

А. Я. Ходоровский, А. А. Апостолов

Анализ зависимости количества выделяемых систем линеаментов от ширины интервала группирования

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Лялько)

Количество систем линеаментов, а также трещин, разломов, определяемых отдельными авторами, значительно разнятся, что препятствует последующей количественной обработке поля линеаментов. Причины такого положения ранее не анализировались. Проведенные исследования показали, что на количество систем линеаментов, выделяемых на графиках распределения их азимутов простирания, существенное влияние оказывает ширина интервала группирования линеаментов. Установлено, что зависимость количества выделяемых систем линеаментов от ширины интервала группирования описывается гиперболой с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,948$.

Постановка задачи. Судя по публикациям [1, 2 и др.], разные исследователи выделяют от 2 до 38 систем трещин и линеаментов на основе анализа графиков распределения их азимутов простирания. Причина выделения разного количества систем заключается в построении графиков распределения замеров ориентировки с использованием разной ширины интервала группирования. При этом авторы не обосновывают, а часто даже не указывают ширину интервала группирования замеров ориентировки трещин и линеаментов, выбранную для их построения. Не анализировалась зависимость количества выделяемых систем структур от ширины интервалов группирования и не сравнивались параметры выделенных систем. Рассмотрение этих вопросов необходимо для обоснованного построения *посистемных карт плотности линеаментов*. Такие карты позволяют уточнить структуру района, количественно оценить трещинную проницаемость пород, могут быть использованы для прогнозной оценки перспективности территории на обнаружение залежей полезных ископаемых и решения гидрогеологических и экологических задач.

Нами проведена работа на основе анализа массовых замеров ориентировки линеаментов *трех районов* Украины, которые различаются по природным условиям, особенностям геологического строения и развития. В исследуемых районах кристаллические породы перекрыты чехлом рыхлых отложений разной мощности. Один из них расположен на Тарханкутском полуострове Крыма, сложенном осадочными породами альпийского платформенного чехла Скифской плиты. Другой район размещается в юго-восточной части Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ), в его строении преобладают осадочные породы палеозоя. Третий — расположен на восточном склоне Украинского щита (УЩ), в районе Чернобыльской АЭС, здесь на небольшой глубине залегает протерозойский кристаллический фундамент.

Исходные данные. Материалами для исследований послужили результаты визуального структурного дешифрирования космических снимков со спутника Landsat (пространственное разрешение 28,5 м), топографические карты масштаба 1 : 100000, цифровые модели рельефа (пространственное разрешение 90 м). Выделение линеаментов проводилось с помощью стандартных ландшафтных индикаторов линеаментов с применением программного

продукта Erdas Imagine. Методика обработки результатов дешифрирования изложена в сообщении [3].

На каждом из участков работ проведены замеры ориентировки всех выделенных линеаментов (около 45 000). По результатам замеров ориентировки линеаментов построены графики распределений их азимутов простирания с использованием интервала группирования шириной — 2°, 3°, 4°, 5°, 6°, 9°, 10°, 12°, 15°, 18°, 20°, 30°, 36°, 45°, 60° и 90°. Только эти интервалы позволяют разделить весь диапазон изменения азимутов простирания линеаментов, равный 180° без потери части наблюдений. Всего по каждому из участков было построено по 32 графика ориентировки максимумов и минимумов линеаментов. Ввиду сложности анализа исходных графиков, ниже по каждому из сравниваемых участков приводится по 16 графиков, на которых показаны только границы систем и их модальные значения (рис. 1).

Анализ полученных результатов. Сравнительный анализ приведенных графиков показал сходство и различия между ними. На всех графиках с увеличением ширины интервала группирования уменьшается количество и увеличивается ширина выделяемых максимумов, которые отвечают системам линеаментов. Количество выделяемых систем изменяется от 30–34 на графиках, построенных интервалом группирования шириной 2°, до 1 на графиках, построенных интервалом группирования с шириной 60° и 90°.

Следовательно, количество выделяемых систем линеаментов определяется прежде всего шириной интервала группирования, использованного для построения графиков. Выделяемое количество систем линеаментов хорошо согласуется с количеством систем разломов и трещин, которые были установлены в разных районах [1, 2, 4 и др].

