

СТЕНД «ЗЕМЛЯ» В ЭКСПОЗИЦИИ «ЗЕМЛЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ»

О.П. Иванов, М.А. Винник¹

Стенд «Земля» отражает специфику возникновения, эволюции и современного строения планеты Земля совместно с её спутником Луной. На стенде особое внимание уделено анализу строения Земли как сложной системы, её кинематическим (нута́ция, пре́цессия, динамика эксцентриситета орбиты и дрейф магнитных полюсов), эндогенным (мантейные струи, конвекция), а также магнитным и палеомагнитным (смены полярностей магнитного поля, электромагнитное динамо) особенностям. Рассмотрена схема возникновения планеты из газопылевого облака. Представлена импактная гипотеза происхождения Луны.

Ключевые слова: сложная система, нута́ция, пре́цессия, инверсии магнитного поля, геодинамика, мантейные струи, разрез, планетезимали, томография.

THE STAND 'EARTH' AT THE EXHIBITION 'THE EARTH IN THE UNIVERSE'

O.P. Ivanov, PhD, M.A. Vinnick, Dr. Sci (Pedagogy)
Lomonosov Moscow State University (Earth Science Museum)

The stand 'Earth' reflects the specifics of emergence, evolution and contemporary structure of the planet Earth as well as its satellite, the Moon. It also demonstrates the results of the Earth analysis from the standpoint of the theory of complex systems. Therefore, special attention is paid to the analysis of the complex system structure, its kinematic (nutatation, precession, orbital eccentricity dynamics and polar drift), endogenic (mantle plume, convection), as well as magnetic and paleomagnetic (geomagnetic reversal, electromagnetic Dynamo) characteristics. The stand reveals the scheme of the planet's formation from a gas-dust cloud. The prevailing explanation for the moon's origin, known as the Giant Impact Hypothesis, is also present on the stand.

Keywords: complex system, nutation, precession, geomagnetic reversal, geodynamics, mantle plume, section, planetesimal, tomography.

Введение. Тематика стенда предполагает исследование структуры, геодинамики и эволюции сложной системы «Земля». Это важно как с позиций планетологии, так и с позиций возникновения и развития жизни на Земле.

Земля – третья от Солнца планета, пятая по размеру среди всех планет Солнечной системы. Она является также крупнейшей по диаметру, массе и плотности среди планет земной группы. Научные данные указывают на то, что Земля образовалась из солнечной туманности около 4,54 млрд лет назад и вскоре после этого приобрела свой естественный спутник – Луну. Жизнь появилась на Земле примерно 3,9 млрд лет назад. Приблизительно 70,8 % поверхности планеты занимает Мировой океан, остальную часть поверхности занимают континенты и острова. На материках расположены реки, озёра, подземные воды и льды; вместе с Мировым океаном они составляют гидросферу. Жидкая вода, необходимая для всех известных жизненных форм, не существует

¹ Иванов Олег Петрович – к.г.-м.н., в.н.с., ivanovop2007@yandex.ru; Винник Михаил Анатольевич – д.пед.н., в.н.с. Музея землеведения МГУ, vin_nik@mail.ru.

на поверхности какой-либо из известных планет и планетоидов Солнечной системы, кроме Земли. Полюсы Земли покрыты ледяным панцирем, который включает в себя морской лёд Арктики и антарктический ледяной щит.

Земля – сложная система и состоит из последовательного ряда внутренних и внешних подсистем. Внутренние подсистемы Земли достаточно активны и состоят из толстого, очень вязкого слоя, называемого мантией, которая покрывает жидкое внешнее ядро, являющееся источником магнитного поля Земли, и внутреннего твёрдого ядра, предположительно состоящего из железа и никеля.

Физические характеристики Земли и её орбитального движения позволили жизни сохраниться на протяжении последних 3,5 млрд лет. По различным оценкам, Земля будет сохранять условия для существования живых организмов ещё в течение 0,5–2,3 млрд лет.

