

## КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОИСКОВ ЗОЛОТА НА ЮГО-ЗАПАДНОМ СКЛОНЕ УКРАИНСКОГО ЩИТА

Б. С. Бусыгин<sup>1</sup>, С. Л. Никулин<sup>1</sup>, В. В. Залесский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный горный университет, Днепропетровск

<sup>2</sup>КП "Кировгеология", г. Каменка Черкасской области

Надійшла до редакції 28.03.06

**Резюме:** Представлена технология интегрированного компьютерного анализа комплексных геолого-геофизических данных при поисках золота в пределах юго-западного склона Украинского щита. Дано описание специализированной геоинформационной системы РАПИД. Результаты применения технологии продемонстрированы на примере Сорокинской зеленокаменной структуры с выделением участков, перспективных на золотоносность. Даны рекомендации по постановке крупномасштабных исследований в их пределах.

**Ключевые слова:** компьютерная технология, геоинформационная система, золоторудные объекты, геолого-геофизические съемки, прогнозные карты.

**Б. С. Бусыгин, С. Л. Нікулін, В. В. Залеський. КОМП'ЮТЕРНА ТЕХНОЛОГІЯ ПОШУКІВ ЗОЛОТА НА ПІВДЕННО-ЗАХІДНОМУ СХИЛІ УКРАЇНСЬКОГО ЩИТА.**

**Резюме:** Представлено технологію інтегрованого комп'ютерного аналізу комплексних геолого-геофізичних даних при пошуках золота в межах південно-західного схилу Українського щита. Дано опис спеціалізованої геоінформаційної системи РАПІД. Результати застосування технології продемонстровані на прикладі Сорокинської зеленокам'яної структури з виділенням ділянок, перспективних щодо золотоносності. Надано рекомендації з постановки крупномасштабних досліджень у їх межах.

**Ключові слова:** комп'ютерна технологія, геоінформаційна система, золоторудні об'єкти, геолого-геофізичні зйомки, прогнозні карти.

**B. S. Busygin, S. L. Nikulin, V. V. Zalesskiy. THE COMPUTER TECHNOLOGY FOR GOLD SEARCH WITHIN SOUTH-WEST DOWNHILL OF THE UKRAINIAN SHIELD.**

**Abstract:** The computer technology of integrated complex geological and geophysical data analysis at gold search process within south-west downhill of the Ukrainian Shield is presented. The specialized geoinformation system RAPID is described. The results of technology application on Sorokinskaya greenstone structure including perspective gold-bearing sites detection are adduced. The recommendations for large-scale research organization within the site bounds are given.

**Keywords:** computer technology, geoinformation system, ore-gold object, geological and geophysical surveys, forecasting maps.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных тенденций современного поискового процесса является переход к поискам глубокозалегающих и слабоконтрастных по своим физическим свойствам объектов в сложных геологических условиях, что обуславливает необходимость расширения комплекса поисковых методов, увеличения объема, разнообразия и сложности полевых материалов.

В последнее время ведущее место по количеству получаемых данных заняли методы дистанционного зондирования (включая наземные и воздушные геофизические наблюдения), а также съемки, выполняемые с космических аппаратов пассивными и активными датчиками. Однако эффективность использования получаемых материалов остается сравнительно невысокой, поскольку из имеющихся данных извлекается не вся полезная информация. Одной из причин этого является недостаточная разработка методологии и подходов к интерпретации и интегрированному анализу комплексных разнородных и разноуровневых данных.

Увеличить количество извлекаемой информации можно путем выполнения по меньшей мере двух условий: 1) создания специализированных компьютерных систем и технологий сбора, регистрации, хранения, манипулирования, обмена и обработки данных; 2) разработки адекватных методов интегрированного анализа материалов и методологии их использования.

В последние годы научной, методологической и информационной основой решения указанных проблем служит бурно развивающееся междисциплинарное направление, получившее название "*геоинформатика*", в рамках которого широкое распространение получили специальные компьютерные технологические средства – "*геоинформационные системы*" (ГИС). Прежде всего ГИС рассма-

триваются как средство обработки пространственно привязанных данных для получения новых знаний и представления их в максимально удобной для восприятия форме. Функции накопления, хранения, преобразования и отображения пространственно- и объектно-привязанной информации подчинены главной цели – интегрированному анализу и комплексной интерпретации геологических данных; прогнозированию и моделированию ситуаций; планированию действий и поддержке принятия решений.

Целью настоящей работы является описание компьютерной технологии поисков золота с помощью специализированной геоинформационной системы РАПИД (распознавание, автоматизированное прогнозирование, интерпретация данных) на примере одного из районов Украинского щита.

