

## Върху една методика за обработка и динамична интерпретация на пукнатини

Стефан Шанов, Сава Стоянов

Геологически институт, 1113 София

*S. Shanov, S. Stoyanov — On a method for treatment and dynamic interpretation of joints.* Dynamic interpretation of tectonic joints is still an unsolved problem in structural geology and hence every new approach is of particular interest. The original method of Nikolaev (1969, 1977) has already shown good results in field studies. It is based on the empirical inference that joint density maxima exhibit a specific asymmetry in the  $\sigma_1 \sigma_3$  plane. For reliable interpretations, conformable projection of density fields in the diagrams used is of fundamental importance. In Nikolaev's method the statistical joint pattern is represented on rectangular density diagrams with coordinate axes  $\phi$  (direction of dip) and  $\alpha$  (angle of dip). They satisfy conformity requirements only for vertical and very steep joint sets. The present work develops a computerized method for plotting of joints on such rectangular diagrams using line-printer. The FORTRAN-IV program includes a procedure which improves the conformity of density fields of joints with steep and moderate dips ( $33-81^\circ$ ). An additional program enables representation of any density maxima without form distortion by means of rotation of the respective joints to a vertical position of their modal plane. The application of the method is illustrated by an example of jointing in Pliocene limestones from NE Bulgaria.

### Въведение

Тектонската напуканост на скалите несъмнено е носител на ценна информация за причинилото я поле на напреженията и по-специално за ориентировката на динамичните оси. В това отношение тя се очертава като по-млада и еднозначна от другите видове структури, които се използват за същата цел. Извличането на тази информация обаче се оказва един твърде сложен и труден проблем. След период на повишен оптимизъм към динамичната интерпретация на пукнатините през 60-те години, в последните едно-две десетилетия е налице, не само у нас, значителен спад на интереса към тях. При такова положение всяко обръщане към пукнатините би следвало да се приема най-малко като едно необходимо напомняне за съществено им структурно-тектонско значение, а всеки нов подход към техния анализ — като полезна стъпка към решаването на въпросния проблем.

Добре известен и прилаган от редица изследователи в България е методът на Гзовски за възстановяване осите на главните нормални напрежения (Г з о в с к и й, 1954, 1963, и др.). Като негов вариант от Н и к о л а е в (1969, 1977) е разработена една методика за статистическа обработка

и интерпретация на пукнатини, показала добри възможности при практически структурни изследвания от различно естество (Николлаев & Лебедева, 1977; Веселов и др., 1984). Окуражаващи резултати бяха получени и на територията на България в района на Централния Предбалкан (Николлаев & Шанов, 1983).

В настоящата статия заедно с краткото описание на тази методика с оглед популяризирането ѝ сред българските специалисти е направен сравнителен анализ на предложението от този автор графичен способ и е представена разработка върху автоматизираното статистическо обработване на пукнатините.

## Общи положения на методиката на П. Н. Николаев

Според Николлаев (1977) при реконструиране осите на тектонските напрежения по метода на Гзовски възникват главно следните затруднения: (1) неопределеност при определяне на спрегнатите пукнатини на срязване (Гущенко, 1975); (2) проблеми при използването на тектонските огледала, с чиято помощ се наименоват осите при наличие на пластични деформации (Гзовски, 1954), защото огледалата могат да не са едновъзрастни с пукнатините, а по браздите невинаги може еднозначно да се определи направлението на движение; (3) трудности при интерполацията на получените резултати между точките на наблюдение поради различия по ранг и ориентировка на напреженията в отделните локалитети.

