользователем из элементарных функций от нескольких исходных слоев с использованием алгебраических и логических операций. Второй тип преобразований реализуется с помощью операций фильтрации. Эти операции позволяют для каждой точки исходного сеточного слоя выявить дополнительные локальные свойства, относящиеся к окрестностям этих точек. В операциях фильтрации вычисляется ряд функционалов от значений сеточного слоя в скользящем окне заданного радиуса: среднее от значений слоя в окне, медиана, среднеквадратичное отклонение, локальные аномалии, модуль и азимут градиента, минимальное и максимальное значения и их разность. Сюда же можно отнести преобразование, в котором вычисляется сеточный слой, равный коэффициенту корреляции двух сеточных слоев в скользящем окне заданного радиуса.

Рассмотрим теперь операции с векторными слоями. Начнем с двух типов операций преобразования векторных слоев в сеточные. Эти операции позволяют численно оценить пространственные свойства векторного слоя. По точечному слою можно вычислить сеточные слои, равные плотности точек, расстояниям от точек до узлов координатной сетки, близости точек к узлам сетки и некоторой функции влияния. По слоям линий или полигонов вычисляются сеточные слои равные расстояниям от объектов до узлов координатной сетки, функции влияния объектов, близости объектов к узлам сетки, плотности линий и суммарной длине линий в скользящем окне оценивания.

Для векторных слоев реализованы два важных аналитических преобразования, в результате которых вычисляется новый атрибут векторного объекта. Первое преобразование состоит в том, что для подмножества объектов векторного слоя вычисляются значения нового атрибута с помощью стандартных арифметических операций и стандартных функций, задействованных в языке SQL. Второе преобразование производится по выбранному векторному слою и выбранному сеточному слою. При этом вначале вычисляются буферные зоны, окружающие векторные объекты. Затем вычисляются атрибутивные значения объектов векторного слоя по значениям одного или нескольких сеточных слоев, относящихся к буферным зонам. Характеристиками объектов могут быть средние значения сеточного слоя в буферной зоне заданного радиуса, среднеквадратичные значения, минимальные или максимальные значения сеточного слоя. Для объектов выбранного векторного слоя и выбранных двух сеточных слоев могут быть вычислены атрибуты равные коэффициенту корреляции значений сеточных слоев в буферной зоне объекта.

Методы *правдоподобного вывода* предназначены для нахождения многомерных эмпирических зависимостей, необходимых для решения задач классификации и прогнозирования. Эти зависимости находятся по выборке прецедентов в виде функции сходства, функции предпочтения, функции принадлежности, оцениваемой по методу ближайшего соседа, и функции непараметрической регрессии.

Рассмотрим два метода нахождения эмпирических зависимостей, которые применяются в данной работе.

Функция принадлежности

Введем следующие обозначения: R^I - пространство признаков, нормированных по среднеквадратичным отклонениям, для $\mathbf{x} \in R^I$ среднеквадратичные отклонения $\sigma_i \equiv 1$, $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{x}^{(n)})$ - метрика в R^I , C - константа.

Функция принадлежности для двух классов q и \bar{q} . Пусть $\{\mathbf{x}^{(q,n)}\}$ и $\{\mathbf{x}^{(\bar{q},m)}\}$, $n = 1, \dots, N$, $m = 1, \dots, M$, обозначают две выборки прецедентов в R^I , R^I - пространство признаков, нормированных по среднеквадратичным отклонениям. Функция принадлежности реализует правило распознавания по методу ближайшего соседа. Оно относит объект (классифицируемую точку) к тому классу, к которому принадлежит ближайшая точка выборки. Для двух классов функция имеет вид

$$f(\mathbf{x}, \{\mathbf{x}^{(q,n)}\}, \{\mathbf{x}^{(\bar{q},m)}\}) = -\frac{\rho(\mathbf{x}, \mathbf{x}^{(q,u)}) - \rho(\mathbf{x}, \mathbf{x}^{(\bar{q},v)})}{\rho(\mathbf{x}^{(q,u)}, \mathbf{x}^{(\bar{q},v)})} \text{ для } \min_{\langle n \rangle} \rho(\mathbf{x}, \mathbf{x}^{(n)}) \leq C,$$

$$\text{где } \mathbf{x}^{(q,u)} = \arg \min_{\langle n \rangle} \rho(\mathbf{x}, \mathbf{x}^{(q,n)}), \mathbf{x}^{(\bar{q},v)} = \arg \min_{\langle m \rangle} \rho(\mathbf{x}, \mathbf{x}^{(\bar{q},m)}).$$

Функция предпочтения

Рассмотрим теперь класс эмпирических зависимостей, которые построены на монотонных решающих функциях [Гитис В.Г. 1974, Юрков Е.Ф. 1974]. Эти решающие функции используются в задачах, в которых знания предметной области дают основание предполагать, что для некоторого интервала значений зависимость прогнозируемого свойства Φ (или степени уверенности в принадлежности рассматриваемых объектов некоторому классу) от признаков монотонно изменяется при изменении значения признака. Предположение о монотонности позволяет найти правило классификации только по выборке объектов одного класса. Без ограничения общности для простоты изложения будем считать, что прогнозируемое свойство $S(\mathbf{x})$ возрастает или не изменяется (но не уменьшается) при увеличении значения любой из характеристик объекта, т.е. $\frac{\partial S(\mathbf{x})}{\partial x_i} \geq 0$, $i = 1, \dots, I$. Свойством монотонности обладает

эмпирическая функция распределения $F(\mathbf{x}) = v_x / N$, где v_x обозначает число прецедентов, для которых $x_i^{(n)} < x_i$ по всем $i=1, \dots, I$, $n = 1, \dots, N$. Во многих задачах классификации объемы выборок прецедентов слишком малы для корректного оценивания многомерного вероятностного распределения. Алгоритм построения функции предпочтения позволяет оценить границу множества $A = \{\mathbf{x}: F(\mathbf{x}) > 0\}$ и построить логическое выражение, объясняющее правила классификации.

Алгоритм состоит из нескольких шагов.

Для каждого элемента выборки \mathbf{x}^n строится полуинтервал

$$R(n) = \{r_k(n)\}, k = 1, \dots, I, n = 1, \dots, N,$$

где:

$$r_i(n) = (x_i(n) - \mu\sigma_i, \infty), \text{ если } \frac{\partial \Phi(\mathbf{x})}{\partial x_i} \geq 0, \text{ и } r_j(n) = (-\infty, x_j(n) + \mu\sigma_j), \text{ если } \frac{\partial \Phi(\mathbf{x})}{\partial x_j} \leq 0,$$

$\mu \geq 0$ - коэффициент μ , определяющий точность аппроксимации области $A = \{\mathbf{x}: F(\mathbf{x}) > 0\}$,

σ_k - среднеквадратичное отклонение признака x_k для исследуемого региона.

