

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЛИНЕАМЕНТОВ  
ПО МАТЕРИАЛАМ ДЕТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

© Б.С. Бусыгин, С.Л. Никулин, 2008

*Национальный горный университет, Днепрпетровск, Украина*

New methods of lineament analysis, expounded in the given article and applied to satellite images with high resolution, permit both identification of faintly shown linear structures, and discover their regular location. Materials, obtained within the limits of the Turanskaya plate have ascertained the fact that detected lineament zones form regular networks with fixed intervals between axes of an identical hierarchic level, and reveal little dependence on geological peculiarities of the territory.

**Введение.** В настоящее время в практике геолого-поисковых работ все чаще используются материалы спутниковых съемок земной поверхности. Это связано с относительно низкой стоимостью космических снимков (КС), постоянным ростом их пространственного и спектрального разрешения, а также с развитием средств обработки и интерпретации. В литературе описано большое количество примеров успешного применения КС при решении разнообразных геологических задач [1–5]. Эффективность использования КС во многом определяется относительной простотой обнаружения и картирования приповерхностных объектов, в том числе тех, которые при большой протяженности, но малой мощности, могут быть пропущены при полевых исследованиях. Вместе с тем снимки земной поверхности несут полезную информацию и о глубинном строении территории, однако для ее извлечения необходима разработка новых подходов, основанных на количественных методах пространственного анализа. В настоящей статье описана методика изучения закономерностей расположения линеаментов, позволяющая увеличить объем извлекаемой из КС полезной информации. Она включает в себя выделение крупных линеаментов, в том числе не проявленных непосредственно на КС, и определение периодичности их чередования.

**Постановка проблемы.** Под линеаментами понимают линейные неоднородности земной коры и литосферы разного ранга, протяженности, глубины и возраста заложения, которые проявлены на земной поверхности разрывами или геологическими или ландшафтными аномалиями. Линеаменты могут быть обусловлены разломами фундамента, флексурными или трещинными зонами в осадочных отложениях. Многие исследователи указывают на связь линеаментов с системами разломов различного порядка, определяющими бло-

ковое строение земной коры. Традиционными индикаторами линеаментов считают, в частности, прямолинейные границы резкого изменения текстуры или яркости (плотности фототона) КС, вытянутые поднятия и опускания рельефа, прямолинейные участки русел гидросети, границ видов растительности и др.

Разрывы — типичные представители линеаментов, однако далеко не все выделяемые линеаменты пространственно совпадают с разрывами. В силу унаследованного характера развития геологической структуры земной коры геологические разрывы более позднего происхождения обычно приурочены к линеаментам и выполняют роль их активаторов. Неактивированные линеаменты, даже достаточно крупные, зачастую проявлены на поверхности весьма слабо, что затрудняет их выделение даже на КС высокого разрешения.

Будучи связанными с системами планетарной трещиноватости, большинство линеаментов располагается на земной поверхности не хаотично, а образует сеть, характеризующуюся определенной регулярностью и иерархической организацией. Известно, что на всей поверхности Земли выделяются две основные системы линеаментов с азимутами 0–90° и 45–135°. В отдельных районах известны и другие системы, например с азимутами 30–120° или 60–150°. Многие исследователи приводят доказательства того, что расстояние между соседними линеаментами одного направления и одного иерархического уровня (определяемого в первую очередь размерами линеамента) — обычно величина, близкая к постоянной [5–8]. Так, эмпирически установлено, что линеаменты (а также разломы, жилы и т. п.) располагаются друг от друга на практически равных расстояниях. Это явление обнаружено, в частности, в рудных районах Саксонии, Болгарии, Украины, Шотландии, Чехии, на Аппени-



Рис. 1. Расположение рудных полей

нах и в Сардинии [6]. Можно предположить, что наличие равных расстояний обусловлено закономерным характером дробления земной коры на блоки, контролирующие расположение более мелких структур. Выявление закономерностей чередования линеаментов различных иерархических уровней и построение линеаментной сети изучаемой территории позволяют более полно учитывать структурный фактор при последующем прогнозе геологических объектов.

Цель работы – описание методики линеаментного анализа, основанной на выявлении и изучении иерархии и закономерностей расположения линеаментов, а также изложение результатов ее применения в пределах двух золоторудных полей Западного Узбекистана (рис. 1).

**Районы исследований и исходные данные.** Для изучаемых рудных полей, расположенных в пределах Туранской плиты, характерна малая мощность осадочной толщи в условиях среднегористой местности с относительно малой техногенной нагрузкой. Рудные поля сложены в основном породами палеозойского возраста. На поле 1 площадью 340 км<sup>2</sup> (рис. 2, а) известны одно небольшое месторождение и несколько незначительных рудопроявлений золота; на поле 2 площадью 98 км<sup>2</sup> (рис. 2, в) расположены более 20 рудных тел, некоторые из них имеют промышленное значение. Для поля 1 были использованы высокоточные КС со спутника QuickBird 2 с пространственным разрешением панхроматического канала около 0,6 м и мультиспектральных (RGB и ближний инфракрасный) около 2,4 м (рис. 2, б). Для рудного поля 2 использовался панхроматический снимок со спутника SPOT-4 с пространственным разрешением 10 м (рис. 2, г).

