

УДК 553.3/9: 528.8

## Использование линеаментного анализа космических снимков для прогнозирования рудных объектов в пределах Восточно-Африканского рифта

Б. С. Бусыгин\*, С. Л. Никулин

*Национальный горный университет (НГУ), Днепрпетровск, Украина*

На примере части территории Восточно-Африканской рифтовой зоны выполнен прогноз рудных объектов на основе использования материалов линеаментного анализа космических снимков Landsat 8 и SRTM.

Установлено, что повышения качества прогнозирования можно добиться путём изучения не собственно линеаментов, а их деформаций — разрывов, резких перегибов, разворотов относительно типичных для всей земной поверхности направлений простирания (0, 45, 90, 135 градусов).

Показано, что карты, отражающие пространственную концентрацию деформаций линеаментов, могут успешно использоваться при геологическом прогнозировании методами Data Mining.

**Ключевые слова:** линеаментный анализ, космические снимки, геологическое прогнозирование, многомерное ранжирование, Восточно-Африканский рифт

© Б. С. Бусыгин, С. Л. Никулин. 2016

### Введение

Активное развитие методов изучения геологического строения Земли из космоса открыло новые перспективы в области прогноза и поисков месторождений полезных ископаемых. Связаны они, в первую очередь, с возможностью оперативного изучения тектонического строения территорий и неотектонических движений по материалам спутниковых съемок, в предположении о влиянии глубинных процессов на компоненты ландшафта [9–10].

Одним из динамично развивающихся направлений исследований является анализ линейных элементов (линеаментов), выделяемых на космоснимках. Им соответствуют прямолинейные структуры рельефа, гидрографической сети и др., которые, в свою очередь, обычно связывают с особенностями строения земной коры — геологическими границами, разрывами и сетями трещиноватости. Практически всеми исследователями признано, что линеаменты существуют повсеместно на земной поверхности и образуют сети, укладываясь в некоторое количество (обычно 4, иногда больше) систем определённого азимута [1, 4, 6, 11 и др.]. В подавляющем большинстве случаев наиболее чётко проявляются линеаменты с азимутами 0, 45, 90, 135 градусов, которые формируют глобальную сеть [4].

Несмотря на то, что применению методов линеаментного анализа в задачах прогноза и поисков месторождений посвящено значительное количество работ, используемый в них методический подход сводится обычно к выявлению зон повышенной

концентрации линеаментов (всех, либо принадлежащих какой-либо системе), к которым, как полагают [3, 7, 12 и др.], приурочены залежи полезных ископаемых. В некоторых случаях это является справедливым, в особенности, когда рудные месторождения находятся геологически открытых районах и тесно связаны с активными разломами, чётко проявляемыми на снимках. В таких условиях повышенное количество выделяемых разломов действительно может рассматриваться как индикатор оруденения. Однако в целом данный подход представляется неверным. В литературе неоднократно подчёркивалось (и практический опыт авторов данной публикации это подтверждает), что линеаменты существуют повсеместно, а степень их проявленности на снимках зависит от факторов, которые могут рассматриваться как помехи, — степень антропогенного воздействия, характер растительности и, в первую очередь, мощность осадочного чехла. В результате, строящиеся исследователями (обычно в автоматическом режиме) карты концентрации линеаментов, существенно коррелируют с мощностью осадочного чехла и зависят от других ландшафтных характеристик, слабо связанных с процессами образования месторождений полезных ископаемых.

Представляется, что теория и практика линеаментного анализа космических снимков в настоящее время продолжает пребывать в стадии становления, что, в совокупности с объективным характером их взаимосвязи с геологическим строением, открывает широкое поле для новых исследований. Описание одного из них приводится в данной работе.

\* busyginb@yandex.ru

## Участок исследований и исходные данные

Целью проведенных работ было изучение характера пространственной взаимосвязи сети линеаментов и жильных рудных образований. При этом изучались и сравнивались разнообразные характеристики линеаментной сети с целью выделения таких, для которых указанная взаимосвязь была бы наиболее тесной. Для исследований использовались только материалы космических съемок, без привлечения данных геофизических съемок, материалы которых являются более дорогостоящими по сравнению с космическими снимками соответствующего масштаба и далеко не всегда доступны для изучения.

