

УДК 528.8

© С.Л. Никулин, О.В. Коробко

## **АВТОМАТИЧЕСКИЙ И ИНТЕРАКТИВНЫЙ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ СЕТЕЙ ЛИНЕАМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ**

В работе проанализированы возможности, преимущества и недостатки автоматического и интерактивного выделения линеаментов на космических снимках, проведен сравнительный анализ результатов и дан ряд рекомендаций по выделению сетей линеаментов в интерактивном режиме.

У роботі проаналізовано можливості, переваги та недоліки автоматичного й інтерактивного виділення лінеаментів на космічних знімках, проведено порівняльний аналіз результатів і дано ряд рекомендацій по виділенню мереж лінеаментів в інтерактивному режимі.

The possibilities, advantages and disadvantages of automatic and interactive detection of lineaments on satellite images are analyzed. The comparative analysis of the results is carried out and recommendations for lineament networks interactive detection are given.

**Постановка и состояние проблемы.** Развитие космических технологий в сочетании с ростом вычислительных возможностей компьютерной техники сделали космические снимки важным источником данных для проведения геологических исследований. Стремительно возрастает роль линеаментного анализа, переживающего сейчас второе рождение. На фоне всеобщей автоматизации обработки геоданных особое внимание уделяется разработке методов, алгоритмов и систем автоматического выделения линеаментов. Появился целый ряд специализированных программных комплексов для работы с линеаментами – WinLessa [1], ALINA [2], Lineament [3], РАПИД [4]. Автоматическое выделение линеаментов (АВЛ) обычно базируется на предварительном обнаружении перепадов (границ) яркости исходного изображения, проводимом при помощи различных масочных алгоритмов, и последующем отборе протяженных линейных фрагментов этих границ.

Совершенствование методов АВЛ происходит на фоне снижения интереса к традиционному подходу к выделению линеаментов, выполняемому дешифровщиком вручную по подложке, в качестве которой используется анализируемый снимок. И хотя в настоящее время ручное выделение линеаментов реализуется на компьютере в интерактивном режиме, его суть остаётся прежней – решение о выделении или не выделении линеамента принимает человек.

**Цель работы** – анализ возможностей, преимущества и недостатков автоматического и интерактивного выделения линеаментов на космических снимках, с целью определения ряда рекомендаций по выделению сетей линеаментов в интерактивном режиме.

**Исходные данные и инструментарий исследований.** Для экспериментального исследования процесса и результатов автоматического выделения линеаментов использована наиболее известная и развитая система линеаментного анализа – WinLessa [1], разработанная под руководством А.А.Златопольского. В

настоящей работе приведен практический пример обработки демонстрационного снимка, поставляемого с WinLessa второй версии (рис. 1). Для сравнения обработка выполнялась как в режиме АВЛ, так и интерактивного выделения линеаментов (ИВЛ).