Земля гравитационно взаимодействует с объектами космоса, включая Солнце, Луну, планеты и их спутники, астероиды и кометы. Земля обращается вокруг Солнца и делает полный оборот примерно за 365,26 солнечных суток – сидерический год. Ось её вращения наклонена на 23,44° относительно перпендикуляра к орбитальной плоскости, что вызывает сезонные изменения на поверхности планеты с периодом в один тропический год – 365,24 солнечных суток. Сутки сейчас составляют примерно 24 часа [3]

Луна начала своё обращение на орбите вокруг Земли примерно 4,53 млрд лет назад. Гравитационное воздействие Луны на Землю является причиной возникновения океанских приливов. Луна также стабилизирует наклон земной оси и постепенно замедляет вращение Земли.

Основные параметры планеты:

Экваториальный радиус – 6378,1 км;

Полярный радиус – 6356,8 км;

Окружность большого круга – 40 075,017 км (по экватору) и 40 007,86 км (по меридиану);

Площадь поверхности (S) – 510 072 000 км², из них 148 940 000 км² суша (29,2 %) и 361 132 000 км² вода (70,8 %);

Объём (V) – 10,8321·10¹¹ км³;

Масса (m) – 5,9726·10²⁴ кг (3·10⁻⁶ M_☉);

Средняя плотность (ρ) – 5,5153 г/см³;

Ускорение свободного падения на экваторе (g) – 9,780327 м/с² (0,99732g);

Первая космическая скорость (v₁) – 7,91 км/с;

Вторая космическая скорость (v₂) – 11,186 км/с;

Наклон оси – 23°26'21".

Структура стенда. Стенд «Земля» состоит из 7 тематических блоков, каждый из которых представлен рядом экспонатов в виде отдельных рисунков или схем (рис. 1). В центре стенда вверху представлен набор схем, демонстрирующих Землю как сложную систему.

К ним относятся нелинейные особенности кинематических параметров, включающих прецессию, нутацию, эксцентриситет и экскурсы северного магнитного полюса, а также сложность среднего химического состава Земли и её строения как сложной системы (рис. 2). Рассуждая о Земле как о сложной системе, мы должны понимать, что признаками сложности также являются взаимодействия подсистем Земли нелиней-

