

А. Я. Ходоровский, А. А. Апостолов

## Метод количественного выделения систем линеаментов

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Лялько)

*Показана важная роль анализа ориентировки и выделения систем линеаментов для количественного описания поля линеаментов. Предложен новый метод выделения систем линеаментов, основанный на количественной оценке достоверности выделения максимумов и минимумов на распределениях их азимутов простирания, построенных с обоснованным выбором интервала группирования замеров. Достоверность систем линеаментов, установленных с использованием предложенного метода, подтверждается их совпадением с ориентировкой систем трещин, кварцевых жил, даек и других линейных образований, приуроченных к разломам.*

**Постановка задачи.** В районах с широким развитием рыхлых отложений только линейные элементы земной поверхности (линеаменты), выделяемые по дистанционным материалам, позволяют проводить количественное изучение трещиноватости коренных пород. Полученные данные используются для поисков и прогноза залежей полезных ископаемых и изучения строения разломов самостоятельно или в комплексе с геолого-геофизическими данными. Количественное описание поля линеаментов обычно проводится с учетом ориентировки линеаментов (посистемно). Поэтому одним из ключевых вопросов количественного описания поля линеаментов есть вопрос анализа пространственной ориентировки и выделения систем линеаментов.

Анализом ориентировки трещин и разрывов исследователи разных стран занимаются уже более 150 лет, но единого мнения по этому вопросу нет. Методы анализа ориентировки трещин, разрывов и линеаментов у большинства авторов близкие и основываются на анализе массовых замеров их азимутов простирания [1–4]. Результаты замеров представляют в виде роз-диаграмм или гистограмм, которые анализируются визуально. В процессе анализа графиков все внимание уделялось выделению модальных значений локальных максимумов, которые рассматривались в качестве отдельных систем линейных структур. Границы максимумов специально не анализировались, хотя обоснованное их выделение имеет большое значение для объективного выделения систем линеаментов.

Задача выделения систем разрывов и линеаментов по данным массовых замеров их азимутов простирания с точки зрения математики сводится к задаче разделения смешанного распределения на составляющие, но при этом неизвестно количество слагающих его отдельных распределений и законы, описывающие эти частные распределения. Крылья соседних частных распределений перекрываются между собой, но степень перекрытия неизвестна. Кроме того, разделение такого смешанного распределения необходимо проводить в одномерном признаковом пространстве (количество или суммарная длина линеаментов). Такая задача не может быть решена строго математическими методами. А. В. Вихертом [5], а также А. Б. Вистелиусом (1958), Т. Е. Грязновой (1949) для ее решения был разработан ряд относительно строгих количественных приемов анализа ориентировки разрывов. Но они

использовали наряду с азимутами простираения еще и азимуты падения структур, кроме того, эти методы ориентировались на выделение лишь 2–4 систем разрывов.

По данным визуального анализа графиков распределений азимутов простираения трещин и разрывов разными авторами выделялось от 2–4 до 36–38 систем линейных структур. Подавляющее большинство исследователей выделяют от 6–8 до 12–14 систем структур. Несмотря на различия в количестве систем разрывов, установленных в разных районах, модальные значения выделяемых систем уверенно совпадают между собой. Это хорошо согласуется с результатами, представленными в работах [2–4].

Значительные различия в количестве систем разрывов, выделяемых разными авторами, по нашему мнению, обусловлены:

- 1) отсутствием единого формализованного подхода к построению анализируемых графиков распределений азимутов простираения;
- 2) выделением систем структур на основании анализа одного графика распределения азимутов простираения всех замеренных линейных структур;
- 3) использованием визуальных методов анализа графиков.

Этому способствует и отсутствие теоретических или экспериментальных данных о количестве систем разломов и трещин, которое существует или может существовать в природе, сведений о законе распределения замеров в пределах систем разрывов.

Учитывая вышесказанное, нами был разработан более строгий метод выделения систем линеаментов и других линейных структур на основе анализа массовых замеров их ориентировки на отдельных участках.

**Исходные данные.** В качестве исходного материала использовалась карта линеаментов, построенная по результатам визуального структурного дешифрирования космических снимков — одного из наиболее эффективных методов картирования разрывов кристаллических пород, перекрытых чехлом рыхлых осадочных отложений [1, 6, 7].

