

## ОТРАЖЕНИЕ ПОПИГАЙСКОЙ СТРУКТУРЫ В МАТЕРИАЛАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (ЯКУТИЯ)

© 2011 г. Н. Н. Говорова<sup>1\*</sup>, Д. Г. Загубный<sup>1</sup>, Н. И. Корчуганова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение Российской академии наук Геологический институт РАН, Москва

<sup>2</sup>Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва

\*E-mail: govorova-67@mail.ru

Поступила в редакцию 12.10.2009 г.

В данной статье на примере Попигаийской кольцевой структуры рассматриваются некоторые варианты компьютерной обработки данных дистанционного зондирования (ДЗ). В качестве исходного материала использовались космический снимок MODIS, цифровой рельеф GTOPO, а также речная сеть, минимумы и максимумы рельефа, схемы экспертного дешифрирования. Специальная обработка космического снимка позволила определить геологические границы, не выделяемые на исходном изображении. Концентрическое строение впадины и местонахождение максимально переплавленного материала были подчеркнуты преобразованием «направленная фильтрация». Обработка цифрового рельефа включала преобразования и фильтрации, позволившие выделить различные особенности рельефа, в том числе для объективного компьютерного расчета центра Попигаийской структуры использовались заложенные в программе Lineament алгоритмы для расчета центра радиально-концентрических структур. При всей субъективности, наиболее информативным исходным материалом для поиска кольцевых структур оказались схемы экспертного дешифрирования. Проведенная компьютерная обработка данных ДЗ позволяет считать ксеногенное происхождение Попигаийской структуры наиболее вероятным.

**Ключевые слова:** Попигаийская структура, дистанционное зондирование, цифровая модель рельефа, программа Lineament, компьютерная обработка, фильтрации, линеаментный анализ, база высотных отметок, кольцевые структуры, астроблема (метеоритный кратер)

### ВВЕДЕНИЕ

На Земле выявлено большое количество концентрических структур разного генезиса и размеров, при этом в значительной мере благодаря космическим снимкам (Буш, 1986; Кольцевые структуры континентов..., 1987). Особую категорию среди них образуют ксеногенные структуры, возникшие в результате падения на Землю астероидов и метеоритов и похожие на вулканические кратеры. Общие размеры метеоритного кратера и сложность его внутреннего строения определяются энергией соударения, а форма в плане зависит от угла встречи метеорита с Землей и геологического строения мишени (Мелош, 1994; Фельдман, 1999). При крутом падении метеорита, близком к вертикальному, образуется округлая форма кратеров. Чем меньше угол встречи при соударении, тем сильнее вытянут кратер по направлению падения (например, крупный кратер Рио-Кварто в Аргентине, возникший ~10000 лет назад, имеет длину 4.5 км, ширину 1.1 км при глубине 7–8 м). Округлая воронка кратера окружена цокольным валом, образованным задранными пластами горных пород мишени, которые перекрыты обломками пород, выброшенными взры-

вом и слагающими насыпной вал. С увеличением диаметра кратера меняется и его внутреннее строение. При диаметрах воронки больше ~3–4 км в ее центре образуется центральная горка, а при диаметрах более 14–15 км появляется центральное кольцевое поднятие. Внутри кратера находятся продукты взрыва (импактиты) (Масайтис, 1973).

До появления данных дистанционного зондирования (ДЗ) Земли был известен лишь один крупный метеоритный кратер – Аризонский в США – диаметром 1240 м и глубиной 170 м, возникший ~50000 лет назад в результате падения железно-никелевого метеорита. Сейчас на Земле известно более 200 астроблем (например, Садбери диаметром 200 км на Канадском щите – одна из древнейших и крупнейших на суше; Нордлингер–Рис в Германии на плато Швабский Альб диаметром 26 км, образованная 14.8 млн. лет назад на месте падения метеоритного тела диаметром ~2.5 км; Маникуаган в Канаде диаметром 120 км и возрастом ~210 млн. лет; астроблема Чиксулуб, недавно обнаруженная на п-ове Юкатан в Северной Америке, имеющая диаметр 300 км и возраст 65 млн. лет, и др.).

