



НАУКИ О ЗЕМЛЕ EARTH SCIENCES

УДК 524.7-77

DOI: 10.18413/2075-4671-2018-42-1-38-43

УСТАНОВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПРИ АККРЕЦИИ НА КОНЕЧНОМ ЭТАПЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

THE ESTABLISHMENT OF A TEMPERATURE MODE DURING ACCRETION AT THE FINAL STAGE OF FORMATION LAND

В.Н. Тюпин, Т.И. Рубашкина
V. N. Tyupin, T.I. Rubashkina

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

Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St, Belgorod, 308015, Russia,

E-mail: tyupinvn@mail.ru

Аннотация

В статье на основе известного механизма аккреции, что приводит к разогреванию поверхности Земли при ее столкновении с планетезималиями, получена формула для определения температуры. Формула получена на основе закона сохранения энергии, когда на первом этапе кинетическая энергия расходуется на упруго-пластические деформации приповерхностного массива горных пород. На втором этапе упругая часть деформаций трансформируется в тепловую. Математический анализ показывает, что наведенная температура существенно зависит от диаметра и скорости внедряющейся планетезималии и существенно уменьшается с расстоянием от поверхности Земли. Численные расчеты дают величину наведенной температуры сравнимую с температурой плавления горных пород земной коры.

Abstract

In article on the basis of the known mechanism of accretion, which leads to warming of the Earth's surface during its collision with planetesimals, the formula for determining the temperature. The formula obtained on the basis of the law of conservation of energy, when at the first stage the kinetic energy is spent on elastic-plastic deformation of near-surface rocks. In the second, phase the elastic part of the deformation transformed into heat. Mathematical analysis shows that the induced temperature significantly depends on the diameter of the intruding speed of planetesimal and decrease significantly with distance from the surface of the Earth. Numerical calculations give a value of the induced temperature comparable to the melting temperature of rocks the Earth's crust.

Ключевые слова: аккреция, планетезималь, поверхность Земли, формула наведенной температуры, закон сохранения энергии, численные расчеты.

Keywords: accretion, planetesimal, the surface of the Earth, the formula for the induced temperature, the energy conservation law, the numerical calculations.

Введение

Аккреция (от латинского «accretio» – приращение) – процесс увеличения размеров неорганического тела путём его наращивания по периферии раздробленным или

деформированным, расплавленным, растворённым веществом из окружающего пространства.

В начале своей геологической истории 4.6 млрд лет назад, Земля была гомогенной (однородной) и холодной, с последующим разогревом и расслоением, к чему склоняется большинство ученых [Сафонов, 1969; Голдрайх, Уорд, 1973; Сорохтин, Ушаков, 1991; Аглонов, 2001; Сорохтин, Ушаков, 2002; Сорохтин, 2004; Чамберз, 2004; Сорохтин и др., 2010].

Земля и другие планеты образовались из холодного газопылевого облака, температура которого в районе орбиты будущей Земли не превышала 100°С. Процесс аккреции планет длился относительно короткое по геологическим масштабам время – от 10^7 до 10^8 лет. Однако, как во время, так и сразу же после аккреции существовали достаточно мощные источники тепловой энергии, которые привели к разогреву Земли. Начальный разогрев Земли был связан, прежде всего, с самим процессом аккреции, поскольку постепенное столкновение планетезималей, образующих планету, неизбежно должно было преобразовывать их кинетическую энергию в тепловую. На ранних стадиях аккреции сила притяжения «зародыша» планеты была небольшой и потому скорость и энергия ударов новых добавляющихся планетезималей была низка; однако с ростом планеты интенсивность ее гравитационного поля увеличивалась, а значит, возрастала и скорость падения планетезималей (рис. 1).



Рис. 1. Аккреция Земли в результате ее бомбардировки планетезималиями
 Fig. 1. Accretion of Earth as a result of her bombing of a planetezimals

Как следствие, разогрев Земли становился все более существенным [Сафонов, 1969; Голдрайх, Уорд, 1973; Витязев и др., 1990; Сорохтин, Ушаков, 1991; Аглонов, 2001; Сорохтин, Ушаков, 2002; Сорохтин, 2004; Чамберз, 2004; Сорохтин и др., 2010].