За излизане от тези затруднения Николлаев (1977) избира твърде оригинален подход. След анализ на голямо количество диаграми на пукнатини той стига до извода, че пукнатинните максимуми почти винаги се отличават с повече или по-малко изразени асиметрия и ексцентрицитет. Като приема, че последните възникват при неизменно регионално поле на тектонските напрежения, той привежда обосновка за това, че в процеса на самото пукнатинообразуване ъгълът между спрегнатите пукнатини на срязване се изменя по определен начин (фиг. 1, а). Това изменение Николлаев обяснява с факта, че появата на всяка пукнатина причинява някаква промяна на напрегнатото състояние в непосредствената си околност. Изменя се по-специално всестранното налягане и именно това води до съответна промяна на ъгъла на срязване  $\theta$ , под който се образуват следващите пукнатини в повлияния обем. В крайна сметка в пукнатинните групи се получава асиметрично честотно разпределение (фиг. 1, б), което на плътностните диаграми се изразява в оформяне на ексцентрични полета на плътността, като изтеглянето на изоплощите (разреждането на изолиниите) се оказва по правило разбягащо се спрямо оста на максималния натиск  $\sigma_3^*$  (фиг. 4 а).

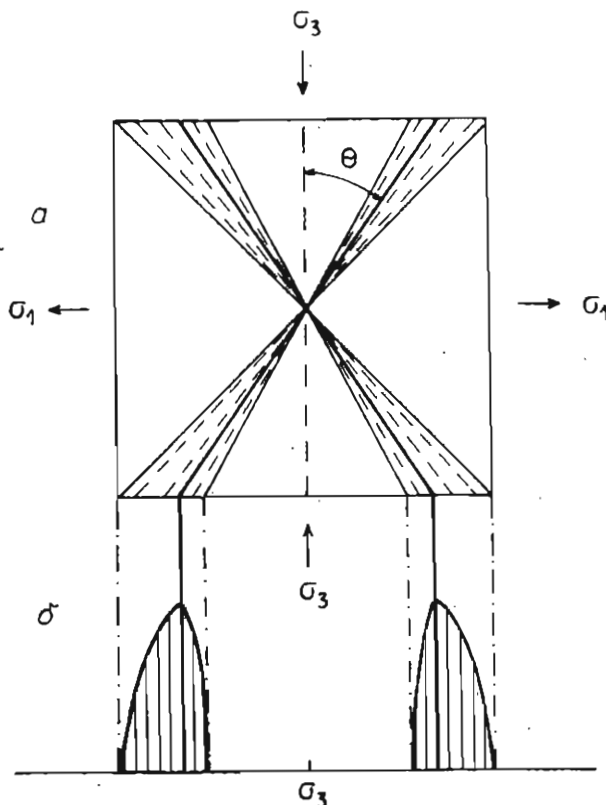
Това обяснение според нас се нуждае от допълнително емпирично и особено от теоретично аргументиране, но наличният полеви материал — собствен и на Николлаев — достатъчно убедително показва, че въпросното асиметрично разсейване на ориентировките на пукнатините на срязване представлява реална закономерност, която може ефективно да се използва за структурно-динамични реконструкции.

Сумирането на диаграми на пукнатини от отделни локалитети в даден район се използва в практиката предимно за получаване на по-пълна качествена информация за площното разпределение на напукаността. В раз-

\* В статията се използва възприетата от Николлаев индексация на главните напрежения.

глежданата методика това сумиране, съчетано с анализ на разсейването в сумарните максимуми, има и конкретно интерпретационно значение при възстановяването на регионалните оси на напреженията.

Специфична и съществена част в методиката, която Николаев (1969, 1977) предлага, е представянето на данните от измерванията във вид



Фиг. 1. Модел на образуването на пукнатините на срязване и тяхното разсейване (по Николаев, 1971, рис. 2)

*a* — формиране на преимуществено разсейване; *b* — асиметрия на разсейването и нейното отношение спрямо оста на максималния натиск

на правоъгълна диаграма на плътността. В декартова координатна система по едната ос се нанасят наклоните на пукнатините, а по другата — азимуталните ъгли („страните“) на потъването. Изборът на такъв вариант предлага определени практически удобства, но е твърде необичаен за структурните изследвания, при които за основа на всякакви анализи на пространствени структурни съотношения са всеобщо приети сферичните проекции. Според този автор в правоъгълните диаграми най-ясно и нагледно се извяват асиметриите и ексцентрицитетът на плътностните максимуми. Той обаче не привежда обосновка на това твърдение, поради което се налага неговото специално анализиране и уточняване.