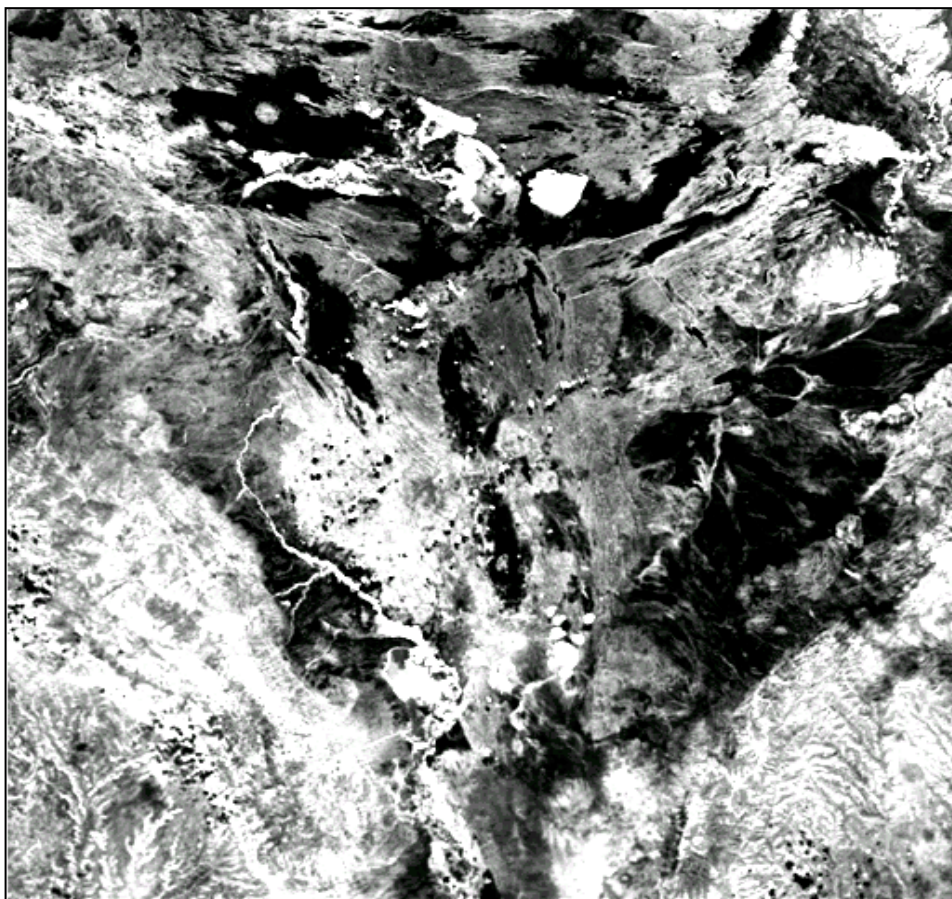


Рис. 1. Демонстрационный космический снимок, входящий в состав системы WinLessa 2

**АВЛ и ИВЛ, их преимущества и недостатки.** Декларируемые преимущества АВЛ – быстрота и простота выполнения операции, а также объективность получаемых результатов. При этом основные недостатки, которые традиционно приписываются ручному (или, в более современном варианте, - интерактивному) подходу – субъективизм и необходимость высокой квалификации дешифровщика (а, желательно, нескольких) для получения достоверных результатов.

Однако на практике автоматический подход обладает степенью субъективизма отнюдь не меньшей: специалист может влиять на результаты выделения линеаментов через выбор программного обеспечения, конкретного алгоритма, методов предварительной обработки снимка, разнообразных параметров и пороговых значений. Получаемые результаты могут разительно отличаться друг

от друга (рис. 2), причём отличия могут быть значительно больше, чем в случае интерактивного выделения линеаментов разными дешифровщиками.

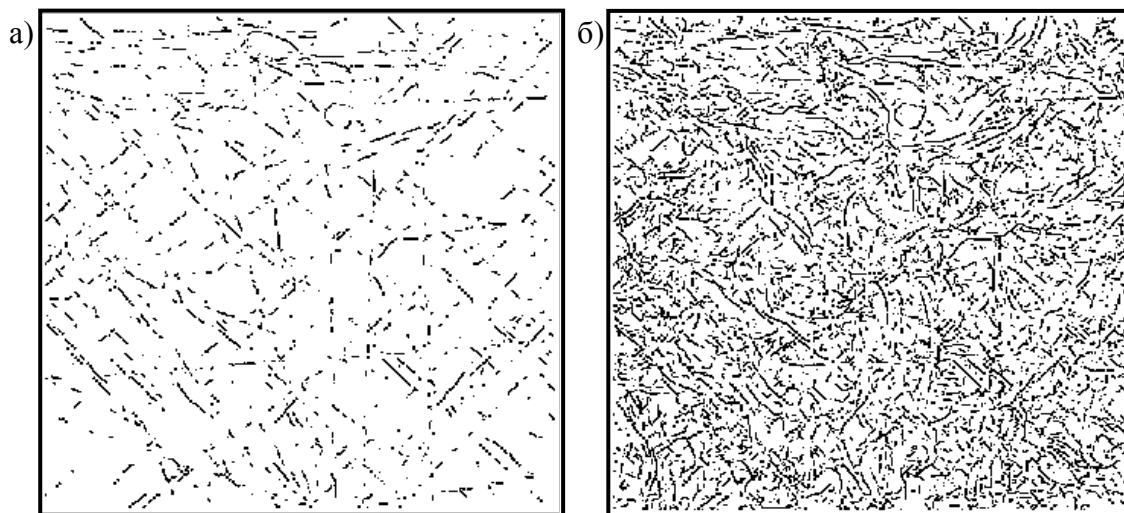


Рис. 2. Линеаменты, автоматически выделенные на снимке (рис. 1) системой WinLessa 2 при порогах 50 (а) и 20 (б)

В конечном счёте, автоматически выделенные линеаменты должны корректироваться в интерактивном режиме для устранения техногенных объектов и добавления линий, не выделенных компьютером, но при этом очевидных для человека. В итоге степень субъективизма при автоматическом выделении зачастую сравнима с присущей интерактивному подходу, а получаемые результаты, особенно в ситуации антропогенно-изменённых ландшафтов, менее адекватны реальной ситуации.