**Методика исследований.** Существует несколько подходов к выделению линейных элементов на КС. Традиционный подход заключается в визуальном анализе снимка и нахождении объектов линейной формы. При этом велик риск пропуска многих линеаментов, поскольку некоторые из них четко выделяются только при определенном увеличении или уменьшении анализируемого изображения. Кроме того, визуальный анализ требу-

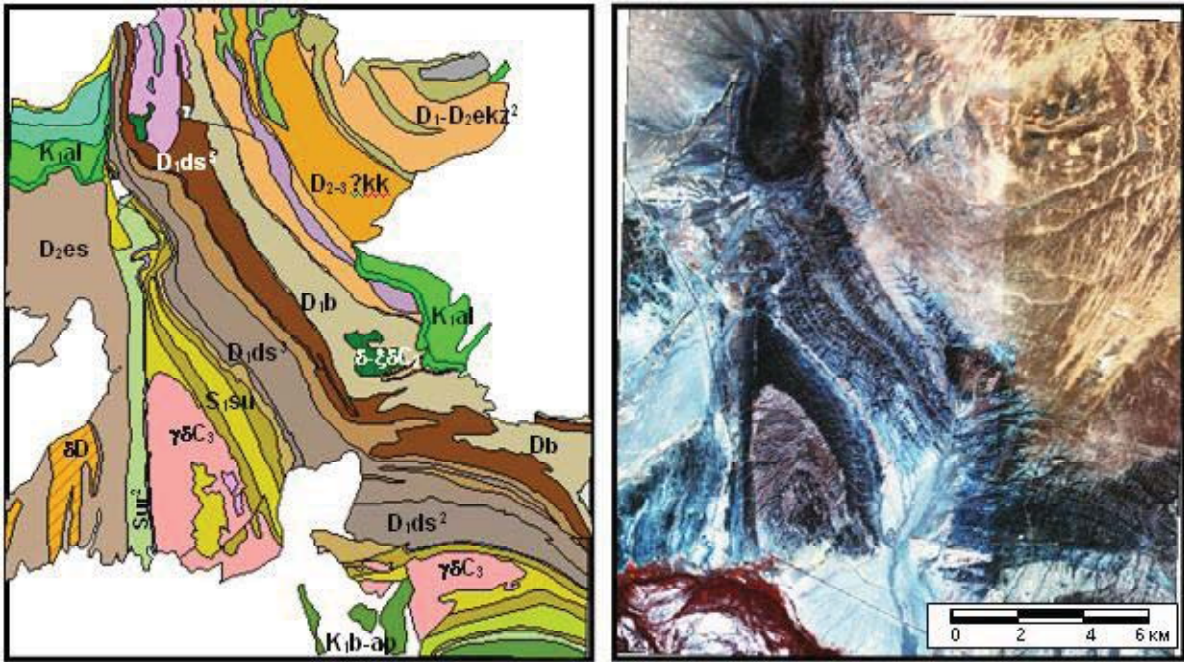
ет больших затрат времени и не лишен субъективности. Выделение линеаментов в две или три руки, повышая в целом достоверность результатов, ведет к существенному увеличению затрат на обработку КС.

Автоматическое выделение линеаментов, пересекающих всю изучаемую площадь или ее большую часть (так называемых сквозных), обычно основано на полосовой фильтрации и преобразовании Хафа, которое выполняется значительно быстрее традиционного и позволяет выявлять линейно-полосчатую текстуру изображения, трудно-различимую визуально [9]. Однако в силу своей специфики (выделяются только достаточно протяженные линеаменты, расположенные вдоль прямой линии) преобразование Хафа не гарантирует выделения линейных объектов, не имеющих четких границ (рис. 3), недостаточно протяженных или деформированных более поздними тектоническими движениями.

К недостаткам обоих подходов следует отнести сложность выделения линейных структур глубинного заложения, не активированных новейшими тектоническими движениями, а потому слабо проявленных на поверхности. Для устранения этой проблемы авторы разработали специальную методику, позволяющую выделять широкий спектр глубинных и поверхностных линейных объектов. Кратко методика сводится к следующему.

1. К исходному КС применяется аппарат выделения границ методом Кенни (Canny). Согласно [10], выделение границ происходит путем свертки исходного зашумленного сигнала  $f(x)$  с функцией  $h(x)$  с асимметричным импульсным откликом, при этом амплитуда  $f(x)$  принимается равной нулю за пределами окна. Выделяемая граница находится в точке локального максимума свертки  $f(x) \otimes h(x)$ . Функция  $h(x)$ , называемая оптимальным оператором Кенни, выбирается таким образом, чтобы обеспечить единственность отклика на единичную границу, высокую точность обнаружения границ и максимизацию отношения сигнал/шум для получения высокой вероятности обнаружения существующей границы и низкой вероятности выделения ложной границы.

