



---

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MATHEMATICAL PHYSICS. MATHEMATICAL MODELING

---

УДК 523.532

DOI 10.18413/2075-4639-2018-50-3-346-354

## УСТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ ОКЕАНСКОЙ КОРЫ ПРИ ПАДЕНИИ АСТЕРОИДА В ОКЕАН

## THE ESTABLISHMENT OF PARAMETERS OF DESTRUCTION OF OCEAN BARK WHEN FALLING THE ASTEROID TO THE OCEAN

**В.Н. Тюпин****V. N. Tyupin**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015,  
г. Белгород, ул.Победы, 85

Belgorod State national research University  
Russia, 308015, Belgorod, Pobeda street, 85

E-mail: tyupinvn@mail.ru

### Аннотация

В статье на основе известных фактов движения астероидов приведены их основные параметры (скорость движения, размеры, количество, состав и др.). Учитывая, что площадь океанов составляет около 70 % поверхности Земли, рассматривается возможность падения астероида в океан. Разработан механизм и математическая модель воздействия астероида на океаническую воду и воздействия гидроударной волны на океанскую кору. Получены зависимости для определения величины давления в океане, а также радиусов зон раздавливания и радиального трещинообразования в океанской коре. Доказана правомерность полученных формул. Проведены численные расчеты, указывающие на то, что при падении астероида радиусы зон разрушения соизмеримы со средней мощностью океанской коры. Это может привести к проникновению в отдельные радиальные трещины (разломы) рудных расплавов и возникновению в океанской коре месторождений полезных ископаемых.

### Abstract

In article on the basis of the known facts of the movement of asteroids their key parameters are specified (speed of the movement, the sizes, quantity, structure, etc.). Considering that the area of oceans is about 70 % of the Earth's surface, the possibility of falling of an asteroid to the ocean is considered. On the basis of the law of energy conservation the mechanism and mathematical model of impact of an asteroid on oceanic water and impacts of a hydroshock wave on ocean bark is developed. Dependences for determination of pressure in the ocean and also crush zone radius and zone of formation of radial cracks in ocean bark are received. The legitimacy of the received formulas is shown. The numerical calculations indicating that when falling an asteroid radiuses of zones of destruction are commensurable with an average power of ocean bark are carried out. This can lead to the penetration of separate radial cracks (fractures) of ore melts and the appearance of mineral deposits in the oceanic crust. In the radial faults and deep ring cracks, mineral deposits can form.

---

**Ключевые слова:** астероид, океан, океанская кора, гидроударная волна, радиус зоны раздавливания, зона радиального трещинообразования, численные расчеты, месторождения полезных ископаемых.

**Keywords:** asteroid, ocean, ocean bark, hydroshock wave, crush zone radius, zone of formation of radial cracks, numerical calculations, deposits of minerals.

### 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 [1–11] (рис. 1).



Рис. 1. Вид астероида, приближающегося к океанской поверхности Земли  
Fig. 1. Type of the asteroid coming to the ocean Earth's surface

Главный параметр, по которому проводится классификация – размер небесного тела. Астероидами считаются тела с диаметром более 30 м, тела меньшего размера называют метеороидами [1–6].

В Солнечной системе по состоянию на 2011 г. в базах данных насчитывалось 84993238 объектов, у 560021 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. Расчеты показывают, что линейная скорость астероидов равна 5–70 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, 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 Веста (9 %), Паллада (7 %), Гигея (3 %) – 51 %. То есть абсолютное большинство астероидов имеют ничтожную по астрономическим меркам массу [1–6].

О составе астероидов можно судить по составу метеоритов, обнаруженных на поверхности Земли. Наиболее часто встречаются каменные, железные и железокремнистые метеориты. Каменные метеориты (92.8 %) 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 %. Железосиликатные метеориты имеют промежуточный состав между каменными и железными метеоритами. Они сравнительно редки (1.5 %).

Анализ материалов [1–12] 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.

