

УДК 523.532

DOI: 10.18413/2075-4639-2018-50-2-207-214

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ  
И РАЗРУШЕНИЙ ПРИ ВНЕДРЕНИИ АСТЕРОИДА****DEFINITION PARAMETERS OF DEFORMATION CRUST  
AND DESTRUCTIONS AT INTRODUCTION OF THE ASTEROID****В.Н. Тюпин**  
**V. N. Tyupin**Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 308015, г. Белгород, ул.Победы, 85Belgorod National Research University  
85 Pobeda street, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: tyupinvn@mail.ru

**Аннотация**

В статье на основе известных фактов движения астероидов и метеоритов приведены их основные параметры (размеры, скорости перемещения, состав и т.д.) и предложена математическая модель их взаимодействия с Землей. На основе закона сохранения энергии получены формулы для определения сжимающих напряжений с расстоянием от места внедрения астероида, радиусов зон раздавливания и трещинообразования в континентальной коре. Проведен математический анализ и численные расчеты параметров, что указывает на правомерность полученных формул расчета. Отдельные радиальные и перпендикулярные им кольцевые трещины, образованные при внедрении астероида могут быть проводниками для растворов и расплавов из глубин Земли, содержащих полезные компоненты. В радиальных разломах и глубинных кольцевых трещинах могли формироваться месторождения полезных ископаемых.

**Abstract**

In article on the basis of the known facts of the movement of asteroids and meteorites their key parameters are specified (the sizes, movement speeds, structure, etc.) and the mathematical model of their interaction with Earth is offered. On the basis of the law of energy conservation formulas for determination of the squeezing tension with distance are received from the place of introduction of an asteroid, crush zone radius and zone of cracks formation in continental bark. The mathematical analysis and numerical calculations of parameters is carried out that indicates legitimacy of the received calculation formulas. Individual radial and perpendicular annular cracks formed during the introduction of an asteroid can be conductors for solutions and melts from the depths of the Earth containing useful components. In the radial faults and deep ring cracks, mineral deposits can form.

**Ключевые слова:** земная кора, астероид, закон сохранения энергии, внедрение, сжимающее напряжение, радиус зоны раздавливания, радиальные разломы, кольцевые трещины, месторождения полезных ископаемых, численные расчеты.

**Keywords:** crust, asteroid, the energy conservation law, the introduction, squeezing tension, crush zone radius, radial faults, annular cracks, mineral deposits, the numerical calculations.

## Введение

Астероид – относительно небольшое небесное тело Солнечной системы, движущееся по орбите вокруг Солнца. Астероиды значительно уступают по массе и размерам планетам, имеют неправильную форму и не имеют атмосферы [<https://ru.wikipedia.org>; Аплоннов, 2001; Сорохтин, Ушаков, 1991, 2002; Хаин, Ломидзе, 1995] (рис. 1).



*Рис. 1.* Вид астероида, приближающегося к Земле

*Fig. 1.* A type of the asteroid coming to Earth

Главный параметр, по которому проводится классификация, – размер небесного тела. Астероидами считаются тела с диаметром более 30 м, тела меньшего размера называют метеороидами [<https://ru.wikipedia.org>; Сорохтин, Ушаков, 1991; Хаин, Ломидзе, 1995; Аплоннов, 2001; Сорохтин, Ушаков, 2002; Сорохтин и др., 2010].

В Солнечной системе, по состоянию на 2011 г. в базах данных, насчитывалось 84 993 238 объектов, у 560 021 точно определены орбиты и им присвоен официальный номер. Предполагается, что в Солнечной системе может находиться от 1.1 до 1.9 миллиона объектов, имеющих размеры более 1 км.

Орбиты 98% пронумерованных астероидов расположены между орбитами Марса и Юпитера. Они образуют так называемый главный пояс астероидов. Периоды их обращения вокруг Солнца составляют, в зависимости от расстояния, от трёх до девяти лет. Расчёты показывают, что линейная скорость астероидов приблизительно равна 20 км/с. Большинство орбит располагается близко к плоскости эклиптики, то есть к плоскости орбиты Земли, наклоны обычно составляют несколько градусов, однако бывают и исключения.

Самым крупным астероидом в Солнечной системе считалась Церера, имеющая диаметр около 950 км. Два других крупнейших астероида, Паллада и Веста, имеют диаметр около 500 км.

