

Л.В. Сычугова¹, Д.Ш. Фаилова²

ВЫДЕЛЕНИЕ СКВОЗНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА: НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ ФЕРГАНСКОЙ ДОЛИНЫ

АННОТАЦИЯ

В результате напряженного состояния литосферного блока может возникать структура ортогональных трещин, которые проявляются в виде сети прямых или дугообразных топографических элементов региональной протяженности на земной поверхности – линеаментов. В последнее десятилетие одним из направлений линеаментного анализа является выделение так называемых сквозных структур с помощью методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые часто служат геологическими границами блоков земной коры. Активно развиваются различные методы линеаментного анализа: улучшение изображения, методы ручной оцифровки и автоматическое извлечение с использованием программного обеспечения и алгоритмов. Выявление взаимосвязи линеаментов и их характеристик с природными и антропогенными процессами является актуальной задачей. Тектоническая линеаментная сеть связана с глубинными разломами, и на пересечении крупных линеаментов могут быть, в частности, локализованы рудные районы. Поэтому большинство исследований повышенного скопления линеаментов проводится в районах определения мест залежей полезных ископаемых и грунтовых вод. К таким районам относится Ферганский регион, являющийся одним из пяти нефтегазоносных регионов Республики Узбекистан. Наличие фонда перспективных ловушек обосновывает необходимость комплексного, включая спутниковые методы, геоинформационного обеспечения и обеспечения возможности перехода к автоматическим методам анализа тектонических процессов. Поэтому в данной работе проводился автоматизированный линеаментный анализ с целью выявления и интерпретации сквозных структур в данном регионе. Период исследования (май – ноябрь 2019 года) выбирался с учетом проведения интенсивных геологоразведочных работ в регионе и технических параметров снимков (отсутствие облачности). Спутниковые снимки Landsat 8 обработаны автоматизированным методом дешифрирования линеаментных структур в программе LEFA, выполняемой в среде MATLAB. При визуальном анализе обработанных снимков получено, что происходит временное изменение количества линеаментных структур по месяцам. При этом северо-западная часть региона (район Наманганской области) характеризуется как зона наиболее сильного проявления линеаментных структур. Дальнейшая детализация линеаментных структур по направлению и ориентировке позволила определить сквозные структуры. Тематические карты с геопространственным расположением сквозных структур показали, что характер и выраженность сквозных структур меняется в зависимости от особенностей геологического строения пересекаемых ими участков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: линеаменты, сквозные структуры, Landsat 8, LEFA, статистический анализ

¹Астрономический институт имени Улугбека Академии наук Республики Узбекистан, ул. Астрономическая, д. 33, 100052, Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: slola988@gmail.com

²Астрономический институт имени Улугбека Академии наук Республики Узбекистан, ул. Астрономическая, д. 33, 100052, Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: dil_faz@yahoo.com

Lola V. Sichugova¹, Dilbarkhon Sh. Fazilova²

DETERMINATION OF TRANSVERSE STRUCTURES BASED ON LINEAMENT ANALYSIS: A CASE STUDY OF THE FERGANA VALLEY

ABSTRACT

As a result of the stress state of the lithospheric block, a structure of orthogonal cracks may appear as a network of straight or arcuate topographic elements of the regional extent on the Earth's surface – lineaments. In the last decade, one of the directions of lineament analysis had been the identification of the so-called transverse structures using remote sensing methods, which often serve as the geological boundaries of crustal blocks. Various lineament analysis methods are being actively developed: image enhancement, manual digitizing methods, and automatic extraction using software and algorithms. Revealing the relationship between lineaments and their characteristics with natural and anthropogenic processes is the relevant task. The tectonic lineament network is associated with deep faults and, in particular, ore regions that can be localized at the intersection of large lineaments. Therefore, most studies of increased accumulation of lineaments are carried out in areas where mineral deposits and groundwater deposits are identified. These areas include the Fergana region, which is one of the five oil and gas regions of the Republic of Uzbekistan. The presence of a fund of promising traps justifies the need for comprehensive geoinformation support, including satellite methods, and the possibility of transition to automatic methods for analyzing tectonic processes. Therefore, in this study, an automated lineament analysis was carried out in order to identify and interpret the transverse structures in this region. The study period (May – November 2019) was chosen to take into account the intensive exploration work in the region and the technical parameters of the images (without clouds). Landsat 8 satellite images were processed by the automated method of lineament structures interpretation in the LEFA program in the MATLAB environment. During the visual analysis of the processed images, it was identified that there was a temporary change in the number of lineament structures by month. At the same time, the northwestern part of the region (Namangan region) is characterized as the zone of the strongest manifestation of lineament structures. Further detailing of the lineament structures in terms of direction and orientation made it possible to determine the transverse structures. Thematic maps with the geospatial location of transverse structures showed that the nature and clarity of transverse structures varied depending on the features of the geological structure of the sections they intersected.