Согласно предположению о монотонности, полуинтервалы $R(n) = \{r_k(n)\}$ покрывают с точностью $\mu\sigma_k$ только те точки, для которых прогнозируемая величина $\Phi(\mathbf{x}) \geq \Phi$. Свяжем каждый полуинтервал $R(n)$ с конъюнкцией $L(n) = \bigcap_{k=1}^I l_k(n)$, где $l_k(n) = 1$, если $x_k \in r_k(n)$, и

$l_k(n) = 0$, если $x_k \notin r_k(n)$. Объединению полуинтервалов $\{R(n)\}$, $n = 1, \dots, N$ соответствует дизъюнкция $L = \bigcup_{n=1}^N L(n)$. Алгоритм построения функции предпочтения (Гитис и Ермаков, 2004) позволяет найти такую логическую функцию \tilde{L} , состоящую из минимального числа конъюнкций $L(n)$, для которой $\tilde{L} = 1$ для каждой точки выборки $\Phi(\mathbf{x}(n)) \geq \Phi$, $n = 1, \dots, N$. Очевидно, что функция $\tilde{L} = 1$ соответствует покрытию из минимального числа полуинтервалов, которое содержит точки $\{\mathbf{x}(n) : \Phi(\mathbf{x}(n)) \geq \Phi\}$. Таким образом, используя предположение о монотонности мы нашли решающее правило вида: *если $\tilde{L} = 1$, то прогнозируемая величина $\Phi(\mathbf{x}) \geq \Phi$.*

Для конструирования текстового объяснения логического выражения $\tilde{L} = 1$ можно использовать заранее заготовленные лингвистические переменные и шаблоны. Текстовая конструкция может выглядеть следующим образом:

ЕСЛИ <имя атрибута> ПРИНИМАЕТ ЗНАЧЕНИЯ ОТ <числовое значение>
ДО <числовое значение>

И/ИЛИ <имя атрибута> ПРИНИМАЕТ ЗНАЧЕНИЯ ОТ <числовое значение> ДО
<числовое значение>

.....,

ТО <имя выходного атрибута> БУДЕТ ПРИНИМАТЬ ЗНАЧЕНИЯ ОТ
<числовое значение> ДО <числовое значение>.

3. РЕГИОНАЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СВИНЦОВО-ЦИНКОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БОЛГАРИИ

3.1. Причинно-следственная модель

Задача регионального анализа и прогноза свинцово-цинковых месторождений Болгарии ранее исследовалась с помощью системы ГЕО 2.5 [Гитис и др. 1989; Гитис и Ермаков, 2004]. В данном разделе рассматривается методика поиска альтернативного решения с помощью ГИС GeoПроцессор 2.0. При анализе использован тот же набор исходных данных <http://www.geo.iitp.ru/GeoProcessor-2/new/Bulgaria.htm>.

Большая часть свинцово-цинковых месторождений Болгарии принадлежит к гидротермальному среднетемпературному типу. Наиболее крупными месторождениями являются Мадан, Звездел, Рудозем, Устрем, Руен и др. Модель образования месторождений этого типа основана на работах [Вольфсон и Дружинин, 1975, Шалдун и Добровольская, 1976, Богданов Б. и др. 1978, Косыгин и Кулиш, ред., 1984].

Причинно-следственная модель регионального прогноза состоит в следующем. Консолидированная кора толщиной 35—40 км подвергается кайнозойской магматической активизации. Гипабиссальные интрузии среднего состава, представленные серией даек и штоков, обеспечивают мобилизацию гидротермальной деятельности и формирование рудных жильных тел на глубинах 1000—1500 м. Протяженность оруденения по глубине составляет около 1000 м. Для того чтобы оруденение стало доступным для эксплуатации, район должен испытать тектоническое поднятие и эрозию. Протяженность вскрытых рудных тел составляет первые километры при ширине до нескольких десятков метров.

Модель определяется тремя группами признаков. Первая из них охватывает вещественные параметры месторождений и вмещающих пород, а также геофизические признаки, связанные с веществом. Она включает характеристики магнитного поля, состава магматических образований, аномалий силы тяжести в редукции Буге. Вторая — объединяет структурные признаки вмещающей среды: градиенты потенциальных полей, плотность разломов, гетерогенность, глубину поверхности Мохоровичича, мощность гранитно-метаморфического слоя и др. Третью группу составляют геодинамические признаки, определяющие вскрытие месторождений. К ним относятся неотектонические, движения, характеристики рельефа,

изостатические аномалии силы тяжести, тепловой поток и др.

3.2. Исходные данные

Региональная информация, связанная с месторождениями полезных ископаемых Болгарии, сосредоточена на картах масштаба 1: 500000, 1:1000000 и 1:1500000. Информационная нагрузка карт определила выбор шага координатной сетки 12' по широте и 6' по долготе (это приблизительно составляет 11,5 и 16,5 км соответственно). Значения признаков снимались для узлов сетки.

Исходные данные ГИС-проекта:

Группа вещественных признаков среды

- x_1 - интенсивность тектономагматической проработки. Для каждого узла сетки определялось количество проявлений разновозрастного магматизма по геологической карте из работы [Атлас, 1983]. Использовалась следующая кодировка: 0 - отсутствие проявлений магматизма, значения от 1 до 4 - количество тектономагматических циклов. Связь значений признака с прогнозом имеет следующий характер. Окрестности точек с нулевым значением признака слабо перспективны в отношении свинцово-цинковых месторождений. Значения 2—3 высоко перспективны в связи с повторной мобилизацией и возможной концентрацией рудного вещества. Значения 4 менее перспективны, поскольку многократная активизация вещества может приводить к его рассеиванию.
- x_2 - возраст последних проявлений магматизма по карте [Димитрова Е., ред., 1978]. Использовалась следующая кодировка: 0 - отсутствие проявлений магматизма, 1 - последние проявления магматизма в докембрии, 2 - в карбоне, 3 - в перми, 4 - в триасе, 5 - в юре, 6 - в мелу, 7 - в палеоцене, 8 - в эоцен-олигоцене, 9 - в миоцене. Перспективность точки региона считается тем выше, чем моложе последние проявления магматизма.
- x_3 - состав последних проявлений магматизма. Данные снимались с карты [Димитрова Е., ред., 1978]. Использовалась следующая кодировка: 0 - ультраосновной состав, 1 - отсутствие проявлений, 2 - основной, 3 - кислый, 4 - средний составы. Перспективность точки возрастает при увеличении значения признака.
- x_4 - региональное магнитное поле в гаммах [Григоров Б., 1961]. Наиболее перспективны области проявления среднего и кислого магматизма, значение магнитного поля в которых должны быть близкими к 0.
- x_5 - вертикальная составляющая локального магнитного поля в гаммах [Григоров Б., 1961]. Единицы измерения - гамма (0.00001 гаусс). Большие значения x_5 соответствуют магнитным интрузиям в коре, на краях которых могут находиться гидротермальные месторождения, в том числе и свинцово-цинковые. Следовательно, краевым зонам интрузий должны соответствовать большие значения модуля градиента x_5 . Учитывая состав магматических образований, контролирующих оруденение, наиболее перспективными считаются точки, в окрестности которых имеются небольшие положительные значения данного параметра.
- x_6 - гравитационное поле в редукции Буге в миллигалах [Добрев и Шукин, 1974]. Положительные аномалии поля на фоне отрицательных связаны с интрузивными телами. В районе их контактов могут находиться месторождения (в том числе и Pb-Zn). Большие модули градиента поля связаны с глубинными разломами, по которым могло подниматься мантийное вещество, впоследствии застывавшее. В результате выплавления некоторых металлов (например, Pb, Zn) могло образоваться месторождение. Состав рудовмещающих пород позволяет считать наиболее перспективными ячейки со средними значениями поля.

Группа структурных признаков

- x_7 - суммарная длина разломов в км в ячейке 11,5x16,5 км² с центром в узле сетки по геологической карте [Атлас, 1983]. Наиболее перспективны точки сетки со значениями признака 3—25 км. При больших значениях среда обладает повышенной проницаемостью, и рудоносные растворы рассеиваются. Среда с меньшими значениями плотности разломов представляет собой экран для этих растворов.

- x_8 - гетерогениость. Определялась по геологической карте [Атлас, 1983] путем подсчета количества геологических границ в ячейке $11,5 \times 16,5$ км² с центром в узле сетки. Зоны глубинных разломов проявляются в повышенной гетерогенности. Поэтому, чем больше значение признака, тем перспективнее данная точка сетки.
- x_9 - толщина гранито-метаморфического слоя в км по соответствующей карте [Добрев и Щукин, 1974]. Наиболее перспективные точки вероятно расположены в областях со средними значениями толщины слоя, приблизительно равными 10—30 км. При значениях, больших 30 км, мощность слоя затрудняет энергетический обмен с нижними частями земной коры и мантией, необходимый для мобилизации рудного вещества и формирования интрузий среднего — кислого состава. При значениях мощности слоя менее 10 км сокращается объем активизируемого вещества.
- x_{10} - глубина залегания поверхности Мохоровичича в км по карте [Димитрова Е., ред., 1978]. Глубины залегания этой поверхности, меньшие 35 км, могут быть связаны с процессами базальтификации коры и активизации основного магматизма. Значения 35-40 км наиболее благоприятны для месторождений свинца и цинка. При залегании поверхности Мохоровичича глубже 40 км затрудняется вещественно-термальный обмен с мантией.

К структурным признакам среды относятся также модули градиента, разности между максимальными и минимальными значениями в скользящем окне, среднеквадратичные отклонения значений регионального магнитного поля, вертикальной составляющей локального магнитного поля, гравитационного поля в редукции Буге, поля изостатических аномалий, толщины гранито-метаморфического слоя, неотектонических движений, глубины залегания поверхности Мохоровичича. Увеличение значений модуля характеризует увеличение перспективности точки карты, поскольку можно предполагать, что градиентные зоны коррелированы с зонами геологических разломов.

Группа геодинамических признаков.

- x_{11} - амплитуда новейших тектонических движений в метрах [Атлас, 1983]. Области опусканий и области поднятий с амплитудой до 200 м не перспективны. Поднятия с амплитудой 200 - 500 м - слабо перспективны, 500 - 700 м - высоко перспективны. Поднятия с (10—30 км) амплитудами более 1700 м слабо перспективны в связи с разрушением эрозией значительной части месторождений.
- x_{12} - гравитационные изостатические аномалии в миллигалах [Добрев и Щукин, 1974]. Поле отражает степень компенсации уплотненных и разуплотненных объемов в земной коре и верхней мантии. Области разуплотненных объемов могут быть связаны с проницаемыми, возможно раздробленными зонами. Точки региона, принадлежащие таким зонам более перспективны.
- x_{13} - тепловой поток в единицах теплового потока по [Смирнову и др. 1986]. Области неотектонической активизации с проявлениями магматизма среднего — кислого состава отличаются повышенными значениями теплового потока. Эти же области содержат большую часть свинцово-цинковых месторождений. Отсюда, перспективность точки тем больше, чем выше значение теплового потока в ее окрестности.
- x_{14} – плотность эпицентров землетрясений на глубине от 0 до 10 км в условных единицах.
- x_{15} – плотность эпицентров землетрясений на глубине от 10 до 20 км в условных единицах.
- x_{16} – плотность эпицентров землетрясений на глубине от 20 до 40 км в условных единицах.

Выборка прецедентов состоит из 133 точек сетки. В нее вошли 40 точек, соответствующих известным месторождениям Болгарии [Йовчев И.С., 1960]. Большая часть точек выборки, относящихся к зонам, не содержащих месторождений, выбрана экспертом в амагматических областях, с преимущественным развитием слабо деформированных мезо-кайнозойских отложений, испытывающих в нетектонический этап погружения. Кроме того, выбирались точки, в которых выявлены месторождения других типов полезных ископаемых, слабо совместимых со свинцово-цинковыми, например, хромитовые и железо-марганцевые.

3.3. Карта прогноза

Модели регионального прогноза свинцово-цинковых месторождений вычислены по функции принадлежности и по функции предпочтения. При анализе использовалась полная

выборка прецедентов.

Наиболее информативными признаками при нахождении решающих правил оказались: x_2 - возраст последних проявлений магматизма, x_{11} - амплитуда новейших тектонических движений, x_{12} - гравитационные изостатические аномалии, x_{13} - тепловой поток.

На Рис. 1 показано правило прогноза, вычисленное по функции принадлежности, найденной по выборкам свинцово-цинковых месторождений и пунктов, где по оценкам эксперта месторождений быть не может. Функция вычислена по 4-м признакам: x_2 , возраст последних проявлений магматизма, x_{11} , амплитуда новейших тектонических движений, x_{12} , гравитационные изостатические аномалии, x_{13} , тепловой поток. Наличие месторождений соответствует значению функции предпочтения больше 0.