Общая масса всех астероидов главного пояса оценивается в  $(3.0-3.6) \cdot 10^{21}$  кг [Хаин, Ломидзе, 1995], что составляет всего около 4% от массы Луны. Масса Цереры –  $9.5 \cdot 10^{20}$  кг, то есть около 32% от общей массы, а вместе с тремя крупнейшими астероидами, Вестой (9%), Палладой (7%), Гигеей (3%), – 51%. То есть абсолютное большинство астероидов имеют ничтожную по астрономическим меркам массу [<https://ru.wikipedia.org>; Сорохтин, Ушаков, 1991; Хаин, Ломидзе, 1995; Аплоннов, 2001; Сорохтин, Ушаков, 2002; Сорохтин и др., 2010].

Метеороид, или метеорное тело, – небесное тело, промежуточное по размеру между межпланетной пылью и астероидом. Согласно официальному определению Междуна-

родной метеорной организации (ИМО), метеороид – это твёрдый объект, движущийся в межпланетном пространстве, размером значительно меньше астероида, но значительно больше атома [<https://ru.wikipedia.org>]. Влетая с огромной скоростью (11–72 км/с) в атмосферу Земли, из-за трения сильно нагревается и сгорает, превращаясь в светящийся метеор, или болид, который можно увидеть как «падающую звезду». Видимый след метеороида, вошедшего в атмосферу Земли, называется метеором, а метеороид, упавший на поверхность Земли – метеоритом.

Большинство найденных метеоритов имеют вес от нескольких граммов до нескольких килограммов. Крупнейший из найденных метеоритов – Гоба (его вес по подсчетам составлял около 60 тонн). Полагают, что в сутки на Землю падает 5–6 тонн метеоритов, или 2 тысячи тонн в год.

Наиболее часто встречаются каменные, железные и железокремневые метеориты. Каменные метеориты (92.8% падений) состоят в основном из силикатов: оливинов ( $(\text{Fe}, \text{Mg})_2 [\text{SiO}_4]$ ) и пироксенов ( $(\text{Fe}, \text{Mg})_2 \text{Si}_2 \text{O}_6$ ). Железные метеориты состоят из железоникелевого сплава. Они составляют 5.7% падений. Железосиликатные метеориты имеют промежуточный состав между каменными и железными метеоритами. Они сравнительно редки (1.5% падений).

Таким образом, анализ материалов [<https://ru.wikipedia.org>; Сорохтин, Ушаков, 1991; Хаин, Ломидзе, 1995; Аплонов, 2001; Сорохтин, Ушаков, 2002] показал, что в основном опасны для Земли астероиды, имеющие диаметр более 30 м. Основная масса астероидов имеет размер до 1 км. Скорость движения астероидов составляет в среднем около 20 км/с. Основная масса метеоритов и астероидов является каменными, состоящими из оливинов и пироксенов.

Падение метеорита или астероида на поверхность Земли в настоящее время может привести к катастрофическим последствиям (рис.2).



*Рис. 2. Характер взаимодействия астероида с твердой поверхностью Земли.  
Fig. 2. The nature of interaction of an asteroid with the firm Earth's surface.*

Помимо отрицательного воздействия астероидов на поверхность Земли возможно и их положительное действие. Известно [Кац, Рябухин, 1984], что при падении астероидов в земной коре возникали космогенные кольцевые структуры – астроблемы. На Земле известно около 100 образований (кратеров), возникших в результате падения астероидов различного размера. В Северной Америке их насчитывается 36, в Европе –

30, в Азии – 11, в Африке – 8, в Австралии – 8, в Южной Америке – 2. В России таких кратеров – 24 [Кац, Рябухин, 1984]. Схема расположения астероидных кольцевых структур приведена на рис.3. Диаметр астроблем по поверхности Земли составляет от 0.5 до 128 км, причем основное число их (61%) имеет диаметр от 2 до 32 км. Время падения астероидов – до 2000 миллионов лет назад.

