



ПРОГНОЗ СКРЫТОГО ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ В ПРЕДЕЛАХ ЦЕНТРАЛЬНО-КОЛЫМСКОГО РАЙОНА ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОЛОГО- ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ МЕТОДОМ РАСПОЗНАВАНИЯ

В работе представлены результаты формализованной (количественной) оценки перспективности Центрально-Колымского района (ЦКР) на золотое оруденение по комплексу геофизических, геологических и геохимических признаков методом ИПС. Метод основан на алгоритме распознавания образов и предполагает разделение множества изучаемых объектов на два класса: «рудные», которые по совокупности анализируемых признаков имеют максимальное сходство с известными эталонами (ранга рудных узлов, полей или месторождений), и условно «безрудные», для характеристики которых оценивается вмещающая среда, включающая в себя площадь за пределами выбранных эталонов. Показано, что в геофизических полях проявлены важные особенности геологического строения известных золоторудных полей и узлов ЦКР. Установлены прогнозно-поисковые геолого-геофизические и геохимические признаки (критерии локализации), характерные для Аян-Юряхской и Инь-Яли-Дебинской структурно-формационных зон. Выделены площади, перспективные на выявление новых золоторудных месторождений в пределах ЦКР.

Ключевые слова: Центрально-Колымский регион, прогноз оруденения, золоторудные месторождения, распознавание образов, прогнозно-поисковые геолого-геофизические признаки.

Карамышев Андрей Викторович

магистрант, инженер^{1,2}
and.karamysheff2011@yandex.ru

Фёдорова Ксения Сергеевна

аспирант, геофизик 1 категории²
ksfedorova24@gmail.com

Тарасов Андрей Вячеславович

кандидат геолого-минералогических наук
доцент кафедры геофизики,
ведущий геофизик^{1,2}
avtarasov@mail.ru

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург

² ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского», г. Санкт-Петербург

На протяжении более 80 лет Центрально-Колымский регион (ЦКР) является крупнейшим центром золотодобычи на Дальнем Востоке России. В нём известно множество коренных и россыпных месторождений золота, в том числе такие крупные, как Наталкинское. Несмотря на относительно хорошую изученность, ЦКР остаётся перспективным на обнаружение новых крупных золоторудных месторождений. Одним из актуальных методов локализации подобных объектов является формализованное прогнозирование с использованием компьютерных методов распознавания образов (РО). Несмотря на то что первые целенаправленные попытки использования вероятностно-статистических методов для решения геологических задач относятся ещё к началу 1960-х гг., широкое распространение они получили только в последние годы в условиях повсеместного перехода к цифровым типам данных.

В качестве прогнозных признаков в алгоритмах РО обычно используются геофизические данные, объективно отражающие характер естественных полей и характеризующиеся преимущественно равномерным покрытием изучаемой территории, что имеет первостепенное значение при применении статистических методов прогноза.

УДК 553.411(571.56)

© А. В. Карамышев, К. С. Фёдорова, А. В. Тарасов, 2020

DOI: 10.24411/0869-5997-2020-10010

В то же время прямые геологические данные, являющиеся в своей основе суммой результатов точечных наблюдений, зачастую неравномерно распределённых в пределах рассматриваемой площади и представляющие субъективное отражение геологической обстановки конкретным наблюдателем, практически лишены основного недостатка косвенных данных, а именно неоднозначности интерпретации. Другой важной составляющей комплекса прогнозных признаков являются также геохимические данные, аномалии которых в отдельных случаях позволяют достаточно точно локализовать непосредственно рудные объекты. Поэтому мы считаем рациональным использование в качестве рабочего набора прогнозных признаков сбалансированной комбинации косвенных геофизических параметров с прямыми геологическими данными, преобразованными в статистически интерпретируемые количественные переменные.

Область исследований расположена в пределах крупнейшего на северо-востоке Азии Яно-Колымского золоторудного пояса, протягивающегося в северо-западном направлении от верховьев р. Колымы более чем на тысячу километров. Административно участок относится преимущественно к Магаданской области, а в номенклатуре ГКК соответствует центральной и восточной частям листа Р-55, а также крайней западной части листа Р-56 (от Р-55-IX на северо-западе до Р-56-ХІХ на юго-востоке).

В структурно-тектоническом отношении ЦКР условно выделяется в пределах Яно-Колымской складчатой системы, входящей в инфраструктуру Верхояно-Чукотской складчатой области и имеющей региональную северо-западную ориентировку. Территория Яно-Колымского складчатого пояса является составной частью северо-восточной аккреционной окраины Евразии и характеризуется блоковой структурой с преобладанием горизонтальных дислокаций [9]. В составе региона традиционно выделяются две крупные линейные структуры – антиклинорная (юго-западная), состоящая преимущественно из пермских и триасовых отложений (Аян-Юряхская), и синклинорная (северо-восточная), сложенная осадками триас-юрского возраста (Иньяли-Дебинская) (рис. 1). Тектонически им соответствует группа террейнов различного происхождения. Доаккреционные структуры на рассматриваемой территории представлены группой блоков, дочерних для палеоокраины сибирского континента.

Кулар-Нерский (Яно-Колымский) террейн пассивной континентальной окраины занимает юго-западную часть участка, примыкая на западе, за его пределами, к Охотскому массиву и Верхоянскому поясу. Сложен террейн комплексом пород осадочного клина восточной окраины Палеосибири, представленным в основании шельфовыми терригенными пермскими толщами. Выше по разрезу они сменяются триасовыми и ниже-среднеюрскими более глубоководными алевролитово-песчаниковыми отложениями глубокого шельфа и континентального склона, иногда с прослоями вулканогенного материала (рис. 2).

Расположенный северо-восточнее Иньяли-Дебинский террейн окраинного бассейна (микроокеана) отделяет Кулар-Нерский террейн от Омулёвского (Индиширо-Колымская складчато-надвиговая система). Юго-западная граница представлена крупным сдвигом, переходящим на юге в надвиг (Чай-Юрьинский разлом). Северо-восточная граница перекрыта надвиговыми пластинами соседнего Омулёвского террейна. Иньяли-Дебинский синклинорий, соответствующий одноимённому террейну в структурном плане, не имеет полного с ним совпадения, поскольку его южная (Бахапчинская) ветвь отнесена к соседнему Вилигинскому террейну. Иньяли-Дебинский террейн представляет собой, вероятно, наиболее глубоководный фрагмент мезозойского окраинного моря, отделённого от океана островным Омулёвским блоком. Сложен террейн преимущественно относительно глубоководными тонкотерригенными осадками верхнего триаса, нижней и средней юры.

Занимающий юго-восток территории Вилигинский террейн задугового бассейна, территориально соответствующий Аян-Юряхской зоне, по всей видимости, представляет собой аллохтон, надвинутый на триасовые толщи Кулар-Нерского террейна. Нижние части разреза Вилигинского террейна представлены морскими пермскими отложениями, включающими все три отдела перми и составляющими не менее 70 % площади. Характерной особенностью данной толщи является наличие в её составе горизонтов диамиктитов – тёмно-серых алевролитов с включениями обломков средних и кислых вулканитов и осадочных пород. Пермско-триасовые толщи террейна интерпретируются как образования задугового бассейна Кони-Тайгоносской островодужной системы [9].

