

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
“Тюменский государственный нефтегазовый университет”

институт Геологии и Геоинформатики  
кафедра Разведочной Геофизики

**МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ**  
к лабораторным занятиям по дисциплине «**Физика Земли**»  
для студентов специальности 071900  
*Информационные системы и технологии*  
очной и заочной форм обучения

Тюмень 2004

Утверждено редакционно-издательским советом  
Тюменского государственного нефтегазового университета

Составил: А.Н.Дмитриев, д.г.-м.н., профессор

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Профессиональная подготовка специалистов информационных технологий геологической направленности включает обязательный курс «Физика Земли». Этот курс, базируясь на достигнутых в последнее время результатах естествознания, связанных с активным освоением околоземного пространства и космоса, закладывает основы знаний миропорядка как во Вселенной и, в частности, в Солнечной системе, так и внутреннего строения планеты Земля и ее сопутствующих физических полей.

Чтение этой дисциплины на II курсе предусматривает, что студенты на более старших курсах значительно эффективнее будут осваивать другие дисциплины геологической и геофизической направленности, ориентированные, как правило, на изучение уже только верхней оболочки Земли – земной коры.

Предлагаемый курс обучения предусматривает, что студенты имеют физико-математические знания на уровне требований высшей школы.

Цель курса «Физика Земли» - дать студентам основы строения Вселенной и более детально ознакомить с внутренним строением планеты Земля, а также физическими полями Земли (гравитационным, магнитным, сейсмическим, электрическим, тепловым).

Учебным планом очного факультета предусматривается чтение лекций по курсу 17 часов и проведение лабораторных занятий 17 часов. Для заочного - предусматривается чтение лекций по курсу 8 часов и проведение лабораторных занятий 4 часа. Студент должен сдать зачет в объеме всего курса.

Перечень лабораторных работ приводится в Указаниях. Список рекомендованной литературы прилагается.

В настоящих Указаниях заметное внимание уделено теоретическому курсу в связи с отсутствием специального учебника и разбросанностью материала по различным источникам, включая и Internet-сведения.

## **ПРОГРАММА КУРСА**

**1. Физика Земли – интеграционная и саморазвивающаяся наука на базе накопленных знаний в физических отраслях естествознания.**

Общие сведения планетологического характера. Теория Большого Взрыва. Происхождение Вселенной, Галактик, Солнечных систем, планет, спутников планет, метеоритных поясов. Планетная система Земля – Луна, прикладное значение её исследований. (2 час).

**2. Сведения о строении Земли, Луны.**

Возраст Земли, Луны. Слои внутри Земли, Луны. Химический состав Земли, её основных слоёв: земной коры, астеносферы, нижней мантии, внешнего и внутреннего ядер Земли. (1 час).

**3. Гравитационное поле Земли.**

Ускорение силы тяжести как градиент геопотенциала. Геонд по спутниковым данным. Сила тяжести внутри Земли и в околоземном пространстве. Изостазия. Понятие о невесомости и космических скоростях. Причины нестационарности гравитационного поля. Эвстатические колебания уровня мирового океана. (2 часа).

**4. Фигура Земли.**

Параметры, определяющие геометрию земной поверхности. Масса и основные моменты инерции Земли, Луны. Отклонение Земли от состояния гидростатического равновесия. (1 час).

**5. Вращение Земли.**

Параметры, характеризующие вращательное движение Земли. Процессы, осложняющие вращение Земли: прецессия, нутация, 12- и 14-месячные колебания полюсов Земли. Приливные явления, обусловленные Луной и Солнцем. Нерегулярные изменения скорости вращения Земли. (2 часа).

**6. Механо-физические свойства Земли.**

Упругие и неупругие деформации Земли. Процессы упругой деформации и описывающая их идеальная теоретическая модель. Процессы неупругой деформации и их теоретическая модель. Ползучесть горных пород, её разновидность – сель. Энергия упругих колебаний и механизм затухания колебаний. (2 часа).