Увеличение ширины интервала группирования при построении графиков приводит к объединению соседних систем, выделенных более узкими интервалами в новые более широкие системы. Модальные значения новых систем, построенные с помощью интервала группирования шириной от 3° до 10–15°, обычно совпадают с модальным значением одной из слагающих его систем, отличаясь не более чем на 3–5°. Объединение соседних систем проявляется главным образом в усложнении формы графика новой системы. График может оказаться одновершинным или двувершинным асимметрично построенным, на одном из крыльев графика может сформироваться ступень.

С дальнейшим увеличением ширины интервала группирования форма графиков систем линеаментов становится все более симметричной, близкой по форме к кривой нормального распределения. Но при этом отмечается постепенное смещение модальных значений выделяемых систем на запад. Смещение тем больше, чем больше ширина интервала группирования и в отдельных случаях достигает 30° относительно модального значения системы, выделенной окном осреднения 2°. В результате модальные значения субмеридиональной и субширотной систем попадают соответственно в границы систем северо-западного и северо-восточного простирания, выделенных более узкими интервалами. При этом модальные значения диагональных систем никогда не попадают в область значений ортогональных систем. Таким образом, выделение систем только по одному графику, построенному с интервалом группирования шириной более 15–18°, может препятствовать выделению ортогональных систем, что хорошо видно при анализе серии графиков (рис. 1, см. вклейку).

Модальные значения систем линеаментов, выделенные нами с использованием интервалов группирования разной ширины, хорошо совпадают с преобладающей ориентировкой трещин, разломов, даек, зон метасоматоза, определяемых в разных районах Украины и других регионах Земли [1, 5, 6 и др.]. Это служит косвенным подтверждением того, что