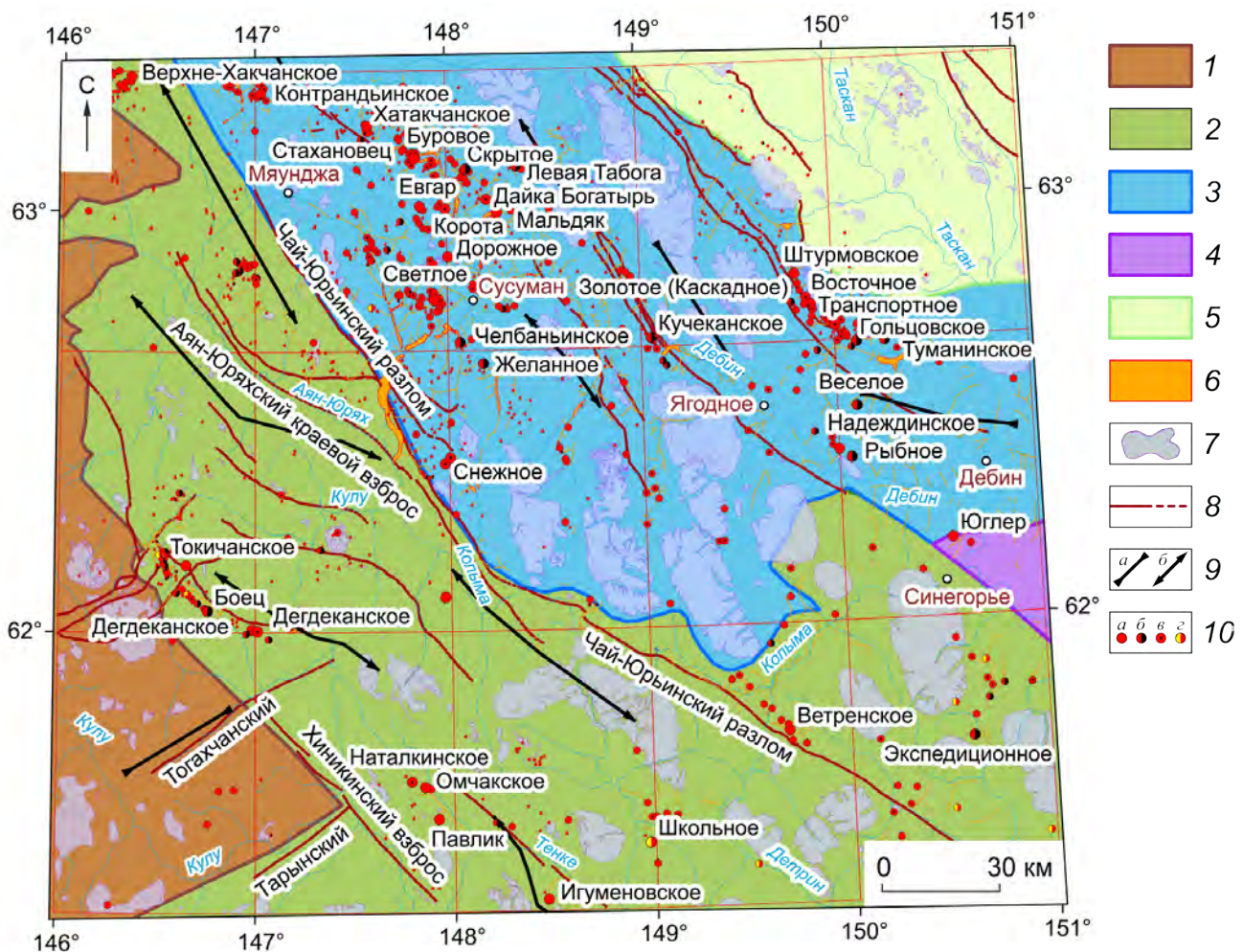


Рис. 1. ТЕКТОНИЧЕСКАЯ СХЕМА ЦЕНТРАЛЬНО-КОЛЫМСКОГО РЕГИОНА, ПО МАТЕРИАЛАМ ГГК-1000/3:

террейны: 1 – Яно-Колымский, 2 – Вилигинский, 3 – Иньяли-Дебинский, 4 – Балыгчанский, 5 – Омулёвский; 6 – участки россыпной золотоносности; 7 – интрузивные тела; 8 – крупные разрывные нарушения; 9 – оси крупных антиклиналей (а) и синклиналей (б); 10 – золоторудные объекты: а – золото кварцевые, б – золото-сульфидные, в – золото-сульфидно-кварцевые, г – золото-серебряные (размер кружка характеризует величину золоторудного объекта – от месторождения до пункта минерализации)

Структурообразующую роль в строении территории играет система глубинных разрывных нарушений северо-западного простирания (Чай-Юрьинский, Тенькинский и др. разломы) (см. рис. 1, 2). Они выражены мощными зонами дробления или сериями субпараллельных разломов, отчётливо проявленных в геофизических полях и являющихся важным фактором локализации золотого оруденения. Разрывные нарушения низших рангов представлены тремя системами различной ориентировки. Субширотные разломы, образующие с северо-

западными сопряжённую динамопару с углом сжатия до 140°, достаточно многочисленны, однако характеризуются меньшими амплитудами смещения и протяжённостью в первые сотни километров. Разломы же субмеридионального и северо-восточного простирания сравнительно редки и имеют малую протяжённость, однако также играют существенную роль в локализации магматических тел и золотого оруденения [2].

Отличительная черта Яно-Колымского складчатого пояса – широкое распространение магматиче-

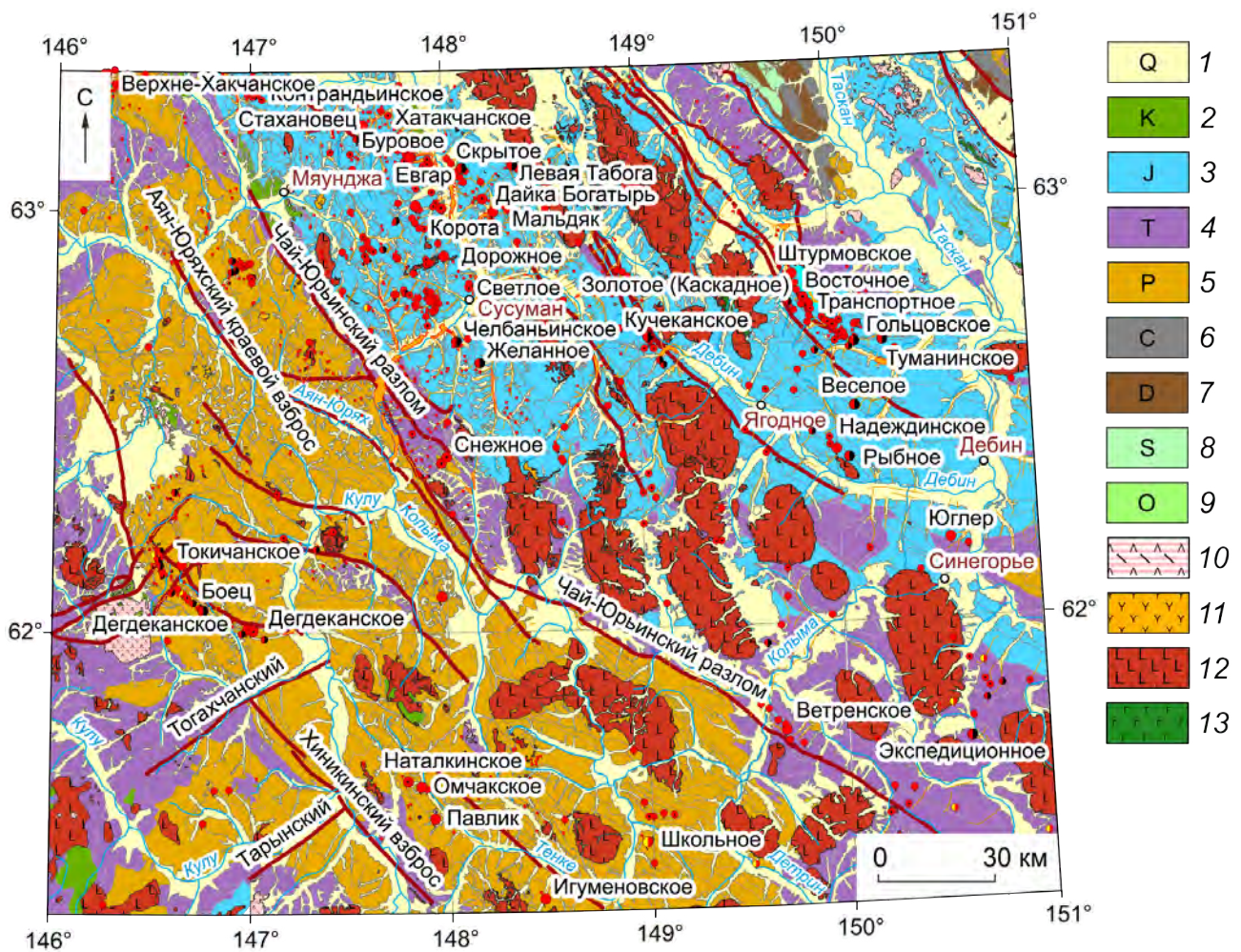


Рис. 2. СХЕМА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНО-КОЛЫМСКОГО РЕГИОНА, ПО МАТЕРИАЛАМ ГКК-1000/3:

1–9 – стратифицированные отложения; 10 – вулканогенные образования; интрузивные тела: 11 – щелочные, 12 – нормально-щелочные, кислые и средние, 13 – основные; остальные усл. обозн. см. рис. 1

ских тел различного состава и возраста (см. рис. 2). На рассматриваемой территории интрузивные массивы занимают до 20 % площади и представлены преимущественно позднемезозойскими коллизийными гранитоидами, входящими в состав Главного Колымского плутонического пояса.

