



ДИСТАНЦИОННАЯ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНАЯ МЕТАЛЛОГЕНЕЗИЯ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ – НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА (НА ПРИМЕРЕ АНАЛИЗА ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА)

С.Л. Шевырев

Рассматривается применение аппарата преобразования Хафа для проведения дистанционного анализа тектонической структуры территории путем выделения и учета линейных и изометрических (кольцевых) элементов дистанционного изображения с последующим экспортом их в географические информационные системы.

Ключевые слова: минерагения, благородные металлы, дистанционные исследования, преобразование Хафа, геоинформатика, металлогенетические пояса, зональные массивы.

REMOTE METALLOGENY OF PRECIOUS METALS IN THE FAR EAST OF RUSSIA: NEW PREDICTION OPPORTUNITIES (ON THE EXAMPLE OF THE SOUTHEASTERN MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON)

S. L. Shevyrev

The application of the Hough transform apparatus for remote analysis of the territory tectonic structure is performed. An allocation and accounting of linear and isometric (ring) elements of the remote images with their further export to a geographic information system is made.

Keywords: mineralogy, precious metals, remote measurements, Hough transform, geoinformatics, metallogenetic belts, zonal massives.

Изучение дистанционных космических изображений поверхности планеты нашло широкое применение во многих науках о Земле. Прогнозный геологический анализ космофотоснимков (КФС) подразумевает выделение в нем регуляризованных составляющих (линий, дуг, колец) и их картографирование для дальнейшей интерпретации. Проблема трудоемкости и субъективности выделения структурных элементов на КФС отчасти может быть решена автоматизацией процесса дешифрирования. Цель настоящей работы – рассмотрение методических аспектов автоматизированного выделения элементов дистанционного изображения и создание соответствующего приложения в программе научных расчетов Matlab (рекомендуется версия 2013b). Кольцевые структуры дистанционного изображения (иначе «кольцевые фотоаномалии», «структуры центрального типа» или «кольцевые объекты») являлись предметом исследований многих ученых [1, 2, 4 и др.]. Выяснилось, что кольцевые объекты полигенетические. Им соответствуют тектономагматические поднятия, импактные кратеры, кальдеры, выступы кристаллического фундамента и другие [6]. Для автоматизации выделения структурных элементов дистанционного изображения потребовался ряд последовательных операций (рис. 1).

Для распознавания структурных элементов (как кольцевых, так и прямолинейных) в узоре

дистанционного изображения, выделенного после применения фильтрации, удовлетворительных результатов предполагалось достичь, используя метод преобразования Хафа. КФС при этом предварительно отфильтровывался с определением контрастных границ. Это оказалось возможным при помощи предложенного метода, основанного на нахождении производных изображения [8].

При выделении прямых применялась функция скелетизации изображения (в Matlab это стандартизованная функция *bwmorph*).

Преобразование Хафа для поиска окружностей выполняется следующим образом [9]. Исходное изображение границ на координатной плоскости (x, y) преобразуется в систему координат, в которой точки контрастных границ, принадлежащие окружности вида (см. формулу), изображаются точкой с координатами (px, py, τ , где px, py – координаты центра окружности, а τ – ее радиус. Если несколько окружностей имеют близкие значения координат, то выбирается наиболее выраженная из них:

$$(x - px)^2 + (y - py)^2 = \tau^2.$$

Если несколько автоматизированно выявленных структурных элементов имеют близкие значения координат и длин, то алгоритмом выбирается тот, который имеет максимальную выраженность. Реализация предложенной методики представляется удобной в среде инженерных и научных расчетов Matlab. Начиная с версии



Рис. 1. Общая схема прогнозного морфометрического исследования космических изображений Земли

2013 программа поддерживает средства цифровой картографии: проекции и вывод в формате ESRI shape.

Основные этапы морфометрического исследования дистанционных изображений (см. рис. 1) могут быть реализованы в виде стандартизованных процедур Matlab 2013b. Преобразование Хафа реализуется стандартной функцией *houghlines* (для линейных объектов) и *imfindcircles* (для окружностей). Удобство работы и выполнения стандартных процедур может быть обеспечено реализацией графического интерфейса. Для автоматизированного анализа нами были созданы программы CFE (Circular features extractor) и LFE (Linear features extractor).