Исследования проведены на нескольких участках, в пределах которых установлены разнообразные проявления рудных ископаемых. Методика и результаты данных исследований базируются на примере участка площадью 2 500 км<sup>2</sup>, находящегося на территории Демократической республики Конго, в районе озера Киву. Восточная и центральная часть участка расположена в пределах Восточно-Африканской рифтовой долины; западная — является окраиной впадины Конго. Исследуемая территория сложена геологическими образованиями палео- и мезопротерозойского возраста, с вкраплениями пород неопротерозоя и частично перекрыта неогеновыми отложениями. Здесь разведано несколько десятков месторождений олова, ниобия, тантала, вольфрама, золота, железа, а также залежи турмалина. Наибольшую промышленную ценность представляют залежи олова (касситерит), а также ниобий-танталовые (колтан) руды, которые обнаружены как в аллювиальных отложениях, так и в коренном залегании (жильных пегматитах протерозоя) [13].

Исследования проводились в среде геоинформационной системы РАПИД [5]. Исходными данными послужили мультиспектральные снимки Landsat 8 (рис. 1), а также материалы SRTM. Координаты известных месторождений приведены по данным Интернет-сервиса IPIS (<http://ipisresearch.be/mapping/webmapping/drcongo>).

## Методика и результаты исследований

Вначале исходные снимки подвергали предварительной обработке — эквализации гистограмм, повышению контрастности и др. Далее на снимках в интерактивном режиме дешифрировали линеаменты и кольцевые структуры. Выделено 3 059 линеаментов и 502 кольцевых (дуговых) структур разного размера, степени сохранности и проявленности (рис. 2).

Далее, по результатам расчетов для всей совокупности линеаментов, а также для их отдельных систем строились карты, отражающие ряд характери-

стик: концентрацию (плотность) линеаментов в скользящих окнах разных размеров (300 × 300 м, 600 × 600 м, 900 × 900 м), количество встречающихся внутри окна азимутов линеаментов, различные соотношения между концентрациями линейных объектов разного азимута, концентрации точек пересечения разнонаправленных линеаментов и др. Для карты каждой из характеристик оценивался процент месторождений, попадающий в зоны её повышенных значений. Под повышенными значениями в данной работе понимаются превышающие 0, при условии, что все значения карты предварительно нормированы на удвоенный размах с последующим центрированием. Для этого каждое исходное значение  $X$  заменяется на

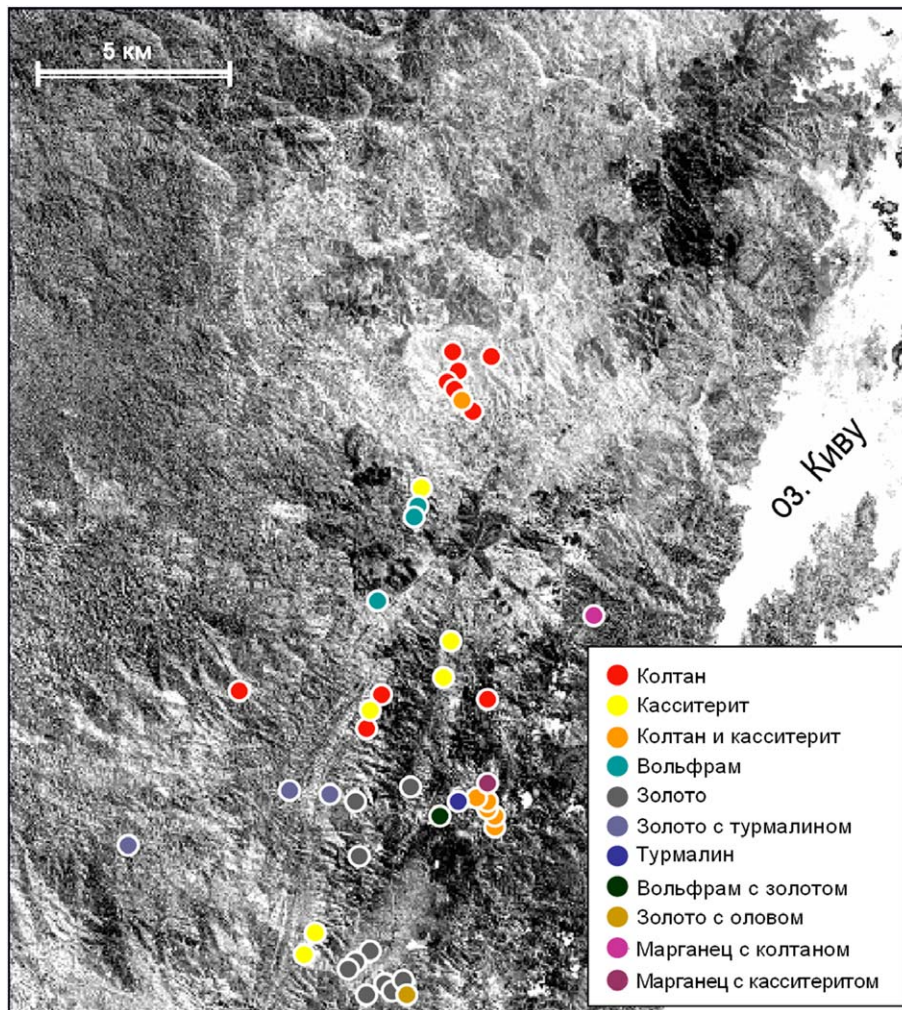
$$X' = 2 * (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) - 1$$