На метеоритные похожи *криптовзрывные* структуры, возникающие при специфическом вулканизме, связанном с природными химическими газовыми взрывами. Эти структуры выделяют в особую группу кольцевых структур, которые считаются закономерным членом формационного ряда: кимберлитовая формация—альнеит-кимберлит-карбонатитовая формация—формация взрывных структур (Взрывные кольцевые структуры..., 1985). При развитии близповерхностного газонасыщенного магматического очага в ходе резких неоднократных колебаний температур и давлений, катастрофически быстрого отделения огромного объема газов и их взрывного окисления может возникнуть вся гамма эффектов ударного метаморфизма. Эндогенное происхождение криптовулканических структур доказывается длительностью и сложностью процессов их образования, закономерной локализацией и присутствием пород с признаками ударного метаморфизма за пределами структур, аналогией с породами явно эндогенного происхождения (Взрывные кольцевые структуры..., 1985; Маракушев и др., 1993).

Поскольку криптовзрывные структуры имеют много сходных черт с метеоритными, возникает проблема их различия. Эта проблема связана и с определением генезиса Попигайской структуры.

Попигайская кольцевая структура (рис. 1) расположена на севере Сибирской платформы в бассейне среднего течения р. Попигай, правого притока р. Хатанги. Выявленная в 1946 г. Д.В. Кожвиным котловина округлой формы в разное время определялась как грабен, вулканотектоническая кальдера, эрозионная впадина, кратер оседания, наложенная синеклиза и пр. Впадина диаметром ~100 км и глубиной до 2.5 км выполнена специфическим комплексом расплавленных и раздробленных пород палеогенового возраста и четвертичными отложениями. Она имеет хорошо выраженный окраинный кольцевой вал и осложнена внутренним кольцевым поднятием, разделяющим центральную опущенную часть структуры и внешний кольцевой желоб. С севера и востока она обрамляется полого залегающими верхнепротерозойскими, кембрийскими, пермскими и юрско-меловыми карбонатными и терригенными отложениями, а с юга и юго-запада — интенсивно дислоцированными архейско-раннепротерозойскими кристаллическими образованиями фундамента (Геологическая карта Сибирской..., 2000). Структура четко маркируется отрицательным гравитационным полем концентрически зонального строения и отрицательным магнитным полем небольшой интенсивности. Ограничивающая Попигайскую депрессию кольцевая зона разломов имеет ширину от 200—300 м до 1.5—2 км и состоит из нескольких параллельных друг другу, иногда кулисно-расположенных, разломов. Их общий сбросовый характер устанавливается по

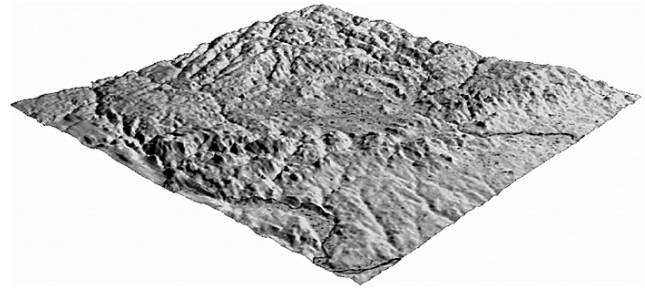


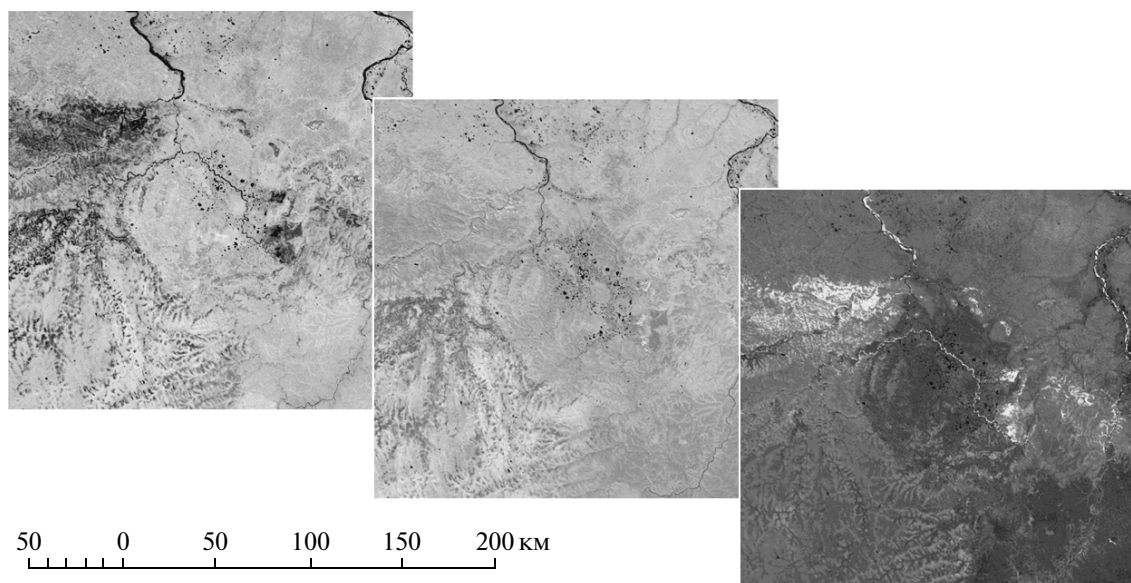
Рис. 1. Трехмерная модель Попигайской структуры, полученная при совмещении рельефа GTOPO30 со снимком MODIS.