**7. Сейсмология.**

Задачи и методы сейсмологии. Сейсмичность Земли. Механизм очага землетрясения. Классификация землетрясений. Сейсмические волны и их траектории в теле планеты. Годографы. Собственные колебания Земли. Фоновые колебания Земли: микросейсмы и цунами. (2 часа).

## **8. Магнитное поле Земли.**

Геомагнитное поле в прошлые эпохи. Палеомагнетизм. Происхождение главного магнитного поля и вековых вариаций. Тороидальная и полоидальная составляющая геомагнитного поля. Инверсия магнитного поля Земли. (2 часа).

## **9. Электрическое поле Земли.**

Электропроводность ядра и мантии Земли. Естественные электрические поля различной природы. Электрические поля континентов и океанов. Атмосферное электричество. (2 часа).

## **10. Тепловое поле Земли.**

Процессы генерации и передачи тепла. Теория твёрдого тела и её применение в геотермии. Тепловое состояние Земли. (2 часа)

**11. Современные представления о зональном строении Земли:** земная кора (А), верхняя мантия (В), переходная зона (С), нижняя мантия (D), внешнее ядро (Е), переходная зона (F), внутреннее ядро (G). (1 час)

## **Раздел 1. КОНСПЕКТИВНЫЙ ЛЕКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ В ПОМОЩЬ ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ**

### **Объект и предмет исследования**

Под Физикой Земли понимают науку, занимающуюся изучением нашей планеты с помощью естественных и искусственных физических полей с целью познания как внутреннего строения планеты, так и её наружных оболочек: твёрдой (литосферы), жидкой (гидросферы), и газообразной (атмосферы). Она исследует все физические явления, происходящие в различных оболочках Земли с целью их познания и прогноза событий. Кроме того, она изучает происхождение и развитие нашей планеты в целом.

### **1. Общие сведения планетологического характера.**

#### **Происхождение Вселенной и Земли. Эволюция Вселенной.**

До 20-х годов прошлого столетия астрофизики считали, что наша Вселенная является стационарной. А. Эйнштейном выведены были специальные гравитационные уравнения для описания стационарной Вселенной. На основе новых решений А.А. Фридман установил, что наша Вселенная нестационарна и она расширяется. Исходя из этих данных Г.А. Гамов (1946 г.) предложил модель горячей Вселенной, ныне

принятую подавляющим большинством исследователей процессов эволюции Вселенной.

В соответствии с этой моделью Вселенная вначале была сосредоточена в квазиточке размером  $10^{-33}$  см, и плотностью  $\sim 10^{93}$  г/см<sup>3</sup> и температурой свыше  $10^{33}$  К. Такая частица получила название супердрона. Примерно 15...20 млрд. лет тому назад она взорвалась и Вселенная стала расширяться.

Этап эволюции расширяющейся Вселенной астрофизики разделяют на 4 эры: а) адронная, б) лептонная, в) излучения, г) вещества. В последней стали возникать атомы водорода и гелия, из которых в последующем образовались галактики, черные дыры, звёзды, планеты и др. космические объекты.

Галактики стали формироваться спустя примерно 3 млрд. лет после начала расширения Вселенной в местах скопления облаков нейтринного газа, представляющего собой так называемые гравитационные ямы. При скоплении в таких местах неоднородностей порядка  $10^{40}$  т начинают возобладать процессы сдвливания вещества преимущественно в двух противоположных направлениях. Всего астрономы выделяют 4 типа галактик: эллиптические, спиральные, линзовидные и неправильные.

Во Вселенной в настоящее время насчитывается  $10^{14}$  Галактик. Наша Галактика (Млечный путь) относится к спиральному типу (рис. 2). В ней порядка 200 млрд. звёзд общей массой  $3 \cdot 10^{38}$  т.

Формирование звёзд начинается сразу после образования Галактик. Солнце образовалось около 5 млрд. лет назад, его масса ( $M_{\odot}$ ) составляет  $2 \cdot 10^{27}$  т. В нашей Галактике на звёзды приходится 97% всей её массы. Остальная часть материи распределена в виде межзвёздного газа и пыли.