Программа считывает значения текстовых полей с параметрами фильтрации и вызывает процедуру анализа (в данном случае поиска окружностей – *imfindcircles*). Программа учитывает задаваемые минимальные (*min_diam*) и максимальные (*max_diam*) значения диаметров выделяемых структур. «Полярность» выделяемых объектов (*'ObjectPolarity'*) выражается в случаях «светлый фон – темный объект» и «темный фон – светлый объект»). Чувствительность метода задается соответствующим параметром (*'Sensitivity'*), порог выделения границ которого указывается как *'EdgeThreshold'*, а разновидность метода анализа как *'Method'*, в данном случае – двухэтапный, (*'twostage'*).



Возвращаемые программой переменные отражены в квадратных скобках. *Centers* содержит массив координат центров выделенных окружностей, *radii* – данные об их радиусах. Переменная *metric* отражает значения относительной выраженности окружностей и может быть использована для их классификации, интерпретации и отображековки.

Анализ изображений радарных топографических съемок (SRTM – Shuttle Radar Topographic Mission [10]) части территории Алдано-Станового

щита, соответствующей Омнинско-Батомскому поднятию (рис. 2), проводился по указанной методике. Эта площадь характеризуется латеральным контрастом представленных геологических структур, широким развитием магматитов разного состава как докембрийского, так и позднемезозойского возраста.

В районе распространены минерагенические подразделения различного возраста и специализации. К их числу относятся рудные узлы и объекты Тыркано-Учурской редкоземельно-ред-