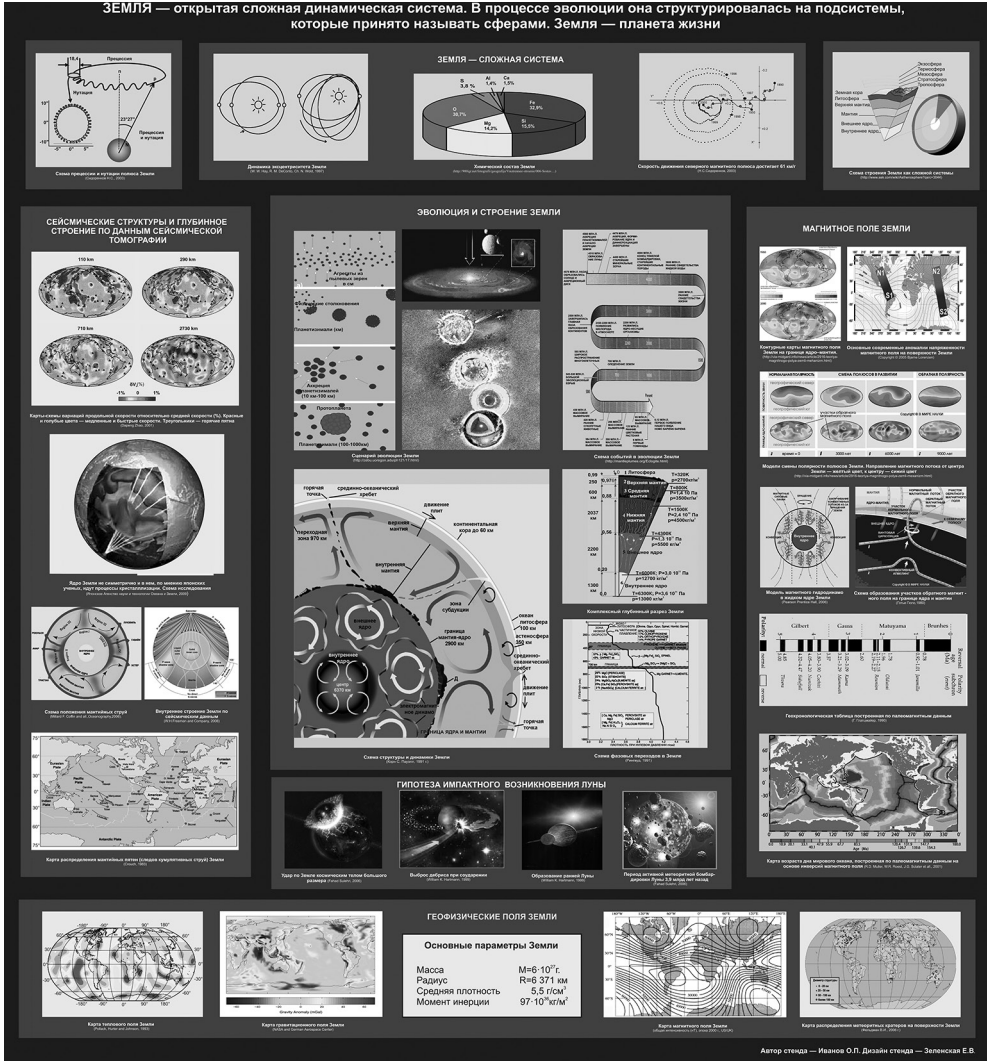


Рис. 1. Вид стенда «Земля».

но друг с другом и с системами и надсистемами космоса (планетами, Солнцем, нашей Галактикой). Особо следует отметить то, что Земля как сложная система состоит из внешних (разряженных) и внутренних (плотных) подсистем.



Рис. 2. Тематический блок «Земля – сложная система».

Ниже представлен тематический блок, посвящённый возникновению планеты Земля из газопылевого облака через объединение пылинок в планетезимали, слияние разрастающихся планетезималей (слева) вплоть до становления планеты (центр). Справа в виде ленты представлена схема основных событий, сопутствующих эволюции Земли как планеты (рис. 3).

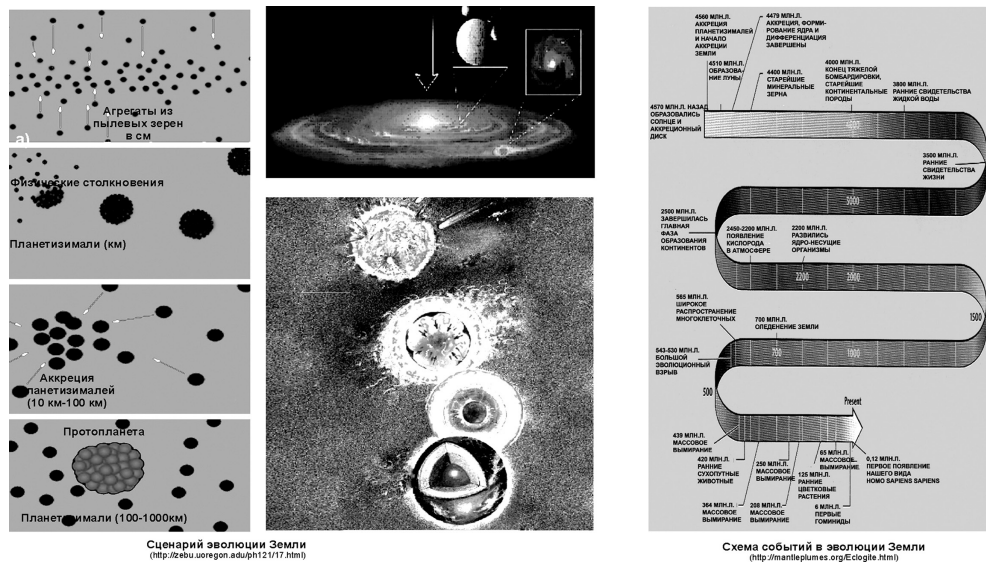


Рис. 3. Тематический блок «Эволюция и строение Земли».