Выделение границ методом Кенни включает: а) подавление шумов; б) нахождение частных производных вдоль строк и столбцов фрагмента изображения внутри скользящей окрестности; в) вычисление модуля горизонтального градиента и подавление его немаксимальных значений; г) применение двух порогов – верхнего  $T_h$  и нижнего  $T_r$ , используемых следующим образом: каждый пиксель изображения, имеющий значение выше  $T_h$ , помечается как граничная точка. Затем каждый пиксель, соединенный с

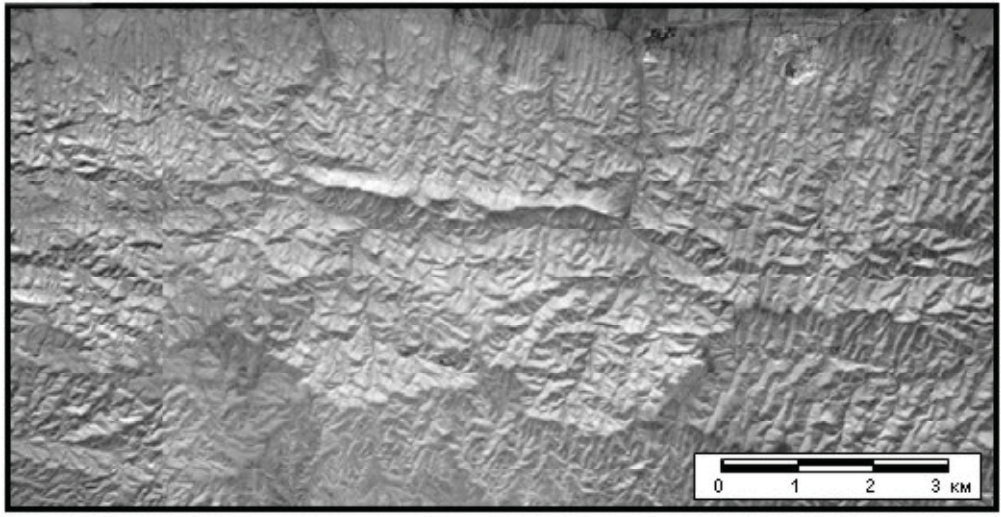


a

б



а



б

Рис. 2. Геологические карты (а, в) и космические снимки (б, г) площадей 1 и 2

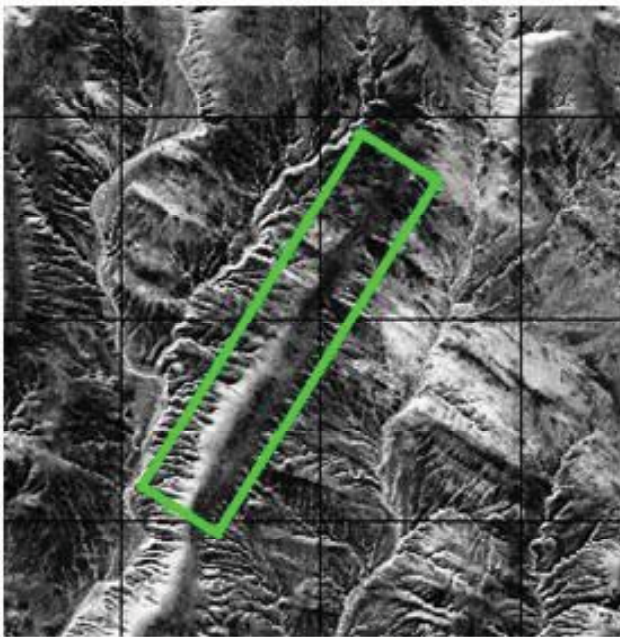


Рис. 3. Пример линейного элемента КС, не имеющего четких границ

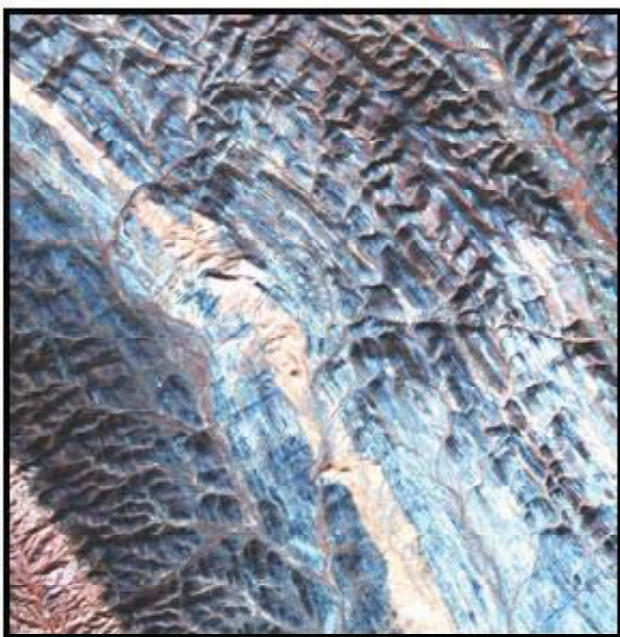
ним и имеющий значение больше  $T_r$ , также помечается граничным. Цепочка таких операций продолжается до тех пор, пока значение пикселя не становится ниже  $T_r$ . Если же на всем фрагменте нет точек со значением, большим верхнего порога, то фрагмент исключается из дальнейшей обработки. Обычно значения  $T_r$  и  $T_h$  рассчитываются для всего изображения по его гистограмме. Однако исследования показали, что наличие на КС областей с большими перепадами яркости приводит к неравномерному выделению границ по площади. Поэтому авторами предложено адаптировать оператор

Кенни к свойствам отдельных областей изображения путем вычисления значений верхнего и нижнего порогов не для всего изображения, а для его отдельных фрагментов, ограниченных окрестностью квадратной формы [11, 12].

2. Затем полученное изображение с выделенными границами яркости в автоматическом режиме сканируется с шагом в  $1^\circ$  в направлениях от 0 до  $359^\circ$ . Вдоль направлений сканирования выделяются штрихи – спрямленные участки границ длиной 5–7 пикселей снимка (рис. 4). Обычно подобные элементы соответствуют мелким дизъюнктивным нарушениям и частям более крупных разломов. Известно, например, что крупные наклонные разломы на поверхности обычно проявляются в виде зон рассеянных штрихов [9].