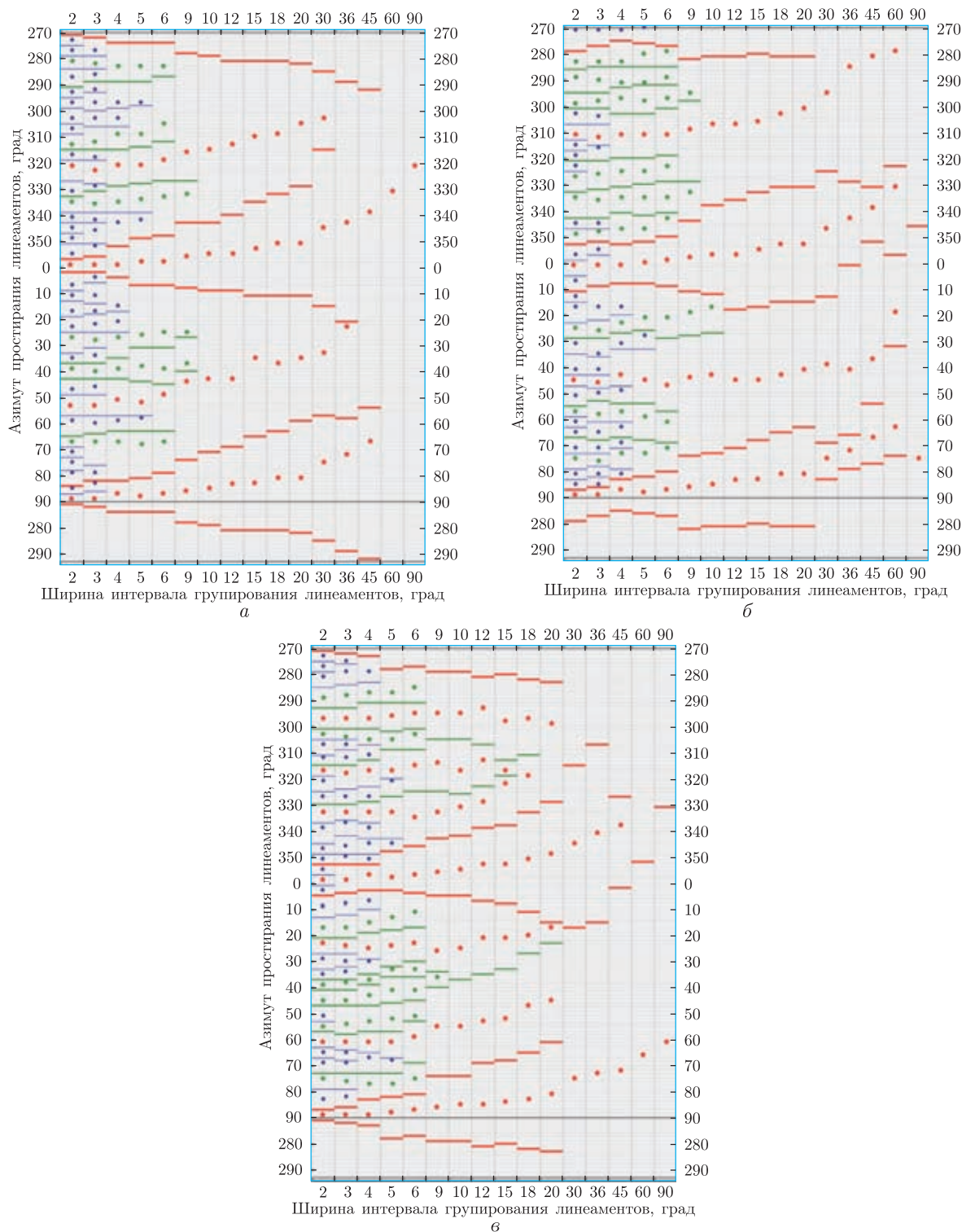


Рис. 1. Графики выделения систем линеаментов при разной ширине интервала группирования: *a* — Тарханкутский полуостров, Крым; *b* — район Чернобыльской АЭС; *v* — юго-восточная часть Днепро-Донецкой впадины. Условные обозначения. Красные линии — системы линеаментов максимальной протяженности (ширина интервала группирования 2–90°); зеленые линии — системы линеаментов средней протяженности (ширина интервала группирования 2–20°); синие линии — системы линеаментов минимальной протяженности (ширина интервала группирования 2–5°). Звездочки — модальные значения системы линеаментов

выделенные линеаменты, отвечают разрывам, а закономерности, присущие ориентировке линеаментов аналогичны закономерностям ориентировки разрывов кристаллических пород.

Сравнительный анализ выделенных систем включал анализ их протяженности, ширины, интенсивности выраженности, сложности строения. Протяженность системы оценивалась числом графиков, построенных с разной шириной интервала группирования, на которых фиксируется его модальное значение в виде отдельного максимума.

В исследуемых районах, судя по графикам распределений ориентировки линеаментов, уверенно прослеживаются четыре группы максимумов: северо-западного, субмеридионального, северо-восточного и субширотного простираний, которые различаются по протяженности и особенностям строения (см. рис. 1). Максимумы субмеридионального и субширотного простираний построены просто: начиная с графиков, полученных с использованием интервалов группирования шириной до 2° , 3° до 90° , это одновершинные максимумы, не состоящие из максимумов меньшей протяженности. По особенностям строения ортогональные системы весьма сходны между собой, независимо от ширины интервала осреднения, использовавшегося для их выделения. В большинстве районов они характеризуются наибольшей протяженностью среди наблюдаемых максимумов (см. рис. 1).

Максимумы северо-западного и северо-восточного простираний построены сложно. Каждый из этих максимумов состоит из одного, редко двух наиболее протяженных максимумов и 4–6 максимумов меньшей протяженности, которые объединяются с увеличением ширины интервала группирования. В большинстве случаев диагональные максимумы заметно меньшие по протяженности, чем ортогональные, но бывают и исключения, вероятно, связанные с влиянием локальных особенностей структуры отдельных районов.

По строению максимумы северо-западного и северо-восточного простираний заметно различаются между собой. Если максимумы, выделенные интервалами группирования шириной 10° и более, характеризуются достаточно однородным строением, то при использовании интервалов меньшей ширины их строение заметно различается по интенсивности, протяженности и количеству слагающих их максимумов. Обычно максимумы северо-западного простирания построены проще, чем максимумы северо-восточного. Возможно, различия в строении максимумов диагональных систем является отражением асимметрии в строении тектонических структур, на которую указывал еще А. В. Пейве [7].