## Относно изкривяванията на пространствени съотношения при изобразяване в плоскост

Най-вярно и еднозначно пространствените ориентировки на линейни и плоскостни елементи се представят и описват чрез съответните им образи (точки, дъги) върху сферична повърхност. Известно е обаче, че преобразуването на последната в удобната за работа равнинна проекция неизбежно внася различни по вид и величина изкривявания. Частичен изход от това положение е намерен в съобразяването на начина на проектиране с изискванията на конкретните задачи. За разглежданата методика, очевидно, е нужно такова проектиране, което най-добре да запазва формата и симетрията (респ. асиметрията) на плътностните максимуми и особено на изразения чрез последователни изолинии градиент на плътността на пукнатините. Освен предложената от П. Н. Николчев правоъгълна диаграма, от интерес в случая могат да са и най-често използваните в геоложката практика кръгови диаграми на Вулф и Шмидт. Изкривяванията, които те внасят, са показани на фиг. 2 чрез проекциите на серия концентрични окръжности от сферичната повърхност.

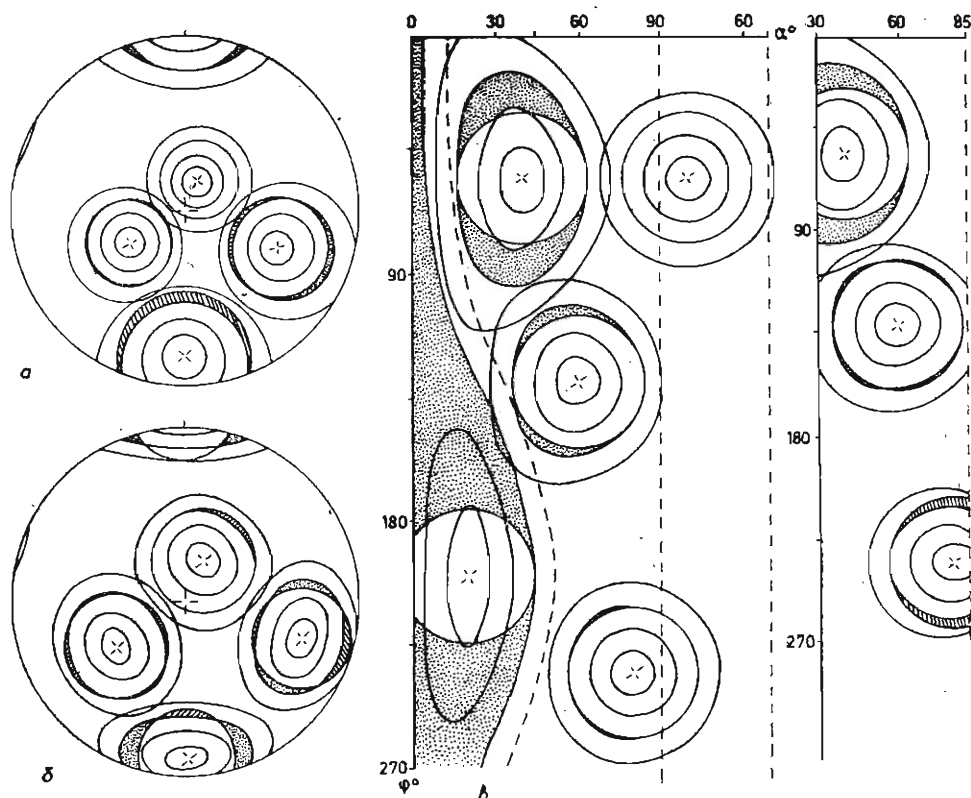
Както е известно, стереографската проекция, прилагана в геологията чрез равноъгълната мрежа на Вулф, по принцип е неподходяща за анализ на статистически разпределения на пространствени ориентировки поради сериозните площни изкривявания. Не е обръщано внимание, че освен това тя внася и известен ексцентрицитет, нарастващ от центъра към периферията (фиг. 2 а), който би могъл да подведе интерпретатора при визуалния анализ на максимумите.