### 2. НАЗНАЧЕНИЕ И ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РАПИД

РАПИД – специализированная растрово-векторная система для решения задач интегрированного анализа разнородных и разноуровневых геологических данных, прогноза геологических явлений и ситуаций, геоэкологического районирования и др. ГИС РАПИД может быть использована для решения задач природопользования, поиска месторождений полезных ископаемых, мониторинга состояния окружающей среды, прогноза опасных природных и техногенных явлений, пространственно-статистического анализа и др. В качестве исходных данных используются материалы геофизических и геохимических съемок, цифровые модели рельефа земной поверхности, аэрокосмические снимки, различные картографические источники, табличные данные и др.

В ГИС РАПИД в качестве основной используется растровая модель хранения и

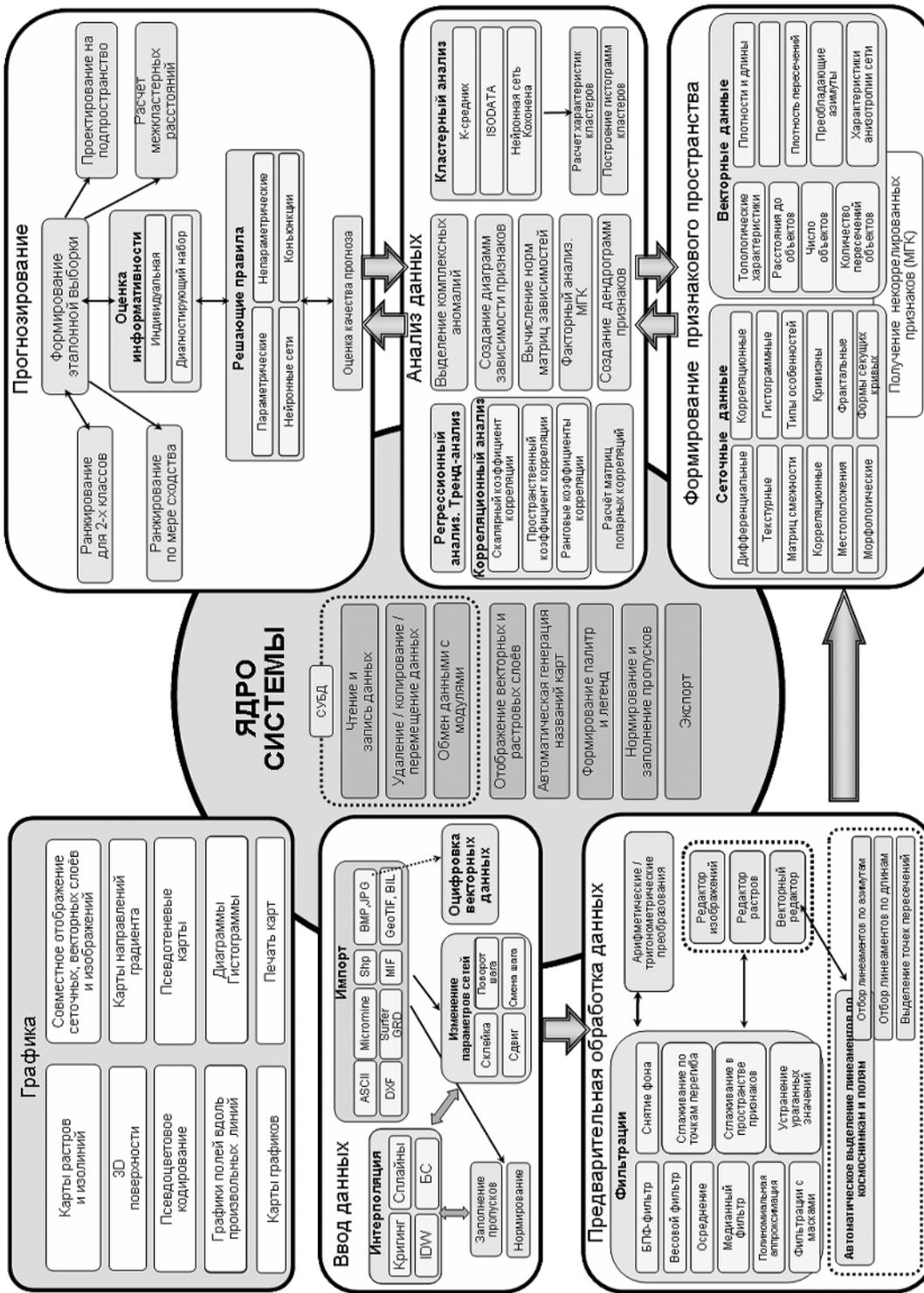


Рис. 1. Функциональная схема ГИС РАПИД

представления данных, при которой информация об исследуемом участке соотносится с узлами регулярной сети, заданной на земной поверхности. Кроме того, система обладает широким спектром средств для работы с векторными картографическими слоями и графическими изображениями. РАПИД обеспечивает интеграцию растровых и векторных представлений данных, аналитические, информационно-справочные и измерительные функции; фильтрацию данных; построение производных карт, исследование зависимостей и статистическую обработку; многомер-

ное районирование, кластеризацию и классификацию; распознавание и картографирование ситуаций, визуализацию данных, компоновку и печать выходных документов. Система включает в себя ядро, обеспечивающее управление сеточными, растровыми и векторными данными, а также совокупность прикладных модулей, решающих конкретные задачи обработки и анализа данных. Упрощенная функциональная схема ГИС РАПИД приведена на рис. 1.