Предложенный подход к выделению штрихов, основанный на построении границ с последующим выделением их произвольно ориентированных линейных частей, выгодно отличается от используемого в известной системе линеamentного анализа LESSA [13–15], в котором штрихи выделяются применением маски прямолинейного ступенчатого края, развернутого в одном из 8 фиксированных направлений.

3. С помощью метода Хафа (Hough) [16] строится схема распределения сквозных линеamentов, прослеживающихся на всем анализируемом снимке или его большей части. Для этого изображение с нанесенными штрихами сканируется во всех направлениях с шагом в  $1^\circ$  и подсчитывается суммарная длина штрихов вдоль направлений сканирования. В сквозные



а



б



Рис. 4. Линеamentы (б), выделенные на фрагменте снимка (а)

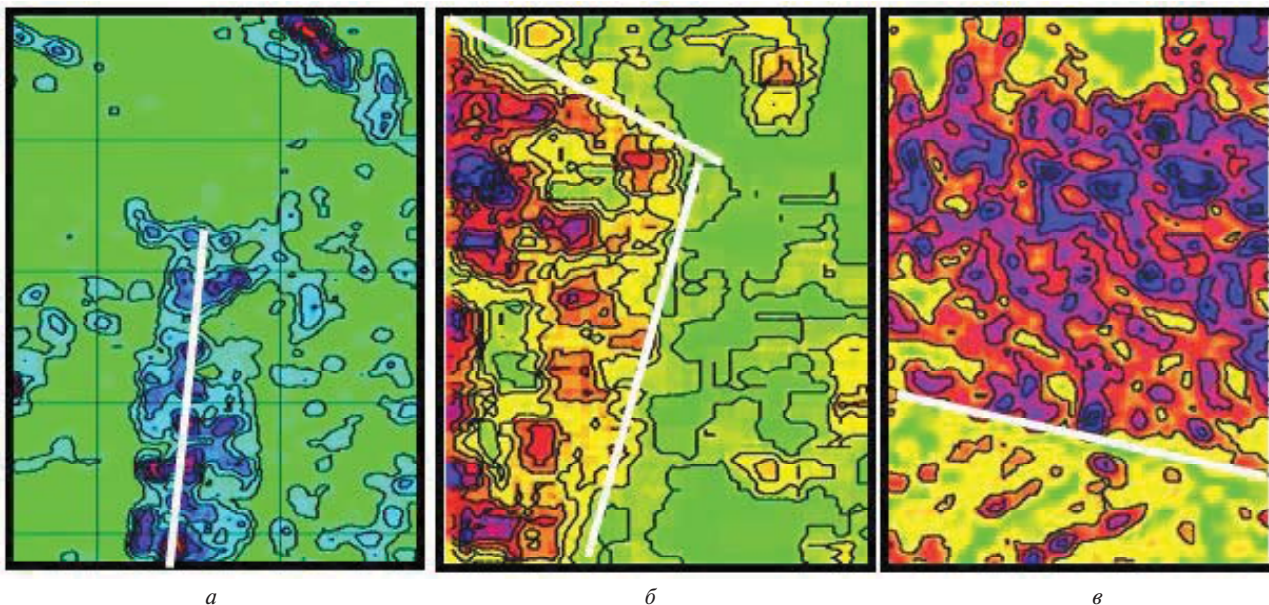


Рис. 5. Примеры выделения осей линеаментных зон на картах характеристик сети линеаментов

линеаменты объединяются штрихи, расположенные вдоль линий, для которых выполняется условие  $L_{\text{ш}}/L_{\text{общ}} \geq T$ , где  $L_{\text{общ}}$  — общая длина линии данного направления в пределах исследуемого участка;  $L_{\text{ш}}$  — общая длина штрихов вдоль данной линии;  $T$  — задаваемый интерпретатором порог (изменяется от 0 до 1), регулирующий количество выделяемых сквозных линеаментов.

Поскольку линейные объекты геологического происхождения подвержены смещениям в горизонтальной плоскости и в той или иной степени перекрыты наносами, соответствующие им границы яркости на КС высокого разрешения обычно не являются идеально прямыми и варьируют в пределах нескольких пикселей. Для устранения влияния вариаций используется модифицированный вариант метода Хафа, в котором сканирование происходит не вдоль линий толщиной в 1 пиксель исходного снимка, а вдоль полосы толщиной  $n$  пикселей, где число  $n$  подбирается пользователем эмпирически — чем существенней вариации и выше разрешение КС, тем большие значения  $n$  необходимо выбирать.

4. В скользящей окрестности рассчитываются специальные характеристики линеаментной сети. В качестве линеаментной сети могут использоваться как выделенные штрихи, так и сквозные линеаменты. Среди рассчитываемых характеристик — плотность штрихов и сквозных линеаментов на единицу площади (включая плотность линеаментов отдельных направлений), количество пересечений штрихов и линеаментов различных направлений в скользящей окрестности, их средняя длина, количество направлений и преобладающий азимут, анизотропия линеаментной сети и др. [11, 12]. В результате

строится серия карт изолиний характеристик, отражающих структурную ситуацию на исследуемой площади.