По расчетам общая энергия аккреции Земли была настолько огромной, что ее одной хватило бы не только на полное испарение земного вещества, но и на разогрев возникшей плазмы до десятков тысяч градусов. Однако этого не произошло, поскольку энергия аккреции выделялась главным образом в приповерхностных частях формирующейся планеты, а генерируемое в ее верхних слоях тепло интенсивно излучалось в космическое пространство.



Таким образом, температура в недрах молодой Земли повышалась от центра к периферии (обратно тому, что наблюдается в современной Земле), но затем вблизи поверхности вновь снижалась за счет быстрого остывания приповерхностных частей [Аплонов, 2001].

Вторая причина начального разогрева Земли, после того, как ее аккреция в основном уже завершилась, – это радиоактивный распад. Уже в первичной Солнечной туманности присутствовали сравнительно короткоживущие радиоактивные изотопы, такие, как ^{26}Al , ^{244}Pu и ^{129}I (следы их распада обнаружены в метеоритах). Третий, дополнительный источник начального разогрева Земли объясняется захватом Протолуны – гораздо более массивной предшественницы современной Луны. Предполагается, что Земля получила дополнительное тепло за счет сильнейших приливных взаимодействий со своим массивным спутником [Аплонов, 2001].

Таким образом, разогрев только что образовавшейся и изначально холодной Земли шел под действием трех главных процессов: аккреции, распада короткоживущих радиоактивных изотопов и приливных взаимодействий с Протолуной [Голдрайх, Уорд, 1973; Сафонов, 1969; Витязев и др., 1990; Сорохтин, Ушаков, 1991; Аплонов, 2001; Сорохтин, Ушаков, 2002; Сорохтин, 2004; Чамберз, 2004; Сорохтин и др., 2010].

В настоящей статье рассматривается процесс аккреции с определением температуры в приповерхностной части образующейся Земли.

Объекты и метод исследования

Объектом исследования является Земля на конечном этапе ее образования за счет притяжения к ней планетезималей (каменных материалов с размерами астероидов) и столкновения их с поверхностью молодой Земли.

Этот процесс сопровождается преобразованием кинетической энергии планетезималей в тепловую. Для исследования использован математический метод моделирования с целью определения температуры при столкновении планетезималей с Землей.

Результаты исследования

Для определения температуры при столкновении планетезималей с Землей используется закон сохранения энергии. На первом этапе, при столкновении, кинетическая энергия планетезималей (E_k) расходуется на упруго-пластические деформации приповерхностной части Земли (E_{yn}) (рис. 2).

Затем упругая энергия, созданная вблизи поверхности Земли (E_y), трансформируется в тепловую (Q).

Закон сохранения энергии на первом этапе имеет вид:

$$E_k = E_{yn} . \quad (1)$$

Кинетическая энергия определяется по известной формуле:

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

где m, v_a, ρ, d_a – соответственно, масса, скорость движения, объемная масса, диаметр планетезимали.

Затраты энергии на упруго-пластические деформации поверхности Земли равны [Тюпин, 2017]:

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

где $\sigma_c(r)$ – сжимающее напряжение, образуемое при соударении планетезимали на расстоянии r от поверхности Земли; E, Φ – модуль упругости и показатель

трещиноватости массива вблизи поверхности Земли; V – объем зоны деформирования массива горных пород у поверхности Земли.

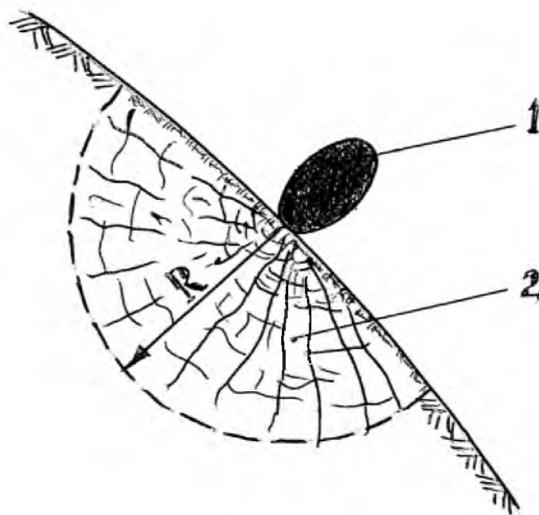


Рис. 2. Схема к расчету температурного режима при аккреции: 1 – планетезималь; 2 – зона деформирования формирующейся Земли

Fig. 2. The scheme to calculation of temperature condition at accretion: 1 – planetesimal; 2 – a zone of deformation of the formed Earth

Будем считать, что при динамическом взаимодействии планетезимали с Землей зона деформирования имеет вид полусферы (см. рис. 2), тогда:

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

где R – расстояние от поверхности Земли.