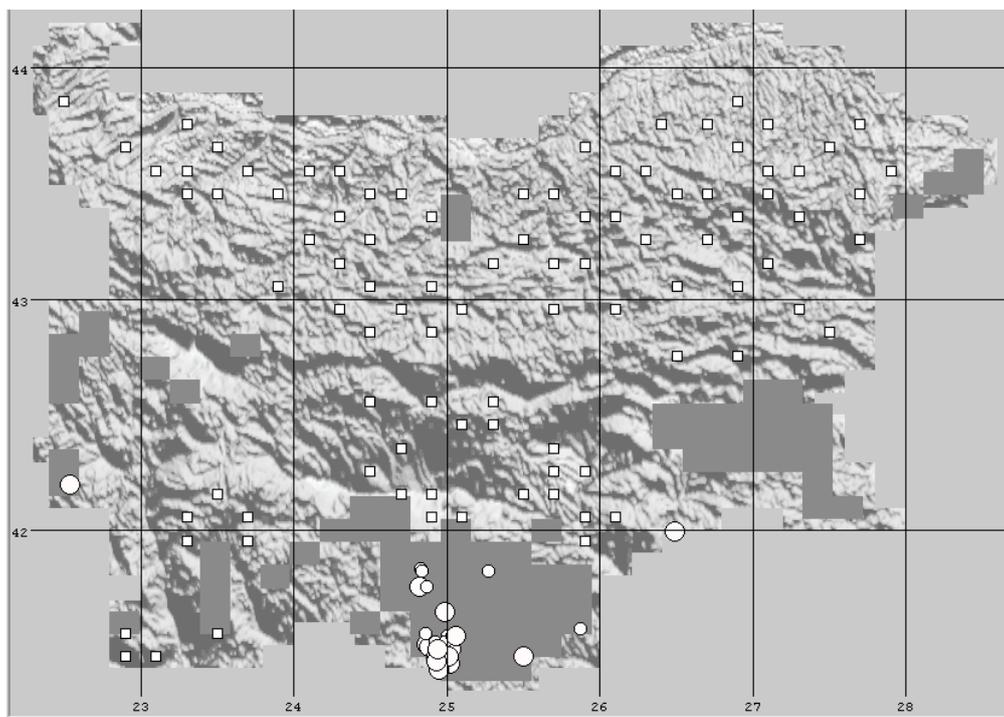


Рис. 1. Карта прогноза свинцово-цинковых месторождений, построенная по функции принадлежности. Кружки – выборка месторождений, квадраты – пункты, где по мнению эксперта месторождений быть не может.

На Рис. 2 показано правило прогноза, вычисленное по функции предпочтения, найденной по выборке свинцово-цинковых месторождений. Функция предпочтения имеет вид: $F_2 = (x_2 > 7.76) \wedge (x_{11} > 363.9) \wedge (x_{12} > 40.3)$. Наличие месторождений соответствует значению функции предпочтению большее 0.5.

Функции предпочтения соответствует текстовое правило:

- Если** возраст последних проявлений магматизма > 7 (т.е., последние проявления магматизма были в эоцен-олигоцене или в миоцене),
И амплитуда новейших тектонических движений > 363.9 м,
И гравитационные изостатические аномалии > 40 миллигал,
ТО (при $F_2 > 0.5$) возможны свинцово-цинковые месторождения.

Результаты прогноза могут быть уточнены при дополнении исходных данных геохимическими признаками, использовании более детальных геологических материалов и привлечении более совершенных моделей формирования свинцово-цинковых месторождений. Выбранные при нахождении прогнозирующей функции признаки позволяют уточнить модель образования свинцово-цинковых месторождений Болгарии.

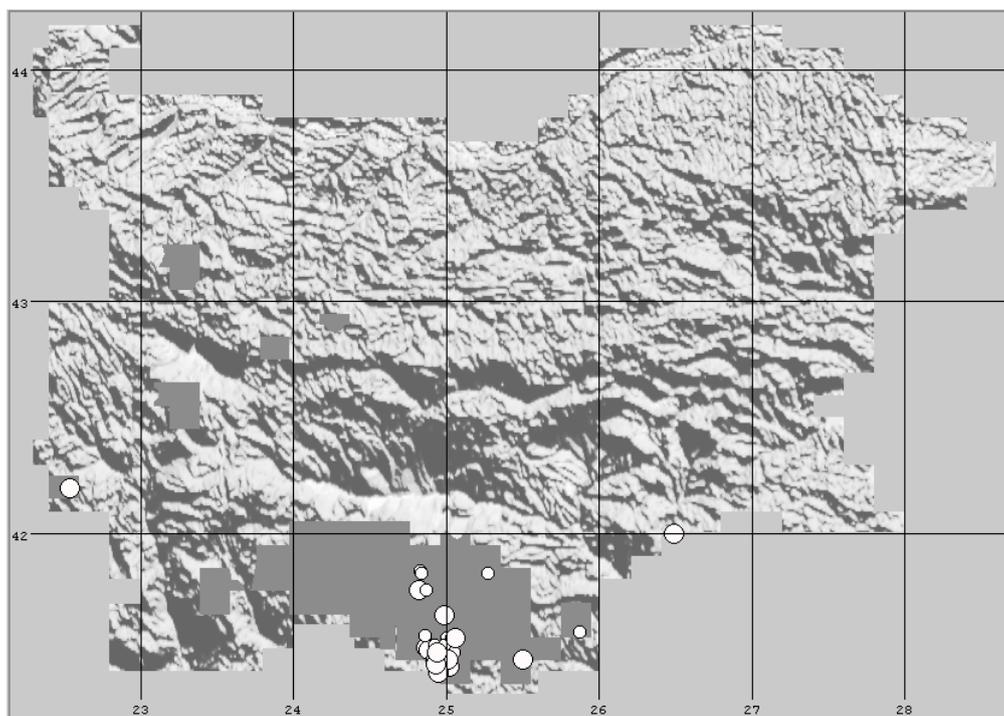


Рис. 2. Прогнозная карта свинцово-цинковых месторождений, построенная по функции предпочтения. Кружки – выборка месторождений.

4. РЕГИОНАЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ МЕДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БОЛГАРИИ

4.1. Причинно-следственная модель

Для Болгарии характерно многообразие медных месторождений, так, [Йовчев, 1960], выделяет 12 их типов. Количество обнаруженных месторождений и рудопоявлений в каждом типе изменяется от 1 до 50. При решении прогнозной задачи рассматривались только шесть типов месторождений, представленных более чем 15 находками. В части этих типов медь содержащие минералы не являются главными.