где  $X_{\min}$  и  $X_{\max}$  — соответственно, минимальное и максимальное значения данной карты.

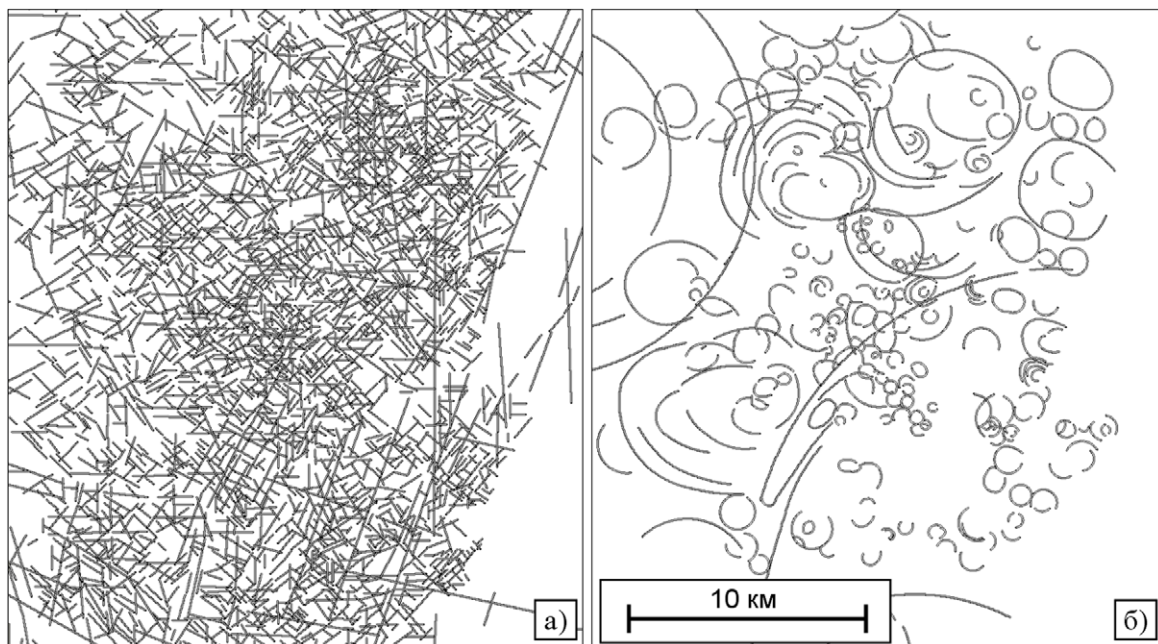
В при изучении карт линеаментной сети выявлен ряд закономерностей (которые справедливы и для ряда других участков земной коры, на которых авторами проводились соответствующие исследования). Как и на большей части земной поверхности, на изучаемом участке преобладают линеаменты двух ортогональных систем с азимутами 0/90 и 45/135 градусов. Так, из 3 059 линеаментов, выделенных в интерактивном режиме, 2 343 (77%) имеют азимуты в одном из диапазонов  $0 \pm 11.25^\circ$ ,  $90 \pm 11.25^\circ$ ,  $45 \pm 11.25^\circ$  или  $135 \pm 11.25^\circ$ . Константа  $11.25^\circ$  вычисляется как отношения  $180^\circ/16$  (рис. 3). Однако карта концентрации (плотности) 716-ти (23%) линеаментов, не попадающих в указанные диапазоны, за некоторыми исключениями, значительно лучше отражает пространственную взаимосвязь с известными месторождениями по сравнению с картой концентрации всех линеаментов (рис. 4). Так, на ней значительно меньше аномальных зон, которым не соответствуют известные месторождения, при том, что количество месторождений, приуроченных к положительным аномалиям, практически неизменно на обеих картах.