5. На созданных картах выделяются линеаментные зоны. К ним относятся: а) узкие вытянутые аномалии рассчитанных характеристик (с соотношением средней длины и ширины более пяти); 2) цепочки аномалий произвольной формы и знака (рис. 5, а); 3) прямолинейные границы крупных участков с существенно различающимися значениями характеристик линеаментной сети или же с различным поведением изолиний этих характеристик (рис. 5, б, в).

Для повышения надежности выделения зоны, пространственно совпадающие на нескольких картах, объединяются, а имеющиеся только на какой-либо одной — не учитываются. Оси выделенных зон, будучи структурами более высокого иерархического уровня по сравнению с выделенными штрихами и сквозными линеаментами, не всегда совпадают как с ними, так и с известными разрывными нарушениями. Нам представляется, что оси отражают наиболее общие черты линеаментной сети как ее своеобразный скелет, связанный с блоковым строением земной коры. Кроме того, линеаментные оси могут быть обусловлены древними и глубинными разрывами, слабо проявленными на земной поверхности.

6. Создается схема расположения осей линеаментных зон, отражающая структурно-тектоническую ситуацию на изучаемом участке и строится роза-диаграмма, характеризующая распределение их азимутов. Для осей преобладающих направлений и их сочетаний строятся графики зависимости расстояний от количества осей, отстоящих друг от друга на соответствующие интервалы. Анализ чередования локальных

Расстояния между линеаменами различных рангов, м

Установленные авторами	По В. Немецу	По В.Г. Трифонову
	24900	25000
	12460	12000
6250	6230	6000
3100	3110	
1550	1560	
775	780	
385	390	

максимумов полученных графиков позволяет установить закономерности расположения линеаментов на изучаемой территории.

**Обсуждение результатов.** По описанной методике были построены и проанализированы схемы расположения осей линеаментных зон для обоих исследуемых участков (рис. 6, а; 7, а).

Для рудного поля 1 наблюдается достаточно хорошая пространственная согласованность осей линеаментных зон с известными геологическими границами и разломами. На рудном поле 2 совпадение разломных структур с линеаменами наблюдается лишь для направления  $90 \pm 10^\circ$  и, частично,  $0 \pm 10^\circ$ . Это может свидетельствовать о том, что линеаменты диагональных направлений ( $45 \pm 10^\circ$  и  $135 \pm 10^\circ$ ) представляют собой проявления глубинных разломов скрытого типа или иных структур, развитых в достаточно глубоких слоях коры и верхней мантии.

На рудном поле 1 исследовалась периодичность расположения осей линеаментных зон преобладающих направлений –  $0-90^\circ$  и  $45-135^\circ \pm 10^\circ$  (см. рис. 6, б-г). Для этого перпендикулярно осям каждого из указанных направлений в автоматическом режиме проводились линии с заданным шагом и измерялись все расстояния вдоль линий от одного линеамента до другого. После этого строились графики распределения расстояний между линеаменами.

Анализ графиков расстояний между осями зон указанных направлений (см. рис. 6, в) показал, что на изучаемой территории большинство осей отстоят друг от друга на один из следующих интервалов:  $6250 \pm 250$  м;  $3100 \pm 100$  м;  $1550 \pm 50$  м;  $775 \pm 25$  м;  $385 \pm 10$  м. Найденные интервалы образуют ряд, в котором все последующие значения относятся к предыдущим, как 1:2, и представляют собой расстояния между зонами линеаментов разных порядков (иерархических уровней). Аналогичные результаты получены на рудном поле 2 (см. рис. 7, в, г). Характерно, что для осей направлений  $0-90^\circ$  и  $45-135^\circ \pm 10^\circ$  преобладающие интервалы остаются практически одинаковыми.

Таким образом, для двух рудных полей, расположенных друг от друга на расстоянии более 500 км (см. рис. 1), а также имеющих различные вещественный состав и геологическое строение, выделены одинаковые преобладающие расстоя-

ния между осями зон линеаментов соответствующих порядков. По-видимому, это обстоятельство свидетельствует о существовании некоторого единого фактора, повлиявшего на формирование структурно-тектонического строения Туранской плиты [17].

Интересно отметить, что найденные авторами статьи значения интервалов между линеаменами весьма сходны с соответствующими значениями, полученными по формуле, предложенной в 1970-х годах известным чешским ученым В. Немецом [7]:

$$y_x = 2^{-x} D,$$

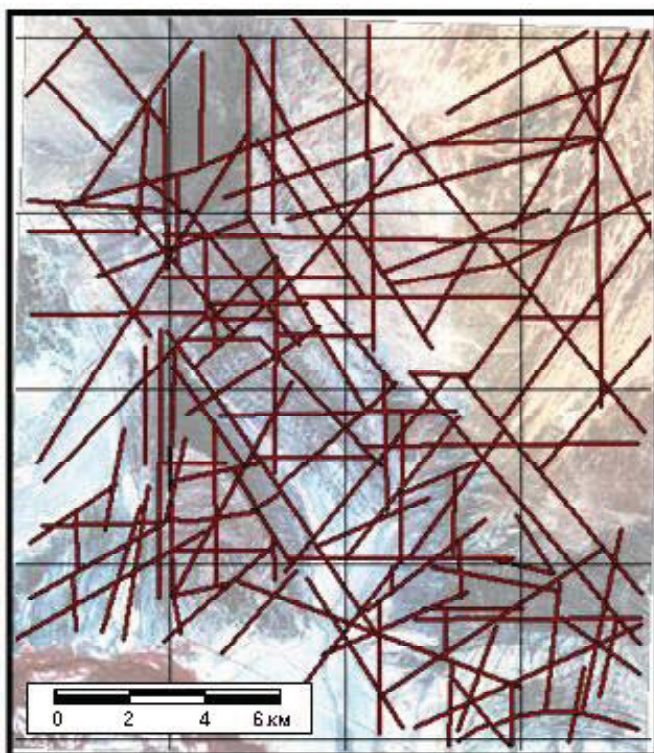
где  $y_x$  – расстояние между структурами одного порядка;  $x$  – порядок структуры;  $D$  – диаметр Земли.