Для каждого типа месторождений (в дальнейшем они именуется по их порядковым номерам) экспертом предложена своя геолого-геофизическая модель, отвечающая структурным, возрастным, вещественным и геодинамическим особенностям формирования и современного состояния типового месторождения, выраженная через значения геолого-геофизических признаков.

Для нахождения прогнозирующей функции была сформирована выборка из 203 точек. В нее вошли 107 точек, которые выбраны в пределах всех шести типов медных месторождений Болгарии [Йовчев, 1960]. Большая часть точек, относящихся к зонам без месторождений, выбрана экспертом в амагматических областях, с преимущественным развитием полого залегающих мезо-кайнозойских отложений, испытывающих в нетектонический этап погружения в пределах Мизийской плиты, а также в районе выходов на поверхность древних гранитов и гранитизированных пород, практически не переработанных последующими процессами тектоно-магматической активизации в пределах Родопского массива и Среднегорской зоны. При решении задач прогноза для каждого типа медных месторождений участвовала выборка из 95 пунктов, в которую входили точки, выбранные экспертом как бесперспективные для поиска медных месторождений, и точки, относящиеся к месторождениям и рудопоявлениям меди только данного типа.

Тип 1. Месторождениям этого типа свойственно наличие ультраосновных, частично серпетинизированных пород, которые могут создавать положительные аномалии регионального и локального магнитного поля, а также положительные аномалии гравитационного поля в редукции Буге. Интрузии ультраосновных пород относятся к ранним этапам геологического развития Болгарии. Они приурочены к зонам глубинных разломов с повышенной степенью раздробленности земной коры и высокой геологической гетерогенностью.

Выборка примеров месторождений типа 1 включает 9 пунктов.

Тип 2. Месторождения связаны с проявлениями герцинского магматизма. Интрузии локализованы в зонах разломов, часть которых была активизирована в неотектонический этап.

Выборка примеров месторождений типа 2 включает 10 пунктов.

Тип 3. Месторождения связываются с раннемеловыми интрузиями, локализация которых контролируется разломами.

Выборка примеров месторождений типа 3 включает 11 пунктов.

Тип 4. Месторождения сосредоточены в эффузивах позднемелового возраста среднего состава и локализованы, как правило, в зонах их дробления.

Выборка примеров месторождений типа 4 включает 10 пунктов.

Тип 5. Месторождения связаны с проявлениями мел-палеоценового магматизма среднего – кислого состава и приурочены к тектоническим контактам, дайкам и другим малым интрузиям.

Выборка примеров месторождений типа 5 включает 24 пункта.

Тип 6. Свинцово-цинковые месторождения с медь содержащими минералами обнаруженными, главным образом, в пределах Родопского массива. Они связаны с интрузиями среднего кислого состава последним из многократных периодов тектонической активизации. Магматические тела локализованы в зонах разломов, в районах испытавших неотектонические поднятия.

Выборка примеров месторождений типа 6 включает 30 пунктов.

4.2. Карты прогноза

Карта прогноза медных месторождений типа 1 показана на Рис. 3.

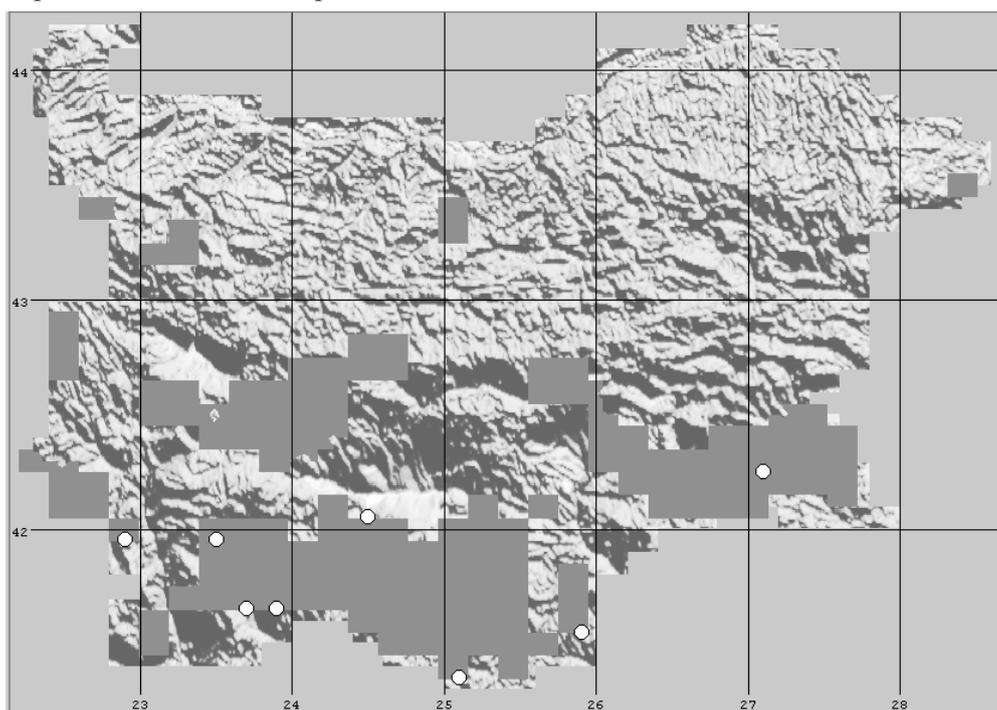


Рис 3. Прогнозная карта медных месторождений 1-го типа. Круги – выборка месторождений типа 1.

Для прогноза по выборке месторождений 1-го типа найдена функция предпочтения:

Функция предпочтения имеет вид: $F_1=(x_1 \geq 2) \wedge (x_2 \geq 1) \vee (x_1 > 1) \wedge (x_2 > 8)$.

Это эквивалентно следующему текстовому правилу:

- ЕСЛИ** интенсивность тектономагматической проработки больше или равно 2 усл. ед. (количество проявлений разновозрастного магматизма от 2 до 4),
- И** возраст последних проявлений магматизма больше 1 усл. ед. (имеются

проявления магматизма),

ИЛИ интенсивность тектономагматической проработки больше 1 усл. ед. (количество проявлений разновозрастного магматизма от 2 до 4)

И возраст последних проявлений магматизма больше 8 усл. ед. (имеется проявление магматизма в миоцене),

ТО возможны медные месторождения типа 1.

Карта прогноза медных месторождений типа 2 показана на Рис. 4.