Дешифрировались исходные космические снимки, сделанные в разное время разной съемочной аппаратурой, а также снимки, подвергшиеся различным преобразованиям (контрастированию, эквипланации, синтезированию и др.). Кроме космических снимков для выделения линеаментов использовались топографические карты разных масштабов и цифровые модели рельефа.

Структурное дешифрирование космических снимков проводилось с использованием программных продуктов ERDAS Imagine, ArcGIS, MapInfo Professional и других геоинформационных систем (ГИС) — приложений. По результатам визуального структурного дешифрирования всего комплекса материалов была построена карта линеаментов на территории исследования.

**Метод анализа закономерностей ориентировки линеаментов, разрывов и трещин,** разработанный нами, близок к методам, предложенным в работах А. Б. Вистелиуса и Т. Е. Грязновой. Метод позволяет выделять разное количество систем линеаментов на территории исследования в зависимости от интервала группирования азимутов простираения линеаментов. Судя по анализу публикаций, наиболее обоснованным нам кажется выделение 8 систем разрывов [1–6].

Работы с использованием предложенного нами метода анализа ориентировки линеаментов состоят из четырех этапов:

*1 этап* — выбор интервала группирования замеров ориентировки линеаментов и построение графиков распределения для выделения систем линеаментов. Как свидетельствует анализ публикаций, при построении графиков распределений азимутов простираения разрывов

и линеаментов, авторы обычно не обосновывают ширину применяемого интервала группирования (окна осреднения). Разные авторы используют интервалы группирования замеров ориентировки структур шириной от 5–10° до 45–60°. В результате анализируемые графики распределений значений азимутов простирания оказываются построенными на основании разного числа данных осреднения. Как известно, интервал изменения значений азимутов простирания составляет 180°. В случае построения анализируемых графиков с интервалом группирования в 5°, количество независимых наблюдений будет равно 36 при ширине 10–18° и так далее. Зависимость между шириной интервала группирования азимутов простирания и количеством выделяемых систем структур:

$$\frac{180}{3 \cdot I} \leq K_{\max T} \leq \frac{180}{2 \cdot I}, \quad (1)$$

$$K_{\text{пр}} \leq K_{\max T}, \quad (2)$$

где  $K_{\text{пр}}$  — количество систем структур, которые выделяются на практике;  $K_{\max T}$  — максимальное теоретическое количество систем структур;  $I$  — ширина интервала группирования структур.

Для выделения каждой отдельной системы разрывов необходимо в среднем порядка трех наблюдений (один относительный максимум и два относительных минимума) — это левая граница формулы (1), правая граница предусматривает вариант, когда график распределения азимутов простирания структур характеризуется “пилообразным распределением” — минимум, максимум, минимум, максимум и т. д.

Таким образом, если взять ширину интервала группирования структур 10°, то по формуле (1):  $K_{\max T} \in [6 \dots 9]$ . Количество систем, выделяемых на практике, всегда меньше теоретического максимального числа (формула 2), поэтому при ширине интервала группирования 10°, трудно выделить более 6 систем структур. Действительно, судя по литературным данным, многие авторы выделяют именно 6 систем трещин, разломов или линеаментов.

Некоторые авторы выбор ширины интервала группирования в 10° обосновывают, исходя из величины ошибки измерения отдельных замеров [1]. Однако в пределах каждого окна осреднения ошибка измерений среднего или модального значения зависит как от ошибки единичных наблюдений, так и от числа наблюдений и вычисляется по известной формуле:

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma_{x_i}}{\sqrt{n}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{\bar{X}}$  — средняя ошибка среднего значения в окне;  $\sigma_{x_i}$  — средняя ошибка единичных определений;  $n$  — число наблюдений.

Замеры азимутов простирания линеаментов, которые проводятся с использованием ГИС продуктов дают возможность получить точность замеров азимутов простирания линеаментов не хуже 1–2°, что позволяет выделять 16 и более систем линеаментов. Однако реальное количество карт плотности или суммарной длины линеаментов, которое можно построить, зависит от количества выделенных линеаментов. Их количество должно обеспечивать интерпретацию построенных карт.

*II этап.* На этом этапе проводится разбивка территории исследования на отдельные, не перекрывающиеся между собой участки для замеров ориентировки линеаментов. Участки располагаются относительно равномерно на изучаемой площади и характеризуются достаточно однородным геологическим строением и близкими ландшафтными условиями. Размеры участков определяются необходимостью иметь количество замеров, достаточное для

построения графиков распределений азимутов простирания линеаментов. На первом этапе работ был выбран интервал группирования линеаментов, исходя из этого, количество выделяемых интервалов определяется по формуле:

$$K_I = \frac{180}{I}, \quad (4)$$

где  $K_I$  — количество выделяемых интервалов.