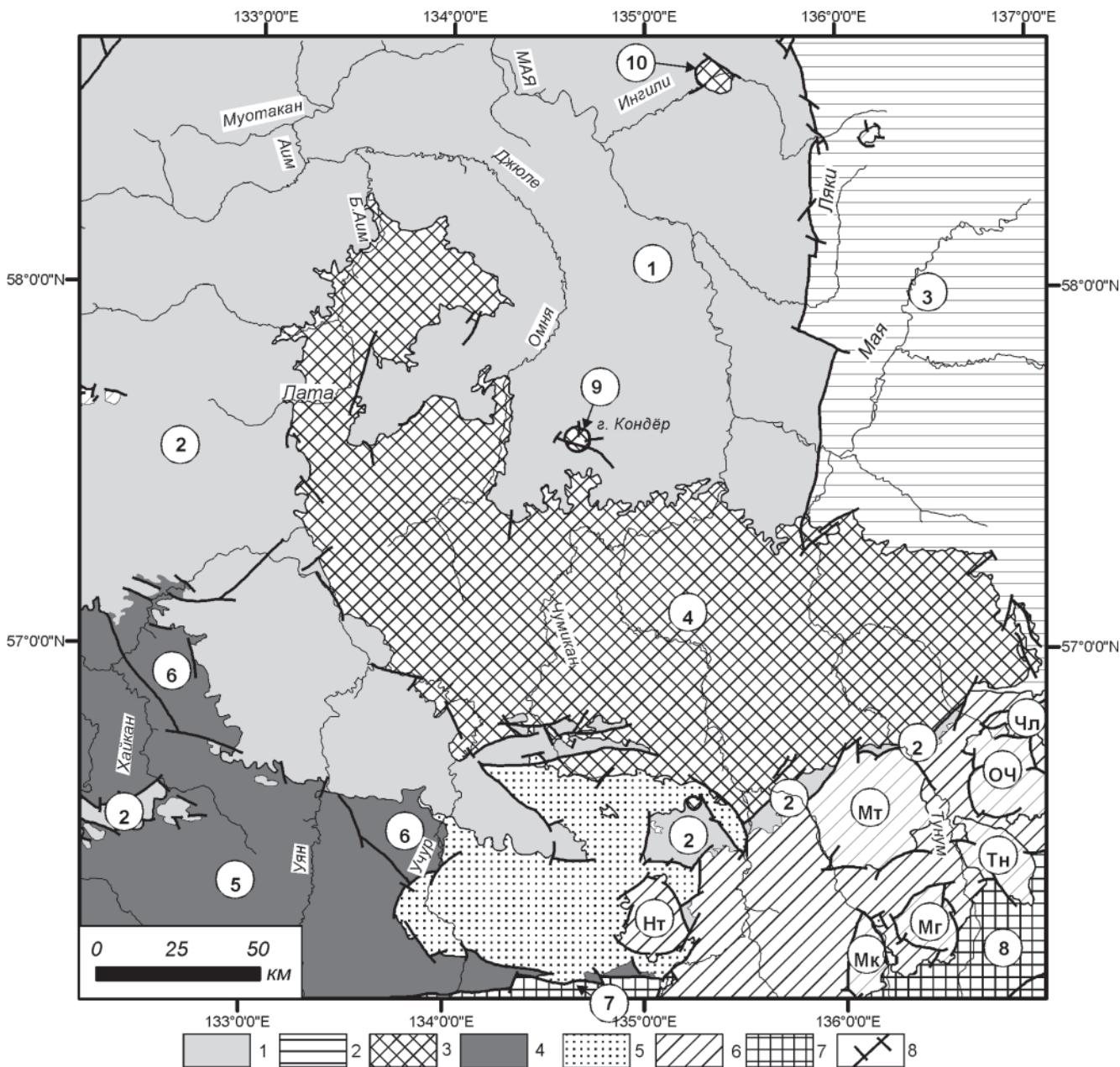


Рис. 2. Тектоническая схема района исследований (по [3], с изменениями)

1 – Сибирская платформа; 2 – Верхояно-Колымская складчатая система (Юдомо-Майская структурно-формационная зона); 3 – выступы кристаллического фундамента Сибирской платформы; 4 – Южно-Алданская система блоков Алдано-Станового щита; 5 – Улканский терригенно-вулканогенный прогиб; 6 – Предджугджурский вулканический прогиб; 7 – Становая система блоков Алдано-Станового щита; 8 – разломы; цифры в кружках: 1 – Майский прогиб, 2 – Учурская зона, 3 – Кыллахская подзона, 4 – Батомгский выступ, 5 – Тырканский блок, 6 – Луриканский блок, 7 – Джанинский блок, 8 – Джугджурский блок, 9 – Кондерский выступ, 10 – Инглийский выступ; локальные вулканотектонические структуры: Нт – Нимаро-Тумская, Мк – Мукитканская, Мт – Мотаринская, Мг – Магейская, Тн – Тунумская, ОЧ – Овланджино-Челасинская, Чл – Челасинская