Вероятно, это связано с тем, что системы с азимутами 0, 45, 90 и 135 градусов формируют глобальную сеть, связанную с процессами планетарного масштаба [2, 4]. Образование же рудных залежей обусловлено локальными тектоническими процессами, проявляющимися на земной поверхности в виде линеаментов, которые имеют ориентировку отличную от глобальной.

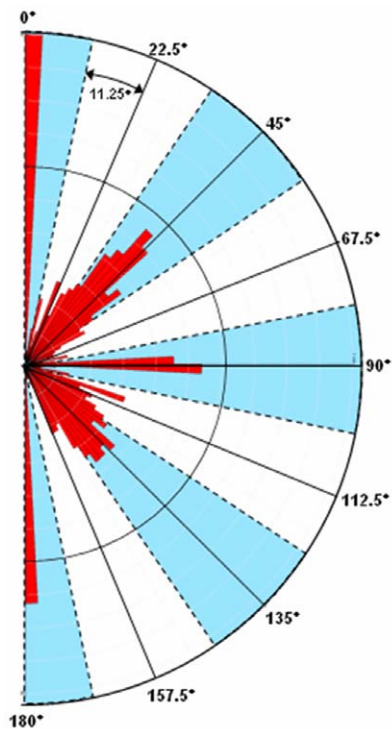
Более того, принимая во внимание повсеместный характер линеаментной сети, несложно сделать вывод, что сама по себе её проявленность на изучаемом участке не может свидетельствовать о наличии или отсутствии месторождений. Более интересным представляется изучение деформаций “нормальной” сети, которые связаны с локальными процессами. “Развёрнутость” линеаментов по отно-



**Рис. 1.** Космический снимок исследуемой территории (Landsat 8, канал 5 с пространственным разрешением 30 м) и расположение известных месторождений



**Рис. 2.** Схема линейных (а) и кольцевых (дуговых) (б) структур



**Рис. 3.** Роза-діаграма розподілу азимутів лінеаментів. Синім отмечены азимуты, характерные для глобальной сети лінеаментів

шенню к азимутам 0, 45, 90 и 135 градусів являється одним из проявлєний этих деформаций. Другим их проявлєнием следует считать наличие изломов и разрывов лінеаментов. Исходя из этих соображений, была построена карта концентрации точек разрывов и резких изменений простирания лінеаментов, не принадлежащих глобальной сети (рис. 5 а). На рисунке 5 б показана карта, представляющая сумму нормированных значений плотности лінеаментов и скопления точек их изломов и разрывов. Как видно, месторождения тяготеют к участкам повышенных значений. Это не только подтверждает явную связь между установленными нами особенностями сети лінеаментов и месторождениями, но и дает возможность использовать материалы лінеаментного анализа для целей поисков и прогноза рудных месторождений. Так, приведенные на рис. 4 и 5 карты можно использовать как прогнозные; при этом зоны повышенных значений их характеристик можно оценивать как перспективные участки, подлежащие более детальному изучению. Однако при этом неизбежно возникает вопрос выбора какой-то одной из полученных карт (“наилучшей”), либо их “механического” объединения (что также порождает вопрос выбора “наилучшего” способа объединения).

В связи с этим более плодотворным представляется другой подход к применению полученных материалов, когда они совместно используются в качестве исходных данных при формировании мно-

гомерного пространства описанного в процедурах Data Mining — эталонной классификации, ранжирования, кластеризации и т. п. В этом случае территория разбивается на совокупность элементарных участков, соответствующих пикселям исходного снимка; каждому пикселу ставится в соответствие вектор значений, взятых с рассчитанных карт [8]. В рамках этого подхода построенные на предыдущих этапах карты использованы в процедуре ранжирования пикселов снимка по мере сходства с объектами эталонного класса. Последние представляли собой пиксели, пространственно совпадающие с проекциями части известных месторождений (31-го из 44-х) на горизонтальную плоскость. Пиксели, соответствующие остальным месторождениям, использовались как контрольные объекты, которые не участвовали в вычислениях, а применялись только для оценки качества результатов.