При решении задач прогноза и поиска месторождений [1] система РАПИД позволя-



Рис. 2. Общая схема прогнозирования

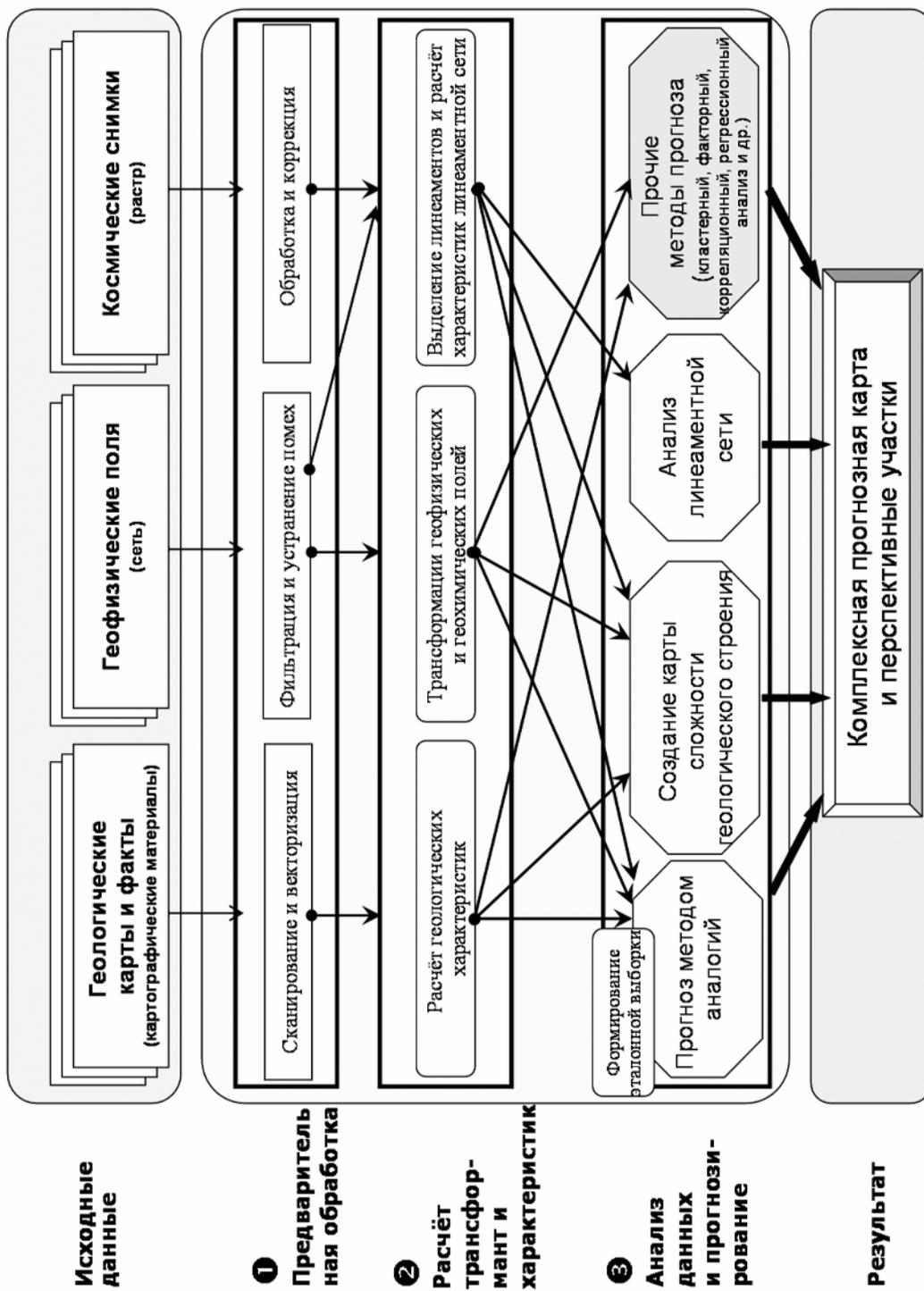


Рис. 3. Технологическая схема обработки информации при прогнозировании

ет реализовать принцип многовариантного решения посредством имитационного моделирования и проведения вычислительных экспериментов, предоставляя пользователю широкий набор инструментов для достижения поставленных целей и возможность выбора наилучшего из них (рис. 2).