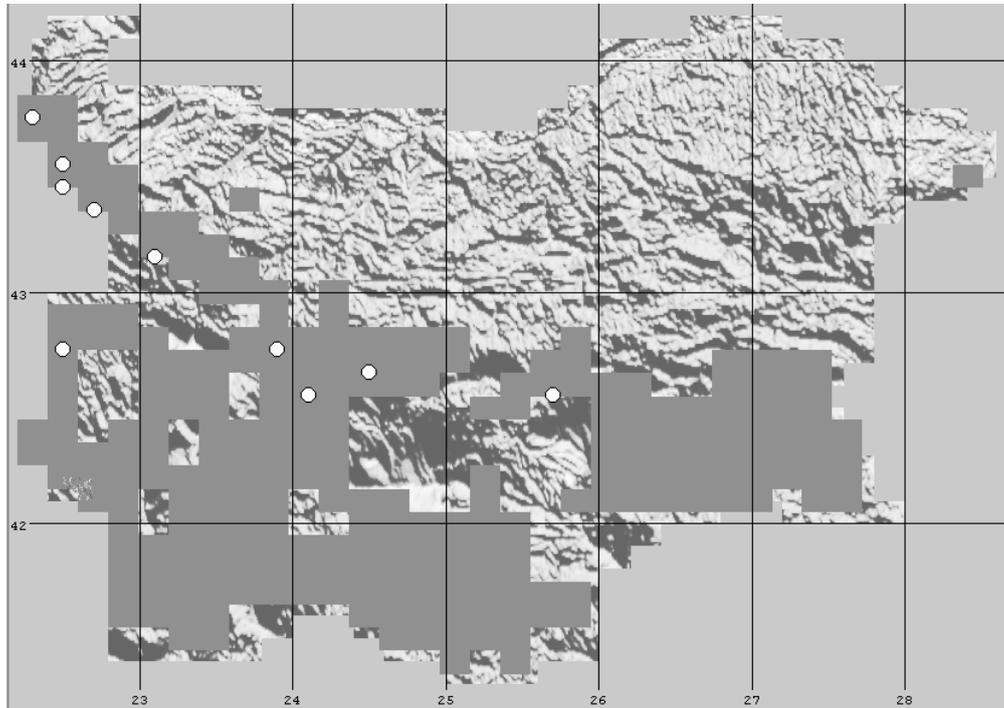


Рис. 4. Прогнозная карта медных месторождений 2-го типа. Кружки – выборка месторождений типа 2.

Для прогноза по выборке месторождений 2-го типа найдена функция предпочтения:

Если $(x_1 \geq 1) \wedge (x_3 \geq 2)$, то возможны медные месторождения типа 2.

Это эквивалентно следующему текстовому правилу:

ЕСЛИ интенсивность тектономагматической проработки больше или равна 1 усл. ед. (количество проявлений разновозрастного магматизма от 1 до 4)

И состав последних проявлений магматизма является основным, кислым или средним,

ТО возможны медные месторождения типа 2.

Карта прогноза медных месторождений типа 3 показана на Рис. 5.

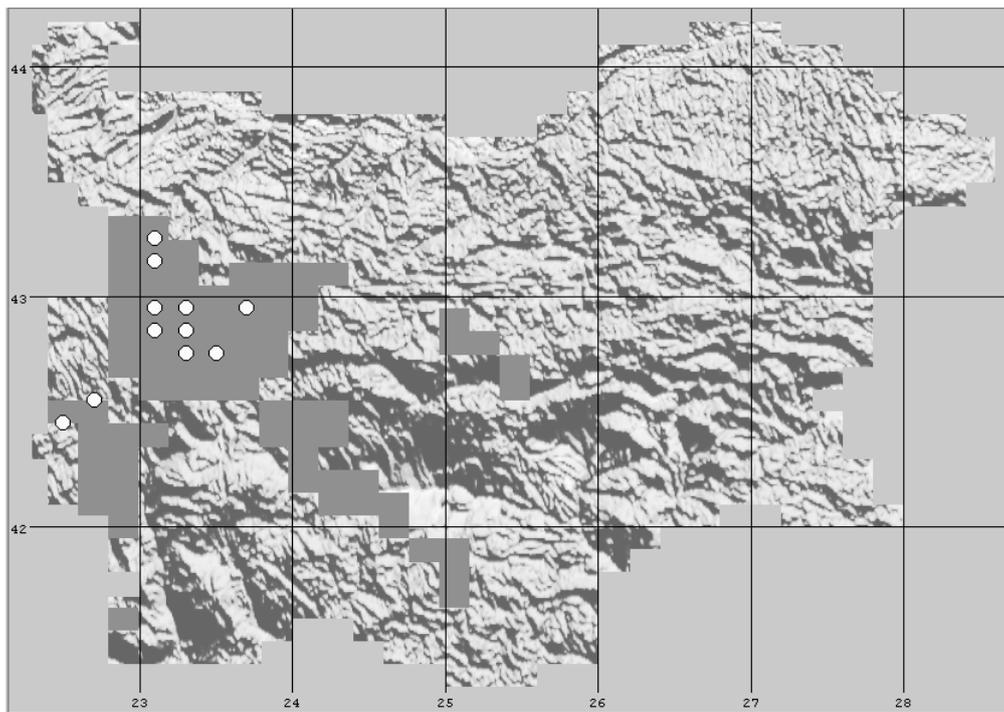


Рис 5. Прогнозная карта медных месторождений 3-го типа. Кружки – выборка месторождений типа 3.

Прогноз выполнен по следующему правилу:

Если $(x_6 \geq -45) \wedge (x_6 \leq -10) \wedge (x_{18} \geq 700) \wedge (x_{18} \leq 1650) \wedge (x_{14} \geq 0.5)$, то возможны медные месторождения типа 3, где $x_{18} = \max(x_{11}) - \min(x_{11})$, операции \max и \min вычисляются в скользящем окне радиуса 10 км.

Это эквивалентно следующему текстовому правилу:

- ЕСЛИ** значение гравитационного поля в редукции Буге находится в интервале от -45 до -10 миллигал,
- И** разность значений амплитуды новейших тектонических движений в окне радиуса 10 км находится в интервале от 700 до 1650 м,
- И** плотность эпицентров землетрясений на глубине от 0 до 10 км более 0.5 условных единиц,
- ТО** возможны медные месторождения типа 3.

Карта прогноза медных месторождений типа 4 показана на Рис. 6.

Прогноз выполнен по следующему правилу:

Если $(x_2 \geq 2) \wedge (x_2 \leq 6)$, то возможны медные месторождения типа 4.

Это эквивалентно следующему текстовому правилу:

- ЕСЛИ** последние проявления магматизма были в карбоне, в перми, в триасе, в юре или в мелу,
- ТО** возможны медные месторождения типа 4.