В металлогеническом отношении территория ЦКР характеризуется выраженной золоторудной специализацией. В пределах рассматриваемого участка известно три крупных месторождения, три средних и 32 малых, а также 312 рудопроявлений и более тысячи пунктов золотой минерализации. Основная часть золоторудных месторождений относится к аккреционному этапу развития складча-

той системы и представлена объектами малосульфидной золото-кварцевой, золото-кварц-сульфидной и золото-редкометалльно-кварцевой формаций. Оруденение локализовано в жильных телах, дайках среднего и кислого составов или в протяжённых штокверковых минерализованных зонах. К последнему типу относятся наиболее крупные объекты Яно-Колымского золотоносного пояса (Наталка, Павлик, Дегдекан, Игуменовское, Верхне-Хакчанское месторождения), локализованные в пределах Аян-Юряхской зоны в туфогенно-терригенных (турбидитовых) толщах верхнепермского возраста (пионерская, атканская и омчакская свиты).

Структурная позиция золоторудных объектов ЦКР определяется сочетанием дизъюнктивных и пликативных форм (см. рис. 1). Преимущественными зонами локализации рудных тел служат непосредственно оперяющие трещины флюидопроводящих зон глубинных разломов и замковые части складок, выполняющих функцию ловушек для минерализованных рудоносных растворов [2]. Следует также отметить особое значение надвиговых структур, как непосредственно вмещающих жильные тела, так и приводящих к формированию во фронтальных частях рамповых антиклиналей, в которых локализуются объёмные жильно-штокверковые системы наталкинского типа.

Непосредственно источником рудного вещества магматические интрузивные и вулканические тела выступают соответственно для объектов золото-редкометалльной и золото-серебряной формаций. При формировании же золото-кварцевых месторождений магматизм служит фактором мобилизации рудного вещества, а интрузивные тела выступают в качестве благоприятной рудовмещающей среды и играют роль хрупких коллекторов. Большая часть крупных рудных объектов ЦКР связывается с плутонами раннемеловой диорит-гранодиоритовой ассоциации.

Метаморфические факторы локализации оруденения сводятся к мобилизации рудного вещества в ходе процессов регионального зеленосланцевого, а также дислокационного и контактового метаморфизма.

Приуроченность большинства значимых рудных объектов к единому литолого-стратиграфическому уровню может указывать на существование в пермских углеродистых отложениях первичной гидротермально-осадочной сульфидной минерализации, впоследствии регенерированной на коллизионном этапе и вовлечённой в формирование крупных месторождений [5, 6].

Формализованная (количественная) оценка перспективности площади по комплексу геофизических признаков выполнена с использованием принципов распознавания образов (РО). Для оптимальной локализации перспективных участков с помощью методов РО необходимо наличие представительных данных с эталонами прогнозируемых типов месторождений.

Отмеченные особенности локализации Au оруденения в пределах ЦКР были приняты во внимание, и с их учётом для оценки перспективности

площади в качестве первичных материалов были использованы:

- геолого-структурная основа – набор векторных слоёв (карт) с сопроводительной информацией, включающий данные стратиграфии, тектоники, магматизма и распределения известных золоторудных объектов;
- геофизическая основа – матрицы аномально-гравитационного и магнитного полей масштаба 1:200 000;
- геохимические данные – материалы литохимического опробования потоков рассеяния для набора элементов (Au, Ag, As, Cr, Cu, Ni, Pb).

Ниже представлены результаты, полученные при использовании технологии формализованного компьютерного прогноза, основанной на алгоритмах РО и программно реализованной Д. С. Зеленецким [3] как метод ИПС (информационный параметр сходства). Метод предполагает разделение множества изучаемых объектов на два класса: «рудные», которые по совокупности анализируемых признаков имеют максимальное сходство с известными эталонами (ранга рудных узлов, полей или месторождений), и условно «безрудные», для характеристики которых оценивается вмещающая среда. Сравнение распределений для групп объектов указанных классов производится по критерию Пирсона, оценка полезности признака для решения задачи выделения областей, сходных с заданными эталонами, – по его информативности, а выделение областей, сходных с объектами исследований, – по сумме частных информативностей интервалов значений (ИПС).

Кроме исходных геофизических полей рассчитан базовый (по опыту работ) набор их трансформант, отражающих важные элементы геологического строения рудовмещающих участков. К ним относятся:

- горизонтальный (и его модуль) и вертикальный градиенты аномально-магнитного и гравитационного полей, эффективно фиксирующие локальные приповерхностные неоднородности, контакты контрастных по физическим свойствам пород и разрывные нарушения;
- матрицы послойной (частотной) фильтрации, отражающие влияние геологических образований, распределённых по заданным интервалам глубин;
- различные характеристики пространственной изменчивости и связей исходных потенциаль-

ных полей, их локальных (приповерхностных) и региональных (глубинных) составляющих, подчёркивающие характерные особенности геологического строения территории;

- статистические параметры (дисперсия, энтропия, число экстремумов и др.), рассчитанные в скользящем окне ранга рудного поля (узла).

Для выявления геофизических признаков локализации эталонных объектов выполнен сравнительный анализ связи аномалий исходных полей и их трансформант с особенностями геологического строения и размещения известных золоторудных полей и узлов. В итоге установлено, что собственно рудные тела и зоны минерализации слабо проявлены в геофизических данных. Гораздо лучше выделяются некоторые пространственно связанные с ними рудоконтролирующие структуры. Разрывные нарушения маркируются линейными магнитными аномалиями и зонами пониженных значений локальных составляющих поля силы тяжести. Кислые интрузивы, как установленные, так и предполагаемые, чётко фиксируются отрицательными гравитационными аномалиями, обрамлёнными зонами повышенных значений. Именно в пределах последних часто локализуются золоторудные объекты.

По комплексу геохимических данных был выполнен компонентный анализ и выделены факторы, пространственные распределения значений которых наилучшим образом коррелируют с расположением известных рудных объектов в ранге рудных полей.

На основании геологических материалов для территории ЦКР рассчитаны матрицы значений таких количественных параметров, как плотность даек на единицу площади и удалённость от крупных разрывных нарушений и гранитных массивов. Прогнозная информативность этих признаков для ЦКР обуславливается значимостью глубинных рудоконтролирующих разломов и интрузивных комплексов как важного фактора локализации золоторудных объектов в пределах Верхояно-Колымской складчато-надвиговой системы [1, 4].

В итоге экспертного анализа выявлены наиболее информативные признаки, использованные для дальнейших прогнозных построений методом ИПС, выполняемых в два этапа. На первом оценивается информативность набора признаков, описывающих анализируемые объекты. На втором по совокупности выявленных информативных при-

знаков рассчитываются значения ИПС, характеризующего степень сходства с соответствующим эталоном каждой элементарной ячейки исследуемой площади (рис. 3).