За статистическата обработка на пукнатините най-широко приложение е намерила равноплощната проекция на Ламберт с реализация върху мрежата на Шмидт. Тази проекция също внася ексцентрицитет, макар и по-слабо изразен, отколкото в мрежата на Вулф. Главното изкривяване при нея е също добре познато — встрани от центъра на диаграмата окръжностите се проектират като елипси, значително сплеснати и удължени в периферната зона (фиг. 2 б), където попадат образите на пукнатини с най-стръмни наклони. Това изкривяване е много нежелателно, защото в земната кора, особено в слабо деформирани седиментни терени, доминират именно стръмните и субвертикалните пукнатини. Нещата не биха се подобрили, ако вместо с нормали се работи с линиите на наклона (при което стръмните пукнатини биха се проектирали в недеформиращата централна част на диаграмите), тъй като проектирането около центъра има силно влошена разделителна способност. Накрая, кръговите диаграми независимо в каква проекция са съвсем непригодни за морфоложки анализ на плътностни максимуми, попадащи около периферията, защото такива максимуми са разделени на диаметрално противостоящи части (фиг. 2 а, б), чиято обща конфигурация много трудно може да се възстанови.

Тъкмо последният недостатък лесно се избягва при правоъгълната диаграма на Николчев. Това е нейното основно достоинство, но не по-малко важен е фактът, че тя напълно удовлетворява изискването за конформност по отношение на най-често срещаните пукнатини — субвертикалните (фиг. 2 в).

Независимо от „матричната“ си форма тази диаграма също би могла да се разглежда като трансформация на сферична повърхност, по-точно като проекция на последната върху разгънатата цилиндрична повърхност, тангираща по екватора на сферата. При проектирането условно се запазват дължините по меридианите, но по паралелите се получава относително разтя-

гане, което нараства ускорено от екватора към полюса, където достига безкрайно голяма величина. Така че изкривяванията, които се внасят в случая, общо взето, са големи, но те практически липсват в един 40—50-градусов пояс около екватора (фиг. 2 в).



Фиг. 2. Равнинни изображения на серия концентрични окръжности от различни части на сферична повърхност при различни способи на проектиране

а — мрежа на Вулф; б — мрежа на Шмид; в — правоъгълна диаграма на Николаев, Окръжностите отговарят на телесни ъгли 16, 32, 48 и  $64^\circ$ , а центровете — на плоскости с наклон 20, 40, 60 и  $80^\circ$ . Към проекцията на третата окръжност ( $48^\circ$ ) е построена „референчна“ окръжност за по-добра визуализация на изкривяванията (точков щрих — площи на растягане, линеен — на свиване)

## Автоматизирано построяване на правоъгълни плътностни диаграми

С машинната статистическа обработка на пукнатините се постига не само облекчаване и ускоряване на една доста трудоемка процедура, но и попълно и рационално осмисляне на емпиричния материал. Разработените от нас програмни продукти на FORTRAN-IV с изход на лайн-принтер на ЕИМ, по общ замисъл и по някои конкретни операции са сходни с програмата за построяване на кръгови структурни диаграми, публикувана по-рано от единия автор (С то я н о в, 1981).