Для расчєтов использованы следующие карты, полученные в результате применения методов лінеаментного анализа:

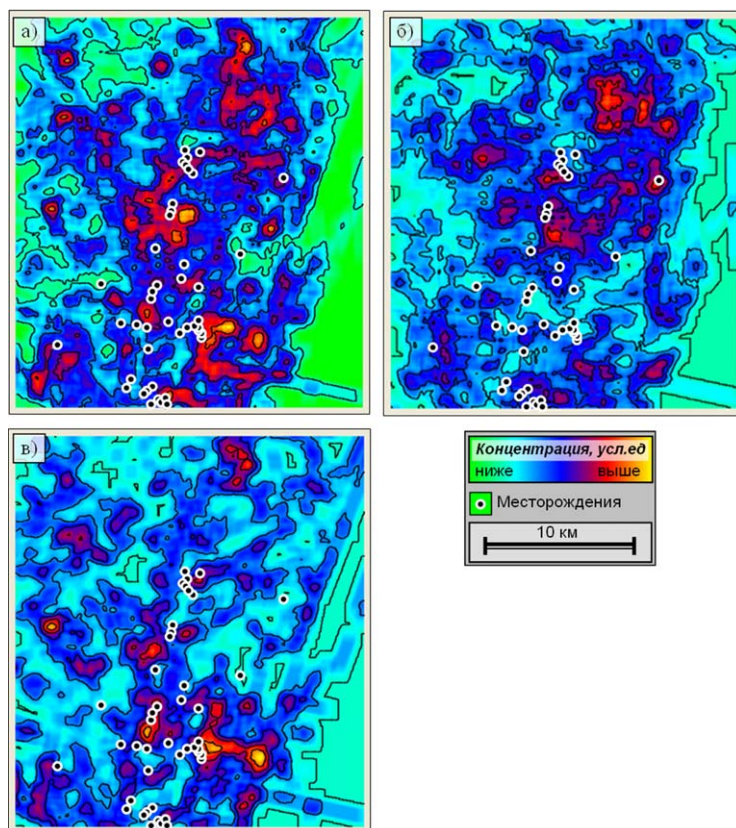
- концентрации кольцевых структур (рис. 5 в);
- концентрации точек пересечения кольцевых и линейных структур;
- концентрации всех лінеаментов;
- концентрации крупнейших лінеаментов;
- концентрации лінеаментов с азимутами, не характерными для глобальной сети;
- концентрации точек деформации всех лінеаментов;
- концентрации точек деформации лінеаментов с азимутами, не характерными для глобальной сети.

По результатам ранжирования получена карта, которая может рассматриваться как прогнозная, поскольку отражает перспективность обнаружения новых рудных объектов (рис. 6). Достоверность карты оценивалась с использованием 13-ти объектов контрольной выборки. Из них 12 попали в пределы участков, обладающих повышенными значениями сходства с эталонными, что позволяет оценить вероятность ошибки 2-го рода в 7.6%.

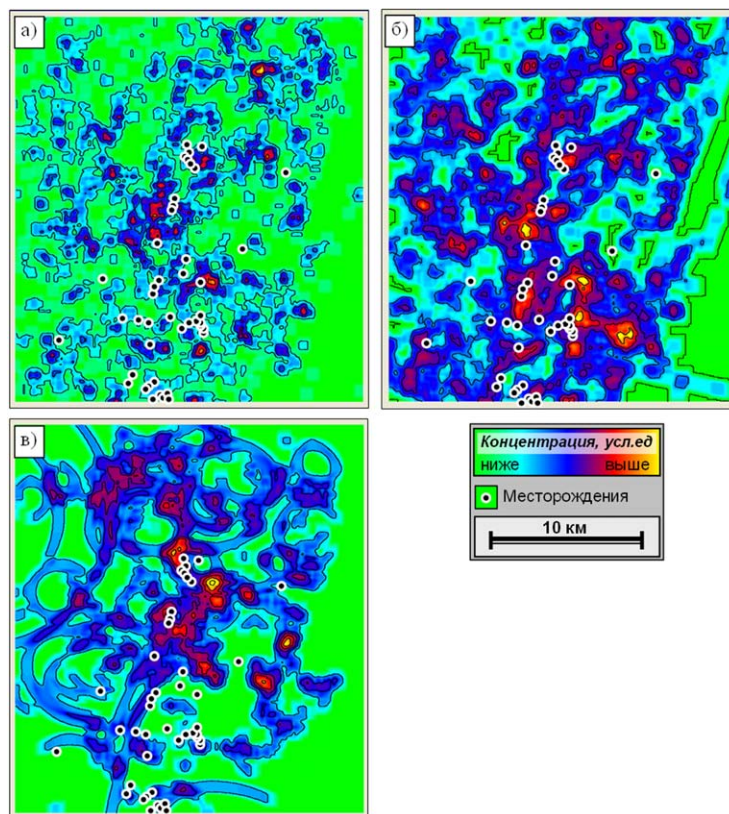
Ввиду отсутствия у авторов полевых материалов, позволяющих оценить вероятность ошибки 1-го рода, она оценивалась косвенно, путєм изучения распределения значений получаемых прогнозных карт (рис. 7). Подробнее этот вопрос рассмотрен ниже.