Как правило, решение каждой конкретной задачи требует особого методического подхода и специальных инструментальных средств. Опыт применения системы позволил построить обобщенную технологическую схему обработки информации в рамках системы при прогнозировании месторождений полезных ископаемых (рис. 3).

Проиллюстрируем технологию работы ГИС РАПИД на примере Сорокинской зеленокаменной структуры.

### 3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОГНОЗА

#### *Участок исследований*

Перспективная на золотоносность Сорокинская гранит-зеленокаменная структура располагается в пределах юго-западного склона

Украинского кристаллического щита. На сегодняшний день получено значительное количество фактического материала, характеризующего золотоносность Сорокинской структуры, и выделен ряд рудных узлов и рудопроявлений, имеющих определённый промышленный интерес. Структурно-тектоническая позиция рудных объектов определяется их приуроченностью к региональным структурам. Особенностью геологического строения является широкое развитие метасоматических изменений вмещающих пород, наличие тектонических нарушений различного простирания, неоднородность магматических образований. Для рудных объектов Сорокинской зеленокаменной структуры выделен ряд поисковых критериев (формационных, геофизических, геохимических, структурно-тектонических), однако все они являются косвенными и имеют вероятностную связь с оруденением. Кроме того, несмотря на достаточную изученность самой Сорокинской структуры, смежные с ней структуры исследованы гораздо менее полно и степень надёжности перечисленных выше критериев для них не установлена. К числу полевых данных, с одинаковой степенью детальности

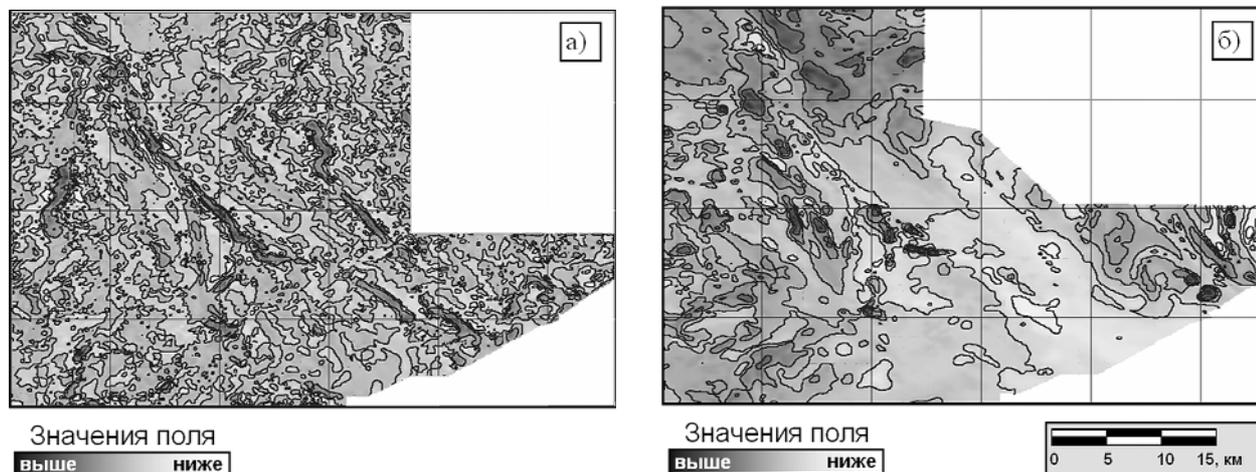


Рис. 4. Гравитационное поле  $V_z$  (а) и магнитное поле  $Z_a$  (б) на участке исследований

описывающих всю изучаемую территорию, относятся лишь съемки магнитного и гравитационного полей (масштаб 1:50 000). Геологические и геохимические наблюдения распределены по площади весьма неравномерно, что затрудняет их использование при прогнозе перспективных участков на территории смежных структур.

С учётом перечисленного была сформулирована задача исследований: на основе использования современных компьютерных технологий обработки и интегрированного анализа гравитационного и магнитного полей, а также геолого-геохимических данных выделить на исследуемой территории участки с геофизической и структурно-тектонической обстановкой, благоприятной для обнаружения золоторудного оруденения.

### *Исходные данные*

Информационной основой для проведения прогнозных работ послужили карты гравитационного (рис. 4, а) и магнитного (рис. 4, б) полей (масштаб 1:50 000). Геофизические поля достаточно дифференцированы. Сорокинская гранит-зеленокаменная структура и смежные ей структуры отчетливо выделяются как в гравитационном, так и в магнитном полях.

Геологическая информация представлена геологической картой масштаба 1:50 000, построенной по материалам исследований, датированных 1961–1981 гг. Геологические факты, положенные в основу карты, распределены пространственно неравномерно, в результате чего строение Сорокинской структуры показано достаточно детально, однако некоторые соседние структуры на карте не отображены. Это затрудняет её использование вне площади Сорокинской структуры.