Краткая история Земли. Современной научной гипотезой формирования Земли и других планет Солнечной системы является гипотеза солнечной туманности, по которой Солнечная система образовалась из большого облака межзвёздной пыли и газа. Облако состояло главным образом из водорода и гелия, которые образовались после Большого взрыва, и более тяжёлых элементов, оставленных взрывами сверхновых. Примерно 4,5 млрд лет назад облако стало сжиматься, что, вероятно, произошло из-за воздействия ударной волны от вспыхнувшей на расстоянии нескольких световых лет сверхновой. Когда облако начало сокращаться, угловой момент, гравитация и инерция сплюснули его в протопланетный диск перпендикулярно к его оси вращения. После этого обломки в протопланетном диске под действием силы притяжения стали сталкиваться, и, слипаясь, образовывали первые планетезимали различного размера.

В процессе аккреции планетезимали, пыль, газ и обломки, оставшиеся после формирования Солнечной системы, стали сливаться во всё более крупные объекты, формируя планеты. Примерная дата образования Земли – $4,54 \pm 0,04$ млрд лет назад. Весь процесс формирования планеты занял примерно 10–20 млн лет.

Протоземля увеличилась за счёт аккреции, и была достаточно раскалена, чтобы расплавлять металлы и минералы. Железо, а также геохимически родственные ему сидерофильные элементы, обладая более высокой плотностью, чем силикаты и алюмосиликаты, опускались к центру Земли. Это в условиях вращения привело к разделению внутренних слоёв Земли на мантию и металлическое ядро спустя всего 10 миллионов