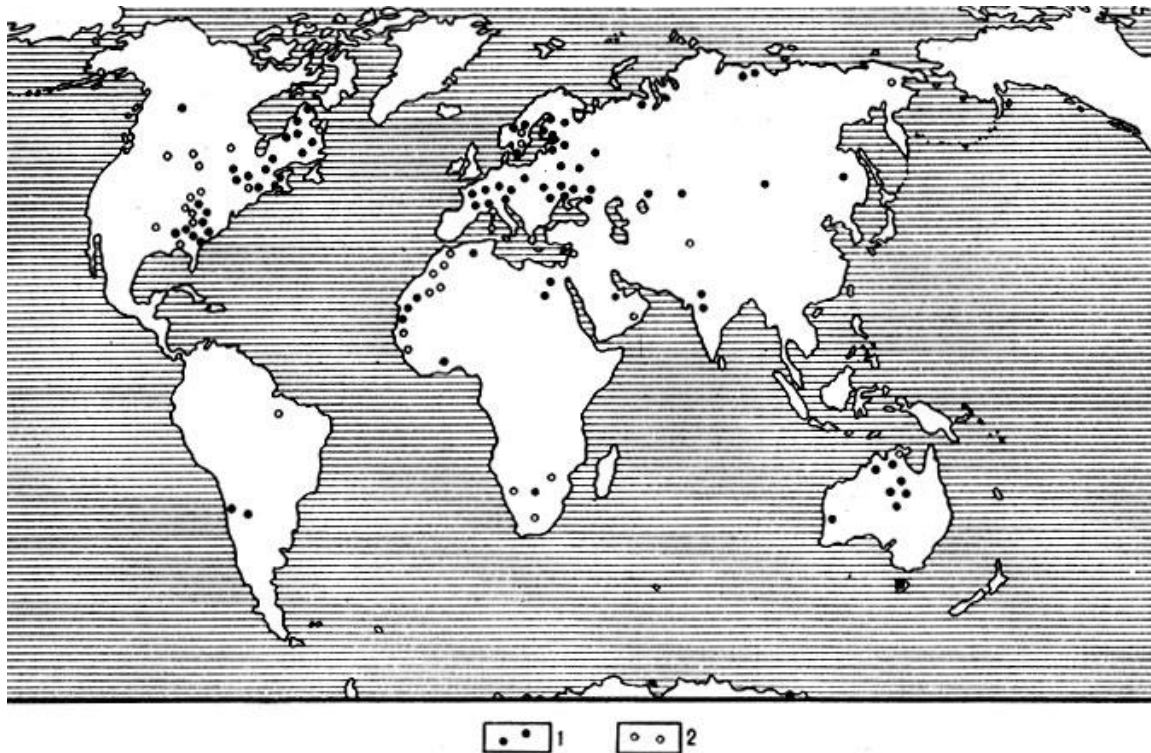


Рис. 3. Схема расположения ударных астероидных структур, установленных на континентах Земли (по В. И. Фельдману): 1 - кольцевые образования, ударный генезис которых не вызывает сомнений; 2 - предполагаемые астероидные кратеры [Кац, Рябухин, 1984].

Fig. 3. Arrangement of impact asteroid structures installed on the continents of the Earth (according to V.I. Feldman): 1 - ring formations whose shock genesis is beyond doubt; 2 - alleged asteroid craters [Katz, Ryabukhin, 1984].

В работе [Кац, Рябухин, 1984] указано, что с кольцевыми структурами космогенного происхождения могут быть связаны месторождения полезных ископаемых, то есть железных, полиметаллических и редкоземельных руд, меди, титана, никеля, кобальта, урана, свинца, цинка и др.

### Объект и метод исследования

Объектом исследования является континентальная земная кора, в которую внедряется астероид. При внедрении астероида в земной коре образуются зоны раздавливания (выброса породы), радиального и кольцевого трещинообразования, сейсмического действия. Для исследования используется метод математического моделирования, основанный на законе сохранения энергии.