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

$$\sigma_c^2(r) = d_a^3 v_a^2 \frac{E \rho}{4 \Phi R^3}. \tag{5}$$

Согласно законам термодинамики упругая энергия сжатого тела (E_y) преобразуется в тепловую энергию (Q) [Ржевский, Новик, 1978]:

$$E_y = Q. \tag{6}$$

Математические значения величин в (6) имеют вид [Тюпин, 2017; Тюпин, 2013]:

$$E_{yn} = \frac{\sigma_c^2(r)}{2E} V; Q = C_T m_{\Pi} \Delta T, \tag{7}$$

где C_T – удельная теплоемкость породы вблизи поверхности Земли; m_{Π} – масса горной породы в зоне деформирования; ΔT – превышение температуры при упругом деформировании горной породы.

Учитывая, что $m_{\Pi} V^{-1} = \rho$ (ρ – объемная масса массива вблизи поверхности Земли, примерно равна объемной массе планетезимали), подставляя (7) в (6), решая уравнение, получим величину превышения температуры вблизи поверхности Земли в виде:

$$\Delta T = \frac{\sigma_c^2(r)}{2E \rho C_T}. \tag{8}$$



Подставляя в (8) значение $\sigma_c^2(r)$ из (5) получим зависимость создаваемой температуры с расстоянием R от поверхности Земли:

$$\Delta T = \frac{d_a^3 v_a^2}{8\Phi R^3 C_T}. \quad (9)$$

Математический анализ показывает, что наведенная температура существенно увеличивается с увеличением диаметра и скорости внедряющейся планетезимали и уменьшается с расстоянием от поверхности Земли.

Для доказательства правомерности полученной формулы (9) проведены численные расчёты при: $d_a = 100$ м; $\Phi = 10$; $v_a = 5 \cdot 10^3$ м/с; $R = 100$ м. Удельная теплоемкость для габбро, базальтов, анортозитов, брекчий [Справочник ..., 1975; Справочник ..., 1978], которые представлены в реголитах – лунном грунте, полученном автоматической станцией «Луна-16» $C_T = 540-880$ Дж/(кг·К). Исследованиями [Ржевский, Новик, 1978] установлено, что удельная теплоемкость лунного грунта составляет 740 Дж/(кг·К), что и принято для расчётов.

Расчёты показывают, что при столкновении с Землей планетезимали диаметром 100 м температура (на глубине от поверхности 100 м) увеличится на 422.3 К (149.3°C), на глубине 50 м составит 3378.4 К (3105.4°C). Как показывают экспериментальные исследования [Справочник ..., 1975; Ржевский, Новик, 1978; Справочник ..., 1978] плавление различных минералов горных пород происходит при температурах в среднем от 1500 К до 3000 К. То есть, динамическое воздействие планетезималей приводило к разогреванию поверхности Земли и расплавлению минералов и горных пород, что вполне согласуется с исследованиями [Сафонов, 1969; Голдрайх, Уорд, 1973; Витязев и др., 1990; Сорохтин, Ушаков, 1991; Аплонов, 2001; Сорохтин, Ушаков, 2002; Сорохтин, 2004; Чамберз, 2004; Сорохтин и др., 2010].

Заключение

На основе известных предположений о разогревании поверхности Земли при аккреции, то есть в результате столкновения планетезималей с поверхностью разработана математическая модель. Модель разработана на основе закона сохранения энергии, когда на первом этапе кинетическая энергия планетезимали затрачивается на упругопластические деформации. Затем, упругая часть энергии преобразуется в тепловую, в приповерхностном слое Земли. Получена формула для определения повышения температуры при столкновении планетезимали с поверхностью Земли. Анализ формулы и численные расчёты по ней указывают на её правомерность. Создаваемая температура составляет на глубине 50 м около 3000 К, что превышает температуру плавления горных пород, составляющую в среднем 1500–3000 К [Справочник ..., 1975; Ржевский, Новик, 1978; Справочник ..., 1978].