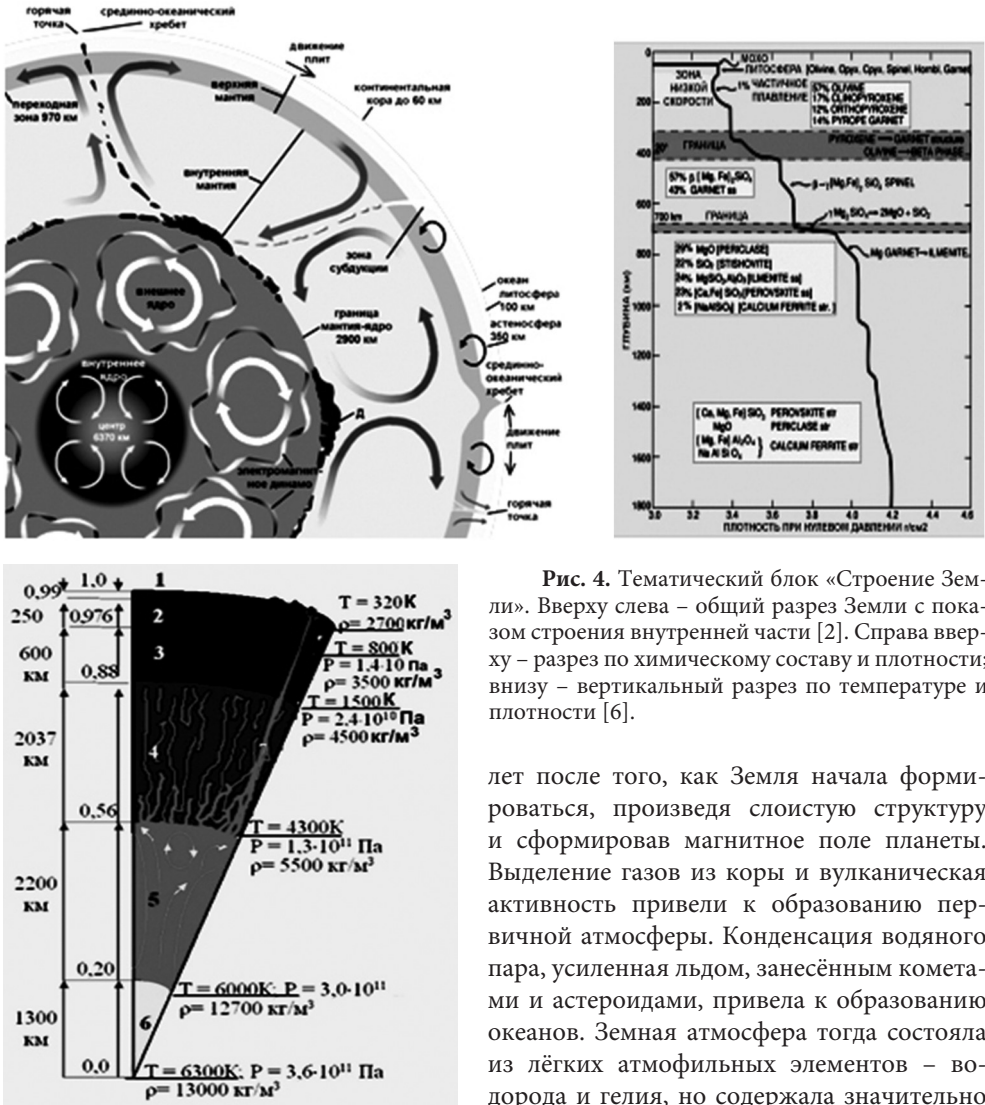


Рис. 4. Тематический блок «Строение Земли». Вверху слева – общий разрез Земли с показом строения внутренней части [2]. Справа вверху – разрез по химическому составу и плотности; внизу – вертикальный разрез по температуре и плотности [6].

лет после того, как Земля начала формироваться, произведя слоистую структуру и сформировав магнитное поле планеты. Выделение газов из коры и вулканическая активность привели к образованию первичной атмосферы. Конденсация водяного пара, усиленная льдом, занесённым кометами и астероидами, привела к образованию океанов. Земная атмосфера тогда состояла из лёгких атмосферных элементов – водорода и гелия, но содержала значительно больше углекислого газа, чем сейчас, а это

уберегло океаны от замерзания, поскольку светимость Солнца тогда не превышала 70 % от нынешнего уровня. Примерно 3,5 млрд лет назад образовалось магнитное поле Земли, которое предотвратило опустошение атмосферы солнечным ветром.

Поверхность планеты постоянно изменялась в течение сотен млн лет: континенты появлялись и разрушались. Они перемещались по поверхности, порой собираясь в суперконтиненты. Приблизительно 750 млн лет назад самый ранний из известных суперконтинентов – Родиния – стал раскалываться на части. Позже эти части объединились в Паннотию (600–540 млн лет назад), затем в последний из суперконтинентов – Пангею, который распался 180 млн лет назад.

Центральный блок стенда представлен 3-мя экспонатами, демонстрирующими сложные разрезы Земли с показом явлений конвекции в твёрдом и жидком ядре и в

мантии (слева) [2]. Распределение температуры, скорости и химического состава от поверхности до центра Земли (справа) не линейно [6].

Ниже расположен блок, посвящённый проблеме импактного происхождения Луны – единственного спутника Земли. Луна сформировалась позднее, примерно $4,527 \pm 0,01$ млрд. лет назад, хотя её происхождение до сих пор точно не установлено. Основная гипотеза гласит, что она образовалась путём аккреции из вещества, оставшегося после касательного столкновения Земли с объектом «Тейя», по размерам близким Марсу и массой 10–12 % земной. Этого было достаточно для испарения внешних слоёв Земли и расплавления обоих тел. Часть мантии была выброшена на орбиту Земли, что предсказывает, почему Луна обделена металлическим материалом и объясняет её необычный состав. Под влиянием аккреции выброшенный материал принял сферическую форму, и образовалась Луна [7].

На блоке слева (см. рис. 1 слева) изображены сейсмические структуры и глубинное строение мантии Земли по данным сейсмической томографии. На вертикальном разрезе отражено положение мантийных струй внутри Земли и их выходы и распределение по поверхности планеты. Представлена схема распространения сейсмических лучей внутри Земли. Важно, что поперечные волны не проходят сквозь внешнее ядро Земли, что говорит о его жидком состоянии.