Для структур порядков  $x = 11...15$ , выделенных в пределах изучаемых рудных полей, соответствующие значения  $y_x$  равны 6229, 3114, 1557, 779 и 389 м. Среднее отклонение найденных расстояний от расчетных составило 12 м (менее 1 %).

Также полученные результаты подтверждают выводы, сделанные ранее по результатам изучения мелкомасштабных КС Туранской плиты [18], в границах которой находятся оба рудных поля. В работе приведена серия преобладающих интервалов между линеаменами – 6, 12, 25, 50, 100, 200, 400 км. Отметим, что эти значения также соответствуют вычисленным по формуле В.Немеца и являются продолжением ряда, найденного авторами настоящей работы по снимкам высокого разрешения (см. таблицу).

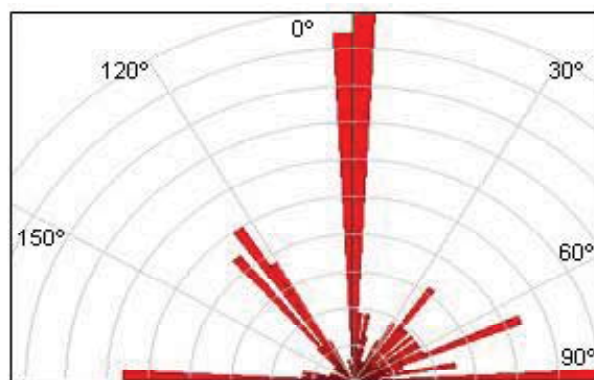
**Заключение.** В результате применения описанной в работе методики линеаментного анализа построены линеаментные сети изучаемых рудных полей и установлены закономерные интервалы чередования осей крупных линеаментных зон. Таким образом:

- разработанная новая методика линеаментного анализа позволяет выделять линейные объекты, не обнаруживаемые непосредственно на исходных КС;
- использование в качестве анализируемых данных осей линеаментных зон вместо штрихов или сквозных линеаментов дает возможность более полно извлекать содержащуюся на КС информацию о структурно-тектоническом строении территорий;