### Основна програма

Вход. Данните се въвеждат по начин, описан в указаната публикация: ПК I — заглавни данни (номерация и свободен текст); ПК II — данни за брой на пукнатините и ключови числа за евентуална обработка в сумарна



тина най-напред се дефинира каре с размери  $20/20^\circ$ , след това на всички точки, попадащи в него, се присвоява (добавя) една или повече бройки в зависимост от кратността на пукнатината. Натрупаните бройки се преизчисляват в проценти, на които за удобство на отпечатването се приписват подходящи литерни символи. Около основната матрица  $360/90^\circ$  се оформят допълнителни (повтарящи) части с цел да се избегне разкъсване на периферните плътностни максимуми (фиг. 3 а). Ако е предвидено дадена диаграма да влезе като съставка в сумарна, бройките, присвоени на съответните точки от мрежата, се записват върху външен носител. Когато се пристъпи към сумиране, последователно се изчитат и наслагват предвидените записи, след което се извършва същата дообработка.

Специфична програмна процедура, въведена във връзка с посочените недостатъци на правоъгълната проекция, е построяването на една допълнителна ивица от диаграмата, в която с по-малки изкривявания се изобразяват изоплътностите на сравнително стръмни, но не субвертикални групи пукнатини. Тя може да се схваща като равнинен образ на проекцията на един пояс от сферата (в случая между паралели  $33$  и  $81^\circ$ ) върху конична повърхност, тангираща по паралел  $56,5^\circ$ . Изборът на този паралел е съобразен с печата на ЕИМ — той е точно с  $1/6$  по-къс от екватора, а такова съксяване на диаграмата по ос  $\phi$  се осъществява непосредствено чрез увеличаване ъгловата стойност на интервала между редовете на мрежата от  $5$  на  $6^\circ$ . Както се вижда от фиг. 2 в, с допълнителната ивица се постига сериозно подобряване в конформността на изображението.

*Изход.* На широкия печат се извеждат двете диаграми — основна и допълнителна — разположени паралелно. Отпечатва се и таблица за числовите значения в проценти на използваните символи. Изчертаването на изолините се извършва ръчно (фиг. 3 а, фиг. 4 а).

### *Допълнителна програма*

С горната програма съвсем удовлетворително е решен проблемът на конформното изобразяване на плътностни максимуми с наклони на центъра над  $50$ — $55^\circ$ . Макар и не така често, възниква необходимост от използването и на полегатите пукнатинни групи. Пълно универсализиране на конформността в правоъгълните диаграми е постигнато чрез една допълнителна FORTRAN-програма. С нейна помощ всякакви максимуми могат да се представят с условен наклон на центъра им  $90^\circ$ , с което да се избегне каквото и да било изменение на тяхната конфигурация. По съображения за програмно удобство е наложено ограничение — действителният наклон на центровете да не превишава  $80^\circ$ .

Входът на програмата е аналогичен на този в основната програма. Различнето е в ПК II, в която се задават и координатите  $\phi_c$ ,  $\alpha_c$  на центровете на максимумите, които следва да бъдат ротирани. Предвидена е възможност в едно изпълнение да се обработват до 4 максимума от една диаграма. Построяването на сумарни максимуми, както в основната програма, тук няма особен смисъл (рядко максимумите от индивидуалните диаграми могат да се зададат с един и същ център), поради което не е предвидено.

Обработката на пукнатините включва главно две специфични процедури: (1) Разпределят се по групи пукнатините, попадащи около зададените центрове. Всяка група обхваща пукнатините, чиито нормали попадат в конус с  $50$ -градусов радиус ( $100$ -градусов телесен ъгъл) около централния „вектор“. Допуска се застъпване на групите. (2) Всяка пукнатина се ротира в две последователни стъпки — около вертикалната ос и около ос С—Ю — паралелно на траекторията, по която центърът на максимума се ротира до

точка 90/90°. По-нататък по начин, както в основната програма, се извършва необходимата обработка до построяването на отделни квадратни диаграми за всеки максимум. Обхватът на диаграмите е от 60 до 120° за азимутите и от 60 до 90° към изток и към запад за наклоните.

Освен разпечатка на самите плътностни диаграми на максимумите, изходът съдържа и данни за ъглите и посоката на ротирането (фиг. 3 б). Последните са нужни за възстановяване неротираното положение на някои точки от максимума, с които се оперира при собствено динамичната интерпретация.