Таким образом, при ширине интервала группирования  $5^\circ$  количество выделяемых интервалов — 36. Учитывая последующую статистическую обработку данных, необходимо, чтобы на каждый выделенный интервал имелось хотя бы 6–10 замеров азимутов простирания линеаментов. А всего для построения графика распределений (с учетом неравномерного характера распределения линеаментов по направлениям) следует иметь не менее 250–350 замеров, что и определяло минимальные размеры участков массовых замеров. Как показывает практика, такое количество замеров можно получить на достаточно ограниченной площади.

*III этап.* Для каждого выделенного участка территории устанавливается сам факт наличия неоднородностей в распределениях замеров азимутов простирания линеаментов. Наличие неоднородностей устанавливается путем проверки соответствия анализируемых распределений случайному или равномерному типу распределения с помощью статистического критерия Пирсона или любого другого непараметрического критерия. Отличия анализируемых распределений от равномерного распределения при уровне значимости 0,05 указывают на неоднородный характер распределений азимутов простирания линеаментов и на наличие систем линеаментов. Далее устанавливается достоверность выделения отдельных максимумов и минимумов распределений, построенных по данным замеров ориентировки линеаментов на всех выделенных участках территории. Подробно процедура оценки достоверности выделяемых максимумов и минимумов описана в работах [8, 9].

Результатом III этапа является построение распределений модальных значений максимумом и минимумов с учетом достоверности их выделения для каждого участка замеров ориентировки линеаментов.

*IV этап.* Модальные значения максимумов и минимумов с учетом достоверности их выделения, установленные на III этапе для отдельных участков, используются для построения графика их распределения для всей территории исследования. На графике этого итогового распределения, в большинстве случаев, достаточно уверенно и однозначно выделяются границы и модальные значения системы линеаментов, общие для всей площади работ.

В тех случаях, когда графики локальных максимумов анализируемых распределений оказываются асимметричными или полимодальными, они рассматривались как совокупность нескольких систем. Разложение графиков таких сложных распределений максимумов на составляющие распределения проводится путем их сопоставления с сопряженными ортогонально расположенными одновершинными максимумами.

**Практические результаты.** Для практической реализации предложенного метода анализа ориентировки и выделения систем линеаментов была составлена автоматизированная программа на языке программирования Delphi, которая использовалась при анализе закономерностей ориентировки линеаментов в разных районах Украины.

Результаты анализа ориентировки и выделения систем линеаментов на территории Зоны отчуждения Чернобыльской АЭС с использованием предложенной методики демонстрирует рис. 1. Графики распределений построены с интервалом группирования данных —  $5^\circ$ .