геологическим и геофизическим данным. В 1970 г. В.Л. Масайтис и др. высказали точку зрения о том, что эта структура является метеоритным кратером (Масайтис и др., 1971; Масайтис и др., 1975). В ряде обнажений на поверхность выходят отложения, претерпевшие дробление и ударное плавление. Сейчас большинство исследователей также придерживаются мнения о метеоритном происхождении Попигайской структуры, образовавшейся в палеогене 35.7 млн. лет назад. Несмотря на кажущуюся очевидность ее метеоритного происхождения, гипотеза эндогенного происхождения Попигайской структуры активно поддерживается крупными учеными, такими как В.И. Ваганов, П.Н. Кропоткин, М.З. Глуховский, А.А. Маракушев (Взрывные кольцевые структуры..., 1985; Маракушев, Шахотько, 2001). Дополнительный интерес к структуре объясняется тем, что с ней связано крупнейшее в мире месторождение технических алмазов.

Попигайская структура открытая, хорошо геологически проявленная и может являться эталонной для дешифрирования структур кольцевого типа (рис. 1). В этой связи интересно оценить выраженность ее в материалах обработки данных ДЗ, проявляющих неявные особенности строения структуры. Рассмотрим некоторые типы преобразований на примере космического снимка MODIS и цифрового рельефа GTOPO и их реализацию в программе Lineament (Загубный, 2004а; Загубный, 2004б). В статье описываются преобразования и фильтрации, проводимые только в этой программе, и только те из них, которые дают дополнительные данные относительно исходных. Указывать детальные параметры преобразований нам представляется нецелесообразным.

## ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Специальная (тематическая) обработка космического снимка включала: гистограммные, цветовые и межканальные преобразования; различного рода фильтрации; классификации и пр., позволяю-



**Рис. 2.** Выраженность Попигайской структуры в каналах снимка MODIS (слева направо): канал 1 MODIS (красный: 0.620–0.670); канал 2 MODIS (ИК: 0.841–0.876); индекс NDVI, рассчитанный из каналов 1 и 2.

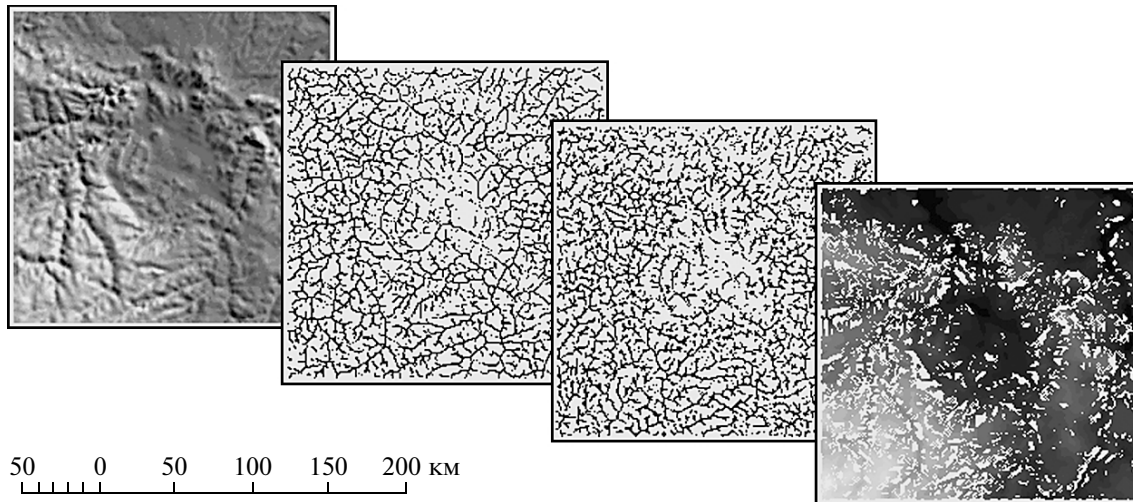
щие представить один или несколько компонентов изображения в более удобном для восприятия и использования виде.