Существенным недостатком автоматического подхода является то, что он ориентирован на выделение отдельных линий, в то время как практически бесспорным является факт группировки их в системы, обладающие строгой выдержанностью по азимуту простирания и признаками эквидистантности [5, 6]. На практике линеаменты разных систем находятся во взаимодействии – они фрагментируют друг друга (очень часто с горизонтальными смещениями), проявляют себя как барьеры, ограничивающие простирание других линеаментов или сами упираются в линеаменты других систем. Эти часто проявляющиеся топологические свойства линеаментной сети никоим образом не используются современными методами и алгоритмами АВЛ, но легко могут быть учтены специалистом-геологом при работе в интерактивного режиме.

Современные методы автоматического выделения линеаментов (АВЛ) основаны на фиксации перепадов яркости снимка. Чем больше этот перепад, тем более уверенно выделяется линеамент. Соответственно, даже очень протяженный линеамент, которому соответствует слабый перепад яркости, может быть не зафиксирован в автоматическом режиме. На практике этому пытаются противостоять выбором низких пороговых значений выделения границ и предварительным контрастированием (либо увеличением резкости). Однако это ве-

дѣт к выделению значительного количества коротких границ, большинство из которых соответствуют мелким ландшафтным особенностям и не несут геологической информации.

Описанная проблема легко решается в интерактивном режиме опытным интерпретатором, поскольку распознающие способности человеческого мозга при работе с двумерными изображениями поистине огромны. Известно, что мозг обладает способностью отвечать на бесконечное множество состояний внешней среды конечным числом реакций. Это позволяет ему легко сводить разнообразные формы проявления линейных геологических и ландшафтных структур на снимке к простейшему графическому примитиву – линии.

Тот факт, что алгоритмы АВЛ основаны на выделении границ яркости, обуславливает и другую проблему. Глобальная сеть линеаментов (или близкая к ней по своей сути глобальная сеть трещиноватости), по мнению многих исследователей, существует повсеместно и достаточно близка к регулярной (хотя и нарушена позднейшими тектоническими дислокациями). Однако проявленность отдельных линеаментов зависит как от времени их последней активации, так и от интенсивности денудационных процессов. Даже небольшой линеамент, активный, например, в результате проявления современной сейсмичности, на снимке отражается более существенным перепадом яркости по сравнению с линеаментами даже самых высоких порядков, но переживавших последнюю тектоническую активацию в глубокой древности. Это приводит к тому, что АВЛ даёт геологически малосодержательную картину, выделяя, в первую очередь, линеаменты, по которым развивается овражно-балочная и гидрографическая системы. Таким образом, построенную сеть можно считать некоторой случайной реализацией истинной сети линеаментов.

ИВЛ позволяет использовать множество других критериев фиксации линеаментов кроме величины перепада яркости, и принимать во внимание, в том числе, границы зон с разным характером проявления того или иного явления или характеристики, текстурные особенности ландшафта, а также общие свойства линеаментной сети (например, её ячеистость), типичные топологические отношения между линеаментами разных направлений и многое другое.

На рисунке 3 приведены результаты построения линеаментной сети на тестовом участке с использованием АВЛ и ИВЛ. На рисунках (а-в) показаны линеаменты, выделенные при разных пороговых значениях. Очевидно, что выбор «наилучшего» из них сам по себе является серьёзной задачей, требующей определённой квалификации и привлечения субъективных суждений и представлений эксперта-интерпретатора.

Но ни один из представленных вариантов АВЛ не даёт той четкости и упорядоченности линеаментной сети, как приведенный на рис. 3г. Чем больше объектов выделяется методом АВЛ, тем более походит построенная линеаментная сеть на совокупность обычных границ яркости снимка, отражающих поверхностный ландшафт, тем слабее проявляется её природная ячеистость, тем меньше геологическая ценность. Следует отметить, что подобные результа-

ты были получены на множестве других снимков с использованием различных модификаций АВЛ.