### Результаты исследования

При внедрении астероида в континентальную кору, его кинетическая энергия ( $E_k$ ) затрачивается на упругопластические деформации коры ( $E_{уп}$ ). При этом считаем, что астероид является абсолютно твердым телом, так как имеет скорость около 20 км/с. Энергетическое уравнение имеет вид:

$$E_k = E_{ym}. \tag{1}$$

Кинетическая энергия определяется по известной формуле:

$$E_k = 0,5m v_a^2 = \frac{\pi}{12} \rho d_a^3 v_a^2, \tag{2}$$

где  $m, v_a, \rho, d_a$  – соответственно масса, скорость движения, объемная масса, диаметр астероида. Затраты энергии на упругопластические деформации континентальной коры можно определить по формуле [Тюпин, 2013; Тюпин, 2017]

$$E_{ym} = \frac{\sigma_c^2(r)}{2E} \Phi V, \tag{3}$$

где  $\sigma_c(r)$  – сжимающее напряжение, образуемое при внедрении астероида с расстоянием  $r$  от поверхности Земли;  $E, \Phi$  – модуль упругости и показатель трещиноватости массива вблизи поверхности Земли;  $V$  – объем зоны деформирования массива горных пород у поверхности Земли. Будем считать, что при динамическом взаимодействии астероида с Землей зона деформирования будет иметь вид полусферы (рис. 4), тогда

$$V = \frac{2}{3} \pi R^3, \tag{4}$$

где  $R$  – расстояние от точки внедрения астероида.

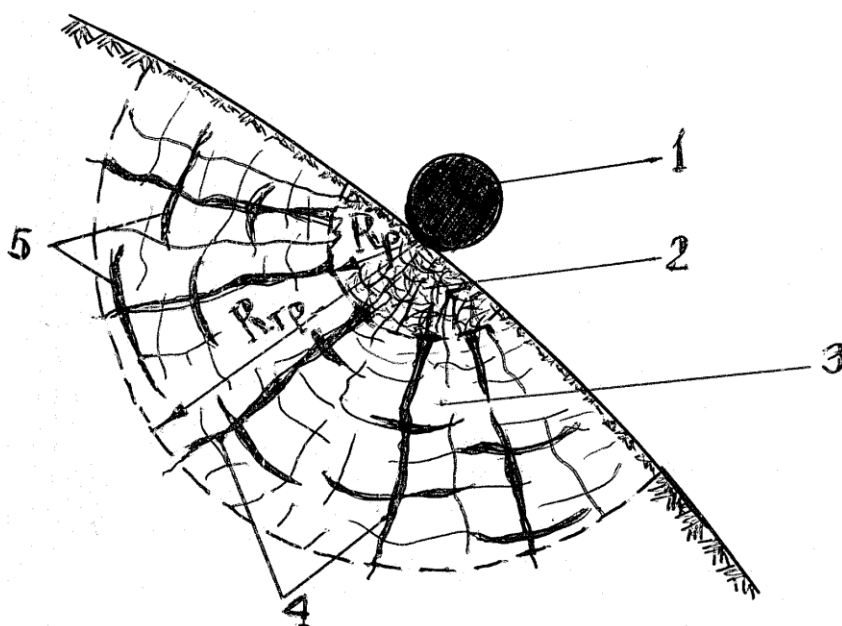


Рис. 4. Схема к расчету параметров разрушения континентальной коры. 1 – астероид; 2 – зона раздавливания; 3 – зона радиального трещинообразования; 4 – радиальные разломы; 5 – кольцевые глубинные трещины  
 Fig. 4. The scheme to calculation of parameters of destruction of continental bark. 1 – asteroid; 2 – crush zone; 3 – zone of a radial cracks formation; 4 - radial faults; 5 - annular deep cracks

Подставляя (4) в (3), а полученное (2) в (1) и решая уравнение, получим формулу для определения сжимающего напряжения с расстоянием от поверхности Земли

$$\sigma_c(r) = \nu_a \left( \frac{E\rho d_a^3}{4\Phi R^3} \right)^{0,5} \quad (5)$$

Радиус зоны раздавливания (рис. 4), в пределах которого горная порода континентальной коры интенсивно измельчается, а часть ее выбрасывается, образуя воронку, определяется из (5) при подстановке вместо  $\sigma_c(r)$  величины

$$\sigma_c(r) = \sigma_{сж} + P, \quad (6)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности пород континентальной коры на сжатие;  $P$  – величина горного давления.

$$P = \rho g H, \quad (7)$$

где  $\rho$  – объемная масса горной породы коры;  $g$  – ускорение свободного падения;  $H$  – глубина от поверхности Земли.