Проведенные геохимические исследования также в основном приурочены к Сорокинской зоне и практически не охватывают

смежных структур. Выявленные в результате геохимического опробования рудопроявления и точки минерализации послужили основой для формирования эталонных выборок при прогнозировании методами распознавания образов.

### *Предварительная обработка данных*

*Геофизические поля.* Изначально были представлены в виде карт изолиний на бумажных носителях, отсканированы и пространственно привязаны. Значения поля, снятые с изолиний, путём интерполяции приведены к регулярной сети с шагом 100×100 м (см. рис. 4).

*Геологические данные.* Геологическая карта, представленная на бумажном носителе, была отсканирована, обработана (путем регулирования яркости, контрастности, цветовой палитры и угла необходимого поворота) и пространственно привязана. Далее осуществлялась векторизация карты, т. е. перевод её из растрового изображения в векторное представление в виде точек, полилиний и полигонов. Все объекты карты группировались в несколько тематических векторных слоёв, представляющих геологические границы, разломы, тектониты, зоны вторичных изменений, точки повышенной минерализации и др.

*Выделение линеаментов.* В качестве дополнительного инструмента извлечения информации из материалов геофизических съёмок использовался линеаментный анализ полей. В его основе лежит выделение линеаментов – линейных элементов поля, предположительно связанных с разломной тектоникой [2, 3] и формирующих линеаментную сеть изучаемой территории. Выделение линеаментов проводилось в автоматическом режиме с помощью специальной подсистемы ГИС РАПИД [4]. Минимальная длина выделяемых линеаментов задавалась равной 300 м. В дальнейшем найденные по гравитационному и магнитному полям линеаменты

использовались совместно; при этом линеаменты, фиксирующиеся в обоих полях, были объединены (рис. 5, а).

**Расчёт геофизических трансформант и геологических характеристик**

*Геофизические данные.* Для прогнозирования с помощью методов распознавания образов выполнялся расчёт большого количество трансформаций геофизических полей, из которых формировалось пространство признаков (картографических слоёв в сеточной форме), характеризующих геофизическую обстановку на изучаемой территории. В дальнейшем полученное пространство минимизировалось путём отбрасывания несущественных с позиций решения поставленной геологической задачи признаков. Всего было рассчитано более 300 различных трансформант гравитационного и магнитного полей в скользящих окрестностях (окнах) размерами 700×700, 1100×1100 и 2100×2100 м, в том числе: дифференциальные, текстурные, гистограммные, морфологические, интегральные, линейные и площадные признаки местоположения, типы особенностей, кривизны и др. [1, 5, 6]

*Геологические данные.* Для обеспечения возможности совместного использования сеточных геофизических и векторных геологи-

ческих материалов рассчитывался ряд цифровых геологических признаков-характеристик, отнесенных к узлам регулярной сети 100×100 м (совпадающей с геофизической сетью). К таким характеристикам, отражающим структурные взаимосвязи геологических объектов, относятся: расстояние от узла сети до ближайшего геологического объекта определенного типа (например, геологической границы), количество взаимопересечений линейных геологических объектов одного или нескольких типов (например, разломов и геологических границ), а также плотность разломов и геологических границ в скользящей окрестности (где плотность – общая длина, делённая на площадь окрестности) и т. п. Полученные характеристики использовались при формировании признакового пространства наряду с геофизическими полями и их трансформантами.

*Линеаменты.* На розе-диаграмме направлений выделенных ранее линеаментов (рис. 5, б) фиксируется 6 максимумов, соответствующих углам 0°, 36°, 55°, 90°, 126° и 145°. Линеаменты соответствующих направлений формируют 3 системы взаимноперпендикулярных разломов – 0–90°, 36–126°, 55–145°. Исходя из этого, из всей совокупности линеаментов было выделено 6 групп, в зависимости от их азимутов простираия:

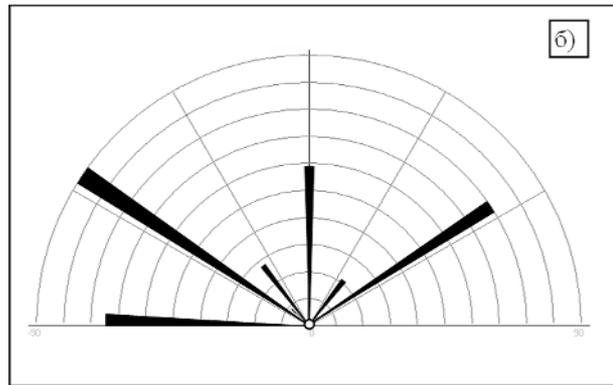
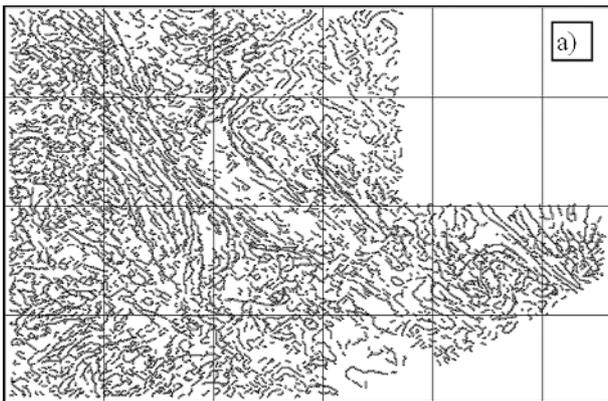