Звёзды и их планетные системы образуются из газопылевых туманностей. Академик О.Ю. Шмидт, изучая эту проблему, пришёл к заключению, что Солнце и планеты образовались не из горячей, а из холодной газопылевой туманности. Ранее Кантом-Лапласом развивалась гипотеза о происхождении Солнца и планет из горячей газопылевой туманности.

В общей сложности процесс образования Солнца занимает порядка 50 млн. лет. Планеты формируются на периферии этого газопылевого облака. Образование землеподобных планет происходит в течение  $\sim 100$  млн. лет. В настоящее время считается, что Солнце образовалось 4.6, а землеподобные планеты – 4.55 млрд. лет назад. Процесс формирования Юпитера и Сатурна протекал порядка 100 млн. лет, а Урана и Нептуна – 0.5 млрд. лет. Плутон же, возможно, ещё не закончил этот процесс.

## Планеты

Под планетами понимают космические тела массой  $10^{17} - 10^{26}$  т. Вещество в них находится в конденсированном состоянии и

эволюционирует за счет процесса гравитационной дифференциации, радиогенной энергии и т.д. В объектах с массой, на порядок больше указанного предела, начинают протекать термоядерные реакции, свойственные звездам.

К настоящему времени достоверно установлено наличие 9 планет в Солнечной системе.

### Планетарная система Земля – Луна, аспекты её изучения.

Земля и её спутник Луна образуют систему, которая в известном смысле является уникальной для всей солнечной системы: отношение масс Луны и Земли равно 1: 81.3, что чрезвычайно велико для спутника. Около 80% момента количества движения системы приходится на долю орбитального движения Луны.

Приливное взаимодействие Земли и Луны вызывает постепенную потерю энергии вращения системы. В результате этого взаимодействия Луна оказалась постоянно обращённой к Земле одной и той же стороной.

## 2. Сведения о строении Земли

### Гипотеза "холодного" происхождения

Как уже говорилось, гипотетически Земля произошла из газопылевого протопланетного облака с относительно низкой начальной температурой планеты. Тем не менее допускается, что расплавление Земли возможно на ранней стадии развития за счёт большого выделения на этом этапе радиогенного тепла. При этом дальнейшая история Земли будет соответствовать гипотезе горячего происхождения. Расплавленная Земля дифференцировалась на кору, мантию и железное ядро. В каждой из этих оболочек благодаря выносу тепла конвенцией установилось адиабатическое распределение температуры.

### Гипотеза "горячего" происхождения

В этом случае наиболее вероятной начальной температурой в настоящее время следует признать температуру порядка 1000 - 1600°K.

### Химический состав и возраст Земли

На основе исследования метеоритов (железных метеоритов или сидеритов и каменных метеоритов или аэролитов (хондритов и ахондритов)) установлено среднее содержание минералов:

- 46% оливина  $(Mg,Fe)_2SiO_4$  ;
- 25% пироксенов  $(Mg,Fe)SiO_3$  или  $(Ca,Mg,Fe,Al)_2(Al, Si)_2O_6$ ;
- 11% плагиоклазов  $NaAlSiO_3 - CaAl_2Si_2O_8$
- 12% железо-никелевой фазы.

В результате подсчёта коэффициента  $r = \text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$  для дочерних изотопов свинца, образованных в результате распада урана между заданным моментом в прошлом и настоящим временем, получаем возраст Земли, близкий к 4.55 млрд. лет.

### Радиоактивность

Радиоактивностью называют способность атомов к превращению, которое сопровождается испусканием излучения. При радиоактивном распаде испускается излучение трёх видов:  $\alpha$  -,  $\beta$  - и  $\gamma$  - излучения.

Роль радиоактивности: установление возраста пород и как источник тепла в Земле.

Заметную долю тепла, выделяемого в недрах Земли, в настоящее время создают изотопы  $\text{U}^{238}$ ,  $\text{U}^{235}$ ,  $\text{Th}^{232}$  и  $\text{K}^{40}$ .