KEYWORDS: lineaments, transverse structures, Landsat 8, LEFA, statistical analysis

ВВЕДЕНИЕ

Изучение тектонических разломов геологическими методами имеет длительную историю и дало хорошие результаты. В то же время, периоды между сейсмическими событиями, являющиеся временем накопления напряжений, изучены недостаточно. В настоящее время в мире совершенствуются технология обработки данных ДЗЗ для обеспечения адекватной оценки уровня современной геодинамической активности среды и достоверной идентификации результатов наблюдений за параметрами деформационного процесса. Данные ДЗЗ в последние годы становятся ключевым мощным инструментом для оценки и мониторинга динамической активности Земли, включая активную тектонику и изменения рельефа поверхности в пространстве и времени. Согласно теории, предложенной еще в начале прошлого века В. Хоббсом, в результате напряженного состояния литосферного блока может возникать структура ортогональных трещин, которые прояв-

¹ Ulugh Beg Astronomical Institute (UBAI) of the Uzbekistan Academy of Sciences, Astronomicheskaya 33, Tashkent, Uzbekistan, e-mail: slola988@gmail.com

² Ulugh Beg Astronomical Institute (UBAI) of the Uzbekistan Academy of Sciences, Astronomicheskaya 33, Tashkent, Uzbekistan, e-mail: dil_faz@yahoo.com

ляются в виде сети прямых или почти прямых топографических элементов региональной протяженности на земной поверхности – линеаментов. В последнее десятилетие обнаружение линеаментных структур с помощью данных ДЗЗ получило широкое распространение и привело к эффективным результатам во многих научных направлениях [Yusof et al., 2011; Takorabt et al., 2018].

Линеаментный анализ, как комплекс методов геологического картирования, основан на обработке информации, которая по способу получения и формату данных делится, как минимум, на три класса: материалы дистанционного зондирования, топографические и геологические карты, геофизические данные. На спутниковых снимках линеаменты представляют границы между различными природно-территориальными комплексами, а также образуют линейные тоновые (или цветные) аномалии различной ширины и выраженности. Зоны линеаментов изображают сложные образования, обычно с «размытыми» границами. Также встречаются системы коротких сближенных субпараллельных линеаментов. Еще более сложно построены и значительно более широкие (до нескольких сотен километров) линеаментные пояса, которые интерпретируются на снимках низкого пространственного разрешения. Выделение линеаментных структур позволяет определить активные разломы, тектонические единицы и сейсмоактивные регионы [Иванченко, Горбунова, 2021; Sichugova, Fazilova, 2021]. Степень проявления линеаментов на спутниковых изображениях зависит от напряженно-деформированного состояния земной коры, которое в свою очередь обусловлено выраженностью структур в физико-химических свойствах поверхности Земли. Это происходит за счет изменения температуры поверхности, влажности почвы и других свойств почво-грунтов и горных пород, а также растительного покрова [Бондур, Зверев, 2006]. Установлено, что линеаменты связаны с линейными структурно-тектоническими дислокациями (структурно-тектоническими линиями) разрывов и поэтому их дешифрирование является актуальной задачей.