### Обсуждение результатов и выводы

1. При использовании для прогноза месторождений карты концентрации лінеаментов весьма высока вероятность ошибки 1-го рода, поскольку площадь, занимаемая участками с высокими значениями концентрации, достаточно значительна (рис. 4 а). Ошибку можно значительно снизить, используя в качестве прогнозной карту концентрации лінеаментов с азимутами, отличными от азимутів



**Рис. 4.** Карты концентрации всех линейментов (а), линейментов глобальной сети с азимутами  $0 \pm 11.25^\circ / 90 \pm 11.25^\circ$  и  $45 \pm 11.25^\circ / 135 \pm 11.25^\circ$  (б) и линейментов прочих азимутов (в)



**Рис. 5.** Карта концентрации точек изломов и обрывов линейментов с азимутами, отличными от  $0 \pm 11.25^\circ / 90 \pm 11.25^\circ$  и  $45 \pm 11.25^\circ / 5 \pm 11.25^\circ$  (а), её объединение с картой 3 в (б) и карта концентрации кольцевых структур

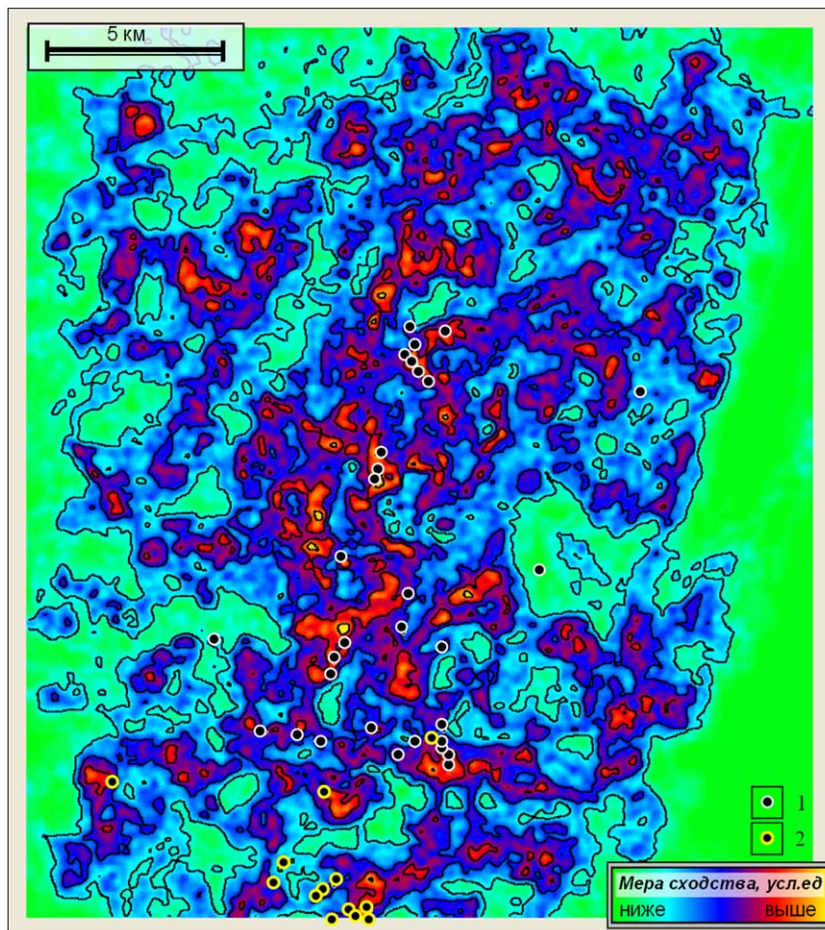


Рис. 6. Карта меры близости пикселей снимка по отношению к эталонным объектам (1 — центры объектов эталонной выборки; 2 — центры объектов контрольной выборки)