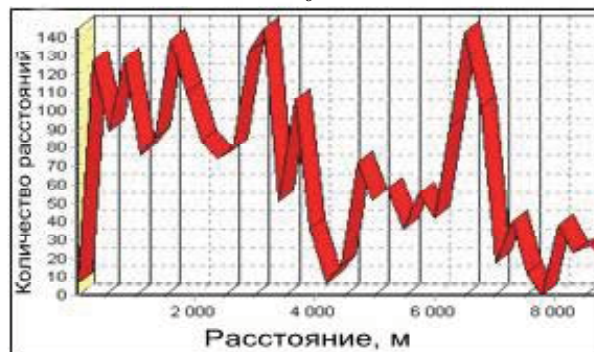


— Оси линейных зон

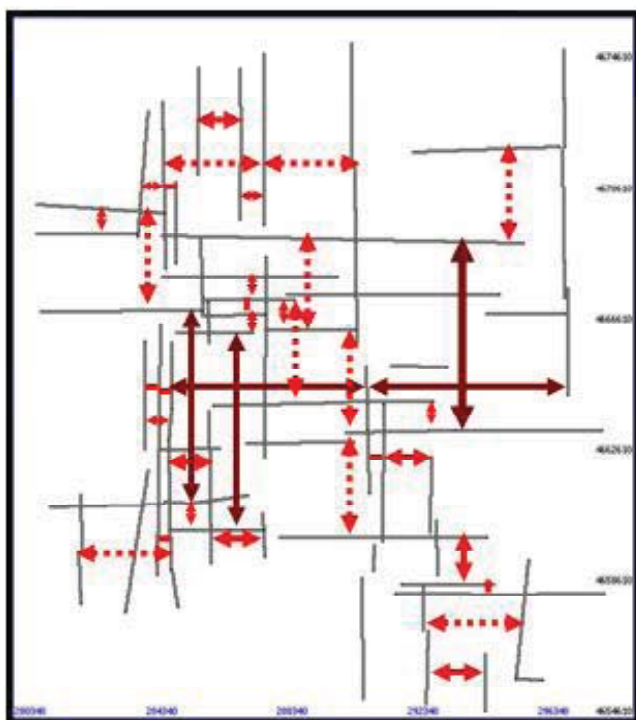
*a*



*b*

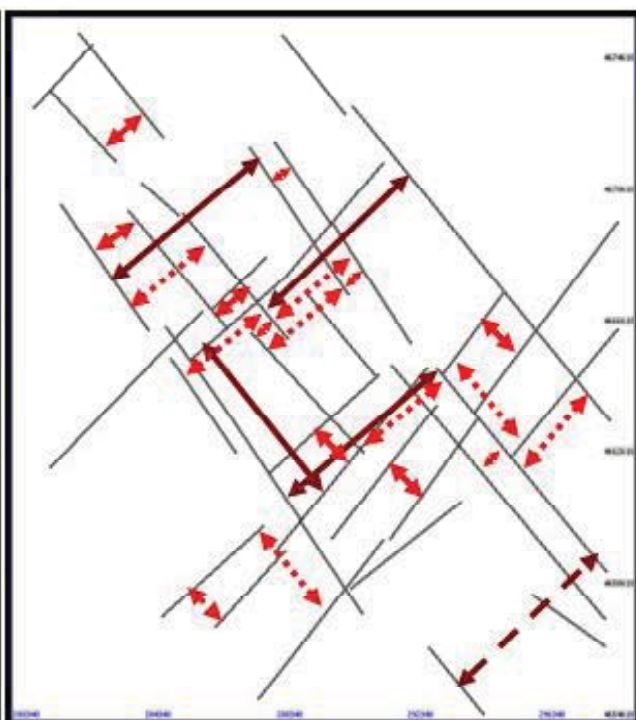


*c*



— Оси линейных зон

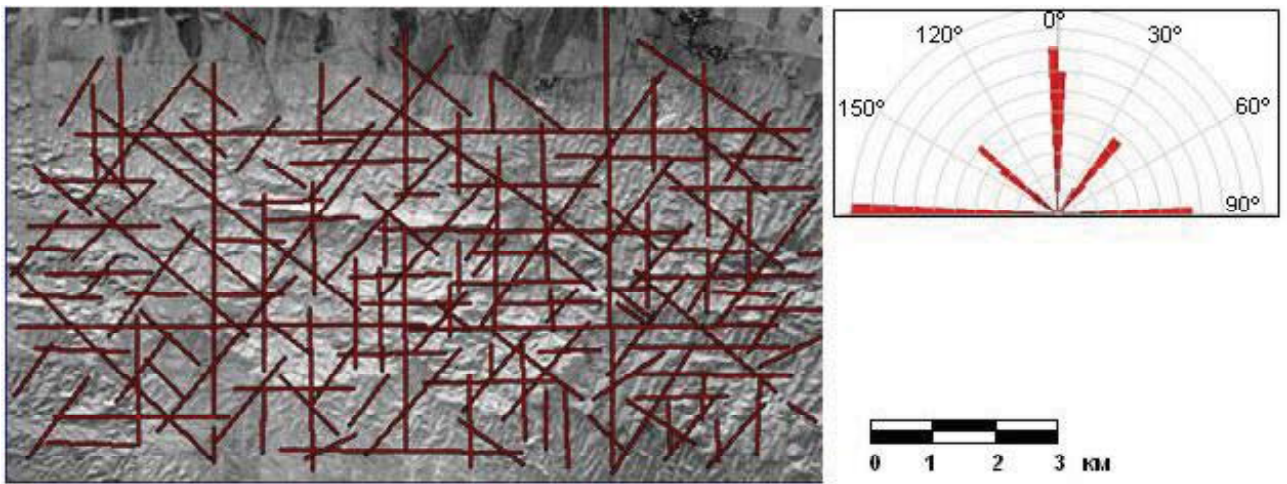
*e*



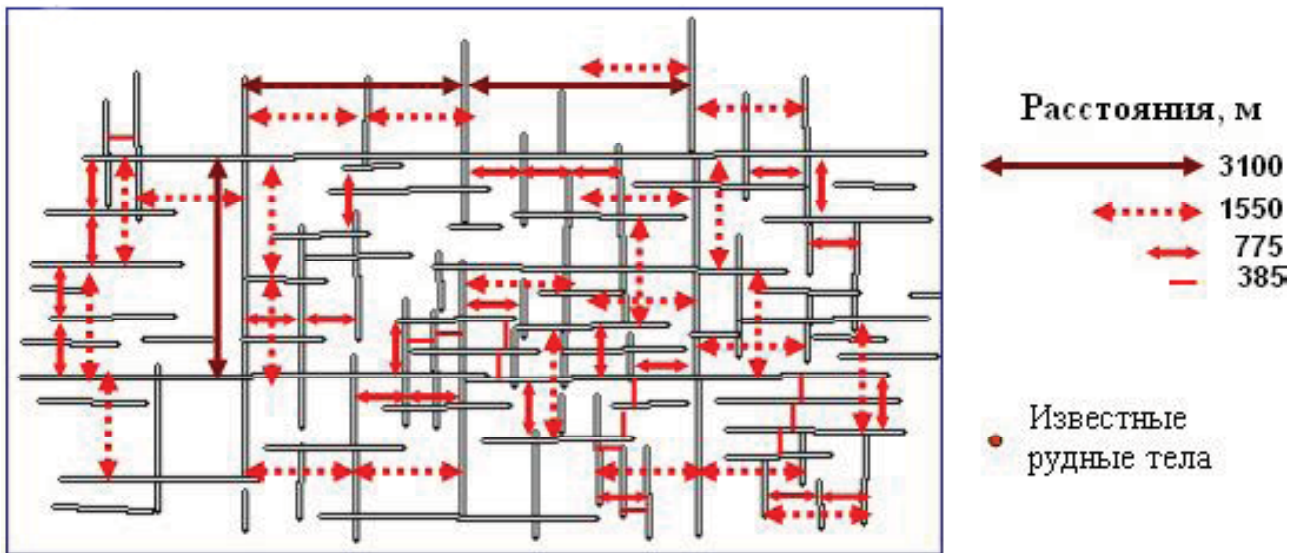
*d*



Рис. 6. Оси линейных зон (*a*), роза-диаграмма их азимутов (*b*), график расстояний для осей с азимутами  $0-90^{\circ} \pm 10^{\circ}$  (*c*) и схемы расположения осей с азимутами  $0-90^{\circ}$  (*e*) и  $45-135^{\circ}$  (*d*) для рудного поля 1



a



b



c

Рис. 7. Оси линейных зон (a), роза-диаграмма их азимутов (б) и схемы расположения осей с азимутами 0–90° (в) и 45–135° (г) для рудного поля 2



