

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ  
НА СТАДИИ АККУМУЛЯЦИИ ЗЕМЛИ В 3D МОДЕЛИ И  
ОСОБЕННОСТИ ЕЁ ПЕРВИЧНОЙ МИНЕРАГЕНИИ**

*Хачай Ю.В., Антипин А.Н.* – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург  
*Анфилогов В.Н.* – Институт минералогии УрО РАН, Миасс

**Аннотация.** В работе используется предложенная ранее (Анфилогов, Хачай 2005; 2012; 2013) модель аккумуляции планет земной группы, которая опирается на современные результаты геохимических анализов, включающих оценки концентрации короткоживущих радиоактивных изотопов  $^{26}\text{Al}$  в веществе протопланетного облака. Результаты численного моделирования показали, что для термической эволюции Земли на этапе ее аккумуляции существенную роль имело неоднородное распределение температуры в формирующихся оболочках Земли, являющееся следствием случайного распределения падающих на растущую поверхность тел и частиц. Это определило особенности первичной металлогении Земли и, в частности, в формировании ранних алмазонасных кимберлитов.

*Численное моделирование, распределение температуры, 3D модель, тепловые неоднородности, случайное распределение падающих тел, ранние алмазонасные кимберлиты.*

**NUMERICAL SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION  
AT THE STAGE OF ACCUMULATION OF THE EARTH IN 3D MODEL AND  
ITS EARLY MINERAGENY**

*Khachay Yu.V., Antipin A.N.* – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg  
*Anfilogov V.N.* – Institute of mineralogy UB of RAS, Miass

**Abstracts.** In this paper we use the previously proposed (Anfilogov, Khachai 2005; 2012; 2013) model of accumulation of the terrestrial planets, which is based on recent results of geochemical analyzes, including estimating the concentration of short-lived radioactive isotopes  $^{26}\text{Al}$  in the preplanetary cloud. The results of numerical simulations showed that the thermal evolution of the Earth at the stage of accumulation had a significant role inhomogeneous temperature distribution in the emerging spheres of the Earth which is a consequence of the random distribution of the incident on the growing surface of bodies and particles. This determined the primary features of metallogeny of the Earth and in particular in the formation of early diamondiferous kimberlites.

*Numerical simulation, the temperature distribution, 3D model, thermal heterogeneity, a random distribution of falling bodies, early diamondiferous kimberlites.*

**Введение**

Получить информацию об условиях реализации процесса минерагении на самых ранних этапах существования Земли можно только опираясь на результаты численного моделирования аккумуляции планеты, включая ее последнюю стадию и раннюю историю Земли. На сегодня результаты, описывающие процесс формирования планет солнечной системы из протопланетного облака, интенсивная стадия которого завершилась около 4,6 млрд лет назад, стали классическими (Сафронов, 1969). Последующая геологическая эволю-

ция Земли зависит от ее начального состояния. В работах (Анфилогов, Хачай, 2005; 2012; 2013; Хачай и др., 2012) нами была предложена новая модель дифференциации вещества в процессе аккумуляции планет земной группы, которая опирается на современные результаты изотопных геохимических анализов, позволивших получить надежные оценки концентрации короткоживущих естественно радиоактивных изотопов  $^{26}\text{Al}$  в веществе протопланетного облака. На основе этих данных получены новые оценки распределения температуры в растущих зародышах планеты в

зоне «питания» Земли. Близкие результаты опубликованы в работах (Печерникова, Витязев, 2005; Nyquist et al., 2009). Существенное продвижение в понимании процесса достигнуто при реализации численного моделирования с использованием 3D модели среды (Khachay, 2013; Khachay et al., 2014).

### **Цель работы**

Используя предложенную в работах (Анфилогов, Хачай, 2005; 2012; 2013а) модель аккумуляции планет земной группы, провести численное моделирование распределения температуры во внутренних областях планеты для последовательно увеличивающихся значений времени и радиуса тела в 3D модели среды и, в отличие от результатов среды (Khachay, 2013; Khachay et al., 2014), сделать это для существенно более сложных условий Земли. Проследить особенности минерагении на завершающем этапе формирования планеты в неоднородной 3D модели.

### **Математическое моделирование распределения температуры в планете на стадии ее аккумуляции**

Базовой для проведения математического моделирования термической эволюции растущей планеты является система уравнений, описывающих баланс импульса, энергии, сохранении массы вещества и задачи Стефана на границах областей с зонами расплава (Khachay, Anfilogov, 2009; Khachay, 2013).