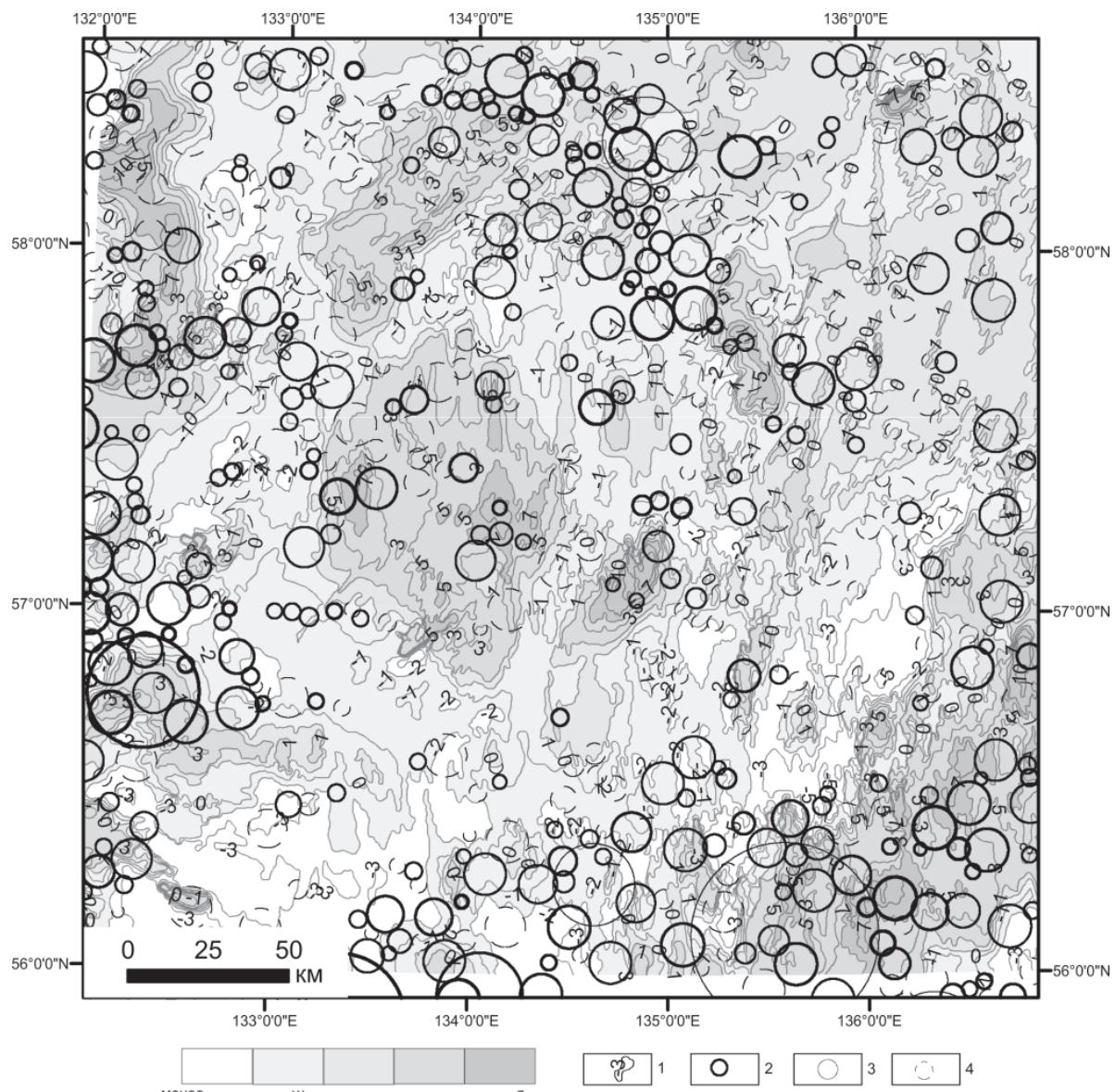


Рис. 3. Схема сопоставления выделенных морфоструктур и аномалий магнитного поля исследований (по [3])

1 – изолиния магнитного поля и значения; кольцевые структуры, выделяемые: 2 – уверенно, 3 – менее уверенно, 4 – неуверенно

кометалльно-урановой минерагенической зоны (ранний архей – ранний протерозой, квартер): Магейско-Батомгский серебрянозолоторудно-россыпной район (ранний – поздний мел, квартер), Чадско-Кондерский золоторедкоземельно-платиноворудно-россыпной район (докембрий), Кет-Капский серебрянозолоторудно-россыпной район (ранний мел, квартер).

Породы фундамента и осадочного чехла вмещают крупные гетерогенные массивы. Участками они представлены асимметричными куполовидными сооружениями, диаметр которых достигает 10–15 км. Существуют представления о формировании таких сооружений при внедрении поздненемезозойских интрузий гранитоидов и гипербазитов [7]. В соответствии с исследованиями средние значения эрозионного среза ядер зональных (кольцевых) plutонов, представленных дунитом,

изменяются от 500 (Чадский массив) до 1500 м (Кондерский массив). Срез щелочноземельных интрузивных тел обрамления ядер составляет 100–300 м. В соответствии с наличием в окружении Кондерского массива мощной зоны роговиков сделано предположение о том, что значительная часть щелочноземельных пород вокруг массива еще не вскрыта эрозией. Глубина формирования апикальной части массивов соответствовала приблизительно 1000 м [5].