Около 70 % земной поверхности покрыто океанами, поэтому падение астероидов и деформирование океанской коры более вероятно, чем внедрение в континентальную кору. Проблемы деформирования континентальной и океанской коры при движении литосферных плит и внедрении астероидов изучали и продолжают исследовать большое количество отечественных и зарубежных исследователей, в том числе с использованием методов математического моделирования [3–17]. В настоящее время установлено, что на дне океанов и в океанской коре находятся существенно большие запасы полезных ископаемых (золото, медь, цинк, свинец, марганец и т. д.), чем в континентальной коре. При этом их содержание в разы превышает содержание металлов в континентальной коре. С 2000 г. Генасамблея ООН создала организацию «Международный орган по морскому дну», который раздает права по разработке морских конкреций. На исследование и разработку Россия получила права на два участка океанского дна каждый площадью 150 тыс. км<sup>2</sup> (см. «Аргументы недели». № 23(616), 14.06.2018. С. 6).

В статье рассматривается процесс падения астероида в океан с созданием там гидроударных волн, которые разрушают океанскую кору (рис. 2). Целью настоящей статьи является определение радиусов зон раздавливания и радиального трещинообразования. Радиальные разломы могут являться проводниками рудных расплавов из верхней мантии Земли и местом расположения месторождений полезных ископаемых.

### Объект и метод исследования

Объектом исследования является океан, в который внедряется астероид, создавая в океане гидроударную волну. Гидроударная волна создает в океанской коре зоны раздавливания и радиального трещинообразования. Для исследования используется метод математического моделирования, основанный на законе сохранения энергии.

### Результаты и их обсуждение

При падении астероида в океан, его кинетическая энергия ( $E_K$ ) затрачивается на создание гидроударной волны в полусферической части океана ( $E_G$ ), то есть

$$E_K = E_G. \quad (1)$$

Кинетическая энергия определяется по известной формуле

$$E_K = 0,5 m v_a^2 = \frac{\pi}{12} \rho d_a^3 v_a^2, \quad (2)$$

где  $m, v_a, \rho, d_a$  – соответственно, масса, скорость движения, объемная масса, диаметр астероида.



Рис. 2. Характер взаимодействия астероида с поверхностью океана  
 Fig. 2. The nature of interaction of an asteroid with the surface of the ocean

Затраты энергии на создание гидроударной волны в океане равны [18,19]

$$E_r = \frac{P_B^2(r)}{2E_B} V, \quad (3)$$

где  $P_B$  – давление, образуемое в воде;  $E_B$  – динамический модуль упругости воды в океане;  $V$  – объем зоны, подвергающейся гидроударному воздействию.

Будем считать, что при динамическом взаимодействии астероида с океаном зона деформирования будет иметь вид полусферы, тогда

$$V = \frac{2}{3} \pi H_0^3, \quad (4)$$

где  $H_0$  – глубина океана в месте падения астероида.

Кроме того, динамический модуль упругости для воды определяется по известной формуле

$$E_B = \rho_B c_B^2, \quad (5)$$

где  $\rho_B, c_B$  – плотность и скорость продольной волны в воде.

Подставляя (5) и (4) в (3), полученное и (2) в (1) и решая уравнение, получим формулу для определения давления в воде в зависимости от глубины  $H_0$ .

$$P_B = c_B v_a \left( \frac{\rho \rho_B d_a^3}{4H_0^3} \right)^{0,5} \quad (6)$$

Далее будем считать, что гидроударная энергия, максимально сосредоточенная в цилиндрической области (рис. 3) ( $E_{ГУ}$ ) затрачивается на деформирование и разрушение океанской коры ( $E_{УП}$ ) в полусферической области. То есть

$$E_{ГУ} = E_{УП} \quad (7)$$

Энергия гидроударной волны в цилиндрической области равна

$$E_{ГУ} = \frac{P_B^2}{8\rho_B c_B^2} \pi d_a^2 H_0 \quad (8)$$

Энергия затрачиваемая на деформирование океанской коры равна [18,19]

$$E_{УП} = \frac{\sigma_c^2(r)}{3E} \Phi \pi R^3 \quad (9)$$

где  $\sigma_c(r)$  – сжимающее напряжение в океанской коре с расстоянием от дна океана;  $E$ ,  $\Phi$  – модуль упругости и показатель трещиноватости океанской коры;  $R$  – расстояние от дна океана вглубь океанской коры.