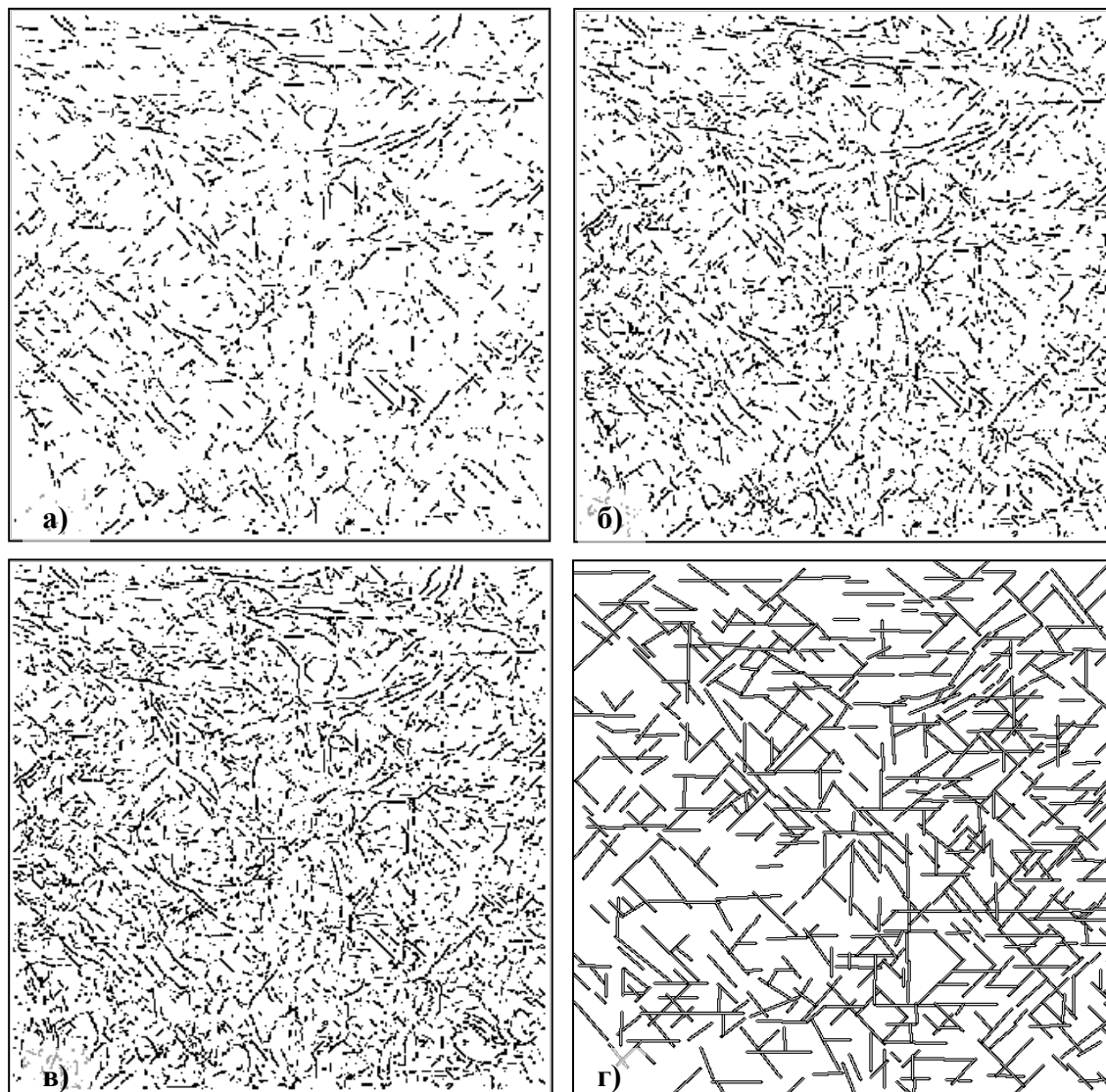


Рис. 3. Результаты автоматического выделения линеаментов системой WinLessa при порогах 40 (а), 30 (б) и 25 (в), и ручного выделения в среде ГИС РАПИД (г)