Карта прогноза медных месторождений типа 5 показана на Рис. 7.

Прогноз выполнен по следующему правилу:

Если $(x_2 \geq 4) \wedge (x_2 \leq 7)$, то возможны медные месторождения типа 5.

Это эквивалентно следующему текстовому правилу:

- ЕСЛИ** последние проявления магматизма были в триасе, в юре, в мелу или в палеоцене,
- ТО** возможны медные месторождения типа 5.

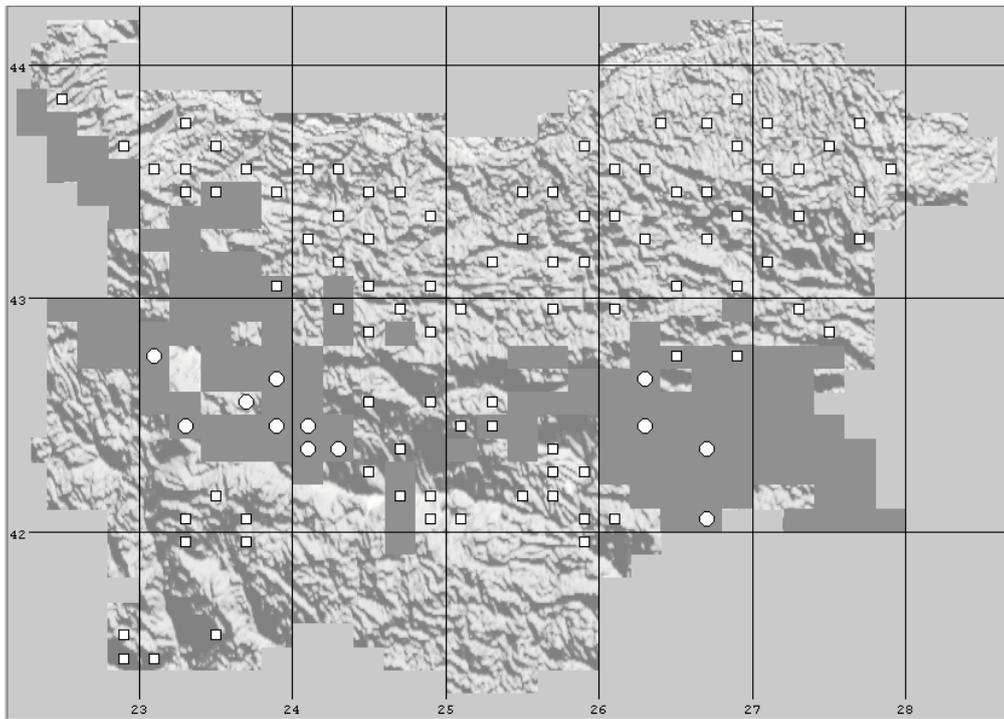


Рис. 6. Прогнозная карта медных месторождений 4-го типа. Кружки – выборка месторождений типа 4, квадраты – пункты, где по мнению эксперта месторождений быть не может.

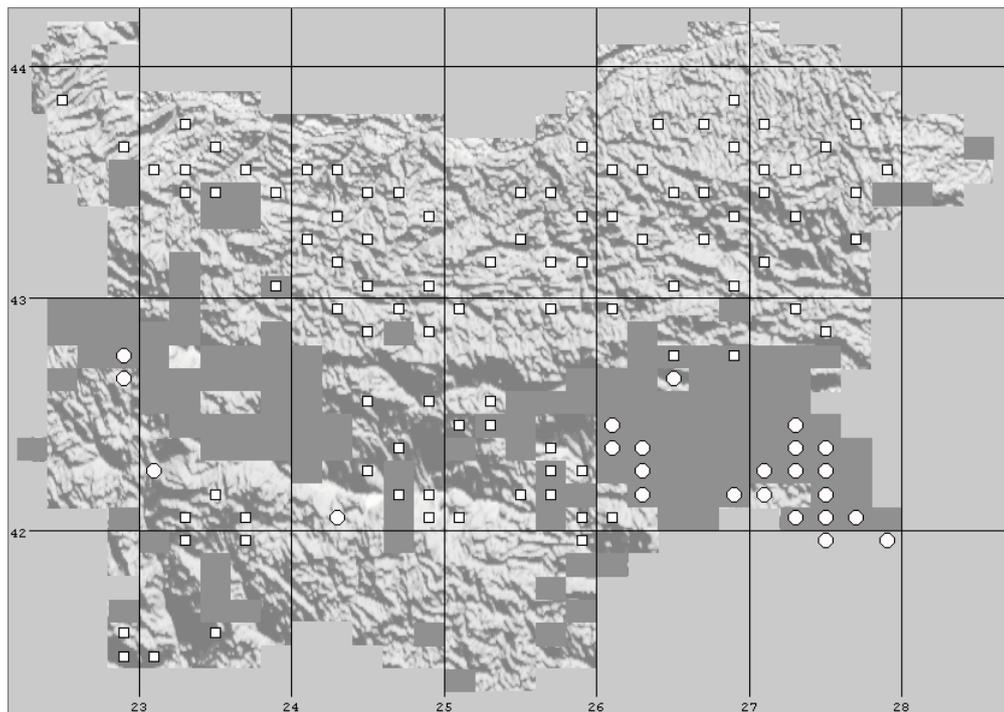


Рис. 7. Прогнозная карта медных месторождений 5-го типа. Кружки – выборка месторождений типа 5, квадраты – пункты, где по мнению эксперта месторождений быть не может.

Карта прогноза медных месторождений типа 6 показана на Рис. 8.