Подставляя (9) и (8) в (7) и решая уравнение относительно  $R$ , получим

$$R = \left( \frac{3P_B^2 H_0 E d_a^2}{8\sigma_c^2(r) \Phi \rho_B c_B^2} \right)^{1/3} \quad (10)$$

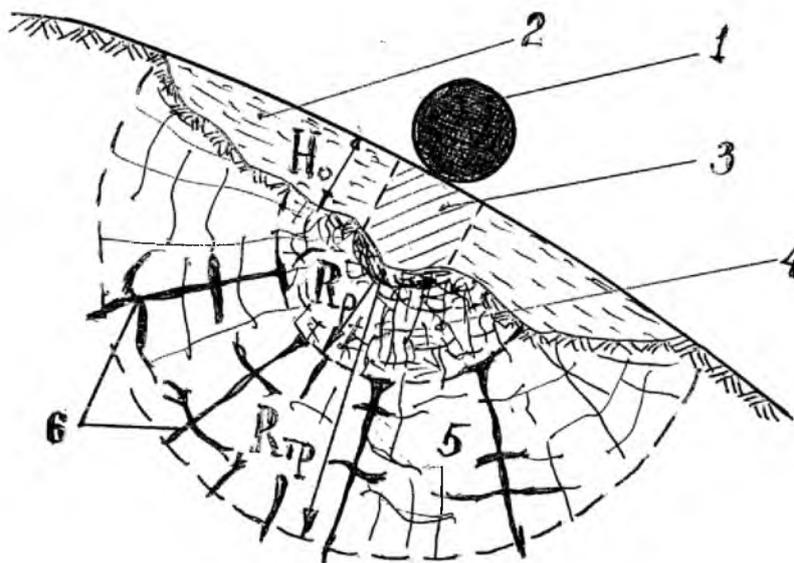


Рис. 3. Схема к расчету параметров разрушения океанской коры. 1 – астероид; 2 – океан; 3 – цилиндрическая область с максимальной гидроударной энергией; 4 – зона раздавливания; 5 – зона радиального трещинообразования; 6 – радиальные разломы и кольцевые трещины  
Fig. 3. The scheme to calculation of parameters of destruction of the oceanic crust. 1 – asteroid; 2 – ocean; 3 – cylindrical area with the maximum hydroshock energy; 4 – crush zone; 5 – zone of formation of radial cracks; 6 - radial faults and annular cracks



Подставляя в (10) вместо  $P_B$  его значение в (6) получим окончательную формулу для определения радиусов зон деформирования океанской коры

$$R = \left( \frac{\nu_a^2 \rho d_a^2 E}{10.7 H_0^2 \sigma_c(r) \Phi} \right)^{1/3} \quad (11)$$

Радиус зоны раздавливания (см. рис. 3), в пределах которого горная порода океанской коры интенсивно измельчается, определяется из (11) при подстановке вместо  $\sigma_c(r)$  величины

$$\sigma_c(r) = \sigma_{сж} + P, \quad (12)$$

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

$$P = \rho_c g H, \quad (13)$$

где  $\rho_c$  – средняя объемная масса воды и горной породы океанской коры;  $g$  – ускорение свободного падения;  $H$  – глубина от поверхности океана. В этом случае

$$R_p = \left[ \frac{\nu_a^2 \rho d_a^5 E}{10.7 H_0^2 (\sigma_{сж} + P)^2 \Phi} \right]^{1/3} \quad (14)$$

Радиус зоны трещинообразования в океанской коре (см. рис. 3) получен из (11) при подстановке вместо  $\sigma_c(r)$  величины

$$\sigma_c(r) = \sigma_p (1 - \nu) \nu^{-1} + \mu P, \quad (15)$$

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

Тогда

$$R_{TP} = \left[ \frac{\nu_a^2 \rho d_a^5 E}{10.7 H_0^2 [\sigma_p (1 - \nu) \nu^{-1} + \mu P]^2 \Phi} \right]^{1/3} \quad (16)$$

Для доказательства правомерности полученных формул (6, 11, 14, 16) проведен их математический анализ. Давление в гидроударной волне  $P_B$  (6) увеличивается с увеличением скорости, диаметра и плотности астероида и уменьшается с увеличением глубины океана, что вполне логично. Радиусы зон раздавливания и радиального трещинообразования (11, 14, 16) увеличиваются с увеличением диаметра астероида, его скорости и плотности. С увеличением глубины океана, прочностных характеристик океанской коры радиусы зон деформирования уменьшаются. Все изложенное подтверждает правомерность полученных формул.