В соответствии с представлениями об изометричном, а в ряде случаев зональном строении массивов и поднятий можно высказать предположение об изометричном рисунке образуемых ими космофотоаномалий. Несомненно, это требует обстоятельной проверки. Выяснение выраженности структур было выполнено с помощью представленных алгоритмов.

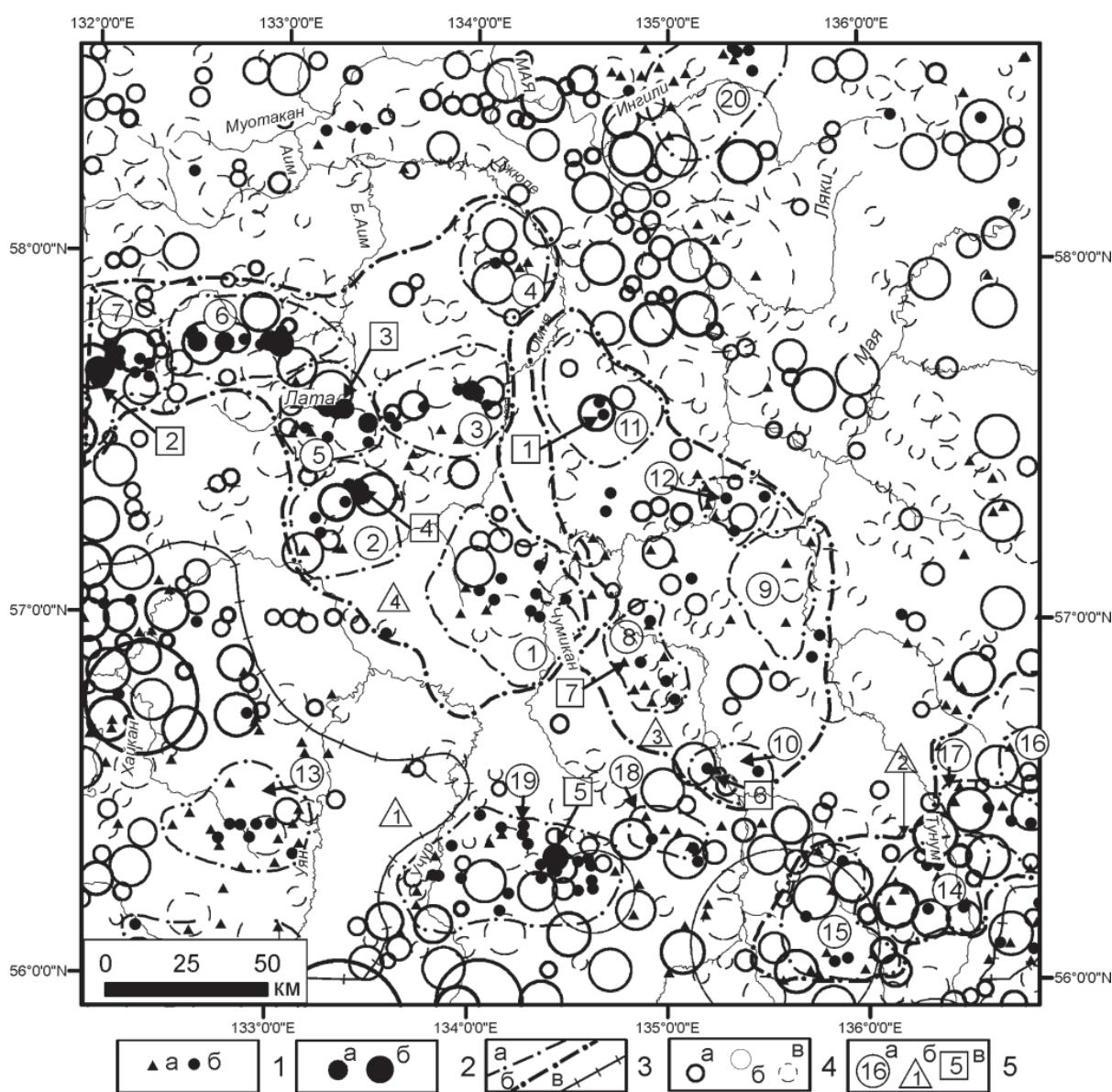


Рис. 4. Схема сопоставления выделенных морфоструктур, минерагенических зон и рудных объектов (минерагенические объекты по [3])