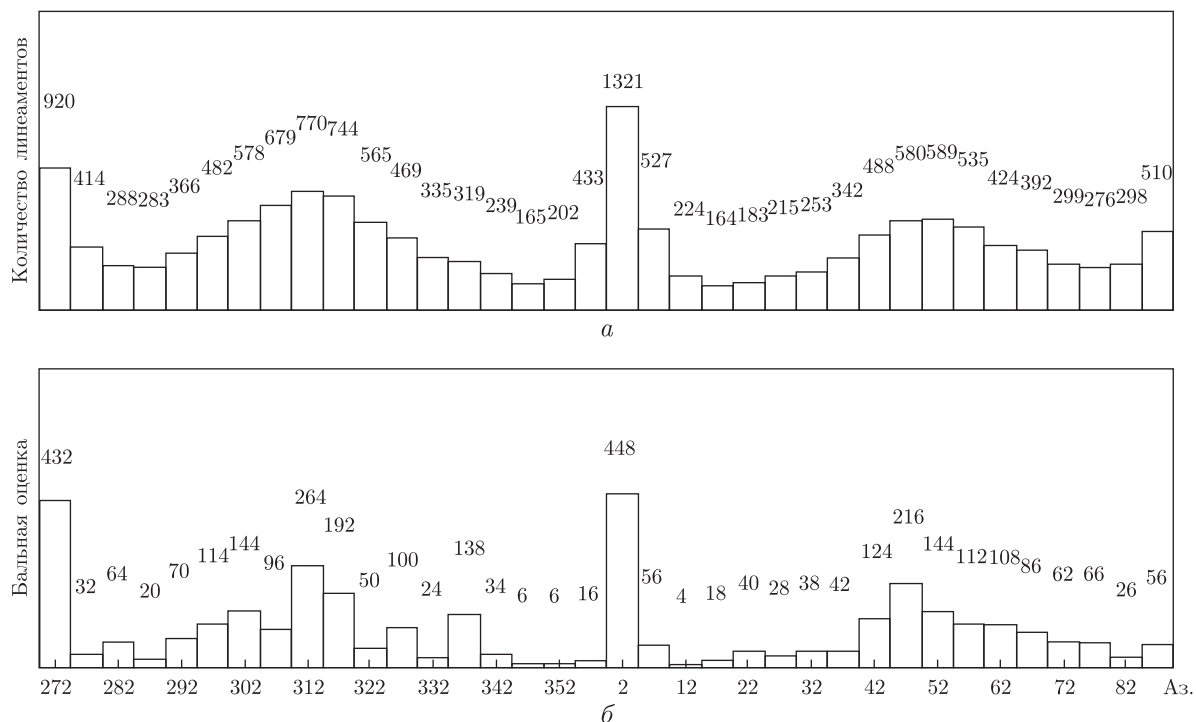


Рис. 1. Гистограммы распределения азимутов простираций линейментов территории Зоны отчуждения Чернобыльской АЭС: *а* — без специальной математической обработки; *б* — с использованием предложенного метода обработки измерений

В результате проведенных расчетов обычно выделяется четное количество систем линейментов, границы и модальные значения выделенных систем различаются примерно на  $90^\circ$ . В случае невыполнения этих условий проводится переинтерпретация всего собранного материала.

Достоверность полученных результатов оценивается путем сопоставления выделенных систем линейментов с системами трещин и разломов изучаемого региона, установленных другими авторами. Если есть возможность, то по той же методике проводится анализ ориентировки трещин и разрывов, а также даек, зон метасоматоза, кварцевых жил, линейных аномалий физических полей и других образований, связанных с разломами, которые установлены по геологическим или геофизическим данным на изучаемой территории. Так, достоверность выделения систем линейментов, установленных с применением предложенного метода, подтверждается их хорошим совпадением с системами разломов, трещин и других линейных образований, приуроченных к разломам (табл. 1).

Таким образом, нами показана зависимость количества выделяемых систем линейментов от интервала группирования линейментов. Использование предложенного метода выделения систем структур в разных районах Украины, различающихся по геологическому строению и природным условиям, позволило выделять 8 систем линейментов (см. табл. 1). Модальные значения выделенных нами систем линейментов хорошо согласуются с модальными значениями систем трещин и разломов, установленных по геолого-геофизическим данным, а также с системами линейментов, трещин и разломов, выделенными в Украине и других регионах разными исследователями [2–4, 10–12]. Это указывает на достоверность систем линейментов, выделенных с использованием предложенного метода.

Таблица 1. Сравнение ориентировки границ и/или модальных значений систем линеаментов, трещин, разломов и других линейных образований, выделенных в Украине и России

Линеаменты				Трещины УЩ КП, по данным авторов	Зоны метасомато- тоза УЩ КП, по данным авторов	Разломы, по [2]	Дайки, по [10]	Разломы по геофизи- ческим данным [3]	Разломы		
УЩ СС, по данным авторов	УЩ ВС, по данным авторов	ДДВ ЮВ, по данным авторов	УЩ КП, по данным авторов						ВЩ, по [13]	БЩ, по [11]	АЩ, по [12]
283–298 295	282–293 289	282–303 297	281–300 295	283–297 292	276–294 285	280–290	—	287	287	295–305	295–300
299–329 309	294–318 311	304–324 318	301–320 315	298–317 307	295–320 310	305–315	305; 315	305; 315	305; 315	320–330	315
330–345 333	319–343 327	325–348 333	321–340 335	318–342 337	321–342 335	335–340	330	332	333	340–345	335–345
346–11 358	344–5 358	349–11 357	341–0 355	343–0 355	343–5 355	0	350; 0	347; 0	345; 0	355–0	0
12–28 19	6–30 25	12–38 24	1–20 15	1–20 15	6–20 15	15–25	—	17	17	25–30	15–25
29–55 44	31–55 43	39–57 54	21–45 40	21–45 30	21–40 30	35–45	35; 45	35; 45	35; 45	45–50	50
56–73 56	56–80 60	58–78 60	46–75 60	46–75 62	41–65 50	65–70	60	62	63	65–70	65–75
74–282 88	81–281 88	79–281 87	76–280 90	76–282 272	66–275 85	90	80; 90	77; 90	75; 90	85–90	90

Примечание. УЩ — Украинский щит; СС — Северный склон щита; ВС — Восточный склон щита; ДДВ — Днепровско-Донецкая впадина; КП — Коростенский плутон; ВЩ — Воронежский щит; БЩ — Балтийский щит; АЩ — Алданский щит.