Регионы внедрения астероидов в океанскую и континентальную кору Земли представлены на рис. 4.

Проведем численный анализ зависимостей  $P_B$  (6),  $R_p$  (14),  $R_{TP}$  (16) при постоянных параметрах [18–22]:  $c_B = 1.7 \cdot 10^3$  м/с;  $\nu_a = 10^4$  м/с;  $\rho = 3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_a = 500$  м;  $H_0 = 10^3$  м;  $E = 5 \cdot 10^{10}$  Па;  $\sigma_{сж} = 2 \cdot 10^8$  Па;  $\rho_c = 2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $H = 5 \cdot 10^3$  м;  $P = 0.98 \cdot 10^8$  Па;  $\Phi = 63$ ;  $\sigma_p = 1.5 \cdot 10^7$  Па;  $\nu = 0.25$ ;  $\mu = 0.4$ .

Численные расчеты дают  $P_B=5.2 \cdot 10^9$  Па,  $R_p=1980$  м,  $R_{TP}=4600$  м. Учитывая, что средняя мощность океанской коры составляет 3–7 км, можно предположить, что при падении астероида диаметром 500 м кора будет нарушена радиальными трещинами и, вероятно, из пластичной астеносферы в зону раздавливания и на океанское дно будет изливаться лава. Отдельные радиальные и перпендикулярные им трещины (рис. 3), образованные при внедрении астероида, могут быть проводниками для расплавов из глубин Земли, содержащих полезные компоненты. В радиальных разломах, глубинных кольцевых трещинах, в зоне раздавливания и на океанском дне могли формироваться месторождения полезных ископаемых.

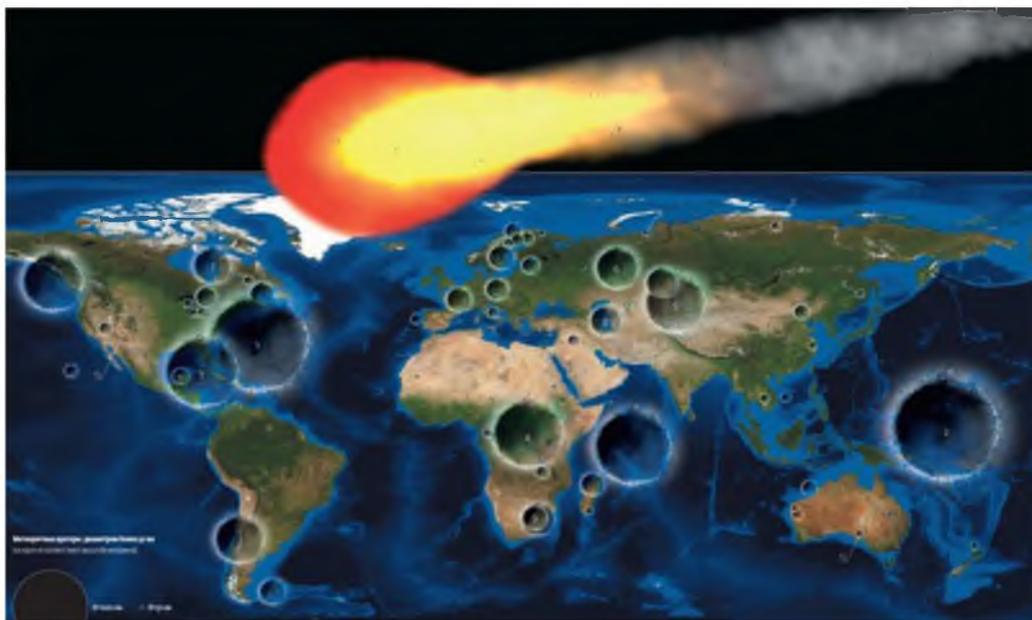


Рис. 4. Регионы внедрения астероидов в океанскую и континентальную кору Земли (концентрические окружности – места внедрения астероидов)

Fig. 4. Regions of the introduction of asteroids into the oceanic and continental crust of the Earth (concentric circles - places of introduction of asteroids)