Список литературы References

1. Аплонов С.В. 2001. Геодинамика. СПб., 360.
Aplonov S.V. 2001. Geodinamika [Geodynamics]. Saint-Petersburg, 360. (in Russian)
2. Витязев А.В., Печерников Г.В., Сафронов В.С. 1990. Планеты земной группы: происхождение и ранняя эволюция. М., 296.
Vityazev A.V., Pechernikova G.V., Safronov V. S. 1990. Planety zemnoj gruppy: proishozhdenie i rannjaja jevoljucija [The terrestrial planets: Origin and early evolution]. Moscow, 296. (in Russian)
3. Голдрайх П., Уорд В.Р. 1973. Образование планетезималей. *Журнал астрофизики*: 1051–1061.
Goldreich P., Ward V.R. 1973. The formation of planetesimals. *Journal of astrophysics*: 1051–1061. (in Russian)
4. Ржевский В.В., Новик Г.Я. 1978. Основы физики горных пород. М., 390.

Rzhevskii V.V., Novik G.J. 1978. *Osnovy fiziki gornyh porod* [Fundamentals of rock physics]. Moscow, 390. (in Russian)

5. Сафонов В.С. 1969. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М., 244.

Safonov V. S. 1969. *Jevoljucija doplanetnogo oblaka i obrazovanie Zemli i planet* [Evolution of planetary clouds and the formation of the Earth and planets]. Moscow, 244. (in Russian)

6. Сорохтин Н.О. 2004. Ранние этапы развития Земли. Вестник Мурманского государственного технического университета, 7 (1): 64–81.

Sorohtin N.O. 2004. The early stages of development of the Earth. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 7 (1): 64–81. (in Russian)

7. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. 1991. Глобальная эволюция Земли. М., 446.

Sorokhtin O.G., Ushakov S.A. 1991. *Global'naja jevoljucija Zemli* [Global evolution of the Earth]. Moscow, 446. (in Russian)

8. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. 2002. Развитие Земли. М., 506.

Sorokhtin O. G., Ushakov S. A. 2002. *Razvitie Zemli* [Development of Land]. Moscow, 506. (in Russian)

9. Сорохтин О.Г., Чилингар Дж.В., Сорохтин Н.О. 2010. Теория развития Земли: происхождение, эволюция и трагическое будущее. М., 752.

Sorokhtin O. G., J. Chilingar, Sorohtin N.O. 2010. *Teorija razvitija Zemli: proishozhdenie, jevoljucija i tragicheskoe budushhee* [The theory of the Earth: origin, evolution and tragic future]. 752. (in Russian)

10. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. 1975. М., 276.

Handbook (cadastre) of physical properties of rocks. 1975. Moscow, 276. (in Russian)

11. Справочник по физическим свойствам минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах. 1978. М., 235.

Handbook of physical properties of minerals and rocks at high thermodynamic parameters. 1978. Moscow, 235. (in Russian)

12. Тюпин В.Н. 2013. Опасные физические процессы при эксплуатации железных дорог. Чита, 149.

Tyupin V. N. 2013. *Opasnye fizicheskie processy pri jekspluatacii zheleznyh dorog* [Dangerous physical processes in the operation of Railways]. Chita, 149. (in Russian)

13. Тюпин В.Н. 2017. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. Белгород, 192.

Tyupin V.N. 2017. *Vzryvnye i geomechanicheskie processy v treshhinovatyh naprjazhennyh gornyh massivah* [Blasting and geomechanical processes in fractured rock masses intense]. Belgorod, 192. (in Russian)

14. Чамберз Дж. Е. 2004. Планетарная аккреция внутри солнечной системы. *Земля и планетарная наука*: 244–249. (in Russian)

Chambers George. 2004 E. Planetary accretion in the inner solar system. *Earth and planetary science*: 244–249. (in Russian)