## Интерпретация на конкретен пример

Както се вижда на фиг. 4 а, в плътностните диаграми на пукнатините могат да бъдат отделени максимуми с характерна асиметрия и да се трасира оста на най-голяма и на най-малък градиент на плътността от двете страни на модалната точка. Примерът е от плиоценските варовици между градовете Силистра и Тутракан. Този район е особено удобен поради това, че във варовиците на горния плиоцен тук е запечатано само едно поле на напреженията, действувало през кватернера, а вероятно и в наши дни. В скали с наложени деформации е нужно предварително да бъдат отделени сингенетичните групи пукнатини на срязване. Водещ момент трябва да остава условието изтеглеността на максимумите да бъде насочена от  $\sigma_3$  към  $\sigma_1$ . Допълнително, ако скалният обем не е бил подложен на пластично деформиране, както най-често е в слабо деформирани терени, посоката на разбягването на максимумите следва да бъде от ъглополовящата на остри ъгъл между спрегнатите групи пукнатини.

В разглеждания пример и двете условия са изпълнени. Това съгласуване на две независими помежду си физически особености представлява убедителен аргумент за коректност на едно от главните положения в методиката.

Самата динамична интерпретация на отделните диаграми се извършва по следния начин (фиг. 4):

маркира се оста на удължаване на всеки максимум, като се означава посоката на изтеглянето (страната на най-малкия градиент на плътността);

по осовата линия се фиксират 3 точки — една централна (на модалната плътност) и две „гранични“ (пресечките с изолинията, която оконтурва компактната част на максимума или която отделя същия от фоновата плътност); по условията на методиката последните винаги са асиметрични спрямо централната;

върху отделна кръгова диаграма трите точки, схващани като полюси на плоскости (модална и гранични), се изобразяват във вид на големи кръгове (фиг. 4 б);

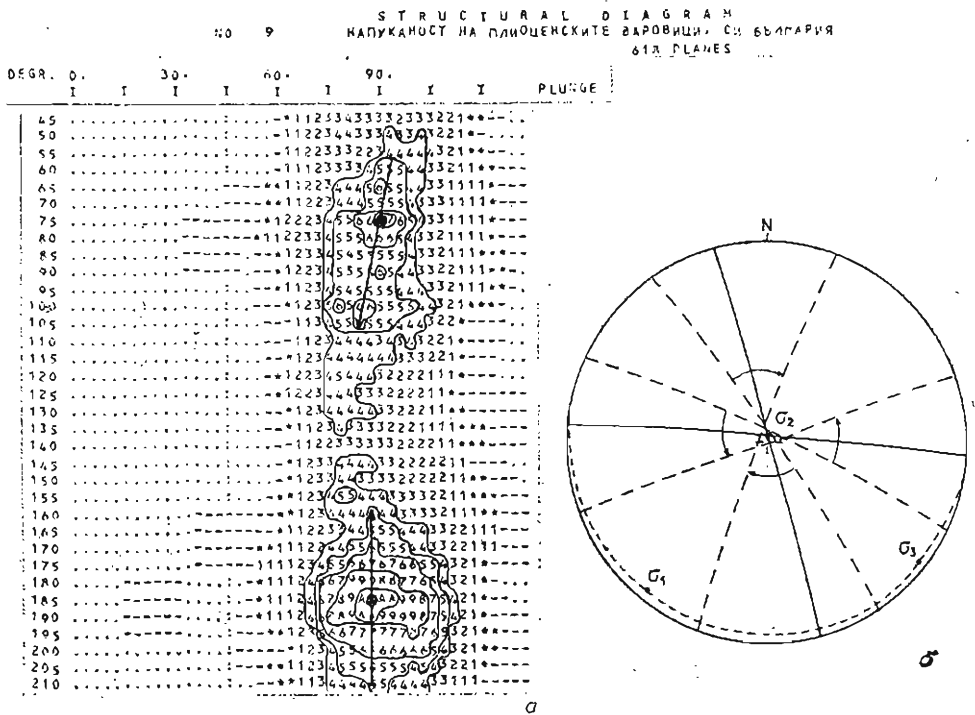
по общите правила на метода на Г з о в с к и от изображенията на спрегнатите двойки максимуми се определят средната динамична ос  $\sigma_2$  и плоскостта на екстремните напрежения ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ );

идентифицират се  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  въз основа на установената закономерност, че преимущественото разсейване на максимумите е с разбягване от оста на максималния натиск.