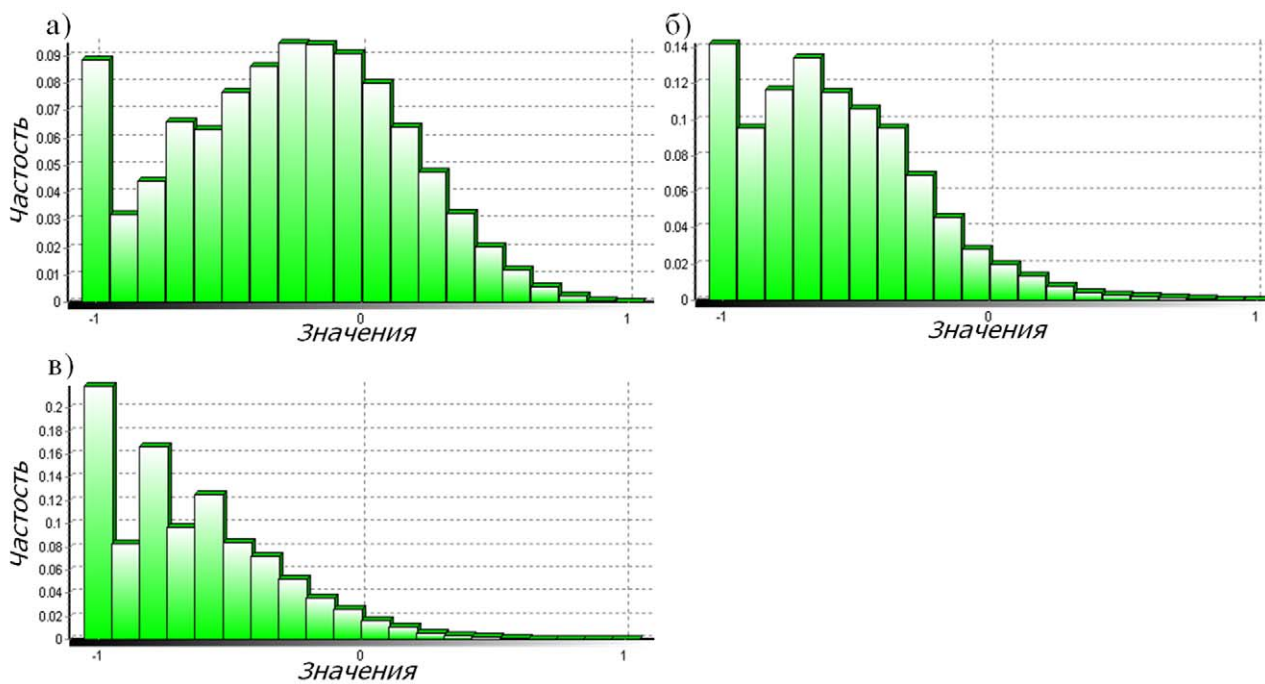


Рис. 7. Гистограммы нормированных значений карт концентрации: а) линейментов всех азимутов; б) линейментов с азимутами, не характерными для глобальной сети; в) деформаций линейментов с азимутами, не характерными для глобальной сети

глобальної мережі (0, 45, 90 і 135°). Як следует из рис. 7, если условно пороговое значение, разделяющее перспективные и неперспективные пиксели, принять за 0, то при использовании карты концентрации всех линеаментов почти 30% территории следует признать перспективной. В случае же использования карты, представленной на рис. 4 в, перспективными будут считаться менее 10% территории. При этом вероятность ошибки 2-го рода, исходя из анализа карт 4 а и 4 в, изменяется несущественно и составляет, соответственно, 13,6 и 15,9%.

2. Лучших результатов можно добиться путём построения карт концентрации не самих линеаментов, а точек их деформаций (рис. 5 а). При её использовании процент площади, относимой к перспективной, снижается до 5% (рис. 7 в), а ошибка 2-го рода остаётся на уровне 15–16%.

3. Наименьших ошибок 2-го рода можно избежать в том случае, если созданные карты различных характеристик линеаментной сети используются совместно для формирования признакового пространства в процедурах Data Mining. Так, в результате ранжирования территории по мере её сходства с эталонными объектами-месторождениями, ошибка 2-го рода, оцененная по контрольной выборке, составила 7,6% (рис. 6).

В целом, анализ полученных результатов подтверждает принципиальную возможность достаточно достоверной оценки перспективности территорий на основе использования результатов линеаментного анализа космических снимков, даже без привлечения материалов геофизических съёмок.