Для выделения линеаментных структур все больше применяют автоматизированные методы извлечения с помощью специальных алгоритмов и программных комплексов [Zlatopolsky, 1992; Rahnama, Gloaguen, 2014; Шевырев, 2018; Sichugova, Fazilova, 2020]. Автоматизированный метод компьютерного линеаментного анализа позволяет выделять линеаменты по различным критериям выраженности и выполнять статистику их распределения. Одним из таких направлений линеаментного анализа является выделение так называемых сквозных структур, которые часто служат геологическими границами блоков земной коры. «Сквозные структуры» – это линейная неоднородность земной коры и верхней мантии, хорошо прослеживаемая на значительные расстояния и свободно пересекающая геологические границы разных рангов. Данные структуры, отражая тектонические напряжения, как правило, ориентированы параллельно (конкордантно) им и другим геотекстурам [Ломакин и др., 2011]. Тектоническая линеаментная сеть связана с глубинными разломами, и на пересечении крупных линеаментов могут быть, в частности, локализованы рудные районы. Поэтому большинство исследований повышенного скопления линеаментов проводится в районах определения мест залежей полезных ископаемых и грунтовых вод. Целью данного исследования было определение сквозных структур с помощью автоматизированного анализа линеаментов для территории Ферганской долины в Узбекистане.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ферганская впадина – крупнейшая в Средней Азии межгорная впадина, расположенная в восточной части территории Республики Узбекистан и граничащая с Республикой Таджикистан и Кыргызстан. На формирование современной структуры осадочного чехла Ферганской долины значительное влияние оказывают тектонические разломы. Основные разрывные нарушения в фундаменте, простиравшиеся вдоль бортов впадины долины, а также многочисленные соподчиненные по направлению, но меньшего масштаба, разбили впадину на ряд разнопорядковых блоков, ступенчато опускающихся от бортов к приосевой зоне [Бикеева и др., 2020]. На территории Ферганской долины имеются участки с залежами нефти и

газа в ловушках не антиклинального типа в прибортовой зоне впадины: Шорсу-Варыкский сегмент, Чимион-Аввальский сегмент, Палванташ-Ходжаосманский сегмент. В работах по данному региону отмечается, что за период 1991–2020 гг. открыто 27 месторождений углеводородов. Наряду с этим интенсивность геологоразведочных работ (сейморазведочные исследования, параметрическое бурение, поисковое и разведочное бурение, глубокое бурение) стала наиболее активной в период 2019–2020 гг. и составила 30 % от общего количества всех месторождений региона [Абдуллаев и др., 2021]. Обработка спутниковых снимков проводилась за 2019 год. Большинство снимков за зимний период большей частью облачные, поэтому нами рассмотрены снимки за май – ноябрь этого года. На рис. 1 представлена область исследования на синтезированном космическом снимке Landsat 8 с основными активными разломами, определенными геологическими методами. [Алимухамедов, 2011]. Котловина долины вытянута в широтном направлении на 370 км и имеет ширину около 190 км. Абсолютные отметки ее дна изменяются от 330 до 1000 м, а в предгорьях более 1000 м.