1. *Гольбрайх И. Г.* Морфоструктурные методы изучения тектоники закрытых платформенных нефтегазоносных областей. – Ленинград: Недра, 1968. – 152 с.
2. *Чебаненко И. И.* Розломна тектоніка України. – Київ: Наук. думка, 1966. – 179 с.
3. *Тяпкин К. Ф.* Физика Земли. – Киев: Вища шк., 1998. – 312 с.
4. *Незаметдинова С. С.* Анализ ориентировки региональных разрывных нарушений нефтегазоносных областей на примере Предкавказья: Автореф. ... дис. канд. геол.-мин. наук. – Ленинград, 1970. – 17 с.
5. *Визерт А. В.* Простейшие методы вероятностного анализа простираения структурных элементов (трещин, разрывов, осей складок, даек, рудных жил и др.) // Применение математических методов в геологии: Сб. науч. тр., № 3. – Алма-Ата: ГИН АН КазССР, 1968. – С. 38–42.
6. *Космическая информация в геологии.* – Москва: Наука, 1983. – 536 с.
7. *Кац Я. Г., Тевелев А. В., Полетаев А. И.* Основы космической геологии: Учеб. пособие. – Москва: Недра, 1988. – 235 с.
8. *Ходоровский А. Я.* Количественное изучение разрывных нарушений для целей прогнозирования в условиях Украинского щита (по материалам аэрофотосъемки): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Львов, 1979. – 22 с.
9. *Спутниковые методы поиска полезных ископаемых / Под ред. акад. НАН Украины В. И. Лялько и д-ра техн. наук М. А. Попова.* – Киев: Карбон-Лтд, 2012. – 436 с.
10. *Азметшина А. К.* Взаимосвязь дайковых образований с тектоническими этапами развития Украинского щита // Докл. АН СССР. – 1980. – 255 – № 5. – С. 1201–1204.
11. *Петров А. И.* Древние разломы восточной части Балтийского щита и движения по ним // Там же. – 1970. – 191, № 2. – С. 418–421.
12. *Гришкян Р. И.* Новые данные о строении и развитии системы докембрийских разломов решетчатого типа на Алданском щите // Вопросы тектоники докембрия континентов: Сб. науч. тр., № 6. – Москва: ГИН АН СССР, 1980. – С. 120–131.
13. *Серебряков Е. Б., Жаворонкин В. И.* Системы разломов Воронежского кристаллического массива (ВКМ) и их аналоги на Украинском щите // Геофиз. журн. – 1987. – 9, № 3. – С. 12–17.

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

Поступило в редакцию 25.07.2012

**А. Я. Ходоровський, О. А. Апостолов**

### **Метод кількісного виділення систем лінеаментів**

*Показано важливу роль аналізу орієнтування та виділення систем лінеаментів для кількісного опису поля лінеаментів. Запропоновано новий метод виділення систем лінеаментів, який заснований на кількісній оцінці вірогідності виділення максимумів та мінімумів на розподілах їх азимутів простягання, побудованих з обґрунтованим вибором інтервалу групування вимірів. Вірогідність систем лінеаментів, встановлених з використанням запропонованого методу, підтверджується їхнім збігом із орієнтуванням систем тріщин, кварцових жил, дайок та інших лінійних утворень, віднесених до розломів.*

**A. J. Khodorovskyi, A. A. Apostolov**

### **Method of quantitative separation of lineament systems**

*The important role of the analysis of orientation and separation of lineament systems for the quantitative description of the lineament field is shown. A method of separation of lineament systems based on the quantitative estimations of the reliability of separation of maxima and minima on the distributions of their trend azimuths constructed with the proved choice of the interval of the grouping of measurements is offered. Reliability of lineament systems established by using the offered method is confirmed by their concurrence with the orientation of crack systems, quartz veins, dikes, and other linear formations connected with fractures.*