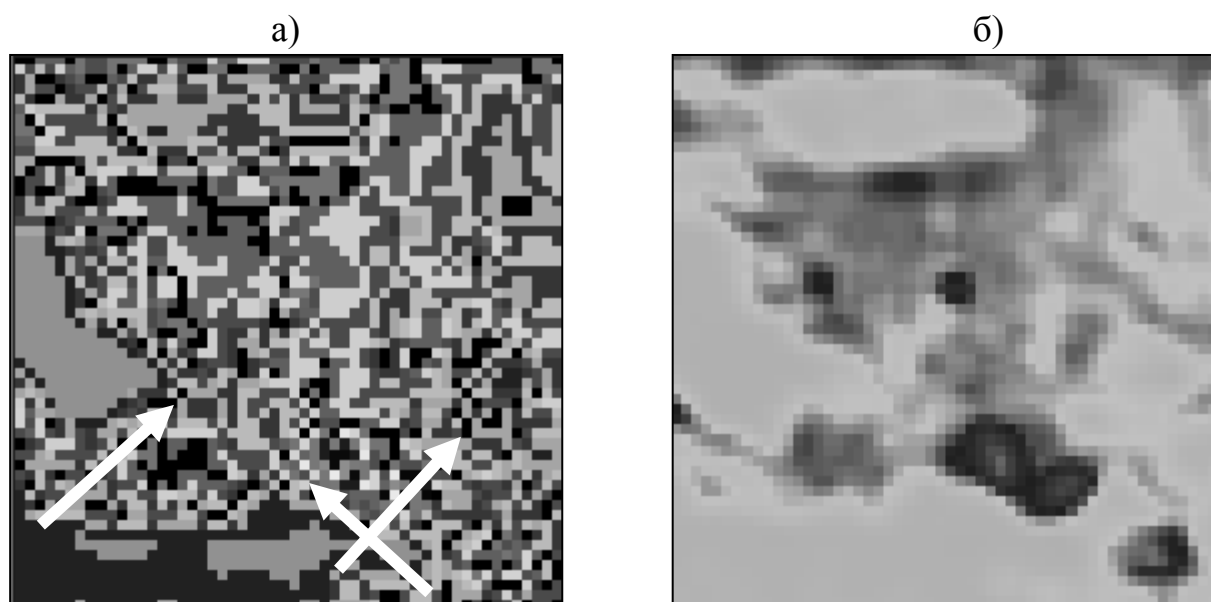
Вместе с тем, в автоматическом режиме на представленном снимке выделены все наиболее явно проявленные линейные структуры, а общий рисунок поля линеаментов и основные азимуты их простираения в целом адекватны действительности. Это позволяет использовать результаты АВЛ в качестве «первого приближения» для проведения экспресс-оценки исследуемых участков. Однако решение серьезных геологических задач методами линеаментного анализа не может базироваться на АВЛ, как по соображениям, высказанным выше, так и с учётом антропогенной изменённости ландшафтов, присущей, в частности, подавляющей части территории Украины.

Поэтому автоматическое выделение обязательно должно подкрепляться интерактивным, использующим ГИС-инструменты, знания и опыт геолога-дешифровщика и колоссальные распознающие возможности человеческого мозга.

**Рекомендации по выполнению ИВЛ.** Практический опыт ИВЛ на разнообразных снимках разных участков Земного шара позволил сформировать ряд рекомендаций, позволяющих добиваться достоверных результатов линейного анализа:

1. Эффективным способом обнаружения линейных элементов снимка является его псевдоцветовое кодирование, при котором каждому яркостному диапазону присваивается значение цвета, полученное случайным образом. В отличие от цветовых палитр, в которых близким значениям яркости соответствуют близкие цвета, палитра, сформированная при помощи случайного выбора цветов, подчеркивает даже незначительные перепады яркости, что особо ценно в случаях слаборасчленённого рельефа и мощного осадочного чехла.

2. Для более уверенного построения линейной сети рекомендуется выполнять выделение линейных элементов при разном количестве интервалов яркости (и, соответственно, цветов, которыми кодируется снимок) – 256, 128, 64, 32, 16, 8. В случае слабоконтрастного ландшафта, как свидетельствует практический опыт, использование малого количества интервалов зачастую является предпочтительным (рис. 4). В целом, варьирование параметрами визуализации является весьма полезным приемом при работе с геоизображениями.



⇒ Примеры линейных структур, проявляющихся на снимке после псевдоцветового кодирования

Рис. 4. Фрагмент исходного изображения: а) в серой палитре 256-цветной палитре б) после псевдоцветового кодирования в 20-цветной палитре

3. Предварительная обработка снимка может привести к улучшению результатов как ИВЛ, так и АВЛ. Рекомендуется использование лишь тех процедур, которые не базируются на вычислениях в скользящем или прыгающем окне квадратной формы, так как это приводит к усилению диагональных составляющих изображения и, как следствие, возникновению риска выделения несуществующих линеаментов с азимутами 45 и 135 градусов. Оптимальная форма окна – круг. Целесообразно проводить обработку при окнах разных размеров, что позволяет изучать снимок при разных степенях его генерализации.

4. В числе рекомендуемых преобразований следует упомянуть операции повышения контрастности, повышения резкости при помощи масок (не квадратной формы), ряд интегральных и текстурных преобразований [4], выполняемых в круглом окне.