## Литература

1. Азімов О. Т. Дослідження диз'юнктивних дислокацій земної кори аерокосмічними методами (на прикладі регіонів України): автореф. дис... д-ра геол. наук / О. Т. Азімов. – К.: Ін-т геол. наук НАН України, 2008. – 37 с.
2. Анохин В. М. Опыт изучения закономерностей направленности и протяженности линеаментов и разломов в регионах / В. М. Анохин, Л. А. Маслов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. — Вып. № 1 (25). — С. 7–18.
3. Анохин В. М. Связь локальных нефтегазоносных структур Баренцевского шельфа с разрывными нарушениями / В. М. Анохин // Доклады Академии наук. — 1999. — Т. 368. — № 6. — С. 790–793.
4. Анохин В. М. Стрoение и происхождение глобальной дизъюнктивной сети Земли: дисс. на соиск. научн. степ. д-р. геол.-мин. наук 25.00.01/ В. М. Анохин. — СПб. — 2007. — 206 с.
5. Бусыгин Б. С. Специализированная геоинформационная система РАПИД: структура, технология, задачи / Б. С. Бусыгин, С. Л. Никулин // "Геоинформатика", Киев. — 2016. — № 1 (57). — С. 22–37.
6. Верховцев В. Г. Новітні платформні геоструктури України та динаміка їх розвитку: автореф. дис. на здоб. наук. ступ. докт. геол. наук / В. Г. Верховцев. — К.: Інститут геологічних наук НАН України, 2008— 36 с.
7. Корчуганова Н. И. Аэрокосмические методы в геологии / Н. И. Корчуганова / М.: Геокарт: ГЕОС, 2006. — 244 с.
8. Пивняк Г. Г. ГИС-технология интегрированного анализа разнородных и разноуровневых геоданных / Г. Г. Пивняк, Б. С. Бусыгин, С. Л. Никулин // Докл. НАН Украины. — 2007. — № 6. — С. 121–128
9. Принципы геоинформационного обеспечения задач дистанционного поиска полезных ископаемых / М. А. Попов [и др.] // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского, 2012. — Т. 25 (64). — № 1. — С. 77–190.
10. Спутниковые методы поиска полезных ископаемых / Под ред. акад. НАН Украины В. И. Лялько и докт. техн. наук М. А. Попова. Киев: Карбон-Лтд, 2012. — 436 с.
11. Ходоровский А. Я. Анализ зависимости количества выделяемых систем линеаментов от ширины интервала группирования / А. Я. Ходоровский, А. А. Апостолов // Доп. НАН України. — 2014. — № 9. — С. 79–85.
12. Crustal structures and mineral deposits: E.S.T. O'Driscoll's contribution to mineral exploration / Edited by J. A. Bourne & C.R.Twidale. — Australia: Rosenberg Publishing. — 2007. — 208 p.
13. de Wit, Maarten J. Geology and Resource Potential of the Congo Basin / Maarten J. de Wit. Francois. — Guillocheau. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. — 2015. — 445 с. — DOI 10.1007/978-3-642-29482-2

## ВИКОРИСТАННЯ ЛІНЕАМЕНТНОГО АНАЛІЗУ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РУДНИХ ОБ'ЄКТІВ У МЕЖАХ СХІДНО-АФРИКАНСЬКОГО РИФТУ

Б. С. Бусигін, С. Л. Нікулін

На прикладі частини території Східно-Африканської рифтової зони виконано прогноз рудних об'єктів на основі використання матеріалів лінеаментного аналізу космічних знімків Landsat 8 і SRTM.

Встановлено, що більш високої якості прогнозування можна домогтися шляхом вивчення не власне лінеаментів, а їхніх деформацій — розривів, різких перегинів, розворотів відносно до типових для всієї земної поверхні напрямків простягання (0, 45, 90, 135 градусів).

Показано, що карти, які відбивають просторову концентрацію деформацій лінеаментів, можуть успішно використовуватися при геологічному прогнозуванні методами Data Mining.

**Ключові слова:** лінеаментний аналіз, космічні знімки, геологічне прогнозування, багатомірне ранжирування, Східно-Африканський рифт

USING OF LINEAMENT ANALYSIS OF SATELLITE IMAGES FOR ORE OBJECTS FORECASTING WITHIN THE EAST AFRICAN RIFT

B. S. Busygin, S. L. Nikulin

In the work, on the example of the part of the East African Rift territory, the forecast of ore objects on the basis of lineament analysis of Landsat 8 and SRTM satellite images is executed.

It is identified that more quality prognoses can be achieved by studying not lineaments itself, but their deformations — gaps, intense bends, turns of the directions relatively 0, 45, 90, 135 degrees azimuths, which are typical for all terrestrial surface.

It is shown that maps reflecting spatial concentration of lineaments deformations can successfully be used for geological forecasting using Data mining methods.

**Keywords:** lineament analysis, satellite images, geological forecasting, multidimensional ranging, East African Rift