Различия в строении ортогональных и диагональных систем, вероятно, обусловлены разным характером деформаций при образовании соответственно ориентированных разрывов. Как известно, субмеридиональные нарушения в большинстве случаев являются структурами растяжения, субширотные — структурами сжатия, а северо-западные и северо-восточные — структурами скола [8, 9].

Анализ взаимного размещения модальных значений систем субмеридионального и субширотного простирания, построенных с использованием интервала группирования шириной от 5° до 15° показал, что угол между ними во всех районах равен 90° со средним отклонением порядка $0,5^\circ$. У систем северо-западного и северо-восточного простираний углы между модальными значениями также часто близкие к прямому углу, но среднее отклонение достигает $4-6^\circ$. Таким образом, все выделенные системы линеаментов являются сопряженными, что характерно и для разломов разных районов Украины и других регионов Земли [5, 9, 10].

Для установления количественной зависимости между числом выделенных систем линеаментов и шириной интервала группирования исходные данные были получены на основе анализа графиков по каждому из трех участков исследуемой территории (см. рис. 1). При

расчете зависимости по каждому интервалу группирования использовались модальные значения количества систем. Исходные данные демонстрирует табл. 1.

С помощью регрессионного анализа было установлено, что зависимость между количеством выделяемых систем линеаментов и шириной интервала группирования, приведенное на рис. 2, описывается уравнением регрессии. Уравнение регрессии представлено гиперболой $Y = 62,157 \cdot X^{-0,933177}$; $R^2 = 0,948$.

Таким образом, нами установлена прямая корреляционная зависимость между шириной интервала группирования линеаментов и количеством выделяемых систем.

Несомненно, на параметры выделяемых систем линеаментов оказали влияние и локальные особенности строения изучавшихся районов. Так, ширина ортогональных систем в Крыму и юго-востоке ДДВ увеличивается с увеличением ширины интервала группирования, тогда как для диагональных систем — сокращается. На аналогичное соотношение ширины диагональных и ортогональных систем указывал П. С. Воронов [8]. Иной характер аналогичных соотношений присущ району ЧАЭС. Здесь с увеличением интервала группирования увеличивается ширина диагональных систем. Вероятно, это связано с локальными особенностями геологического строения района.

Различаются районы и по протяженности систем линеаментов и их роли в строении районов. В пределах изученных районов Крыма и ДДВ ортогональные системы линеаментов более протяженные, чем аналогичные диагональные системы. Это согласуется с известными данными об определяющем влиянии на строение этих районов протяженных ортогональных трансрегиональных разломов [11]. В Крыму, по нашим данным, субмеридиональная система линеаментов более протяженная, чем субширотная система, что отвечает роли этих структур в строении района. Согласно данным геолого-геофизических исследований, наиболее крупные субмеридиональные разломы Крыма являются продолжением Западно-Ингулецкой и Криворожско-Кременчугской зон глубинных разломов УЩ [5, 12, 13]. Субширотные нарушения играют меньшую роль в строении района.

Таблица 1. Сопоставление ширины интервала группирования с модальным количеством выделяемых систем линеаментов на каждом участке работ

Ширина интервала группирования, град	Количество выделяемых систем			
	Тарханкутский полуостров, Крым	территория Чернобыльской АЭС	юго-восточная часть ДДВ	модальное значение количества систем
2	34	31	33	33
3	29	26	28	28
4	16	20	23	20
5	13	14	17	14
6	10	13	14	13
9	7	7	8	7
10	4	5	7	5
12	4	4	7	4
15	4	4	7	4
18	4	4	6	4
20	4	4	5	4
30	4	4	2	4
36	3	4	2	3
45	2	4	2	2
60	1	2	1	1
90	1	1	1	1