5. Наличие нескольких спектральных каналов снимка также позволяет повысить качество построения линеаментной сети [7]. Целесообразно производить выделение с привлечением всех (или нескольких наиболее характерных) каналов, потому что линеаменты, не фиксирующиеся по одному каналу, могут выделяться на другом. Может быть полезен и расчёт статистических характеристик (оценок среднего, дисперсии, эксцесса и т.п.) для пикселей снимка, каждый из которых представляется вектором значений яркости различных каналов. В некоторых ситуациях хорошие результаты может дать расчёт вегетационных индексов, таких как NDVI, RVI и других. Большой интерес представляют главные компоненты многоканальных снимков, полученные соответствующим методом [8].

6. В конечном счёте, визуальному анализу должно подвергаться 5-7 изображений, наиболее хорошо подчёркивающих линеаментную структуру земной поверхности. При работе с каждым из изображений актуальны рекомендации, приведенные в пунктах 1 и 2.

В качестве линеаментов целесообразно выделять только те линейные структуры, которые уверенно выделяются хотя бы на 2-3х изображениях.

Применение описанной методики позволяет получать геологически осмысленные, содержательные результаты, подобные приведенным на рис. 3г.

**Выводы.** На настоящем этапе своего развития методы и алгоритмы автоматического выделения линеаментов могут успешно использоваться только для предварительной оценки сетей линеаментов в регионах с малой и средней техногенной нагрузкой на ландшафты.

Однако АВЛ имеет существенные возможности для своего развития. Пути повышения его эффективности лежат через учёт топологических особенностей сетей линеаментов, эквидистантность линеаментов отдельных направлений, выявление линейных структур, не выделяемых перепадами яркости космических снимков, а также выработку количественных критериев выбора параметров алгоритмов АВЛ [9].

Но на сегодняшний день максимально адекватные результаты могут быть получены исключительно методами интерактивного выделения линеаментов, предполагающими высокую квалификацию геолога-дешифровщика, а также

использование специализированных ГИС-пакетов. Подобное выделение линейных элементов не следует воспринимать, как слабо компьютеризованный процесс. Он обязательно должен выполняться в ГИС-среде, поскольку предполагает достаточное количество разнообразных вычислительных операций, связанных с привязкой, преобразованием и визуализацией снимка.

Разумеется, ручное выделение требует несравненно больших затрат времени по сравнению с АВЛ. Вместе с тем, эти затраты не столь велики, чтобы из-за них пренебрегать качеством линейного анализа и, как следствие, достоверностью получаемых геологических результатов.

#### Список литературы

1. Zlatopolsky A. Program LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis). Automated linear image features analysis - experimental results / A. Zlatopolsky // Computers & Geosciences, 1992. - v. 18, N 9. - p. 1121-1126.
2. Щепин М.В. Выявление геологических объектов на материалах космической съемки / М.В. Щепин, С.В.Евдокимов // Исслед. Земли из космоса, 2008. № 2. - С. 44–56.
3. Загубный Д.Г. Новая программа обработки векторных и растровых дистанционных материалов для ГИС // Исследование Земли из космоса. 2004. № 5. С. 21–27.
4. Busygin, B.S. Specialized geoinformation system RAPID: features, structure, tasks / Busygin, B.S., Nikulin S.L. / XIVth International Conference on Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects. – Kyiv, 2015. – 4 p.
5. Lev Maslov and Vladimir Anokhin Earth's decelerated rotation and regularities in orientation of its surface lineaments and faults – New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 35, June, 2005. Higgins, Australia P. 29-33.
6. Busygin B. The investigation of lineaments location regularity in mountain regions using the satellite images / B.Busygin, S. Nikulin // Proc. of IAMG MatGeoS-2008 Conference, Freiberg, Germany. – June 2008.
7. Никулин С.Л. Использование многоканальных космических снимков для линейного анализа территорий / С.Л. Никулин // Науковий вісник ДВНЗ «НГУ». -2011.-№2. - С.62-68.
8. Айвазян С. А.. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин – М.: Финансы и статистика, 1989.- 607 с.
9. Никулин С.Л. Влияние параметров алгоритма Кенни на результаты выделения границ яркости космических снимков /С.Л.Никулин, О.В.Коробко // Збірка наукових праць НГУ. – Д: Державний ВНЗ «НГУ», 2015. – №43. – С.145-150.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Назаренком В.О.  
Надійшла до редакції 10.11.2014*