При синтезе цветного изображения красному (R), зеленому (G) и синему (B) его каналам при даются значения различных каналов исходного снимка. По данным MODIS (пространственное разрешение 250 м) с использованием канала 1 (красный) и канала 2 (ближний ИК) возможно определение нормализованно-разностного вегетационного индекса (NDVI), рассчитываемого как отношение разности и суммы значений спектральных яркостей в красной и ближней ИК-зонах спектра. По геологическим данным, диаметр кратера Попигайской структуры оценивается в 100 км, а на снимках, особенно четко в индексе NDVI, проявилась лишь внутренняя часть кратера диаметром ~80 км, поросшая лесом. Это вполне закономерно, так как NDVI используется для детектирования растительности (рис. 2).

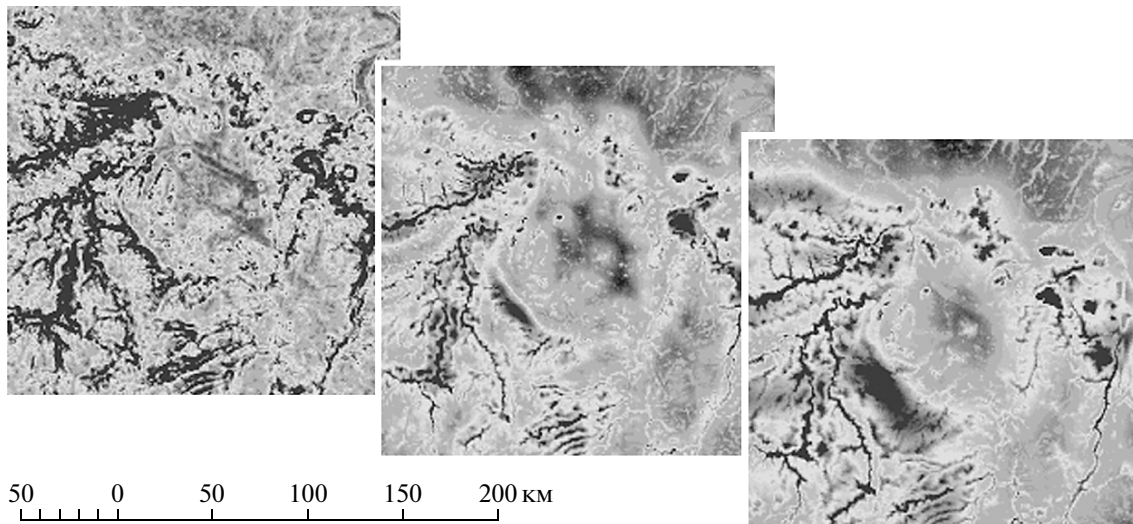
После синтеза изображение подвергалось дополнительным канальным и межканальным преобразованиям, использовались преобразования, заключающиеся в умножении и делении значений каналов. R-каналу при этом присваивалось значение  $R/B$ , G-каналу —  $G/R$ , а B-каналу —  $B/G$ . Преобразования подчеркнули некоторые геологические границы, например, границу между зювитами и тагамитами в западной части кратера, проявление которой на исходном снимке не очевидна. Количество подобных преобразований очень велико, и при их выполнении надо представлять, какие особенности строения необходимо подчеркнуть. В большинстве случаев предсказать заранее степень целесообразности того или

иного преобразования невозможно, и степень информативности приходится оценивать визуально. Преобразование направленной фильтрации, например, подчеркнуло концентрическое строение Попигайской структуры, проявив окружность, особенно четко выраженную в юго-западном секторе структуры. Это согласуется с предполагаемым направлением падения метеорита с северо-востока и нахождением там основных масс переплавленного материала. Надо заметить, что большую часть выделяемых структурных элементов и особенностей строения структуры можно увидеть и на исходном снимке, однако полученные преобразования помогли их выявить более четко или подчеркнуть.