- установлено, что линеаментные зоны одного иерархического уровня располагаются друг от друга на практически равных расстояниях. При этом выявленная закономерность наблюдается в районах с различным геологическим строением.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в выявлении возможностей прогнозирования рудной минерализации на основе объективно существующей закономерности чередования линеаментов в предположении, что существует некая приуроченность рудных объектов к линеаментным зонам разных иерархических уровней. Кроме того, весьма перспективным представляется подход, основанный на совместном использовании характеристик линеаментной сети и полевых геолого-геофизических материалов. Интегрированный анализ соответствующих разнородных и разноуровневых геоданных [19] может существенно повысить качество и достоверность прогноза.

1. Андросова Н.К., Моралев В.М., Шеремет О.Г. Оценка достоверности прогнозирования эндогенного оруденения на основе космогеологической информации (на примере п-ва Камчатка) // Исследования Земли из космоса. — 1992. — № 4. — С. 82–91.
2. Миловский Г.А., Денисова Е.А., Ежов Л.Л., Каленкович Н.С. Прогнозирование оруденения на Сось-Харбейской площади (Полярный Урал) по космогеологическим данным // Там же. — 2007. — № 6. — С. 29–36.
3. Миловский Г.А., Бугарь В.Д., Деревянко И.В. Крупномасштабное прогнозирование оруденения и нефтегазозности на Приполярном Урале // Там же. — 2004. — № 4. — С. 73–81.
4. Моралев В.М., Пржиялговский Е.С., Шеремет О.Г. Цифровая обработка линеаментной сети, выявленной по космическим снимкам, и прогноз золотой минерализации в системе зеленокаменных поясов // Там же. — 1995. — № 4. — С. 45–57.
5. Kutina J., Pokorný J., Veselá M. Empirical prospecting net based on the regularity distribution of the veins with application to the Jihlava mining district, Czechoslovakia // Econ. Geology. — 1967. — № 62. — P. 390–405.
6. Кутина Я. Применение принципа равных расстояний при поисках рудных жил // Геология и геохимия руд. м-ний (Тр. XXII МГК). — М.: Мир, 1971. — С. 109–118.
7. Nemeč V., Kvet R. The Hierarchy of Equidistances in the Planetary Equidistant Rupture Systems // Proceed. the 2<sup>nd</sup> Int. conf. on Basement Tectonics. — Newark; Delaware, USA, 1976. — P. 371–374.
8. Zhdanovich A.R., Aketayev Z.E., Uteuliyev T.S. Regularities of distribution of tectonic lineaments and faults in morphostructure of northern Tien Shan and Dzhungariya // Geodynamics and environmental problems of high-mountain regions in XXI century. — Bishkek, Kyrgyzstan, 2005.
9. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исследования Земли из космоса. — 2007. — № 1. — С. 47–56.
10. Pratt W. Digital image processing. — 3 ed. — Wiley, 2001. — 366 p.
11. Busygin B., Nikulin S. The integrated analysis of geological-geophysical and remote sensing data at the gold prospecting in Western Uzbekistan // 67-rd EAGE conf.: Extended Abstracts. Vol. 1. — Madrid, Spain., June, 2005.
12. Бусыгин Б.С., Никулин С.Л., Бойко В.А. ГИС-технология поисков золота в Западном Узбекистане // Геоинформатика. — 2006. — №1. — С. 44–49.
13. Короновский Н.В., Златопольский А.А., Иванченко Г.Н. Автоматизированное дешифрирование космических снимков с целью структурного анализа // Исследования Земли из космоса. — 1986. — № 1. — С. 111–118.
14. Zlatopolsky A.A. Texture orientation description of remote sensing data using LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) // Computers & Geosci. — 1997. — 23, № 1. — P. 45–62.
15. Malkin B.V., Zlatopolsky A.A. Southern Angola lineament tectonics features analysis via Image Processing (LESSA) IGC. — Florence, 2004. — P. 199–42.
16. Duda R., Hart P. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures // Communications of the ACM. — 1972. — 15/1. — 1972. — P. 11–15.
17. Иванов В.А., Поletaев А.И. Опыт линеаментного и палеотектонического анализов размещения бокситовых месторождений (на примере северной части Туранской плиты) // Изв. вузов. Геология и разведка. — 1988. № 1. — С. 131–136.
18. Космическая информация в геологии / Под ред. В.Г. Трифонова, В.И. Макарова, Ю.Г. Сафонова, П.В. Флоренского. — М.: Наука, 1983. — 370 с.
19. Пивняк Г.Г., Бусыгин Б.С., Никулин С.Л. ГИС-технология интегрированного анализа разнородных и разноуровневых геоданных // Доп. НАН України. — 2007. — № 6. — С. 121–128.

Поступила в редакцию 22.02.2008 г.