### Заключение

На основе известных фактов движения астероидов приведены их основные параметры (размеры, скорость движения, состав и т. д.). Предложена математическая модель при внедрении астероида в элементы географической оболочки Земли – океан и земную кору. На основе закона сохранения энергии получена формула для определения давления в гидроударной волне. Далее рассмотрено действие гидроударной волны на океанскую кору с установлением зависимостей для определения радиусов зоны раздавливания и зоны радиального трещинообразования. Математическим анализом доказана правомерность полученных формул. Приведены численные расчеты величины давления в гидроударной волне и радиусов зон раздавливания, радиального трещинообразования. Установлено, что радиусы зон (1.98 и 4.6 км) по величине соответствуют средней мощности океанской коры (3–7 км). При внедрении астероида диаметром 500 м, вероятно, произойдет проникновение в отдельные радиальные трещины (разломы) рудных расплавов и возникновение в зоне раздавливания океанской коры и на океанском дне месторождений 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](https://ru.wikipedia.org/wiki/Метеориты_и_астероиды)
2. Аплонov С.В. 2001. Геодинамика. Учебник. СПб., Изд-во С.-Петерб. ун-та, 360.  
Aplonov S. V. 2001. Geodynamics. Textbook. SPb., Izd-vo S.- Peterb. Univ., 360. (in Russian)
3. 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. (in Russian)
4. 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. (in Russian)
5. 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. (in Russian)
6. 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. (in Russian)
7. Hills J.G., Goda M.P. 1999. Damage from comet-asteroid impacts with earth // *Physica D*. V. 133. P. 189–198.
8. Chapman C.R. 2004. The hazard of near-Earth asteroid impacts on earth // *Earth and Planetary Science Letters*. V. 222. P. 1–15.
9. Wetherill G.W. 1979. Steady state populations of Apollo-Amor objects// *Icarus*. V. 37. P. 96–112.
10. Wetherill G.W. 1988. Where do the Apollo objects come from? // *Icarus*. V. 76. P. 1–18.
11. Hills J.G., Goda M.P. 1998. Damage from the impacts of small asteroids // *Planetary and Space Science*. V. 46. Iss. 2–3. P. 219 –229.
12. Korycansky D.G., Lynett P.J. 2007. Run-up from impact tsunami // *Geophys. J. Int*. V. 170. P. 1076–1088.
13. Кац Я.Г., Рябухин А.Г. 1984. Космическая геология. М., Просвещение, 80.  
Katz Ya.G., Ryabukhin A.G. 1984. Space Geology. M., Education, 80. (in Russian)
14. Артюшков Е.В. 1993. Физическая тектоника. М., Наука, 455.  
Artyushkov E.V. 1993. Physical tectonics. M, Science, 455. (in Russian)
15. Гзовский М.В. 1975. Основы тектонофизики. М, Наука, 536.  
Gzovsky M.V. 1975. Tektonofizika bases. M, Science, 536. (in Russian)
16. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. 2004. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М., Научный мир, 525.  
Lobkovsky L.I., Nikishin A.M., Hain V.E. 2004. Modern problems of geotectonics and geodynamics. M, Scientific world, 525. (in Russian)
17. Полянский О.П., Сухоруков В.П., Ревердатто В.В., Бабичев А.В. 2014. Термо-тектоническое численное моделирование надвигообразования и формирование мигматитов коллизийной зоны Монгольского Алтая. В сборнике: Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. Материалы Второй Всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск, Изд. СО АН РФ, С. 242–244.  
Polyansky O.P., Sukhorukov V. P., Reverdatto V.V., etc. 2014. Thermo-tectonic numerical modeling of a nadvigoobrazovaniye and formation of migmatit of a conflict zone of the Mongolian Altai. In the collection: Geological processes in situations of a subduktion, a collision and sliding of earth's plates. Materials of the Second All-Russian conference with the international participation. Novosibirsk, Prod. FROM AN of the Russian Federation, Page 242–244. (in Russian)
18. Тюпин В.Н. 2013. Опасные физические процессы при эксплуатации железных дорог. Чита, ЗаБИЖТ, 149.



Тюпин V. N. 2013. Dangerous physical processes in the operation of Railways: monograph. Chita, ZRTI, 149. (in Russian)

19. 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. (in Russian)

20. 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. (in Russian)

21. 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. (in Russian)

22. Справочник по физическим свойствам минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах. 1978. / Под. ред. М.П. Воларовича. – М., Недра, 235.