В этом случае

$$R_p = d_a \left[ \frac{E\rho\nu_a^2}{4(\sigma_{сж} + P)^2 \Phi} \right]^{1/3} \quad (8)$$

Радиус зоны трещинообразования в континентальной коре (см. рис. 3) получен из (5) при подстановке вместо  $\sigma_c(r)$  величины

$$\sigma_c(r) = \sigma_p(1 - \nu)\nu^{-1} + \mu P, \quad (9)$$

где  $\sigma_p$  – предел прочности на разрыв образца породы;  $\mu$  – коэффициент трения между отдельностями в массиве;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Тогда

$$R_{TP} = d_a \left[ \frac{E\rho\nu_a^2}{4\Phi[\sigma_p(1 - \nu)\nu^{-1} + \mu P]^2} \right]^{1/3} \quad (10)$$

Кольцевые глубинные трещины образуются в результате упругой реакции массива континентальной коры при динамическом деформировании ее астероидом. Упругая реакция обеспечивает смещение массива в сторону поверхности Земли с образованием глубинных трещин перпендикулярных радиальным (рис.4).

Проведем анализ сжимающего напряжения  $\sigma_c(r)$  с расстоянием, радиуса зоны раздавливания и трещинообразования в континентальной коре.

Величина сжимающих напряжений (формула (5) увеличивается с увеличением скорости и диаметра астероида, модуля упругости и плотности горных пород. При этом су-



щественно уменьшается с расстоянием от места внедрения астероида и с увеличением степени трещиноватости массива пород коры. Анализ формул для расчета радиусов деформирования коры показывает, что они также существенно увеличиваются с увеличением диаметра и скорости астероида и существенно снижаются с увеличением прочностных свойств и горного давления в земной коре.

Проведем численный анализ зависимостей  $\sigma_c(r)$  (5);  $R_p$  (8);  $R_{TP}$  (10) при постоянных параметрах [Справочник, 1975, 1978; Ржевский, Новик, 1978; Тюпин, 2013; Тюпин, 2017]:  $E=5 \cdot 10^{10}$  Па (средняя величина на глубине 0–10 км),  $\nu=0.22$ ,  $\rho=2.5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $v_a=10^4$  м/с,  $d_a=500$  м,  $\Phi=6-120$  (63 в среднем),  $P=29.4 \cdot 10^7$  Па, при  $H=10^4$  м,  $\sigma_{сж}=2 \cdot 10^8$  Па (гранит),  $\sigma_p=2 \cdot 10^7$  Па,  $\mu=0.4$ ,  $R=10^3-10^6$  м.

Сжимающее напряжение на расстоянии от  $10^3$  до  $10^6$  м (от 1 до 1000 км) снижается с  $2.47 \cdot 10^9$  до  $0.77 \cdot 10^5$  Па. Сопоставление этих данных с пределом прочности на разрушение зданий и сооружений (табл.1) указывает на то, что в пределах около 500 км будут разрушены все поверхностные здания в результате сейсмического воздействия внедряющегося астероида.

Таблица 1

Прочностные характеристики зданий и сооружений  
Table. Strength characteristics of buildings and constructions

Здания, сооружения и устройства	$\sigma_c, 10^5$ , Па
Мосты железобетонные с пролетным строением длиной 20–25 м	2–3
Здания с металлическим каркасом	0.4–0.6
Здания кирпичные:	
малоэтажные	0.25–0.35
многоэтажные	0.2–0.3
Здания деревянные	0.12–0.2
Подстанции (трансформаторные, тяговые), водонапорные башни	0.6–0.7
Воздушные линии связи, контактная сеть	0.7–1.2
Подземные кабельные линии	6–10
Подземные линии водопровода, канализации, газопровода	10–15
Станочное оборудование депо и мастерских, подъемно-транспортное оборудование	0.6–0.7

Радиус зоны раздавливания при этих условиях:  $R_p=2936$  м.

Радиус зоны трещинообразования:  $R_{TP}=5970$  м.

Отдельные радиальные и перпендикулярные им трещины (рис.4), образованные при внедрении астероида могут быть проводниками для растворов и расплавов из глубин Земли, содержащих полезные компоненты. В радиальных разломах и глубинных кольцевых трещинах могли формироваться месторождения полезных ископаемых. Максимальная глубина месторождения полезных ископаемых вероятно определяется радиусом кольцевой структуры на поверхности Земли.