Частная информативность $\text{Inf}(j, i)$ i -го интервала значений j -го геофизического признака в методе ИПС рассчитывается по формуле:

$$\text{Inf}(j, i) = P_m(j, i) - P_s(j, i) \quad (1),$$

где $P_m(j, i)$ – частота встречи значений j -го геофизического признака из i -го интервала в выборке для объектов исследований (например, месторождений);

$P_s(j, i)$ – частота встречи значений из i -го интервала в выборке по всей площади исследований.

Информативность j -го признака в целом оценивается по формуле:

$$\text{Inf}(J) = \sum_{i=1}^{i=K} (\text{Inf}(j, i) \times \text{Inf}(j, i)) / P_s(j, i) \quad (2),$$

где K – общее количество интервалов, на которое разбит весь диапазон значений оцениваемого признака.

Информационный параметр сходства определяется как сумма частных информативностей значений признаков, характеризующих рассматриваемую точку:

$$\text{Inf}(S) = \sum_{j=1}^{j=N} (\text{Inf}(j, i)) \quad (3).$$

При $\text{Inf}(j, i) < 0,0$, т. е. при частоте встречи значений из рассматриваемого интервала в выборке по эталонным объектам меньшей, чем в выборке по площади в целом, интервал не информативен. Для удобства выбора интервалов при расчёте информативности использовались нормированные значения геофизических параметров в усл. ед. (квантилях). Это позволяет легко задавать интервалы, имеющие равную вероятность встречи на территории исследований.

При определении частоты встречаемости для объектов исследований в зависимости от имеющейся информации возможно задать их положение в разной форме:

- координатами реальных контуров объектов, описывающих их границы;
- координатами точки, соответствующей объекту (его условному центру).

При задании положения объекта в виде точек возможно введение дополнительных параметров, учитывающих ранг объекта. Это могут быть весо-

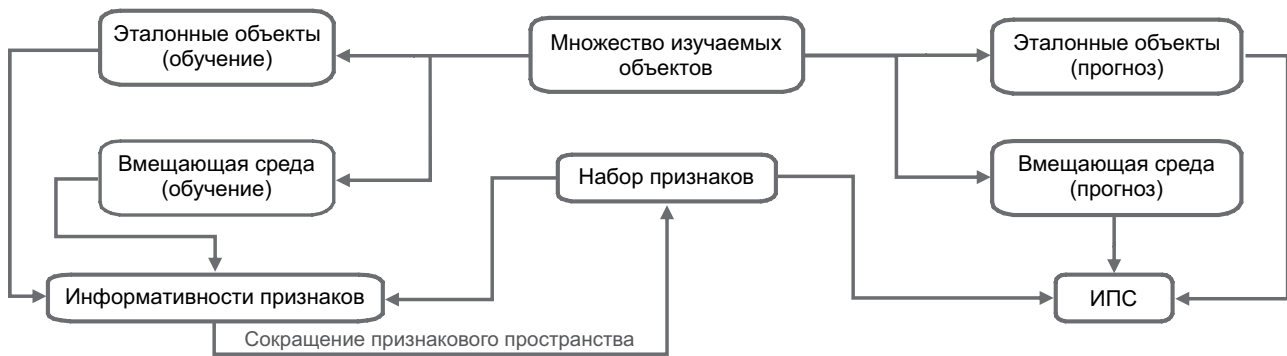


Рис. 3. БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМА ФОРМАЛИЗОВАННОГО ПРОГНОЗА ПО МЕТОДУ ИПС

вые коэффициенты или радиус окружности, условно принимаемой за границы объекта, причём в зависимости от ранга объекта радиус его может меняться в соответствии с заданным коэффициентом. При задании реальных контуров ранг объекта специально не задаётся и не учитывается.

По результатам анализа таблиц информативности ($Inf(J)$) для всех введённых на первом этапе признаков (полей и их трансформант) произведено сокращение признакового пространства и отобраны наиболее информативные поля и их трансформанты, использованные в дальнейшем для построения карты информационного параметра сходства с конкретным типом эталонов.

При расчёте параметра ИПС для различных структурно-формационных зон в пределах ЦКР использовались следующие наборы признаков (в порядке убывания относительной информативности) (табл. 1).

Отметим (рис. 4), что трансформанты магнитного поля, такие как энтропия и параметр *tilt* (отношение вертикального градиента к полному горизонтальному) хорошо выделяют элементы дизъюнктивной тектоники, в том числе крупные рудо-контролирующие разломы, тогда как аномалии поля силы тяжести лучше подчёркивают проявления магматического фактора локализации оруденения. На картах энтропии и вертикальной составляющей градиента, отражающих локальные аномалии от малоглубинных источников, выделяются зоны обрамления крупных интрузивов и невоскрытые приповерхностные массивы, а полученная методом послышной фильтрации составляющая поля силы тяжести от слоя 4–5 км характеризует корневые части массивов, зоны подводящих каналов и другие глубинные структуры. Те же факторы локализации оруденения отражают и матрицы, полученные непосредственно по геологическим дан-

1. ИНФОРМАТИВНЫЕ ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫЕ ПРИЗНАКИ

Аян-Юряхская СФЗ	Иньяли-Дебинская СФЗ
Геохимический фактор $F1 = 0,954 \cdot \lg(\text{Au}) + 0,954 \cdot \lg(\text{As})$ (золото-сульфидно-кварцевое оруденение в черносланцевых толщах)	Энтропия магнитного поля
Составляющая поля силы тяжести от слоя 4–5 км	Плотность распределения даек на единицу площади
Энтропия магнитного поля	Геохимический фактор $F2 = 0,68 \cdot \lg(\text{Au}) + 0,16 \cdot \lg(\text{Ag}) + 0,15 \cdot \lg(\text{As}) - 0,56 \cdot \lg(\text{W}) - 0,22 \cdot \lg(\text{Cu}) - 0,19 \cdot \lg(\text{Mo})$
Плотность распределения даек на единицу площади	Удалённость от крупных разрывных нарушений
Удалённость от крупных разрывных нарушений	Вертикальный градиент гравитационного поля
Удалённость от гранитных массивов	Удалённость от гранитных массивов
Вертикальный градиент гравитационного поля	Составляющая поля силы тяжести от слоя 4–5 км
Энтропия гравитационного поля	Энтропия гравитационного поля
Параметр <i>tilt</i> магнитного поля	Параметр <i>tilt</i> магнитного поля

2. ЭТАЛОННЫЕ ОБЪЕКТЫ В СОСТАВЕ ГРУППОВЫХ ЭТАЛОНОВ ДЛЯ КАЖДОЙ ИЗ ЗОН

Месторождение	Ранг	Тип
<i>Аян-Юряхская СФЗ</i>		
Верхне-Хакчанское	МС	Au-Q
Дегдеканское	МК	Au-Q
Омчакское	ММ	Au-Q
Павлик	МК	Au-Q
Игуменовское	МС	Au-Q
Токичанское	ММ	Au-Q
Боец	ММ	Au-Sf
Дегдеканское	МС	Au-Sf-Q
Наталкинское	МК	Au-Sf-Q
<i>Иньяли-Дебинская СФЗ</i>		
Светлое	ММ	Au-Q
Евгар	ММ	Au-Q
Стахановец	ММ	Au-Q
Контрандъинское	ММ	Au-Q
Хатакчанское	ММ	Au-Q
Дорожное	ММ	Au-Q
Мальдяк	ММ	Au-Q
Штурмовское	ММ	Au-Q
Восточное	ММ	Au-Q
Ветренское	ММ	Au-Q
Надеждинское	ММ	Au-Q
Юглер	ММ	Au-Q
Челбаньинское	ММ	Au-Sf
Левая Табога	ММ	Au-Sf
Скрытое	ММ	Au-Sf
Желанное	ММ	Au-Sf
Кучеканское	ММ	Au-Sf
Туманинское	ММ	Au-Sf
Гольцовское	ММ	Au-Sf
Весёлое	ММ	Au-Sf
Рыбное	ММ	Au-Sf
Экспедиционное	ММ	Au-Sf
Буровое	ММ	Au-Sf-Q
Корота	ММ	Au-Sf-Q
Дайка Богатырь	ММ	Au-Sf-Q
Снежное	ММ	Au-Sf-Q
Золотое (Каскадное)	ММ	Au-Sf-Q
Транспортное	ММ	Au-Sf-Q