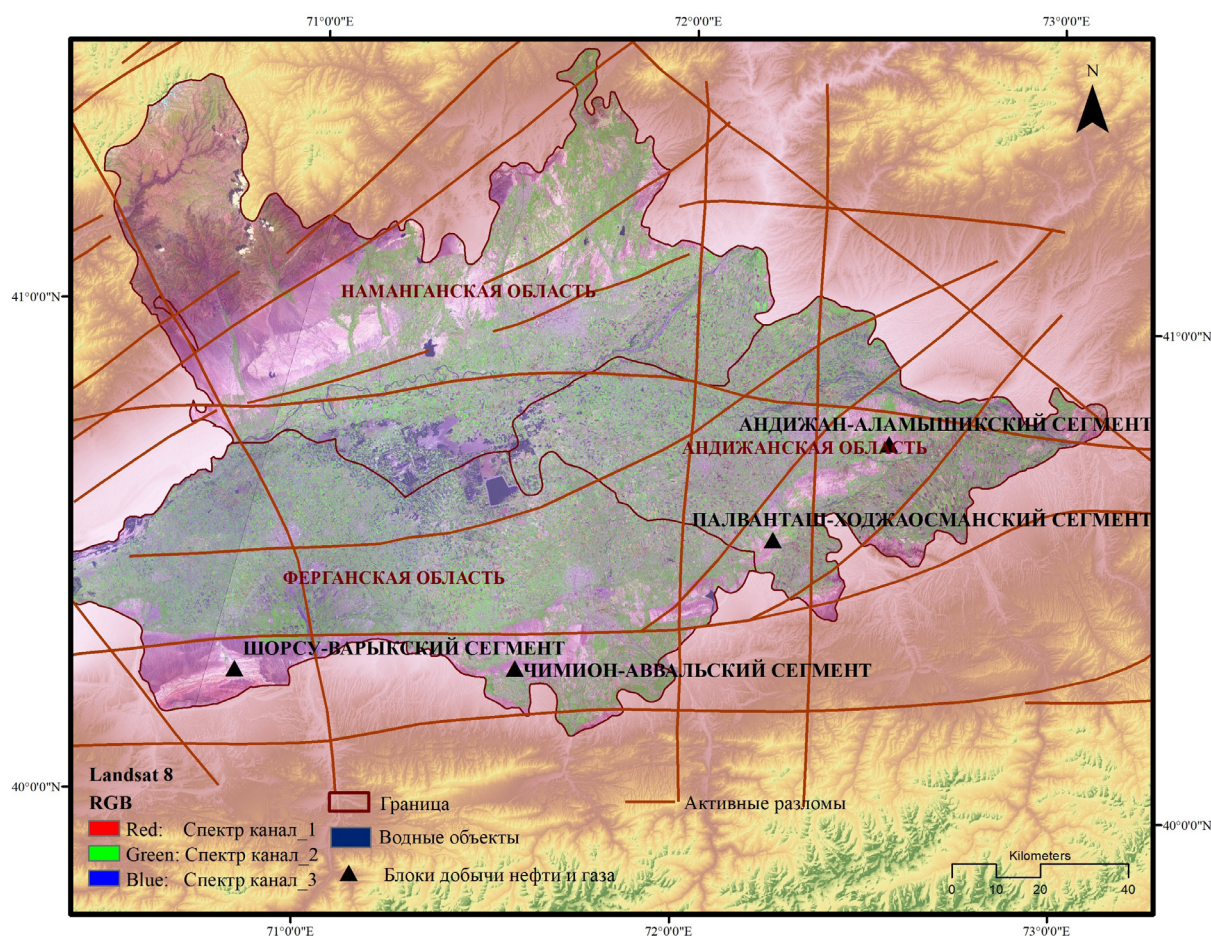


Рис. 1. Активные разломы Ферганской долины
Fig. 1. Active faults in the Ferghana Valley

Автоматизированный метод извлечения линементных структур включает несколько этапов обработки спутниковых снимков Landsat 8, находящихся в свободном доступе и загруженных с сайта геологической службы США. Во-первых, проводился паншарпенинг оптического изображения для улучшения пространственного разрешения. Во-вторых, принцип главных компонент (РСА) использовался для улучшения структурного строения поверхности. И, на последнем этапе обработки, проводилось извлечение самих линементных структур в программе LEFA. На этом шаге применялись фильтр Санны и преобразование Хафа.

РСА преобразует набор полос таким образом, что выходные полосы, называемые главными компонентами, не коррелируют друг с другом, и каждый компонент несет новую спектральную информацию и становится более интерпретируемым, чем исходные

данные. Также для четкого отображения наземной поверхности следует задавать значение параметра стандартного отклонения. Параметр стандартного отклонения показывает, насколько значения атрибутов объектов отличаются от среднего значения. Обработка РСА проводилась в программном продукте ENVI. В этом исследовании РСА проводился с использованием семи спектральных каналов Landsat 8 (каналы 1, 2, 3, 4, 5, 7 и 8). Полосы 6 (тепловые) в исследовании не использовались. Анализ данных компонент показал, что наиболее информативными компонентами с точки зрения отображения геологических структур являются шестая, пятая и третья компоненты со стандартным отклонением 1,5.

В LEFA имеется несколько алгоритмов детектирования границ. Алгоритм включает:

1. Фильтрация изображения, для подготовки изображения к вычислению обнаружения краев. Предварительная обработка изображений включает использование графических фильтров. Для изображений Landsat в оттенках серого резкие линейные изменения в яркости интерпретируются как линейные структуры. Для обнаружения краев использовался алгоритм Canny. Оптимальный фильтр для изоляции, локализации и минимизации повторяющихся откликов на одном краю, сумма четырех экспонент. Границы пикселей – это точки, в которых достигается локальный максимум градиента в направлении вектора градиента (подавление без максимума). В детекторе используется фильтр, основанный на первой производной Гаусса [Canny, 1986].

2. Вектор линейных элементов оцифровывается с использованием метода вероятностного преобразования Хафа (РНТ) [Duda, Hart, 1972]. Параметры для этого метода включают минимальную длину обнаруженных линий (в пикселях), максимальный допуск зазора в пикселях для конкретной строки, выборку значений координат Хафа (ρ и θ) и количество пиков Хафа («пики Хафа»).