Для скорости роста зародыша планеты используется модель Сафронова в варианте (Сафронов, 1969)

$$\frac{\partial m}{\partial t} + 2(1 + 2\theta)r^2\omega\left(1 - \frac{m}{M}\right)\sigma, \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая скорость орбитального движения,  $\sigma$  – поверхностная плотность вещества в зоне «питания» планеты,  $M$  – современная масса планеты,  $r$  – радиус растущего зародыша,  $\theta$  – статистический параметр, учитывающий распределение частиц по массам и скоростям в зоне «питания».

Краевые задачи для каждого из уравнений системы решались методом конечных разностей с использованием неявных, монотонных, консервативных схем. Шаг по временной сетке переменный и при выбранном распределении плотности как функции глубины вычисляется из уравнения (1). Эта же пространственная и временная сетки используются при решении остальных краевых задач системы.

С использованием уравнения (1) на каждом временном шаге вычисляются масса растущей планеты и распределение литостатического давления во внутренних областях. Для каждого значения достигнутого размера растущей планеты вычисляется распределение температуры плавления. В ядре зависимость температуры плавления в основном железного состава вычисляется по (Стейси, 1972). В области формирующейся преимущественно силикатной мантии используется зависимость температуры плавления от давления по (Kaula, 1979). Зона полного и частичного плавления определялась для каждого временного слоя по сопоставлению вычисленного распределения температуры в каждом узле 3D модели с распределением температуры плавления в этом узле для данного момента времени.

На поверхности протопланеты заданы условия, обеспечивающие баланс поступающей части потенциальной энергии гравитационного взаимодействия тел, затрат тепла на нагревание поступившего вещества и переизлучаемого в пространство тепловой поток с учетом прозрачности внешней среды:

$$k\rho\frac{\gamma M dr}{r dt} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_1^4) + \rho c_p (T - T_1)\frac{dr}{dt}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность вещества,  $\gamma$  – гравитационная постоянная,  $M$  – масса растущей планеты  $r$  – ее радиус.  $T$  и  $T_1$  – соответственно, температура тела на границе и внешней среды,  $\varepsilon$  – коэффициент прозрачности среды,  $c_p$  – удельная теплоемкость,

$k$  – доля преобразованной в тепло потенциальной энергии. Качественное отличие полученных вариантов результатов численного моделирования в 3D модели состоит в том, что удалось проследить возникновение тепловых и плотностных неоднородностей. Возникновение этих неоднородностей обусловлено случайным характером распределения тел и частиц по массам и скоростям, которое описывается параметром  $\theta$  в уравнении (1), а в уравнении (2) учитывается использованием случайной функции при вычислении левой части этого уравнения внутри слоя, на которое происходит увеличение радиуса тела за шаг по времени.

### **Результаты и обсуждение**

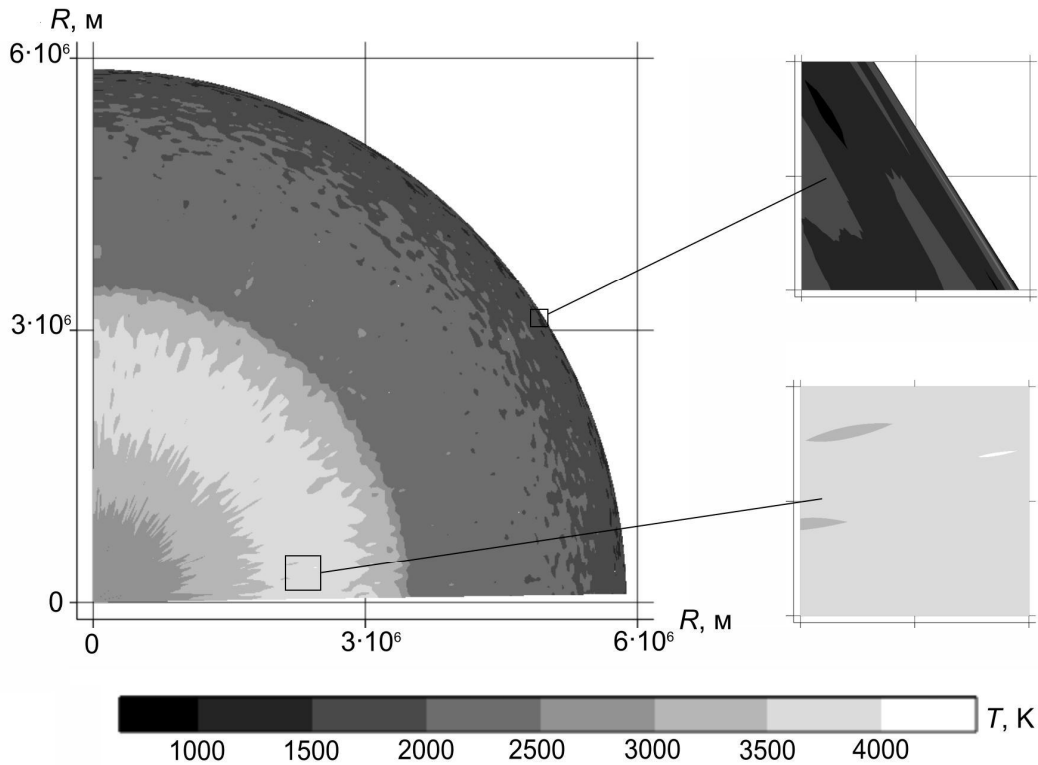
Суждения об условиях минерации в ранней коре и мантии во многом основываются на изучении алмазоносных кимберлитов (Анфилов, Хачай, 2013а). Происхождение алмазоносных кимберлитов и условия образования алмазов является не только одной из наиболее сложных нерешенных проблем геологии, имеющих прикладное значение, но и предоставляет свидетельство о раннем состоянии земной коры и верхней мантии.