Рис. 5. Линеаменты, выделенные по данным полей (а), и роза-диаграмма их направлений (б)

$0 \pm 5^\circ$ ,  $36 \pm 5^\circ$ ,  $55 \pm 5^\circ$ ,  $90 \pm 5^\circ$ ,  $126 \pm 5^\circ$  и  $145 \pm 5^\circ$ . Полученные наборы линеаментов послужили основой для создания специальных характеристик линеаментной сети [7, 8]. Их основное предназначение – разделение (зонирование) территории в зависимости от свойств линеаментной сети и, предположительно, характера трещиноватости, а также выделение границ таких зон. Помимо того, они использовались при формировании признакового пространства для прогноза методами распознавания образов.

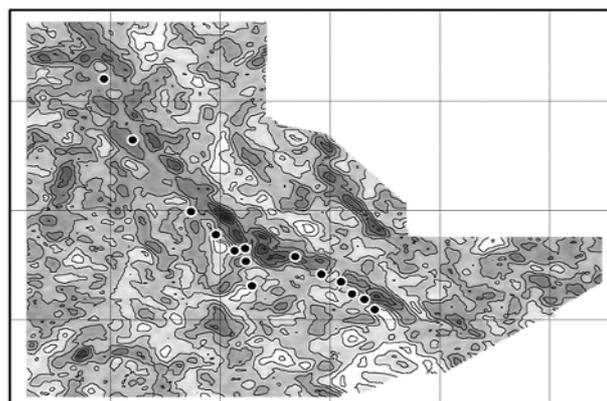
### Анализ данных и прогнозирование

Прогноз перспективности Сорокинской и прилегающей к ней структур был выполнен в рамках нескольких, принципиально различных подходов, что позволило обеспечить достоверность и устойчивость результатов. Ниже дана краткая характеристика использованных методов.

**А. Прогноз, реализующий метод аналогий**, выполнялся двумя алгоритмами – ранжирования на два класса и ранжирования по мере сходства с заданным классом [1].

Алгоритм ранжирования на два класса специально разработан для геологических приложений, в которых возникает задача разделения объектов, в различной степени подверженных воздействию некоторого фактора (например, процесса образования золоторудной минерализации). Располагая представителями двух различных классов объектов (первый – с низкой степенью проявления фактора, второй – с высокой), алгоритм ранжирует изучаемую совокупность объектов по интенсивности проявления конкретного фактора в каждой точке наблюдений.

В качестве объектов с максимальным проявлением фактора (золоторудной минерализации) использовались точки геохимического опробования с содержанием Au  $\geq 0,5$  г/т,

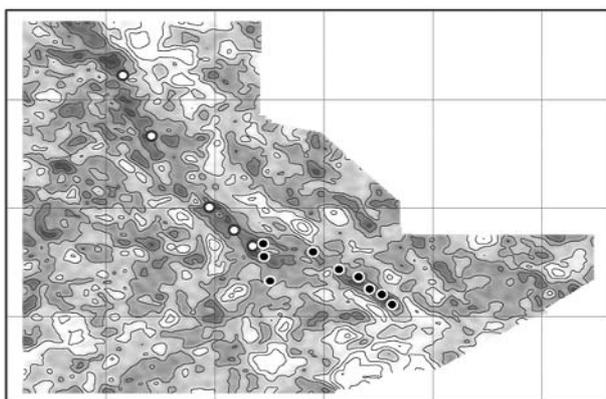


Перспективность  
Выше ниже  
● Эталонные объекты «рудного» класса

Рис. 6. Карта ранжирования территории для 2-х классов

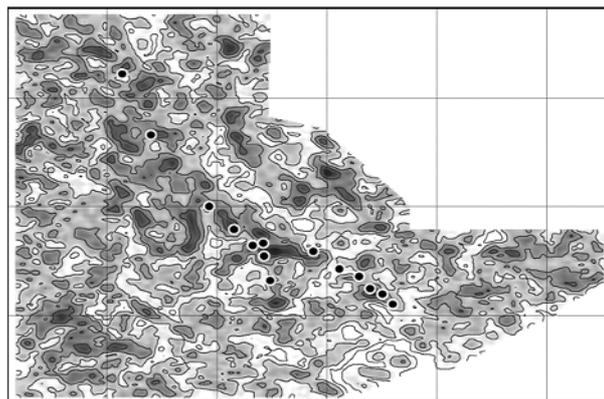
которые и представили "рудный" класс эталонов (рис. 6). Объекты второго, "безрудного" класса были выбраны случайным образом. Количество объектов первого класса – 14, второго – 28. В целом, признаковое пространство представляло совокупность вычисленных ранее геофизических, геологических и линеаментных характеристик.