3. Крупные линейные элементы – разломы, получаются объединением нескольких элементов. Параметрами объединения являются пространственная близость этих сегментов и их коллинеарность. Алгоритм коллинеарности применяется к линейным элементам длиной более нескольких пикселей и управляется следующими параметрами: максимальная разность k/b (отношение наклона уравнения сравниваемых линий к точке пересечения), максимальное расстояние между центральными точками сравниваемых линий, минимальное количество линий, необходимое для объединения в линеаменты, порядок полинома линии [Шевырев, 2018].

Проведение статистического анализа линеаментных и сквозных структур выполнялось в программном обеспечении ArcGIS.

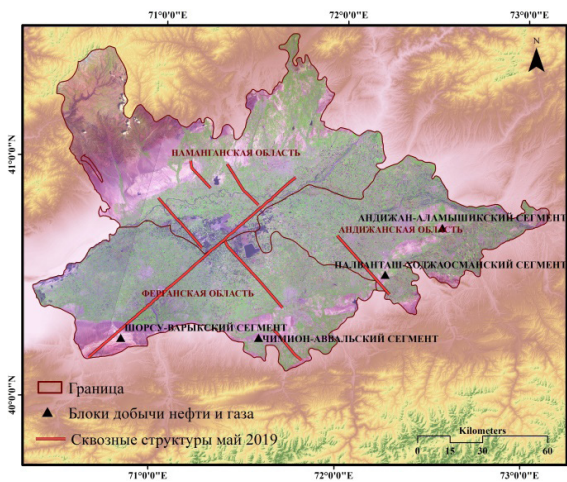
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Визуальный анализ обработанных снимков показал, что происходит временное изменение количества линеаментных структур по месяцам. При этом северо-западная часть Ферганской долины (район Наманганской области) выделена как зона наиболее сильного проявления линеаментных структур. Статистический анализ линеаментных структур показал, что увеличение и максимальное количество линеаментных структур приходится на июль, а спад и минимум наблюдается в ноябре (табл. 1).

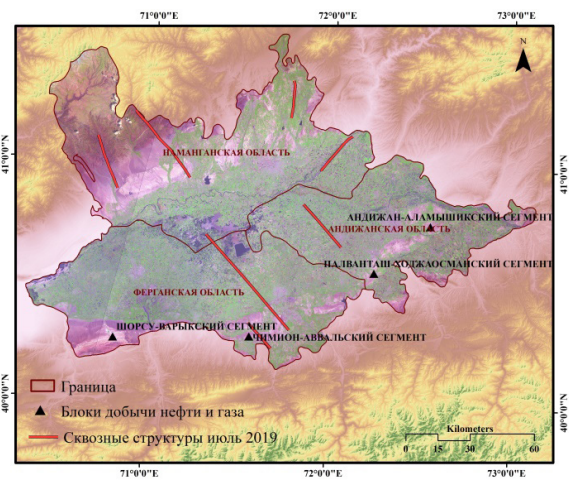
Табл. 1. Статистический анализ линеаментных структур
Table 1. Statistical analysis of lineament structures

	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь
Общ. кол-во	504	386	645	537	435	209	97
Мин. длина, км	0,15	0,1	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Макс. длина, км	4,03	3,43	3,51	3,09	4,56	3,29	3,82
Сумма, км	535,92	357,41	862,06	723,87	602,40	292,16	139,41
Стандартное отклонение, км	0,57	0,71	0,35	0,34	0,50	0,45	0,47

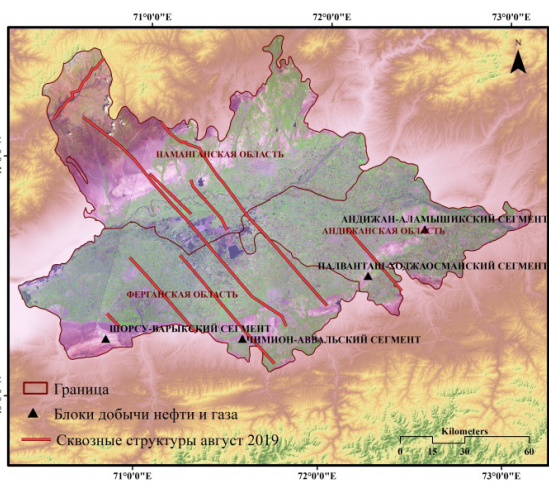
Дальнейшая детализация линейных структур по направлению и ориентировке позволила определить сами сквозные структуры. Были построены тематические карты с геопространственным расположением сквозных структур (рис. 2).