### Заключение

На основе известных параметров движения астероидов и возможного внедрения их в земную поверхность разработана математическая модель взаимодействия астероида с континентальной корой. Модель разработана на основе закона сохранения энергии, согласно которому кинетическая энергия астероида затрачивается на упруго-пластические деформации земной коры.

Получены формулы для определения сжимающих напряжений с расстоянием, по которым можно определить результаты сейсмического действия внедряющегося астероида, радиусы зон раздавливания и радиального трещинообразования континентальной коры. Анализ формул и численные расчёты указывают на правомерность модели и полученных формул расчета.

Радиальные и перпендикулярные им трещины, образованные при внедрении астероида, могут быть проводниками для растворов и расплавов из глубин Земли, содержащих полезные компоненты. В радиальных разломах и глубинных кольцевых трещинах могли формироваться месторождения полезных ископаемых.

Данная работа может быть использована как практическое занятие для студентов по курсу «Геотектоника и геодинамика».

### Список литературы

#### References

1. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Метеориты\\_и\\_астероиды\\_\(дата\\_обращения:\\_27\\_марта\\_2918\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Метеориты_и_астероиды_(дата_обращения:_27_марта_2918))
2. Аплонов С.В. 2001. Геодинамика. Учебник. СПб., Изд-во С.-Петербург. ун-та, 360.  
Aplonov S. V. 2001. Geodynamics. Textbook. SPb., Izd-vo S.- Peterb. Univ., 360.
3. Кац Я.Г., Рябухин А.Г. 1984. Космическая геология. М., Просвещение, 80.  
Katz Ya.G., Ryabukhin A.G. 1984. Space Geology. M., Education, 80. 4. Ржевский В.В., Новик Г.Я. 1978. Основы физики горных пород. М., Недра, 390.  
Rzhevskii, V. V., Novik G. J. 1978. Fundamentals of rock physics. M., Nedra, 390.
5. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. 1991. Глобальная эволюция Земли. М., Изд-во Моск. ун-та, 446.  
Sorokhtin O. G., Ushakov, S. A. 1991. Global evolution of the Earth. M., Publishing house of Moscow State University, 446.
6. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. 2002. Развитие Земли. М., Изд-во МГУ, 506.  
Sorokhtin O. G., Ushakov S. A. 2002. Development of Land. M., Publishing house of Moscow State University, 506.
7. Сорохтин О.Г., Чилингар Дж.В., Сорохтин Н.О. 2010. Теория развития Земли: происхождение, эволюция и трагическое будущее. Серия «Науки о Земле». М., Изд-во «ИКИ», 752.  
Sorokhtin O. G., J. Chilingar, Sorokhtin N.O. 2010. The theory of the Earth: origin, evolution and tragic future. Series «Earth Sciences». M., Publishing house «IKI», 752.
8. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. 1975. /Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодьяконова. М., Недра, 276.  
Handbook (cadastre) of physical properties of rocks. 1975. / Under. edited by N.V. Melnikov, V. V. Rzhevsky, M.M. Protodyakonova. M., Nedra, 276.
9. Справочник по физическим свойствам минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах. 1978. /Под. ред. М.П. Воларовича. – М., Недра, 235.  
Handbook of physical properties of minerals and rocks at high thermodynamic parameters. 1978 /Under. edited by M. P. Volarovich. M., Nedra, 235.
10. Тюпин В.Н. 2013. Опасные физические процессы при эксплуатации железных дорог. Чита, ЗаБИЖТ, 149.  
Tyupin V. N. 2013. Dangerous physical processes in the operation of Railways: monograph. Chita, ZRTI, 149.
11. Тюпин В.Н. 2017. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. Белгород, ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 192.  
Tyupin V. N. 2017. Blasting and geomechanical processes in fractured rock masses intense. Belgorod, publishing house «Belgorod» NIU «BelGU», 192.
12. Хаин В.Е., Ломидзе М.Г. 1995. Геотектоника с основами геодинамики. М., Изд-во Моск. ун-та, 220.  
Hain V.E., Lomidze M.G. 1995. Geotectonics with fundamentals of geodynamics. M., Publishing house Mosk un-ty, 220