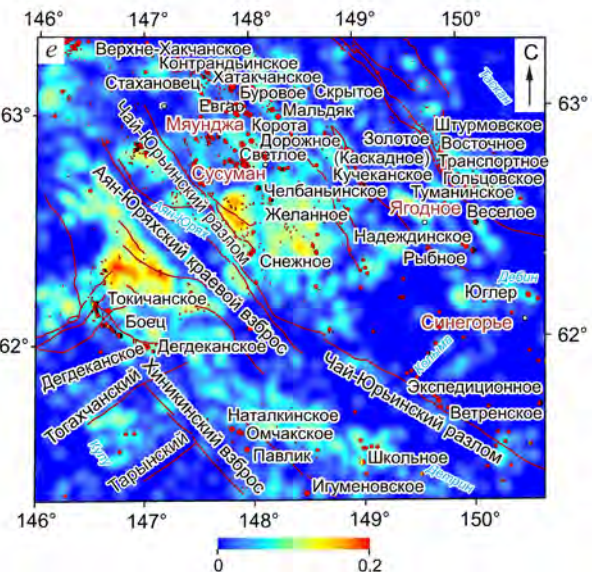
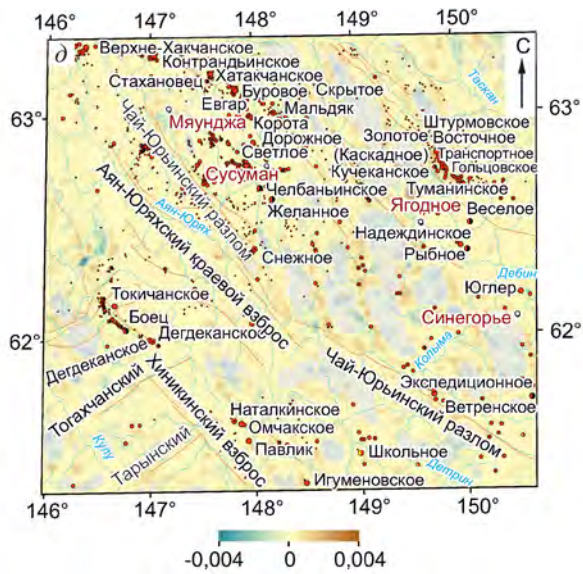
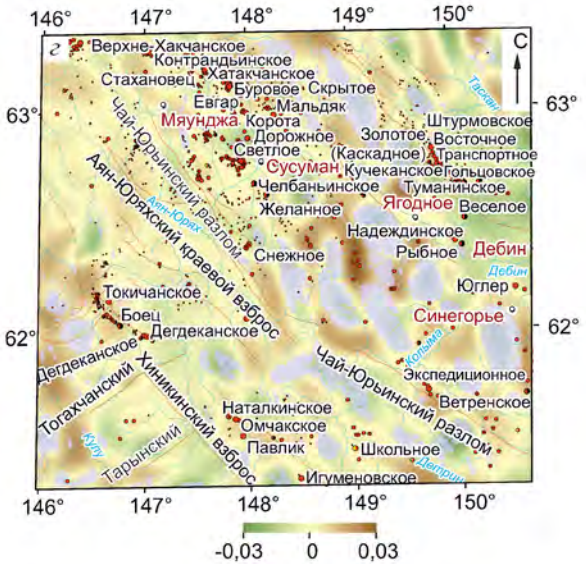
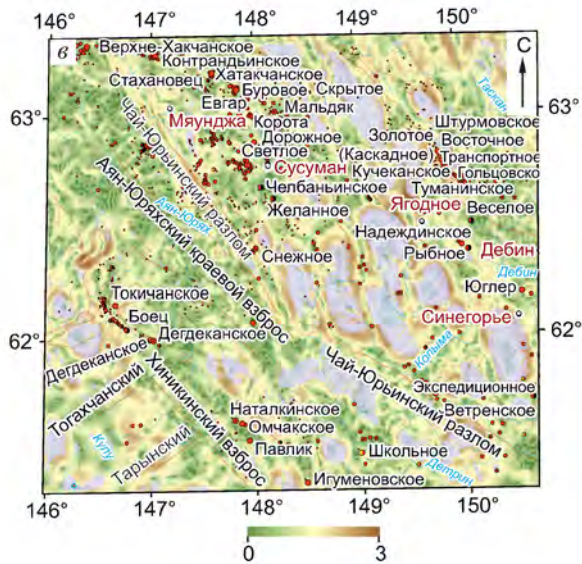
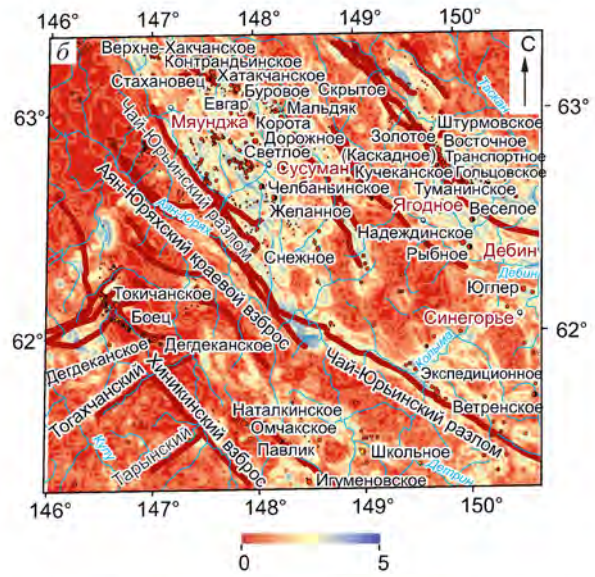
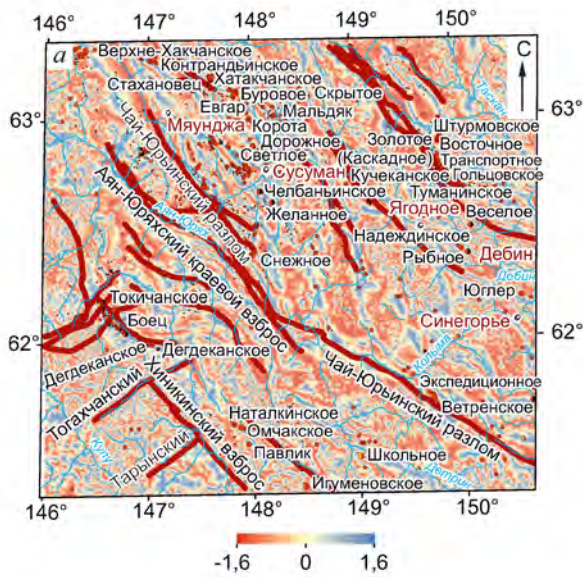
Примечание. ММ, МС и МК – месторождение малое, среднее и крупное соответственно; типы оруденения: Au-Q – золото-кварцевый, Au-Sf – золото-сульфидный, Au-Q-Sf – золото-кварц-сульфидный.

ным (рис. 4, е–з). Крупные рудные узлы образуют на периферии дайковых ареалов линейные пояса, параллельные зонам глубинных разломов. Региональная минерагеническая специфика Аян-Юряхской и Иньяли-Дебинской зон проявляется в различии состава элементов-спутников золотого оруденения по данным геохимии (см. рис. 4, и, к).

Полученные с использованием указанного набора признаков карты ИПС для эталонов известных месторождений, таких как Наталкинское, Ветренское и др., характеризуются хорошей корреляцией аномалий параметра перспективности с реальным распределением известных золоторудных узлов в пределах рассматриваемой СФЗ, что позволяет предполагать возможность их использования для локализации скрытых рудных объектов (рис. 5).