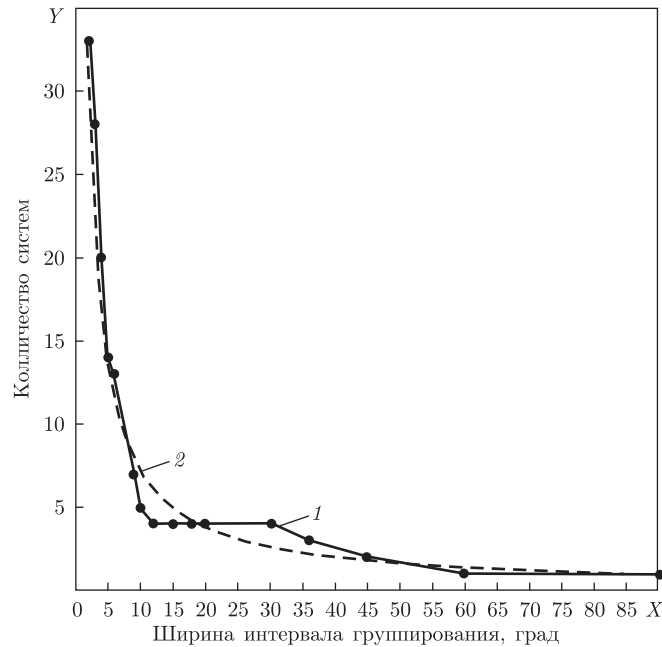


Рис. 2. Зависимость количества выделяемых систем линеаментов от ширины интервала группирования (1). Корреляционная зависимость (2)

В изученном нами районе ДДВ более протяженной является субширотная система линеаментов, чем субмеридиональная. Это хорошо увязывается с расположением района в пределах субширотной Центрально-Украинской мегазоны тектонической активизации [14]. Еще одной характерной особенностью района, которая отличает его от двух остальных, есть наличие в составе диагональных максимумов не одного, как в Крыму и Чернобыле, а трех протяженных систем северо-западного простирания и двух систем северо-восточного. Несомненно, это связано с тем, что важную роль в строении как исследуемого района, так и всей ДДВ играют структуры северо-западного простирания.

В районе Чернобыля северо-западная система более протяженная, чем ортогональные системы. Эти особенности могут быть вызваны влиянием расположенной здесь крупной тектонической зоны разломов северо-западного простирания, ограничивающей ДДВ. В тоже время основные ортогональные системы характеризуются одинаковой протяженностью, что отражает примерно одинаковую роль в строении района субмеридиональной Одесско-Брусилловской зоны разломов и Северо-Украинской мегазоны тектонической активизации субширотного простирания [14].

Несомненно, указанные выше особенности строения систем линеаментов отражают особенности строения разломов, но требуют более углубленного геологического анализа.

Таким образом, на основании изложенных результатов исследования можно сделать следующие выводы

1. Количество выделяемых систем линеаментов зависит прежде всего от ширины интервала группирования, используемого для построения графиков распределений их азимутов простирания, анализ которых позволяет выделять системы линеаментов. Поэтому при выделении систем линеаментов или трещин необходимо обязательно указывать ширину интервала группирования.

2. Системы линеаментов субширотного и субмеридионального простираний по особенностям строения близки между собой и резко отличаются от систем линеаментов северо-западного и северо-восточного простираний. Линеаменты ортогональных направлений образуются по одной системе, которая не делится на более мелкие, тогда как линеаменты диагональных направлений представлены несколькими более узкими системами. Системы линеаментов северо-западного и северо-восточного простираний различаются по количеству слагающих их более узких систем.

3. У большинства выделенных систем линеаментов имеются сопряженные системы, т. е. угол между их модальными значениями близкий к 90° .

4. Различия в строении графиков распределений азимутов простирания линеаментов каждого из трех изученных районов, вероятно, вызваны различиями в ориентировке тектонических напряжений.

5. Установлена прямая корреляционная зависимость между шириной интервалов группирования линеаментов и количеством выделяемых систем с $R^2 = 0,948$.

6. Учитывая генетическую связь линеаментов с разрывами пород, закономерности, присущие системам линеаментов, вероятно, аналогичны закономерностям, характерным для систем трещин и разрывов.