Кроме космического снимка, обрабатывался цифровой рельеф. На район Попигайской структуры доступны только данные GTOPO30 и DTM. Миссия SRTM не захватывает высокие северные широты. Обработка цифрового рельефа включала преобразования и фильтрации, позволившие выделить различные особенности рельефа. При обработке сетки рельефа суть преобразований наиболее очевидна. При обработке сетки фильтрами, заложенными в подпрограмме “Выделение”, из всех значений оставались только те, которые удовлетворяли условиям допуска. При этой фильтрации анализировались только ближайшие точки. Новая полученная таким образом сетка нагляднее всего в виде раstra. На выполненных преобразованиях четко проявились изометричная котловина кратера, заполненная обломочными отложениями, и кольцевой вал по периферии кратера (рис. 3). Преобразование выравнивания показало отсутствие сколько-нибудь выраженного рельефа в основной аккумулятивной части



**Рис. 3.** Варианты обработки рельефа подпрограммами фильтрации (слева направо): диагональный фильтр, выделение минимумов, выделение максимумов, выделение плоскостей.



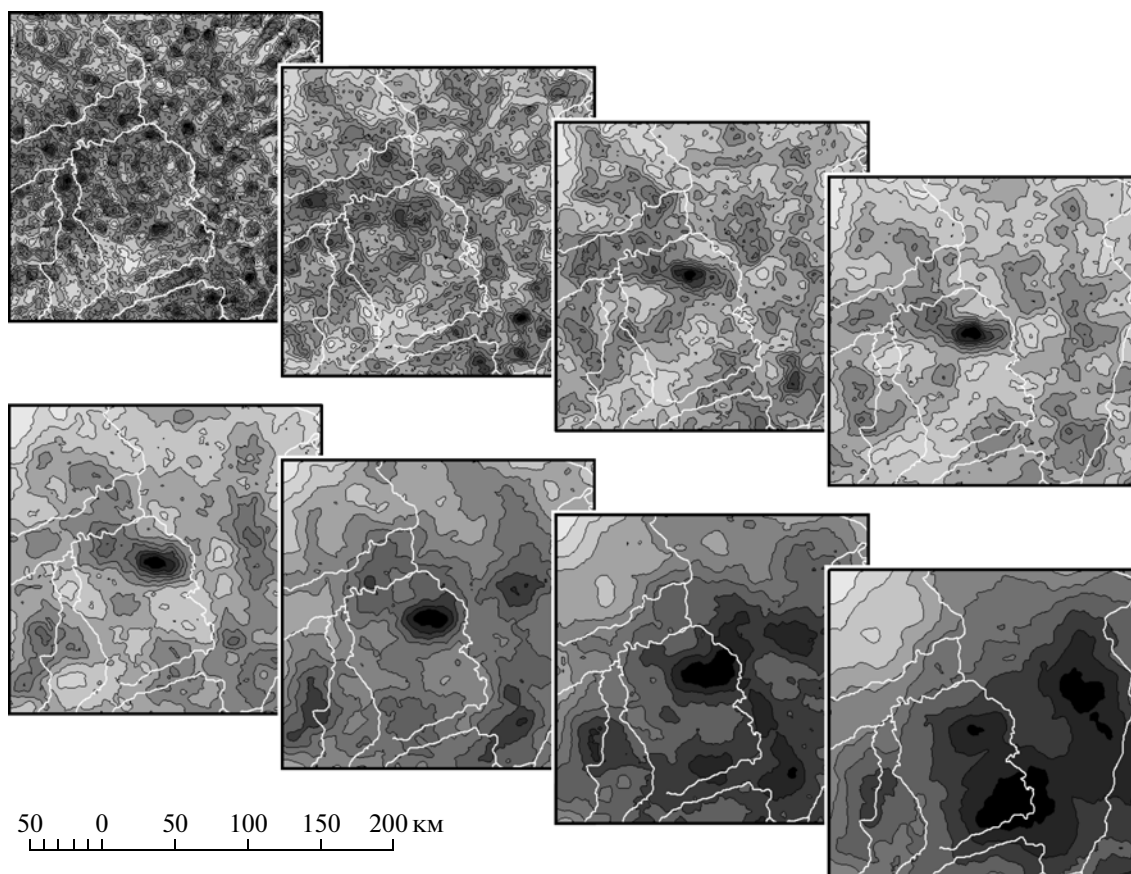
**Рис. 4.** Варианты обработки рельефа подпрограммой расчета градиента (слева направо увеличивается размер ячейки расчета градиента).