Расчёт ИПС производился отдельно для Аян-Юряхской и Иньяли-Дебинской СФЗ, поскольку, как показала практика, информативность карты, полученной на основании эталона, расположенного в одной из зон, при переходе в другую для ряда объектов резко снижается. Это следует связывать, по видимости, с существенными различиями структурно-тектонических обстановок и, следовательно, условий локализации оруденения в каждой из зон. В то же время различия значений прогнозных признаков для эталонных месторождений с различными типами золото-кварцевой минерализации вопреки первоначальному предположению оказались в данном масштабе несущественны, что позволило далее рассчитать ИПС на основании двух групповых эталонов, включающих большинство известных крупных золоторудных месторождений в пределах каждой из зон (табл. 2). Сводная карта ИПС (рис. 6) получена путём объединения матриц ИПС Аян-Юряхской и Иньяли-Дебинской СФЗ.

По результатам экспертной интерпретации полученных данных на основании априорной геологической информации проведена разбровка аномалий ИПС и составлена схема участков, потенциально перспективных для локализации новых золоторудных объектов. Критерием выделения того или иного участка как потенциально перспективного служила в первую очередь интенсивность соответствующей аномалии параметра ИПС. На схему вынесены только участки, расположенные за пределами известных рудных узлов, использованных в качестве эталонов, поскольку интенсивные аномалии в пределах последних связа-



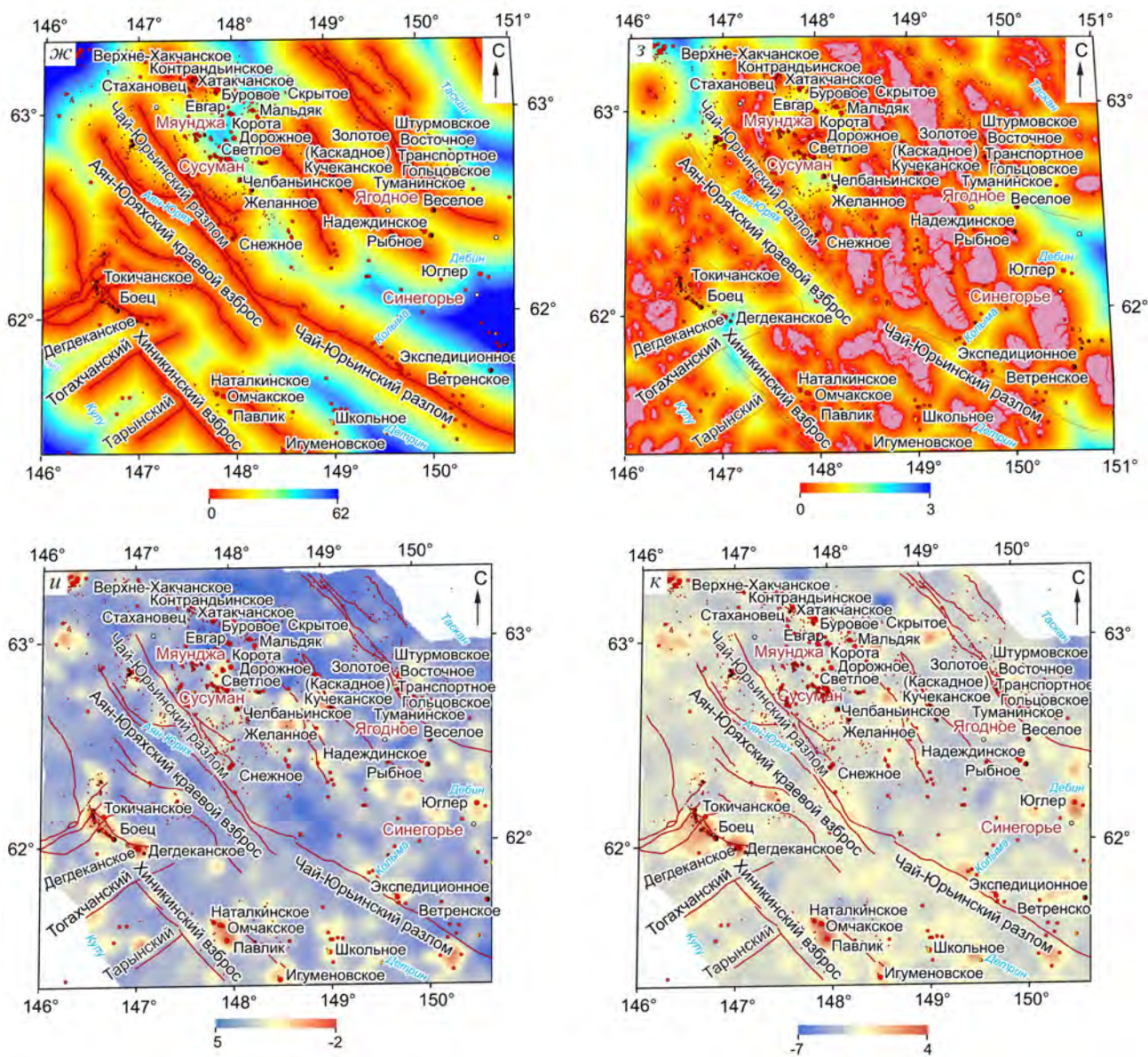


Рис. 4. КАРТЫ ЗНАЧЕНИИ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНО-КОЛЫМСКОГО РЕГИОНА:

а – энтропия магнитного поля (усл. ед.); б – параметр магнитного поля (усл. ед.); в – энтропия гравитационного поля (усл. ед.); г – составляющая поля силы тяжести от слоя 4–5 км (мГал); д – вертикальный градиент гравитационного поля (мГал/м); е – плотность даек (ед/км²); ж – удалённость от гранитных массивов (км); з – удалённость от крупных разрывных нарушений (км); и – геохимический фактор 1 (Au + As); к – геохимический фактор 2 (Au + Ag + As-W-Cu-Mo); остальные усл. обозн. см. рис. 1

ны исключительно с использованием при расчёте групповых эталонов и не несут полезной информации. Как можно заметить, даже в исходном виде полученная карта ИПС на качественном уровне вполне отвечает ожидаемому распределению перспективных площадей: заведомо безрудные участки выходов интрузивных массивов закономерно

отражены пониженными значениями, а наиболее интенсивные аномалии тяготеют к зонам крупных разрывных нарушений и обрамлению гранитоидных тел.

Во многом такая картина соответствует рассматриваемой некоторыми авторами концепции преимущественной локализации крупных золоторудных