1. Чебаненко И. И. Теоретические аспекты тектонической делимости земной коры. – Киев: Наук. думка, 1977. – 88 с.
2. Тяпкин К. Ф. Физика Земли. – Киев: Вища шк., 1998. – 312 с.
3. Ходоровский А. Я., Апостолов А. А. Метод количественного выделения систем линеаментов // Доп. НАН України. – 2013. – № 1. – С. 111–117.
4. Муди Дж. Д., Хилл М. Дж. Сдвиговая тектоника // Вопросы современной зарубежной тектоники. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1960. – С. 265–333.
5. Краснощек А. Я. Системы разломов фундамента и их взаимосвязь со структурами осадочного чехла в пределах Северного Причерноморья // Геол. журн. – 1971. – **36**, вып. 5 – С. 10–18.
6. Азметшина А. К. Взаимосвязь дайковых образований с тектоническими этапами развития Украинского щита // Докл. АН СССР. – 1980. – **255**, № 5. – С. 1201–1204.
7. Пейве А. В. Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1961. – № 3. – С. 5–11.
8. Воронов П. С. Очерки о закономерностях морфометрии глобального рельефа Земли – Ленинград: Наука, 1968. – 217 с.
9. Чебаненко И. И., Гожик П. Ф., Евдощук Н. И., Клочко В. П. Схема глубинных разломов на участках Крымского и Кавказского побережья Черного моря // Геол. журн. – 2003. – № 1. – С. 54–58.
10. Штенгелов Е. С. Зоны новейшего и современного раздвижения континентальной коры // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1980. – № 6. – С. 5–19.
11. Буш В. А. Системы трансконтинентальных линеаментов Евразии // Геотектоника. – 1983. – № 3. – С. 15–31.
12. Крутиховская З. А., Пашкевич И. К. Магнитное поле и строение земной коры древних щитов // Геофиз. сб. АН УССР. – 1974. – Вып. 62. – С. 3–15.
13. Державна геологічна карта України. – 1: 200000. Аркуші L-36-XX1 (Чорноморське), L-36-XX11 (Красноперекопськ), L-36-XY11 (Руїна Морське): Поясн. зап. Кримська серія // Державний комітет природних ресурсів України / Уклад. Б. П. Чайковський, С. В. Білецький, В. Б. Деев та ін. – Київ. – 2005. – 99 с.
14. Атлас. Геологія і корисні копалини України / Упоряд. ін-т геол. наук НАН України, УШПТ “Геос-XXI століття”; Гол. ред. Л. С. Галецький. – 1 : 5000000 – Київ: ДП “Такі справи”, 2001. – 168 с.

ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины”, Киев

Поступило в редакцию 26.03.2014

А. Я. Ходоровський, О. А. Апостолов

Аналіз залежності кількості виділених систем лінеаментів від ширини інтервалу групування

Кількість систем лінеаментів, а також тріщин, розривів, які визначають окремі автори, значно різняться, що перешкоджає подальшій кількісній обробці поля лінеаментів. Причини такого положення раніше не аналізувалися. Проведені дослідження показали, що на кількість систем лінеаментів, які виділяють на графіках розподілу їх азимутів простягання, істотно впливає ширина інтервалу групування лінеаментів. Встановлено, що залежність кількості виділених систем лінеаментів від ширини інтервалу групування описується гіперболою з коефіцієнтом кореляції $R^2 = 0,948$.

A. J. Khodorovskiy, A. A. Apostolov

Analysis of the dependence of the number of allocated systems of lineaments on the grouping interval width

The numbers of the systems of lineaments, as well as cracks and breaks, allocated by separate authors, are different considerably, which interferes the subsequent quantitative processing of a field of lineaments. The reasons for such situation were not analyzed. The carried out researches have shown that the width of the interval of grouping of the lineaments influences significantly the number of systems of lineaments allocated on the graph of distribution of their stretch azimuths. It is established, that the dependence of the number of allocated systems of lineaments on the width of the interval of grouping is described by a hyperbola with the coefficient of correlation $R^2 = 0.948$.