Алгоритм ранжирования по мере сходства с заданным классом основан на оценке сходства геологической обстановки объектов изучаемой территории с известными золоторудными объектами. При этом эталонная выборка (точки геохимического опробования с содержанием Au  $\geq 0,5$  г/т) была разделена на несколько классов в зависимости от положения в многомерном пространстве признаков. Для разделения использовалась процедура кластеризации, проведенная тремя различными методами (*k*-средних, ISODATA, нейронной сетью Кохонена [1, 9]) при разном количестве первоначально задаваемых классов (кластеров) и различной структуре признакового пространства. После согласования полученных результатов выделилось 2 эталонных класса. Ранжирование выполнялось по отношению к каждому из них, после чего по-



Перспективність  
 выше ниже  
 ● Эталонные объекты  
 ○ Класс 1 ● Класс 2

Рис. 7. Карта комплексного показателя меры сходства территории с эталонами



Перспективність  
 выше ниже  
 ● Эталонные объекты

Рис. 8. Карта параметра анизотропии поля линейментов

лученные карты меры сходства были объединены в единую карту комплексного показателя меры сходства (рис. 7).

В процессе расчетов производилась минимизация признакового пространства, для чего рассчитывался диагностирующий набор признаков. Преследовалась цель получения информативного подмножества исходной системы признаков, при помощи которого можно наилучшим образом характеризовать территорию с точки зрения сходства её с имеющейся эталонной выборкой конкретного класса [10]. Признаки, не вошедшие в диагностирующий набор, из дальнейшего рассмотрения исключались.

**Б. Выделение зон повышенной анизотропии линейментной сети** базировалось на сравнении интенсивностей (суммарных длин) взаимно перпендикулярных систем линейментов [11].

Для этого рассчитывался показатель  $D$ , характеризующий анизотропию (искаженность) поля линейментов на исследуемой территории:

$$D = |N_0 - N_{90}| + |N_{36} - N_{126}| + |N_{55} - N_{145}|,$$

где  $N_i$  – суммарные длины линейментов соответствующих азимутов простирания.

Показатель  $D$  характеризует нарушенность территории, явившуюся следствием прошедших ранее тектонических процессов. Параметр достигает максимальных значений на участках с выраженным преобладанием одного или двух смежных направлений линейментов (в первую очередь – вдоль глубинных разломов и по границам блоковых структур); при отсутствии подобной нарушенности его значение стремится к нулю. Опыт применения этого показателя на ряде золоторудных месторождений свидетельствует, что многие известные объекты тяготеют к областям его повышенных значений.

Карта, отражающая распределение показателя анизотропии поля линейментов, приведена на рис. 8. Повышенные значения параметра  $D$  предположительно соответствуют более перспективным участкам.

**В. Создание карты сложности геологического строения.** Подход к прогнозированию, основанный на построении карты сложности геологического строения территории, базируется на предположении, что более сложное строение более перспективно на наличие оруденения. Другими словами, предполагается, что зоны пересечения линеймен-

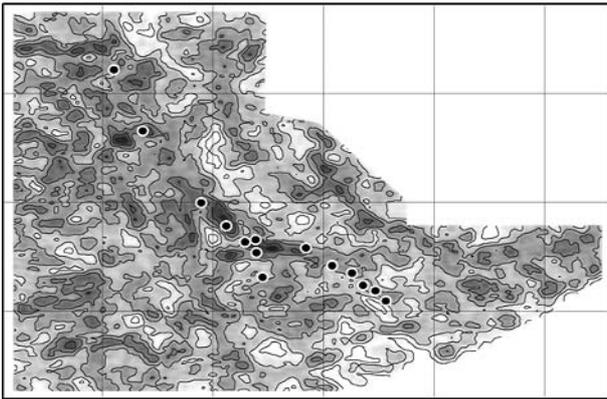


Рис. 9. Карта показателя сложности геологического строения

тов различных систем обуславливают наличие "структурных ловушек", которые, в свою очередь, могут являться важнейшим индикационным признаком структурного контроля любого геологического объекта вне зависимости от его формационной принадлежности.