По современным результатам изучения образования алмазов, основанным на экспериментальных данных, считают, что алмазы образовывались при температуре около 1600 °С и давлении порядка 6–7 ГПа (Пальянов, 2005), что соответствует современным условиям на глубинах 200–230 км. Важной закономерностью размещения кимберлитов является их преимущественное нахождение в пределах древних платформ, в фундаменте которых преобладают архейские породы. Минеральный и химический состав кимберлитов свидетельствует о том, что резервуар, из которого были сформированы кимберлиты, отличается от современного среднего состава мантии. По сравнению с неистощенной мантией кимберлиты содержат на два порядка больше La, Ce, Nd, Th, Cs, U, F, на порядок больше Rb, Ba, P, K (Илупин и др., 1978). В кимберлите присутствуют такие неха-

рактерные для мантии минералы, как флогопит, кальцит, апатит; в кимберлитах встречаются включения эклогитов, состав которых изменяется от толеитовых до оливиновых базальтов.

Важную информацию о генезисе кимберлитов представляет возраст субстрата, из которого образовался кимберлитовый материал. Наиболее древние кимберлиты Западной Африки имеют возраст 2100–2300 млн лет. В то же время на этой территории известны кимберлиты с возрастом 1150, 700 и 80–10 млн лет. (Даусон, 1983). Возраст включений пирротина в центральных частях кристаллов алмаза из трубки Кофифонтейн (Африка) и для некоторых трубок Якутии 3,0–3,5 млрд лет, в то время как возраст самой трубки, в алмазах которой найдены древние включения, может быть 60 млн лет. Самыми древними изученными алмазами на Земле являются включения микроалмазов в древнейших цирконах возраста 3,1–4,2 млрд лет (Menneken et al., 2007), которые обнаружены в терригенных породах. Все это позволяет заключить, что области алмазоносности в литосфере были сформированы на самом раннем этапе эволюции Земли. Существование алмазоносной литосферы практически под всеми архейскими кратонами свидетельствует о специфической особенности их глубинного состава и строения, которая возникла на начальном этапе эволюции Земли. Следовательно, необходимо восстановление динамики образования Земли, распределения РТ-условий и состава вещества на стадии завершения ее аккумуляции только небольшая часть кинетической энергии преобразуется в поглощаемое зародышем планеты тепло.

Нами впервые получены результаты численного решения задачи для 3D модели среды (Khachay, 2013; Khachay et al., 2014), которые позволяют проследить образование и дальнейшую динамику трехмерных аномальных по температуре и составу областей, возникающих за счет падения тел и частиц на поверхность растущей планеты при их случайном распределении по массам. Один из полученных результатов рас-



Вариант геотермического разреза сферического сектора Земли к концу аккумуляции планеты

пределения температуры по сечению шарового сектора модели показан на рисунке.

Силикатная оболочка Земли начала формироваться, когда основная часть ядра уже была сформирована. Выполненное нами численное моделирование теплового режима при формировании ядра Земли показало, что температура на поверхности растущего ядра на завершающей стадии может достигать 2500–3000 К (Анфилов, Хачай, 2012; Khachay, 2013; Khachay et al., 2014). Поэтому силикатный материал, из которого формировалась мантия Земли, отлагался на поверхность ядра, температура которой была выше температуры ликвидуса этого материала.

В результате на границе ядро-мантия образуется слой силикатного расплава, мощность которого по мере роста Земли может достигать 800–900 км. При такой мощности слоя расплава температура ликвидуса в его основании становится выше температуры расплава. Расплав в основании слоя начнет кристаллизоваться и на границе ядро-мантия будет формироваться

кристаллический слой мантии, а слой расплава будет подниматься к поверхности растущей Земли.

В качестве составов, моделирующих последовательность кристаллизации фаз, в нашей модели используются шпинелевый лерцолит KLB1 и состав метеорита Альенде, для которых существуют фазовые диаграммы до 30 ГПа. Подробно процесс формирования мантии и первичной земной коры дан в работе (Анфилов, Хачай, 2012).