1 – рудные объекты (а – пункт минерализации; б – рудопроявление); 2 – месторождения (а – мелкие; б – средние); 3 – границы минерагенических подразделений (а – узлов, б – районов, в – зон); 4 – кольцевые структуры (выделяемые: а – уверенно, б – менее уверенно, в – неуверенно); 5 – минерагенические подразделения (а – узлов, б – районов и зон, в – объектов); рудные узлы (цифры в кружках): 1 – Томптоканский (Au), 2 – Дарьинский (Au-Ag), 3 – Даньский (Au), 4 – Омнинско-Одолинский (Au), 5 – Юньский (Au), 6 – Юртовый (Au), 7 – Улаханский (Au-Ag), 8 – Утукачанский (TR, прогнозируемый), 9 – Одолинский (Au), 10 – Чадский (Au-Pt), 11 – Кондерский (Au-Pt), 12 – Одола-Бургалинский (TR, прогнозируемый), 13 – Амуликано-Хайканский (TR, прогнозируемый), 14 – Мотаринский (Au-Ag), 15 – Мукитканский (Au-Ag), 16 – Авланджинский (Au-Ag прогнозируемый), 17 – Нюбинский (Au-Ag, прогнозируемый), 18 – Секталинский (Mo-Au, прогнозируемый), 19 – Улканский (U-TR), 20 – Инглийский (TR); рудные районы и зоны (цифры в треугольниках): 1 – Тыркано-Учурская зона (U-TR), 2 – Магейско-Батомгский (Au-Ag), 3 – Чадско-Кондерский (Au, TR, Pt), 4 – Кет-Капский (Au, Ag); месторождения (цифры в квадратах): 1 – Кондерское (Pt), 2 – Скарновое (Ag, Au), 3 – Шумное (Au), 4 – Усмун (Au), 5 – Бугундинское (Be, TR); платиноносные массы: 6 – Чадский; 7 – Сыбахский

В соответствии с методикой (см. рис. 1) исходное SRTM изображение фильтровалось с выделением контрастных границ и последующим распознаванием кольцевых структур. С помощью переменной *metric*, характеризующей степень выраженности структур, они разделялись на четыре равных класса. Класс наименее выраженных структур из дальнейшего рассмотрения устранился.

Оставшиеся структуры разделялись на три класса (выделяемые уверенно, выделяемые менее уверенно, выделяемые неуверенно). Полученный массив кольцевых объектов дистанционного изображения сопоставлялся с фактическими данными (геологическими и геофизическими).

Из предварительного визуального осмотра схемы дешифрирования видно, что зональные



структуры распределены по территории неравномерно: очевидны зоны их сгущения и разрежения, которые могут быть объединены в кластеры. Установлена корреляция кластеров локальными максимумами магнитного поля (рис. 3), соответствующими выступам фундамента и интрузивным массивам. Кроме того, кластеры кольцевых структур совпадают с региональными минерагеническими подразделениями и объектами.

На западе исследуемого участка находятся рудные узлы позднемезозойского Кет-Капского серебрянозолоторудно-россыпного района, трассируемые цепью кольцевых структур, характеризуемых как «выделяемые уверенно» (рис. 4). Находящийся на юго-востоке территории Магейско-Батомгский серебрянозолоторудно-россыпной район фиксируется двумя кластерами, образованными дешифрованными кольцевыми структурами, тяготеющими к его западному и восточному участкам, в которых локализованы Улканский, Мукитканский, Мотаринский, прогнозируемые Нюбкинский и Авланджинский узлы. Можно предположить, что образование дешифрируемых объектов дистанционного изображения происходило синхронно формированию пространственно ассоциированных с рудными объектами орогенных гранитоидов Улканского терригенно-вулканогенного и Предджугджурского вулканического прогибов.