Оценка сложности геологического строения выполнялась путем построения карты комплексного параметра сложности. Она пред-

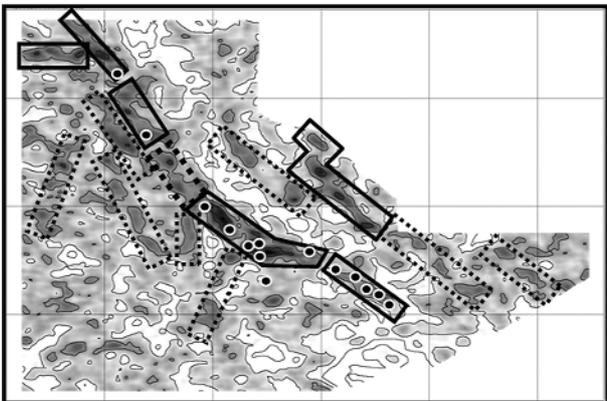


Рис. 10. Комплексная прогнозная карта

ставляет результат совместного рассмотрения карт 6-и характеристик, вычисленных в скользящей окрестности размером 1100×1100 м:

- 1) плотности линеаментов в гравитационном и магнитном полях;
- 2) количества направлений линеаментов;
- 3) плотности осей линеаментных зон. Оси выделялись на картах рассчитанных ранее характеристик линеаментной сети. Критериями выделения служили: а) оси узких (до 1 км) вытянутых аномалий; б) цепочек аномалий (как положительных, так и отрицательных); в) границы крупных участков с существенно различными значениями характеристик линеаментной сети или с различным поведением изолиний этих характеристик (отметим, что полученная схема расположения осей линеаментных зон отражает структурно-тектоническую обстановку на участке исследований и представляет самостоятельный геологический интерес);
- 4) плотности точек пересечения линеаментов и осей линеаментных зон;
- 5) параметра анизотропии линеаментной сети  $D$ ;
- 6) суммарной дисперсии гравитационного и магнитного полей (для сопоставимости по уровню поля были предварительно нормированы).

Полученная карта комплексного параметра сложности приведена на рис. 9. Участки с более высокими значениями параметра принимались в качестве перспективных.

Окончательным результатом работ явилась комплексная прогнозная карта (рис. 10), полученная путем совмещения 4-х карт, построенных на предыдущих этапах:

- 1) карты ранжирования для двух классов ("рудного" и "безрудного");
- 2) комплексной карты меры сходства по отношению к известным золоторудным объектам;

- 3) карты распределения параметра анизотропии линейной сети D;
- 4) карты комплексного параметра сложности геологического строения.

Главная цель совмещения – повышение устойчивости и надёжности результатов прогноза.

Тщательный анализ комплексной прогнозной карты с привлечением широкого спектра неформализуемой априорной геологической информации позволил выделить в её пределах перспективные участки 1-й и 2-й очередей, занимающие, соответственно, 5 и 15 % общей площади, и рекомендовать проведение в их пределах крупномасштабных поисковых работ, в том числе грави-, магнито- и электроразведки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Бусыгин Б. С., Мирошниченко Л. В.** Распознавание образов при геолого-геофизическом прогнозировании. – Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1991. – 168 с.
2. **Кац Я. Г., Тевелев А. В., Полетаев А. И.** Основы космической геологии. – М: Недра, 1988. – 430 с.
3. **Миловский Г. А.** Применение крупномасштабной панхроматической и спектральной космической съемки для прогноза эндогенного оруденения на севере Архангельской области. // Исследование Земли из космоса. – 2003. – № 4. – С. 38–41.
4. **Busygin B., Inozemtsev S., Nikulin S.** The integrated analysis of geological-geophysical and remote sensing data at the gold prospecting in Western Uzbekistan // 67-rd EAGE conference: Extended Abstracts. – Madrid, Spain. – June, 2005.
5. **Haralick R. M.** Textural features for image classification // IEEE Transaction on Systems, man and Cybernetics SMC-3. – 1973. – P. 610–621.
6. **Ахметшин А. М., Бойко В. А., Бусыгин Б. С.** Статистическая классификация текстурных изображений методом обобщённого спектрального анализа в базисе Грамма–Шмидта. // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2005. – № 2. – С. 108–114.
7. **Бусыгин Б. С., Залесский В. В., Никулин С. Л.** Прогнозирование золоторудной минерализации в районе Сорокинской зеленокаменной структуры. // Науковий вісник НГУ. – 2006. – № 3. – С. 13–25.
8. **Пуговкин А. А.** Компьютерная обработка результатов дешифрирования космических материалов для ресурсной оценки территорий (Карело-Кольский регион). // Исследование Земли из космоса. – 2000. – № 1. – С. 67–71.
9. **Kohonen T.** Self-organization and associative memory // Series in Information Sciences, vol. 8. – Berlin: Springer Verlag. – 1984. – 417 p.
10. **Бусыгин Б. С., Мирошниченко Л. В.** Оценка информативности признаков при крупномасштабном геофизическом прогнозе. // Геофиз. журнал. – 1991. – Т. 13, N 3. – С. 35–46.
11. **Кукушкин Д. А., Ян Г. Х.** Некоторые вопросы методики анализа линейментов (по данным дешифрирования космических снимков). // Исследование Земли из космоса. – 1983. – № 1. – С. 51–56.