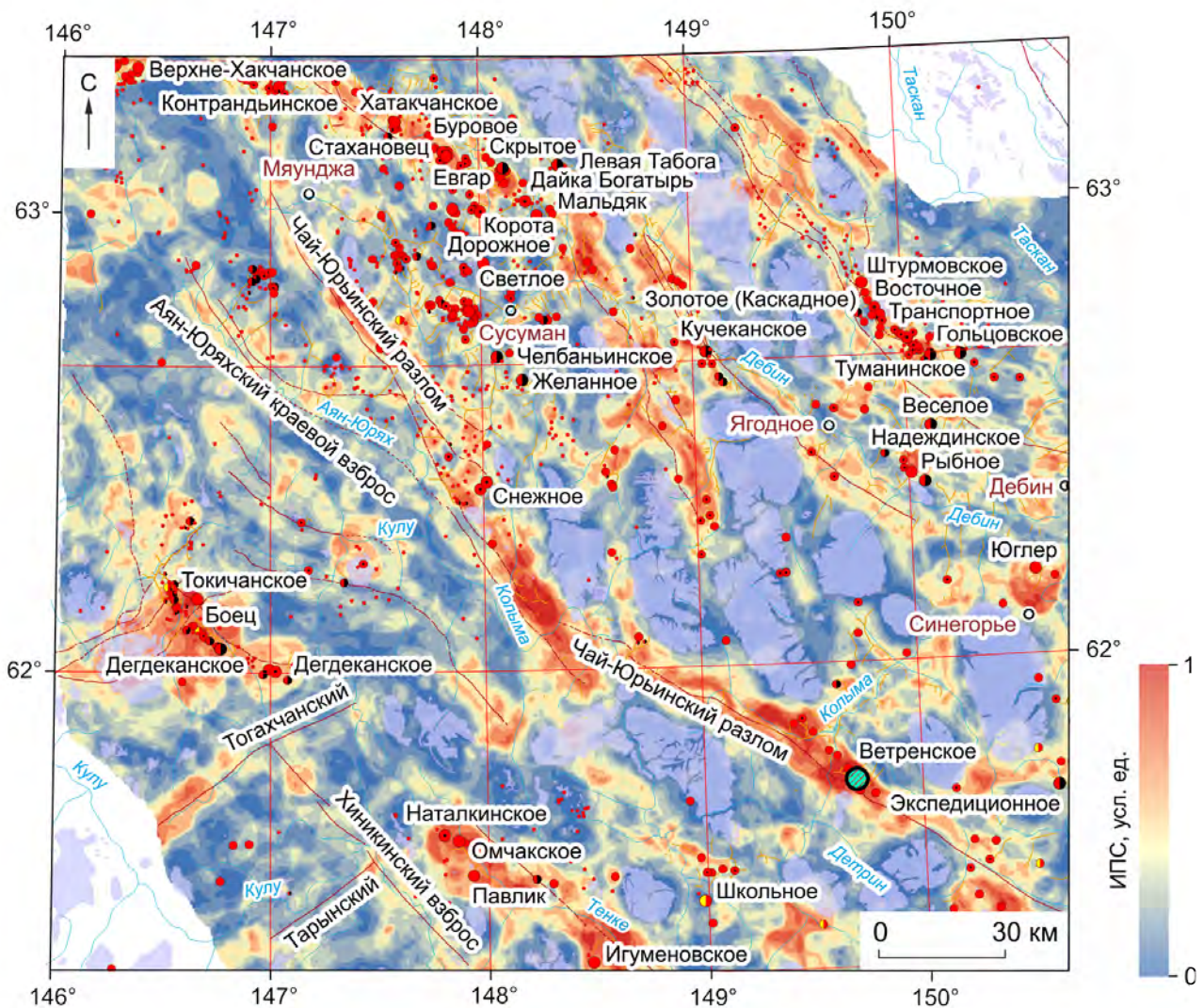


Рис. 5. КАРТА ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРА ИПС ДЛЯ ЭТАЛОНА ВЕТРЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ:

заштрихованный кружок – эталонный объект

объектов Яно-Колымского складчатого пояса в зонах обрамления гранитоидных массивов и купольных структур, сформированных на участках пересечения глубинных разломов [1]. В пределы аномальных участков зачастую попадают ранее установленные золоторудные проявления, что также говорит в пользу достоверности проведённого формализованного прогноза. Однако в целях минимизации влияния на конечный результат возможных ошибок, связанных с потенциальным несовершенством статистического алгоритма, была произведена оценка каждой аномальной площади на предмет её соответствия формальным критериям локализации золотого оруденения.

Всего выделено 26 потенциально перспективных участков, 14 из которых попадают в пределы Аян-Юряхской зоны (см. рис. 6).

По результатам формализованного прогноза наибольшей перспективностью на обнаружение крупнообъёмного золоторудного объекта обладает территория Аян-Юряхской СФЗ, а именно линейные зоны обрамления крупных разломов: Чай-Юрьинского, Тенькинского, Тогахчанского и др., особенно участки их сближения с гранитоидными массивами.

Так, существенный интерес, по нашему мнению, представляет перспективная площадь (I), выделенная к югу от Дегдеканского рудного узла. Она

контактных частях мелких гранодиоритовых штоков и минерализованных зонах дробления. Площадь же к югу, в междуречье Бол. Чабылкан – Хилгыча (VI), где на границе рассматриваемого участка выделена другая аналогичная аномалия, стоит, на наш взгляд, более детально изучить.

Перспективный участок в левобережье р. Арга-Юрях (VII) расположен на северной границе крупного нескрытого интрузивного массива субмеридиональной ориентировки, отчётливо выделяющегося в поле силы тяжести. Выходящие на дневную поверхность его апикальные части – небольшие массивы Кривой и Бодрый – представлены плагиогранитами и отнесены к позднеюрскому Нера-Бохачинскому комплексу. У южной границы этого массива расположена северная оконечность Арга-Юрях-Дегдеканского золоторудного узла. Входящее в его состав Токичанское месторождение находится на периферии упомянутого погребённого интрузива непосредственно в зоне пересечения Тенькинского глубинного разлома серией субпараллельных сбросо-сдвигов северо-восточной ориентировки. В сходной геолого-структурной позиции находится и рассматриваемая аномальная зона на севере массива, где Хинке-Кулинский краевой взброс сближается с самым северным в группе разломов северо-восточного направления, геометрию которого в значительной мере повторяет русло р. Арга-Юрях. На этой площади уже известно рудопоявление Бодрое и ряд пунктов золотой минерализации, а также многочисленные россыпи, однако благоприятное сочетание рудоконтролирующих факторов позволяет допустить существование в пределах данного участка и других неизвестных рудных объектов. Аналогичные выводы можно сделать и о другом перспективном участке, выделенном восточнее, в устье р. Улахан-Матрайбыт (VIII), в пределах той же Хинке-Кулинской зоны разломов, но на границе сравнительно более позднего по времени образования штока Таятах в составе Басугунынского комплекса.

Показательным примером эффективности используемой методики может служить интенсивная локальная аномалия ИПС в верхнем течении р. Бол. Хатыннах (IX). В её пределах сконцентрировано значительное количество рудопоявлений, однако объекты в ранге месторождений на момент проведения работ не были обнаружены, и участок не был внесён в групповой эталон. При этом известно, что на основании результатов гео-

логоразведочных работ 2018–2019 гг. на рудопоявлении Петух – наиболее перспективном объекте Верхне-Хатыннахской площади – общий ресурсный потенциал участка был оценён более чем в 95 т золота. Начало работ по добыче планируется ООО «Новая рудная компания» на 2021 г.

Ряд выделенных потенциально перспективных участков, как, например, группа на северо-западе рассматриваемой территории, в верхнем течении р. Аян-Юрях (X, XI), также частично перекрывается участками с действующими лицензиями на коренное золото, что в перспективе при условии проведения в их пределах поисково-разведочных работ может послужить дополнительным независимым источником данных для верификации результатов работы рассматриваемого прогнозного алгоритма.

Отсутствие в пределах Иньяли-Дебинской зоны крупных эталонных объектов, сопоставимых по масштабам с Наталкинским или Дегдеканским месторождениями, которым при расчете ИПС присваивался приоритетный вес, в сочетании с более сложным внутренним строением и повышенной тектонической подвижностью террейна, что подтверждается обилием интрузивных тел и ареалов даек разнообразного состава [8], приводит к снижению контрастности рудных объектов по отношению к вмещающей среде и существенно усложняет задачу формализованного прогноза. Легко заметить, что аномалии ИПС в пределах Иньяли-Дебинской зоны, особенно северо-западной её части, характеризуются сравнительно невысокими значениями, приближающимися к фоновым, и отсутствием чётких границ. Более уверенно перспективные участки можно выделить на востоке зоны (XII, XIII, XIV), в левобережье р. Колымы, где аномалии параметра перспективности связаны в первую очередь с мелкими нескрытыми интрузивными массивами, по видимости, гранитоидными штоками Басугунынского комплекса, подобными массиву Одинокий. К минерализованным зонам дробления в северном обрамлении этого массива приурочены месторождения Надежнинское и Рыбное. Внимания также заслуживает участок, выделенный на северо-восточной границе позднемелового массива Хатыннах, с противоположной стороны которого расположен богатый Штурмовской рудный узел.

Полученные результаты демонстрируют эффективность методики совместного использования геофизических, геохимических и геологических данных при формализованном прогнозировании

вании. Выделенные за пределами известных рудных узлов потенциально перспективные участки могут быть приняты во внимание при планировании направления поисковых и ревизионно-оценочных работ в ЦКР.