Основной метод внутреннего исследования – сейсмология. Сейсмическая томография базируется на измерении скоростей объёмных и поверхностных сейсмических волн, «просвечивающих» интересующие геофизиков внутренние части Земли. Новые сейсмические станции и компьютеры позволили выявить небольшие (до 5 %) отклонения скоростей прохождения сейсмических волн через недра Земли относительно стандартных моделей их распределения К.Е. Буллена или PREM. Структура Земли оказалась мозаичной с положительными или отрицательными значениями скоростей упругих объёмных сейсмических волн относительно их «нормальных» значений для соответствующих глубин. Эти участки можно наблюдать как в двух-, так и в трёхмерном изображении. Можно использовать сразу все типы волн, не изучая их последовательно, а как бы суммируя вместе. Это так называемая многоволновая томография, которая даёт гораздо более качественное представление о глубинных неоднородностях. В пределах верхней мантии подтвердились основные положения теории тектоники литосферных плит, и мы действительно наблюдаем погружение холодных и более плотных океанических пластин под более лёгкие континентальные и подъём нагретого вещества вдоль осей рифтовых океанических и континентальных зон [1].

Справа на стенде тематический блок (см. рис. 1 справа) посвящён магнитным особенностям Земли, включая специфику смены магнитной полярности на планете, шкалу таких смен и схему электромагнитного динамо в ядре Земли.



Рис. 5. Тематический блок «Гипотеза импактного происхождения Луны».

Внизу блока показана карта магнитного поля океанов Земли [5]. Низ стенда представлен изображениями различных геофизических полей Земли (теплового, гравитационного, магнитного) и картой импактных структур на её поверхности [4] (рис. 6).

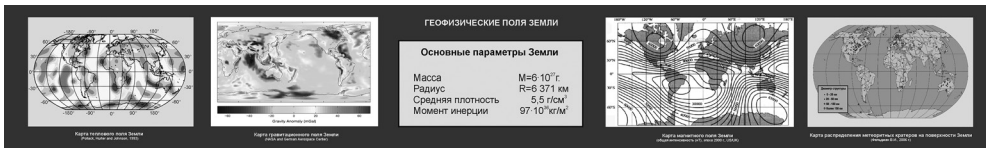


Рис. 6. Тематический блок «Геофизические поля Земли».

На карте теплового поля Земли (слева) четко отслеживаются линейные зоны экстремального выделения тепла в зонах рифтов. На карте гравитационного поля хорошо выделяются зоны островных дуг. Карта магнитного поля Земли демонстрирует четыре основные аномальные зоны и, наконец, на карте импактных структур показано распределение кратеров Земли космического происхождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Короновский Н.В. Сейсмическая томография // Соросовский образовательный журнал. Т. 6, №11, 2000. С. 63–68.
2. Корн С. Пауэлл. Вглядываясь вглубь // В мире науки. 1981. № 8. С. 88–79.
3. Сидоренков Н.С. Нестабильность вращения Земли (http://fiz.1september.ru/2003/01/no01_1.htm).
4. Фельдман В. И. Петрология импактитов. М.: Изд-во МГУ, 1990. 298 с.
5. Muller R.D., Roest W.R., Sclater J.G. Satellite-derived gravity having an impact on marine exploration // *The Leading Edge* 20:873–876, 2001.
6. Ringwood, A.E. Phase transitions and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. V. 55, 1991.Pp. 2083–2110 (<http://www.le.ac.uk/geology/art/gl209/lecture1.html>).
7. William K. Hartmann. Early Moon Formed (<http://www.psi.edu/hartmann/pic-cat/earth.html>, 1999).

REFERENCES

1. Koronovskiy N.V. Seismic tomography. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*. 6 (11), 63–68 (2000) (in Russian).
2. Korn S. Pauell. *Looking deep // V mire nauki*. 8, 88–79 (1981) (in Russian).
3. Sidorenkov N.S. *Instability of Earth's rotation* (http://fiz.1september.ru/2003/01/no01_1.htm) (in Russian).
4. Feldman V.I. *Petrology of impactites*. 298 p. (Moscow: Izdatel'stvo MGU, 1990) (in Russian).
5. Muller R.D., Roest W.R., Sclater J.G. Satellite-derived gravity having an impact on marine exploration. *The Leading Edge*. 20, 873–876 (2001).
6. Ringwood, A.E. Phase transitions and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 55, 2083–2110 (1991) (<http://www.le.ac.uk/geology/art/gl209/lecture1.html>).
7. William K. Hartmann. *Early Moon Formed* (<http://www.psi.edu/hartmann/pic-cat/earth.html>).