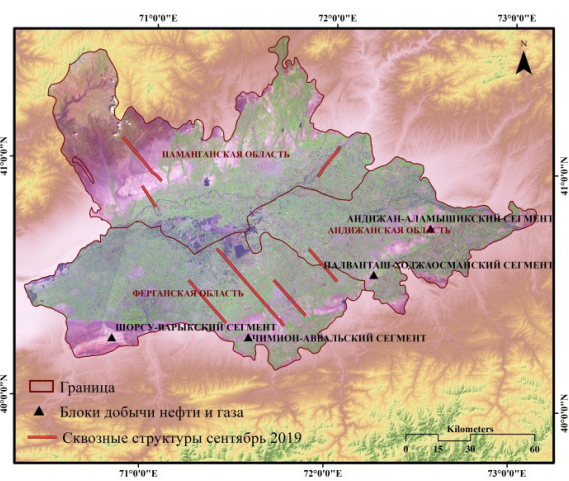
Май 2019



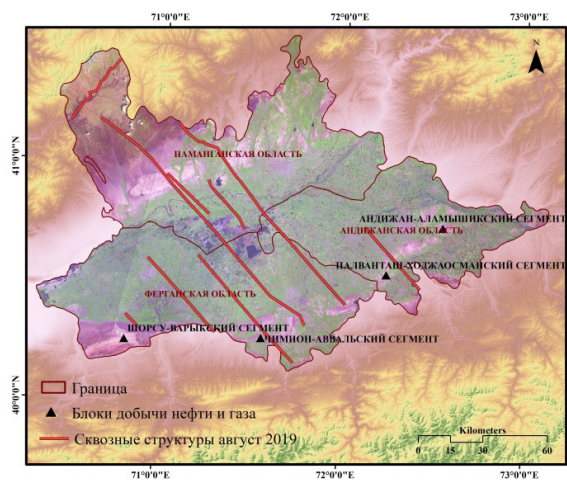
Июль 2019



Август 2019



Сентябрь 2019



Октябрь 2019

Рис. 2. Сквозные структуры на территории Ферганской долины
Fig. 2. Transverse structures on the territory of the Fergana Valley

С другой стороны, выявлена динамичность сквозных структур с течением времени, проявляющаяся в изменении их длин по месяцам (табл. 2).

Табл. 2. Статистический анализ сквозных структур
Table 2. Statistical analysis of transverse structures

	Май	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Общ. кол-во	7	7	9	7	7
Мин. длина, км	16,2	16,02	9	11,9	8,8
Макс. длина, км	128,7	59,2	136,6	48,05	93,2
Сумма, км	296,6	208,02	510,3	174,5	186,9
Стандартное отклонение, км	36,2	14,1	40,4	10,7	27,6

В результате статистического анализа выявлено, что максимальное количество сквозных структур обнаружено в августе с максимальной длиной 136,6 км и минимальной 9 км. В Наманганской области в октябре выявлен участок сгущения (концентрации) сквозных структур. Характер и выраженность сквозных структур меняется в зависимости от особенностей геологического строения пересекаемых ими участков.