В методиката на Н и к о л а е в (1977) се анализира още и разсейването на осите на главните нормални напрежения както по локалитети, така и за по-обширни площи. На тази основа се правят заключения и за типа на деформациите. Приема се, че на диаграмите разсейването се изобра-



звява от площта около модалните прободи, заградена от дъгите на граничните плоскости (фиг. 4 б). Този аспект обаче е извън предмета на настоящата публикация.



Фиг. 4. Пример за динамична интерпретация на пукнатини по методиката на П. Н. Николаев (плиоценски варовици от Мизийската платформа между Тутракан и Сялистра)

а — сумарна плътностна диаграма на напукването (фрагмент); стрелките показват оста и посоката на асиметрично удължаване на максимумите; б — реконструкция на осите на напреженията (обяснения в текста)

## Заклучение

Представената методика за реконструкция на полетата на тектонските напрежения по статистически изследвания на тектонската напуканост може успешно да се прилага в различни структурно-геоложки условия съвместно с други структурни методи, което несъмнено би повишило представителността на изводите за изучаваната територия. Анализът на тектонските полета на напреженията има важно значение при изследване процесите на рудоотлагане, съвременните геоложки процеси и тяхното социално отражение, а също така и за по-ясно разбиране на тектонските процеси, определили развитието на изучаваните територии в различните геоложки епохи. Автоматизирането на най-трудоемката част от обработката на данните за пукнатините съществено облекчава използването на тази методика и разширява възможностите на интерпретацията.

## Л и т е р а т у р а

- В е с е л о в, К. Е., П. Н. Н и к о л а е в. 1984. Вертикальная зональность физических свойств горных пород и строение земной коры по результатам изучения разреза и района Кольской сверхглубокой скважины. — В: *Кольская сверхглубокая*. М., Недра, 357—372.
- Г з о в с к и й, М. В. 1954. Тектоническое поле напряжений. — *Изв. АН СССР. Сер. геофизич.*, 5, 390—410.
- Г з о в с к и й, М. В. 1963. *Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория*. М., АН СССР. 544 с.
- Г у щ е н к о, А. И. 1975. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным). — *Докл. АН СССР*, 225, 3, 557—560.
- Н и к о л а е в, П. Н. 1969. К методике статистической обработки замеров трещин. — В: *Новейшая тектоника, новейшие отложения и человек*, 2, МГУ.
- Н и к о л а е в, П. Н. 1977. Методика статистического анализа трещин и реконструкция полей тектонических напряжений. — *Изв. ВУЗ, Геол. и разведка*, 12, 103—115.
- Н и к о л а е в, П. Н., О. А. Л е б е д е в а. 1977. Напряженное состояние и механизм деформации земной коры района строительства Ингури ГЭС (Западный Кавказ). — *Изв. ВУЗ, Геол. и разведка*, 12, 85—93.
- Н и к о л а е в, П. Н., С. Б. Ш а н о в. 1983. Опыт оценки полей напряжений и механизма формирования новейших структур Центрального Предбалкана (Болгария). — *Вестн. Моск. у-та. Сер. 4. Геология*, 1, 16—23.
- С т о я н о в, С. 1981. Програма за автоматизирано построяване на кръгови структурни диаграми. — *Геотект., тектонофиз. и геодин.*, 13, 60—69.

(Постъпила на 28. VI. 1985 г.)