котловины, кроме участков, где обнажены переплавленные породы основания. На визуализированных преобразованиях градиента (рис. 4) четко проявилось характерное для ударных кратеров центральное поднятие и его края, маркированные зонами повышенного градиента. В юго-западной части кратера выделилась сильно расчлененная область, обусловленная, очевидно, наибольшим задиром пород мишени и выбросом в этом направлении значительного количества пород кратера, что согласуется с предполагаемым направлением падения метеорита.

При построении серии профилей по сетке с небольшим шагом были получены объемные модели рельефа. Использование подобных построе-

ний с разным соотношением вертикального и горизонтального масштаба дали дополнительную визуальную информацию. Разумеется, подобную визуализацию можно использовать не только для данных рельефа, но и для любых данных, переведенных в сетку.

Обработке также подверглись некоторые векторные данные — речная сеть, минимумы рельефа и схемы визуального дешифрирования космоснимка и рельефа. Для получения достоверных данных при расчете бралась векторная сеть большего размера, как минимум на радиус окна расчета со всех сторон от структуры. Рисунок речной сети подчеркивает контур изометричной структуры диаметром ~60–65 км. Для получения объективно-



**Рис. 5.** Поиск центров концентрических структур по схемам дешифрирования для структур диаметром (слева направо): верхний ряд – 20, 40, 60, 80 км; нижний ряд – 100, 150, 200, 300 км.

го компьютерного расчета центра Попигайской структуры использовались заложенные в программе Lineament несколько алгоритмов для расчета центра радиально-концентрических структур. По одному из алгоритмов допуск определялся углом между направлением линеамента и направлением на центр, в другом – диаметром области, через которую должен пройти луч, продолжающий линеамент. Первый алгоритм хорошо работает для периферийных частей структур, второй более корректен для центральных частей, где направления на центр не столь четко выражены. Из схем экспертного дешифрирования суммировались все длины линеаментов, направленные на центр (для радиальных) и перпендикулярные к направлению на центр (для концентрических структур). При поиске радиальных структур проявились области сгущения однонаправленных линеаментов, а при поиске концентрических – области, лежащие между этими зонами. При поиске центров радиальных структур в зависимости от выбранного диаметра окна расчета выделились основные зоны сгущения линеаментов различного ранга, но центр Попигайской структуры при этом практически не проявился, т.е. радиальные направления, неоднократно описанные в этой

структуре (Масайтис и др., 1971; Масайтис, 1973; Масайтис и др., 1975), не нашли четкого отражения в схемах дешифрирования. При расчете концентрических структур центр выделяется для диаметров от 60 до 150 км, наиболее четко – 80 км (рис. 5). При этом проявилась некоторая вытянутость в субширотном направлении в положении центра структуры. Результаты расчета поиска центров кольцевых структур по сети векторных данных, соответствующих “минимумам” (водотоки и понижения), полученным по цифровому рельефу, также выявили центр структуры диаметром 80 км, а также более крупной структуры диаметром ~120–130 км. При расчетах радиальных структур по “минимумам” рельефа центр Попигайской структуры начинает четко выделяться с диаметра 80 км, с небольшим смещением на восток относительно его положения на схемах дешифрирования, но там он проявляется при меньших диаметрах поиска, и также вытянут в восточном направлении. Вероятно, для структуры меньшего диаметра (порядка 60–80 км) центр расположен западнее, чем для структуры большего (порядка 100–120 км), что, возможно, связано с наклонным падением метеорита.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приходится констатировать, что наилучшими исходными материалами для поиска кольцевых структур пока остаются схемы экспертного дешифрирования. При всей субъективности таких данных они оказались наиболее информативными. Вероятно, можно получить интересные результаты при автоматизированном дешифрировании снимков, например программой ScanEx NeRIS (Scan Ex NeRIS), использующей адаптивные алгоритмы на основе искусственных нейронных сетей Кохонена (Добрынин, Савельев, 1999), однако такая работа пока не проводилась. Представляется целесообразной разработка специальной программы для дешифрирования снимков, рельефа и прочих полутонных или векторных данных, нацеленной на специализированное геологическое дешифрирование.