ВЫВОДЫ

В данном исследовании был проведен анализ сквозных структур на территории Ферганской долины. Автоматизированный метод линеаментного анализа использован для выделения сквозных структур. Период исследования (май – ноябрь 2019 года) выбирался с учетом проведения интенсивных геологоразведочных работ в регионе и технических параметров снимков (отсутствие облачности). Для обработки данных использовались программы ENVI, LEFA и ArcGIS. Спутниковые снимки Landsat 8 обработаны автоматизированным методом дешифрирования линеаментных структур в программе LEFA, выполняемой в среде MATLAB. Результаты исследования позволили выявить динамику линеаментных структур в течение всего рассмотренного периода. Такие изменения сквозных структур связаны с происходящими активными тектоническими процессами на территории Ферганской долины. Территория Ферганской долины относится к одной из двух наиболее сейсмоактивных зон на территории Республики Узбекистан [Ибрагимова и др., 2021]. При этом северо-западная часть региона (район Наманганской области) характеризуется как зона наиболее сильного проявления линеаментных структур. Статистический анализ показал, что максимальное количество линеаментных структур было в июле, минимальное количество линеаментных структур наблюдалось в ноябре. Дальнейшая детализация линеаментных структур по направлению и ориентировке позволила определить сквозные структуры. Тематические карты с геопространственным расположением сквозных структур показали, что они большей частью ориентированы параллельно тектоническим разломам. Но также, с другой стороны, отмечается увеличение их количества в мае, июле, августе, сентябре и октябре, что, вероятнее всего, связано с периодом проведения разработки открытых месторождений. Предлагаемый метод выделения сквозных структур на основе автоматизированного линеаментного анализа, наряду с наземными исследованиями, может быть использован для определения мест залежей нефти и газа, а также для определения зон грунтовых вод в регионе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного бюджетного финансирования Академии наук Республики Узбекистан.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the State Budget Foundation of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаев Г.С., Богданов А.Н., Эйдельмант Н.К. Современное состояние и перспективы развития геологоразведочных работ на нефть и газ в Ферганском регионе Республики Узбекистан. Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2021. Т. 16. № 2. DOI: 10.17353/2070-5379/15_2021.
2. Алимухамедов И.М. Современная активность земной коры Южного Узбекистана и ее сейсмичность. Автореф. канд. геолог.-минерал. н. Ташкент, 2011. 19 с.
3. Бикеева Л.Р., Урманов А.Х., Юлдашева М.Г., Умаров Ш.А. Структурное дешифрирование космofотоснимков и характерные черты неотектонических движений при оценке перспектив отдельных участков (зон) южного борта Ферганской межгорной впадины. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Пятая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием, 5–9 октября 2020 г. С. 507–511.
4. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Физическая природа линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2006. В. 3. Т. 2. С. 177–183.
5. Ибрагимова Т.Л., Ибрагимов Р.С., Мирзаев М.А., Ребецкий Ю.Л. Современное напряженное состояние земной коры территории Узбекистана по данным сборного каталога очагов землетрясений. Геодинамика и Тектонофизика, 2021, Т. 12. № 3. С. 435–454. DOI: 10.5800/GT-2021-12-3-0532.
6. Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М. Формализованный линеаментный анализ геологических структур Прибайкалья. Физика Земли, 2021. № 5. С. 223–234. DOI: 10.31857/S0002333721050082.
7. Ломакин И.Э., Иванов В.Е., Кочелаб В.В. Линеаменты дна океанов и сквозные структуры. Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 2011. № 4. С. 30–46.
8. Шевырев С.Л. Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab. Успехи современного естествознания, 2018. № 10. С. 138–143.
9. Canny J.A. Computational Approach to Edge Detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986. V. 8. No. 6. P. 679–698.
10. Duda R.O., Hart P.E. Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. Comm. ACM, 1972. V. 15. P. 11–15.
11. Rahnema M., Gloaguen R. TecLines: A MATLAB-Based Toolbox for Tectonic Lineament Analysis from Satellite Images and DEMs, Part 1: Line Segment Detection and Extraction. Remote Sensing, 2014. V. 6. Issue 7. P. 5938–5958. DOI: 10.3390/rs6075938.
12. Sichugova L., Fazilova D. Structural interpretation of lineaments using satellite image processing: a case study in the vicinity of the Charvak reservoir. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. 2020. V. 26. Part 2. P. 436–442. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-436-442.
13. Sichugova L., Fazilova D. The lineaments as one of the precursors of earthquakes: A case study of Tashkent geodynamical polygon in Uzbekistan. Geodesy and Geodynamics. 2021. V. 12. Issue 6. P. 383–388. DOI: 10.1016/j.geog.2021.08.002.
14. Takorabt M., Toubal A.C., Haddoum H., Zerrouk S. Determining the role of lineaments in underground hydrodynamics using Landsat 7 ETM+ data, case of the Chott El Gharbi Basin (western Algeria). Arabian Journal of Geosciences. 2018. V. 11. No. 76. DOI: 10.1007/s12517-018-3412-y.
15. Yusof N., Ramli M.F., Pirasteh S. & Shafri H.Z.M. Landslides and lineament mapping along the Simpang Pulai to Kg Raja highway. Malaysia. International Journal of Remote Sensing. 2011. V. 32. No. 14. P. 4089–4105. DOI: 10.1080/01431161.2010.484434.
16. Zlatopolsky A.A. Program LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) automated linear image features analysis experimental results. Computers & Geosciences. 1992. V. 18. Issue 9. P. 1121–1126. DOI: 10.1016/0098-3004(92)90036-Q.