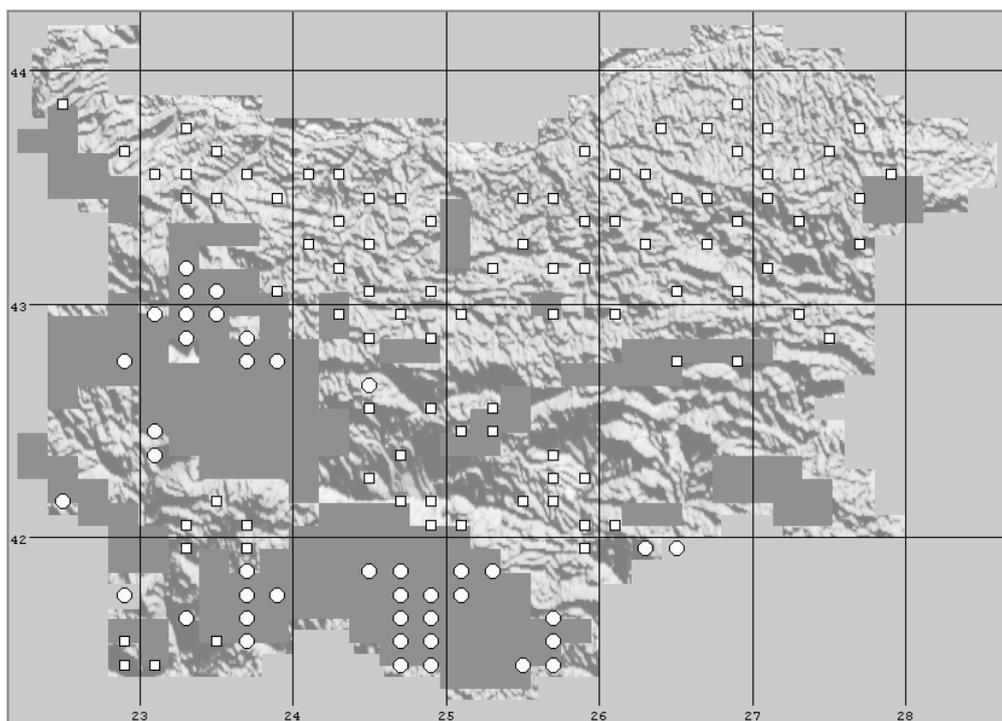


Рис. 8. Прогнозная карта медных месторождений 6-го типа. Круги – выборка месторождений типа 6, квадраты – пункты, где по мнению эксперта месторождений быть не может.

Прогноз выполнен по следующему правилу:

Если $(x_2 \geq 4) \wedge (x_7 \geq 20) \wedge (x_{11} \geq 200)$, то возможны медные месторождения типа 6.

Это эквивалентно следующему текстовому правилу:

- ЕСЛИ** последние проявления магматизма были в триасе, в юре, в мелу, в палеоцене, в эоцен-олигоцене, или в миоцене,
И суммарная длина разломов в ячейке $11,5 \times 16,5 \text{ км}^2$ превышает 20 км,
И амплитуда новейших тектонических движений более 200 м,
ТО возможны медные месторождения типа 6.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели сетевую геоинформационную технологию, которая применяется для анализа пространственных географических данных. Существенными характеристиками технологии являются: (1) сетевой доступ к географической информации (ГИ), которая может распределена на удаленных серверах сети Интернет и на компьютере пользователя; (2) современные методы извлечения существенной информации из данных, реализованные с помощью операций, не требующих от специалиста предметной области углубленной подготовки в области геоинформатики; (3) высокая интерактивность и наглядность анализа, повышающая эффективность принятия решений. Данная технология реализована в сетевой ГИС ГеоПроцессор. К ГИС и региональным ГИС-проектам открыт свободный доступ по адресам, указанным в статье. Несколько приведенных примеров применения рассматриваемой технологии для решения задач прогноза показывают эффективность ее применения для выполнения научных исследований и решения прикладных задач.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 07-07-12019, 09-07-12077, 10-07-00491-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас Народна Република България, 1983. София: ГУГК. 168 л.

- Богданов Б., Димитров Д., Стайков М. и др. 1978. Рудные формации Карпато-Балканской области. М., Недра. 239 с.
- Вольфсон Ф.Н., Дружинин Н.М. 1975. Главнейшие типы рудных месторождений // М.: Недра. 392 с
- Гитис В.Г. Геоинформационные технологии для научных исследований // Вестник РФФИ, №2-3 (70-71), апрель-сентябрь 2011, С. 13-32.
- Гитис В.Г., Добрев Т.В., Ермаков Б.В., Кубарева Н.Ю., Щукин Ю.К. 1989-А. Применение экспертной системы ГЕО для регионального прогноза свинцово-цинковых месторождений Болгарии // Геофизический журнал. Том 11. №4. С. 36-48.
- Гитис В.Г., Добрев Т.В., Ермаков Б.В., Щукин Ю.К., Вычев В.Т., Юрков Е.Ф. 1989-Б. Региональный прогноз медных месторождений Болгарии по геофизическим данным // Карпато-Балканская геологическая ассоциация. Труды XIV Конгресса СВГА. София: С. 1247-1250.
- Гитис, Ермаков, 2004. Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике // М., ФИЗМАТЛИТ, 2004. 256 С.
- Григорев Б., 1961. Магнитно поле в НР България // Изв. Геофиз. Ин-т Бълг. АН. Т 2. С. 109-115.
- Димитрова Е., ред., 1978. Карта магматических формаций Карпато-Балканской области // 1:1 000 000 София. КИПП по картография. 7л.
- Добрев Т.В., Щукин Ю.К., 1974. Геофизические поля и сейсмичность восточной части Карпато-Балканского региона // М.: Наука. 170 с.
- Йовчев И.С., 1960. Полезны ископаемы на НР България // София: Техника. 105 с.
- Косыгин Ю.А., Кулиш Е.А., ред., 1984. Основные типы рудных формаций. Терминологический справочник // М., Недра. 216 с.
- Старостин В.И. 2012. Металлогения // М., 560 с.
- Шалдун Т.Н., Добровольская М.Г., 1976. Рудные формации свинцово-цинковых месторождений // в книге Рудные формации эндогенных месторождений. М., Наука, С. 149-297
- Gitis, V., Dovgyallo, A., Osher, B., Gergely, T. 1998. GeoNet: an information technology for WWW on-line intelligent Geodata analysis // Proceedings of the 4th EC-GIS Workshop. Hungary. Joint Research Centre of European Commission. P. 124-135.
- Gitis V., Derendyaev A., Metrikov P., Shogin A. 2012. Network geoinformation technology for seismic hazard research. // Natural Hazards: Volume 62, Issue 3, Page 1021-1036

GIS technology for ore deposit forecasting

V.G.Gitis^{1,3}, Yu.K.Shchukin², V.I. Starostin³

¹ Institute for Information Transmission Problems, Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute),

² Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences,

³ Lomonosov Moscow State University.

Abstract— The elements of a network GIS spatial data research technology and its application to the regional forecast lead-zinc and copper deposits in Bulgaria are considered. The essential characteristics of the technology are: network access to data that can be distributed to remote servers and the user's computer, the modern methods of extracting relevant information from the data, implemented by means of operations that do not require a specialist subject area in-depth training in the field of geoinformatics, high interactivity and obviousness analysis. Technology is implemented in the network GIS GeoProcessor. Examples presented in the paper demonstrate the efficiency of the system for scientific and applied research.

Keywords: GIS technology, metallogeny, forecast of ore deposits