Следует отметить, что ключевым фактором, определяющим результативность работы прогнозного алгоритма, является правильный подбор геологически обоснованных признаков, отвечающих модели искомого объекта. Как показывает практика,

при использовании корректного набора информативных параметров эффективное прогнозирование возможно даже с использованием простейших статистических методов. Однако получающие всё большее распространение и активно совершенствуемые методы машинного обучения, в частности технологии распознавания образов с использованием искусственных нейронных сетей, открывают новые перспективы для повышения достоверности результатов формализованного прогноза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаров В. И., Ворошин С. В., Сидоров В. А. Наталкинское золоторудное месторождение. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2002. – 250 с.
2. Горячев Н. А. Геология и происхождение мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии : автореф. дис. на соискание учёной степени д-ра геол.-минерал. наук : специальность 04.00.11 «Геология, поиски и разведка рудных и нерудных месторождений, металлогения» / Горячев Николай Анатольевич // СКВНИИ ДВО РАН. – Владивосток, 2000. – 53 с.
3. Зеленецкий Д. С., Асламов Ю. В., Аристов В. В. Оперезающее геофизическое обеспечение прогнозно-металлогенических исследований масштаба 1:500 000 в Яно-Колымской золоторудной провинции // Прогноз, поиски, оценка рудных и нерудных месторождений – достижения и перспективы : сборник тезисов докладов. – М., 2008. – С. 82–83.
4. Золоторудные месторождения России / Под ред. М. М. Константинова. – М. : Акварель, 2010. – 365 с.
5. Константинов М. М., Быстрова А. К., Фридовский В. Ю. Стратиграфические уровни локализации месторождений золота и серебра в Верхоянской и Центрально-Колымской металлогенических провинциях // Тихоокеанская геология. – 2002. – Т. 21. – № 6. – С.105–111.
6. Кряжев С. Г. Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродистотерригенных комплексах : автореф. дис. на соискание учёной степени д-ра геол.-минерал. наук : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения» / Кряжев Сергей Гаврилович. – М., 2017. – 52 с.
7. Шарфутдинов В. М., Хасанов И. М. Геофизическая характеристика золоторудных месторождений на юге Яно-Колымского металлогенического пояса // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2013. – № 3. – С. 24–34.
8. Шахтыров В. Г. Сдвиговые структурные ансамбли и золотое оруденение Яно-Колымской складчатой системы : автореф. дис. на соискание учёной степени д-ра геол.-минерал. наук : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения» / Шахтыров Василий Григорьевич. – Иркутск : Иркутский ГТУ, 2009. – 50 с.
9. Шникерман В. И., Полуботко И. В., Васькин А. Ф., Петухов В. В. [и др.]. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-55 – Сусуман. Объяснительная записка. – СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. – 520 с.

REFERENCES

1. Goncharov V. I., Voroshin S. V., Sidorov V. A. Natalkinskoe zolotorudnoe mestorozhdenie [Natalka gold ore deposit], Magadan, SVKNII DVO RAN Publ., 2002, 250 p.
- Goryachev N. A. Geologiya i proiskhozhdenie mezozoi-skikh zoloto-kvartsevykh zhil'nykh poyasov Severo-Vostoka Azii : avtoref. dis. na soiskanie uchen. stepeni d-ra geol.-mineral. nauk : spetsial'nost' 04.00.11 "Geologiya, poiski i razvedka rudnykh i nerudnykh mestorozhdenii, metallogeniya" [Geology and origin of the Mesozoic gold-quartz vein belts of Northeast Asia. Extended abstract of Doctor's thesis], Vladivostok, SVKNII DVO RAN Publ., 2000, 53 p.
3. Zelenetskii D. S., Aslamov Yu. V., Aristov V. V. Operezha-yushchee geofizicheskoe obespechenie prognozno-metallogenicheskikh issledovaniy masshtaba 1:500 000 v Yano-Kolymskoi zolotorudnoi provintsii [Advanced geo-

- physical support for predictive metallogenic studies of 1:500 000 scale in the Yano-Kolyma gold ore province], *Prognoz, poiski, otsenka rudnykh i nerudnykh mestorozhdenii – dostizheniya i perspektivy : sbornik tezisov dokladov* [Forecast, prospecting, evaluation of ore and non-metallic deposits – achievements and prospects: Abstracts of Papers], Moscow, 2008, pp. 82–83. (In Russ.).
4. Zolotorudnye mestorozhdeniya Rossii [Gold deposits in Russia], Moscow, Akvarel' Publ., 2010, 365 p.
 5. Konstantinov M. M., Bystrova A. K., Fridovskii V. Yu. Stratigraficheskie urovni lokalizatsii mestorozhdenii zolota i serebra v Verkhoyanskoi i Tsentral'no-Kolymaskoi metallogenicheskikh provintsiyakh [Stratigraphic levels of localization of gold and silver deposits in the Verkhoyansk and Central Kolyma metallogenic provinces], *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], 2002, V. 21, No 6, pp. 105–111. (In Russ.).
 6. Kryazhev S. G. Geneticheskie modeli i kriterii prognoza zolotorudnykh mestorozhdenii v uglerodisto-terrigennykh kompleksakh : avtoref. dis. na soiskanie uchen. stepeni d-ra geol.-mineral. nauk : spetsial'nost' 25.00.11 "Geologiya, poiski i razvedka tverdykh poleznykh iskopaemykh, minerageniya" [Genetic models and forecasting criteria for gold deposits in carbonaceous-terrigenous complexes: Extended abstract of Doctor's thesis], Moscow, 2017, 52 p.
 7. Sharafutdinov V. M., Khasanov I. M. Geofizicheskaya kharakteristika zolotorudnykh mestorozhdenii na yuge Yano-Kolymaskogo metallogenicheskogo poyasa [Geophysical characteristics of gold deposits in the south of the Yano-Kolyma metallogenic belt], *Vestnik SVNTs DVO RAN* [Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch], 2013, No 3, pp. 24–34. (In Russ.).
 8. Shakhtyrov V. G. Sdvigovye strukturnye ansambli i zolotoe orudnenie Yano-Kolymaskoi skladchatoi sistemy : avtoref. dis. na soiskanie uchen. stepeni d-ra geol.-mineral. nauk : spetsial'nost' 25.00.11 "Geologiya, poiski i razvedka tverdykh poleznykh iskopaemykh, minerageniya" [Striking Structural Ensembles and Gold Mineralization of the Yano-Kolyma Fold System], Irkutsk, Irkutskii GTU Publ., 2009, 50 p.
 9. Shpikerman V. I., Polubotko I. V., Vas'kin A. F., Petukhov V. V., et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Verkhoyano-Kolymaskaya. List P-55 – Susuman. Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation). Verkhoyano-Kolymaskaya series. Sheet P-55 - Susuman. Explanatory letter], St. Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI Publ., 2016, 520 p.

FORECAST FOR CONCEALED GOLD MINERALIZATION WITHIN CENTRAL KOLYMA REGION BASED ON A SET OF GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL FEATURES BY IDENTIFICATION METHOD

Karamyshev A. V. (undergraduate, engineer^{1,2})

Fedorova K. S. (postgraduate, 1st category geophysicist²)

Tarasov A. V. (PhD, associate Professor of geophysics department^{1,2})

¹ FSBEI Saint Petersburg State University, Saint Petersburg (Russia)

² FSBI A. P. Karpinsky Russian Research Geological Institute, Saint Petersburg (Russia)

The paper presents results of a formalized (quantitative) assessment for Central Kolyma region (CKR) gold mineralization potential based on a set of geophysical, geological and geochemical features using IRP method. The method is based on image identification algorithm and involves division of numerous study targets into 2 classes: «ore» deposits, which are most similar to the known standard ore clusters, fields or deposits in terms of all the analyzed features, and conventionally «barren»; to characterize them, host environment including an area beyond the selected standard deposits is assessed. It is shown that geophysical fields display essential geological structure features of CKR known gold fields and clusters. Forecasting-prospecting geological/geophysical and geochemical features (localization criteria) typical of Ayan-Yuryakhskaya and Inyali-Debinskaya structural-formation zones are revealed. Areas prospective for new gold deposit discovery within CKR are recognized.

Keywords: Central Kolyma region, mineralization forecast, gold deposits, image identification, forecast and search geological and geophysical features.