Для решения нашей проблемы важно знать, как протекает этот процесс на завершающем этапе аккумуляции Земли. По мере роста Земли мощность слоя расплава уменьшается. Когда она достигнет 420 км, из ликвидусных фаз исчезнет гранат, извлекающий из расплава  $Al_2O_3$ , и глинозем будет накапливаться в расплаве. Кристаллизация оливина на линии ликвидуса будет сопровождаться обеднением расплава MgO и обогащением FeO. В результате состав расплава приблизится к составу обогащенного FeO и  $Al_2O_3$  базальта. Когда температура расплава в верхней части слоя опустится ни-

же 1250 °С, начнется кристаллизация плагиоклаза, кристаллы которого будут подниматься вверх, образуя на контакте расплава с верхней твердой оболочкой слой магматической «каши», состоящей из расплава и кристаллов плагиоклаза. Это создает условия для формирования у поверхности Земли слоя анортозитов.

### **Выводы**

Первичная металлогения ранней Земли определялась сочетанием более не повторявшихся в геологической истории Земли условий, контролируемых процессом аккумуляции планеты, и формированием внутренних оболочек планеты.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 13-05-00138.

### **Литература**

Анфилов В.Н., Хачай Ю.В. Возможный вариант дифференциации вещества на начальном этапе формирования Земли // ДАН. 2005. Т. 403. № 6. С. 803–806.

Анфилов В.Н., Хачай Ю.В. Дифференциация вещества мантии в процессе гетерогенной аккумуляции Земли и формирование первичной земной коры // Литосфера. 2012. № 6. С. 3–14.

Анфилов В.Н., Хачай Ю.В. Природа кимберлитовой алмазоносной литосферы кратонов // ДАН. 2013а. Т. 451. № 5. С. 537–540.

Анфилов В.Н., Хачай Ю.В. Эволюция ядра в процессе гетерогенной аккумуляции Земли // Литосфера. 2013б. № 4. С. 146–153.

Даусон Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них. М.: Мир, 1983. 300 с.

Илупин И.П., Каминский Ф.В., Францесон Е.В. Геохимия кимберлитов. М.: Недра, 1978. 352 с.

Пальянов Ю.Н., Сокол А.Г., Соболев Н.В. Экспериментальное моделирование мантийных алмазообразующих процессов // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 12. С. 1290–1303.

Печерникова Г.В., Витязев А.В. Импаکتы и эволюция ранней Земли // Катастрофические воздействия космических тел / Под ред. В.В. Адушкина и И.В. Немчинова. М.: Академкнига, 2005. С. 215–265.

Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономическая

схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. Т. 5. № 5. С. 816–827.

Сафронов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.

Стейси Ф.Д. Физика Земли. М.: Мир, 1972. 342 с.

Тихонов А.Н., Любимова Е.А., Власов В.К. Об эволюции зон проплавления в термической истории Земли // ДАН СССР. 1969. Т. 188. № 2. С. 338–342.

Хачай Ю.В., Анфилов В.Н., Антипин А.Н. О влиянии первичной атмосферы на распределение температуры в Земле при ее аккумуляции // Уральский геофизический вестник. 2012. № 2. С. 54–59.

Jacobsen S., Yin Q. Models of planetary accretion and core formation based on the Hf-W clock // Geophys. Research Abstracts. 2003. V. 5. P. 13884.

Kaula E.M. Thermal evolution of Earth and Moon growing by planetesimal impacts // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 999–1008.

Khachay Yu.V. MHD process in the layer of gravitating sphere growing radius // Magnetohydrodynamics. 2013. V. 49. No 1–3. P. 81–86.

Khachay Yu., Anfilogov V. Variants of temperature distributions in the Earth on its accumulation // The study of the Earth as a planet by methods of geophysics, geodesy, and astronomy. Kyiv: Akadempriodyka, 2010. P. 197–203.

Khachay Yu.V., Anfilogov V.N., Antipin A.N. Numerical Results of 3-D Modeling of Moon Accumulation // Geophys. Research Abstracts. 2014. V. 16. P. 1011.

Krot A.N., Amelin Y., Bland P. et al. Origin and chronology of chondritic components: A review // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2009. V. 73. P. 4963–4997.

Menneken M., Nemchin A.A., Geisler T et al. Hadean diamonds in zircon from Jack Hills, Western Australia // Nature. 2007. V. 448. P. 917–920.

Nyquist L.E., Kleine T., Shih C.-Y., Reese Y.D. The distribution of short-lived radioisotopes in the early solar system and the chronology of asteroid accretion, differentiation, and secondary mineralization // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2009. V. 73. P. 5115–5136.