Различные преобразования снимка MODIS, цифрового рельефа, речной сети и схем экспертного дешифрирования подчеркивают концентрическое строение Попигайской структуры, котловину кратера, центральное поднятие и область наибольшего расчленения на его юго-западной границе. Положение центра Попигайской структуры имеет наиболее четкую фиксацию для диаметров 80 и 100 км. Вытянутость и смещение центра структуры при различных расчетах может быть связано с наклонным падением метеорита. Проведенная компьютерная обработка дистанционных материалов выявляет особенности структуры, характерные для метеоритных кратеров, и позволяет считать ксеногенное происхождение Попигайской структуры наиболее вероятным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Буш В.А. Проблема кольцевых структур Земли // Итоги науки и техники. Сер. Общая геология. М.: ВИНТИ, 1986. Т 22. 115 с.

Взрывные кольцевые структуры щитов и платформ. М.: Недра, 1985. 200 с.

Геологическая карта Сибирской платформы и прилегающих территорий. Масштаб 1 : 1 500 000. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 12 л.

Добрынин Д., Савельев А. Нейронные технологии для тематического дешифрирования ДДЗ // ГИС-обозрение. 1999. № 1. С. 12–14. <http://www.scanex.ru/>

Загубный Д.Г. Новая программа обработки векторных и растровых дистанционных материалов для ГИС // Исслед. Земли из космоса. 2004а. № 5. С. 21–27.

Загубный Д.Г. Способы обработки цифрового рельефа программой "Lineament" // Исслед. Земли из космоса. 2004б. № 6. С. 30–58.

Кольцевые структуры континентов Земли. М.: Недра, 1987. 326 с.

Маракушев А.А., Шахотько Л.И. Стадии формирования и природа Попигайской алмазоносной кольцевой структуры // Докл. РАН. 2001. Т. 377. № 3. С. 366–369.

Маракушев А.А., Богатырев О.С., Панях Н.А., Феногенов А.Н., Федосова С.П. Длительность формирования кольцевых структур как главный аргумент их эндогенной природы // Изв. вузов. Геология и разведка. 1993. № 4. С. 3–16.

Масайтис В.Л. Геологические последствия падения кратерообразующих метеоритов. Л.: Недра, 1973. 18 с.

Масайтис В.Л., Михайлов М.В., Селивановская Т.В. Попигайская котловина – взрывной метеоритный кратер // ДАН СССР. 1971. Т. 197. № 6. С. 1390–1393.

Масайтис В.Л., Михайлов М.В., Селивановская Т.В. Попигайский метеоритный кратер. М.: Наука, 1975. 124 с.

Мелош Г. Образование ударных кратеров: Геологический процесс. М.: Мир, 1994. 336 с.

Фельдман В.И. Астроблемы – звездные раны Земли // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 9. С. 67–74.

ScanEx NeRIS – <http://www.scanex.ru/ru/software/default.asp>

## Popigay Ring Structure Using Remote Sensing Data Processing

N. N. Govorova<sup>1</sup>, D. G. Zagubny<sup>1</sup>, N. I. Korchuganova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>2</sup>Russian State Geological University of S. Ordzhonikidze, Moscow

In this article an example Popigay ring structure are considered some options for computer processing remote sensing data. As the raw material used space shot MODIS, digital terrain GTOPO, as well as the river network, minimum and maximum relief scheme expert interpretation. Special processing of satellite imagery included: histogram analysis, various kinds of filtering, classification, etc. In this case inter-channel transformation showed some geological boundary, which in the original photo were not so obvious. Concentric building trenches and the location of possible remelted material was stressed conversion «aimed filtering». The processing of digital elevation included the conversion and filtering, will allow the different characteristics of topography, including, for the objective of computer calculation center Popigayskoy structure used enshrined in the Lineament algorithms to calculate the center of radial concentric structures. In all subjectivity, the most informative source material to find the ring structures have proven expertise decoding schemes. A computer processing of remote sensing data makes the xenogeneic origin Popigay structure most likely.

**Keywords:** Popigay structure, remote sensing, satellite imagery, digital terrain model, program Lineament, computer processing, filtering, lineament analysis, digital elevation model, ring structures, astrobleme (meteor crater)