REFERENCES

1. *Abdullaev G.S., Bogdanov A.N., Eydelnant N.K.* The current state and prospects for the development of geological exploration for oil and gas in the Fergana region of the Republic of Uzbekistan. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*, 2021. V. 16. No. 2. (in Russian). DOI: 10.17353/2070-5379/15_2021.
2. *Alimukhamedov I.M.* Modern activity of the Southern Uzbekistan earth crust and its seismicity. PhD dissertation. Tashkent. 2011. 19 p. (in Russian).
3. *Bikeeva L.R., Urmanov A.Kh., Yuldasheva M.G., Umarov Sh.A.* Structural interpretation of space photographs and characteristic features of neotectonic movements in assessing the prospects of individual sections (zones) of the southern part of the Fergana intermountain depression. *Tectonophysics and topical issues of Earth sciences. Fifth tectonophysical conference at IPE RAS. Materials of the reports of the All-Russian conference with international participation, October 5–9, 2020.* P. 507–511. (in Russian).
4. *Bondur V.G., Zverev A.T.* The physical nature of lineaments recorded on space images during monitoring of seismic hazard areas. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 2006. Issue. 3. V. 2. P. 177–183. (in Russian).
5. *Canny J.A.* Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986. V. 8. No. 6. P. 679–698.
6. *Duda R.O., Hart P.E.* Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. *Comm. ACM*, 1972. V. 15. P. 11–15.
7. *Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A., Rebetsky Yu.L.* The current stress of Earth's crust in the territory of Uzbekistan according to focal earthquake mechanisms. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2021. V. 12. No. 3. P. 435–454 (in Russian). DOI:10.5800/GT-2021-12-3-0532.
8. *Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M.* Formalized lineament analysis of geological structures in the Baikal region. *Physics of the Earth*, 2021. No 5. P. 223–234 (in Russian). DOI: 10.31857/S0002333721050082.
9. *Lomakin I.E., Ivanov V.E., Kochelab V.V.* Lineaments of the ocean and transverse structures. *Geology and Mineral Resources of World Ocean*, 2011. No. 4. P. 30–46 (in Russian).
10. *Rahnama M., Gloaguen R.* TecLines: A MATLAB-Based Toolbox for Tectonic Lineament Analysis from Satellite Images and DEMs, Part 1: Line Segment Detection and Extraction. *Remote Sensing*, 2014. V. 6. Issue 7. P. 5938–5958. DOI: 10.3390/rs6075938.
11. *Shevyrev S.* LEFA software: an automatized structural analysis of remote sensing imagery in Matlab environment. *Advances in current natural sciences*, 2018. No. 10. P. 138–143 (in Russian).
12. *Sichugova L., Fazilova D.* Structural interpretation of lineaments using satellite image processing: a case study in the vicinity of the Charvak reservoir. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference.* 2020. V. 26. Part 2. P. 436–442. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-436-442.
13. *Sichugova L., Fazilova D.* The lineaments as one of the precursors of earthquakes: A case study of Tashkent geodynamical polygon in Uzbekistan. *Geodesy and Geodynamics*. 2021. V. 12. Issue 6. P. 383–388. DOI: 10.1016/j.geog.2021.08.002.
14. *Takorabt M., Toubal A.C., Haddoum H., Zerrouk S.* Determining the role of lineaments in underground hydrodynamics using Landsat 7 ETM+ data, case of the Chott El Gharbi Basin (western Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. V. 11. No. 76. DOI: 10.1007/s12517-018-3412-y.
15. *Yusof N., Ramli M.F., Pirasteh S. & Shafri H.Z.M.* Landslides and lineament mapping along the Simpang Pulai to Kg Raja highway. Malaysia. *International Journal of Remote Sensing*. 2011. V. 32. No. 14. P. 4089–4105. DOI: 10.1080/01431161.2010.484434.
16. *Zlatopolsky A.A.* Program LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) automated linear image features analysis experimental results. *Computers & Geosciences*. 1992. V. 18. Issue 9. P. 1121–1126. DOI: 10.1016/0098-3004(92)90036-Q.