В центральной части региона располагаются рудные узлы и объекты Чадско-Кондерского золоторедкоземельно-платиноворудно-россыпного района (Утукачанский, Одолинский, Чадский, Кондерский и прогнозируемый Одола-Бургалинский рудные узлы). Выраженность их в полях уверенно выделяемых кольцевых объектов невысока, за исключением отчетливо определяемого на дистанционной основе Кондерского plutона (см. рис. 4), который отличается значительным эрозионным срезом, обнажившим зональную структуру plutона.

Не вполне ясна природа кластера кольцевых объектов северо-западного простираия севернее Чадско-Кондерского рудного района. Указанный кластер может соответствовать выступам фундамента Сибирского кратона, с которым могут быть связаны платиноносные массивы Кондер-Феклистовского металлогенического пояса, предполагаемые авторами работы [7].

Получены результаты по корреляции изометрических рудоносных структур земной коры и кольцевых объектов дистанционного изображения, выделяемых автоматизировано с классификацией по степени выраженности. Установлено соответствие полей наиболее уверенно выделяемых методом Хафа структур рудным узлам и зонам. В определении рудоносных структур описанным методом, очевидно, ведущую роль играют возраст рудогенетических тектономагматических событий, синхронность интрузивного магматизма

процессам рудогенеза и мощность эрозионного среза. Наиболее контрастно в полях кольцевых структур машинного дешифрирования отразились кластеры, связанные с полями развития меловых орогенных гранитоидов. Выраженность рудоносных структур фундамента контролируется мощностью платформенного чехла и величиной эрозионного среза.

На основе совпадения дешифрованных кластеров кольцевых структур с известными рудными объектами можно сделать вывод, что предлагаемая методика может эффективно применяться для прогнозирования рудоносных структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буш, В. А. Проблема кольцевых структур Земли [Текст] / В. А. Буш // Итоги науки и техники. Сер. Общая геология. Т. 22. – М. : ВИНТИ, 1986. – 116 с.
2. Гаврилов, А. А. Проблемы морфоструктурно-металлогенического анализа [Текст] / А. А. Гаврилов. – Владивосток : Дальнаука, 2001. – 307 с.
3. Государственная геологическая карта. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист О-53 – Нелькан : объяснительная записка [Текст] / ред. С. А. Радченко. – СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 1991.
4. Ежов, Б. И. Морфотектоника геодинамических систем центрального типа: новая глобальная концепция [Текст] / Б. И. Ежов, Г. И. Худяков. – Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1984. – 126 с.
5. Ельянов, А. А. Магматизм и металлогения платформенных областей многоэтапной активизации [Текст] / А. А. Ельянов, Г. В. Андреев. – Новосибирск : Наука, 1991. – 168 с.
6. Космогеологическая карта СССР масштаба 1:2 500 000 [Карты] / Под ред. Е. А. Козловского. – М. : Аэрогеология, 1984.
7. Хомич, В. Г. Глубинная геодинамика Юго-Востока России и позиция платиноносных базит-гипербазитовых массивов [Текст] / В. Г. Хомич, Н. Г. Борискина // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 4. – С. 1–11.
8. Jianbo Shi Computer vision [Electronic resource]: Penn Engineering. School of engineering and applied science. – URL: <http://www.seas.upenn.edu/~cse399b/Lectures/CSE399b-04-edge.pdf>. – (Date: 23.03.2014).
9. Hough Transform [Electronic resource]: OpenCV 2.4.8.0 documentation. – URL: http://docs.opencv.org/doc/tutorials/imgproc/imgtrans/hough_lines/hough_lines.html. – (Date: 23.03.2014).
10. The Shuttle Radar Topography Mission [Electronic resource] / T. Farr, P. Rosen, E. Caro [et al.] // Reviews of Geophysics. – RG2004/2007. – N 45. – URL: http://www.geol.ucsb.edu/faculty/burbank/Site/Publications_files/Farr%20et%20al%20SRTM%20RoG2007.pdf.