Примем, что скорость генерации тепла определяется хондритовой моделью и равна  $21 \cdot 10^{-8}$  кал/(г · год); удельную теплоёмкость примем равной 0.3 кал/(г·°C). Тогда (если не принимать во внимание потери тепла) температура Земли за первый млрд. лет должна была повыситься до 700°C. Если всё тепло, выделенное хондритовой Землёй за 4.5 млрд. лет останется целиком в Земле, тогда её средняя температура достигнет лишь 1800°C. Таким образом, вклад долгоживущих радиоактивных изотопов может объяснить только часть начального разогрева Земли. Поэтому, чтобы разогреть Землю до современной температуры, необходимы были и другие источники тепла.

### Предполагаемые закономерности изменения массы и объёма Земли

В настоящее время существует довольно много геотектонических гипотез, рассматривающих основные проблемы формирования и развития земной коры. Существуют пять основных геотектонических гипотез: гипотеза контракции, гипотеза дрейфа континентов, гипотеза расширяющейся Земли и две разновидности гипотезы дифференциации.

Все гипотезы, кроме некоторых разновидностей дрейфа континентов, рассматривают в качестве основной причины развития земной коры внутренние физические и физико-химические процессы в недрах планеты, хотя и не исключается некоторая роль внешних факторов как второстепенных воздействий.

### Плотностная зональность в строении Земли

Оболочка	Интервал глубин, км	Интервал плотности, г/см <sup>3</sup>
Кора (A)	0 - 33	2.7 - 3.0
Мантия (B)	33 - 400	3.32 - 3.65
	(C) 400 - 1000	3.65 - 4.68
	(D) 1000 - 2900	4.68 - 5.69

Ядро	(E)	2900 – 5000	9.4 - 11.5
	(F)	5000 – 5100	11.5 - 12.0
	(G)	5100 – 6371	12.0 - 12.3

### 3. Гравитационное поле Земли

Сила, с которой всякое тело притягивается к Земле, называется силой тяжести. Сила тяжести в данной точке Земли – равнодействующая двух сил: силы притяжения всей массой Земли и центробежной силы, вызванной суточным вращением Земли вокруг своей оси.

По Закону Ньютона сила притяжения всей массой Земли единичной массы ( $m = 1$ ) равна

$$F = G \int_{\tau} \frac{dm}{\rho^2}$$

где  $\rho$  – расстояние от притягиваемой единичной массы в точке  $(x, y, z)$  до элемента  $dm$  массы Земли в точке  $(\xi, \eta, \zeta)$ ;  $\tau$  – объём Земли.

В этом случае величина  $F$  численно равна ускорению свободного падения.

Составляющие  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  представляют частные производные по координатам притягиваемой точки от функции  $V$ , называемой потенциалом (потенциалом притяжения):

$$V = G \int_{\tau} \frac{dm}{\rho}$$

Потенциал центробежного ускорения равен

$$U(x, y, z) = \omega^2 (x^2 + y^2) / 2$$

где  $\omega$  – угловая скорость суточного вращения Земли и равна  $2\pi/86164$  рад/с.

Тогда составляющие ускорения свободного падения по координатным осям:

$$g_x = G \int_{\tau} \frac{\xi - x}{\rho^3} dm + \omega^2 x$$

$$g_y = G \int_{\tau} \frac{\eta - y}{\rho^3} dm + \omega^2 y$$

$$g_z = G \int_{\tau} \frac{\zeta - z}{\rho^3} dm$$

Значение силы тяжести  $g = \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2}$  на экваторе составляет  $g_e = 978.0$  Гал. И на полюсах  $g_p = 983.2$  Гал.

## Понятие о невесомости

Невесомость – состояние, при котором действующие на тело внешние силы не вызывают взаимных давлений его частиц друг на друга. В поле тяготения Земли человеческий организм воспринимает такие явления как ощущение весомости. Невесомость имеет место при свободном движении тела в поле тяготения (например, вертикальное падение, движение по орбите искусственного спутника, полёт космического корабля).

Но чтобы тело находилось в состоянии невесомости и стало спутником Земли, например, на орбите, оно должно двигаться со скоростью

$$V_1 = \sqrt{gR_{\text{земли}}}$$

Эта скорость называется первой космической скоростью. При подстановке  $g$  и  $R_{\text{земли}}$  даёт  $\approx 8$  км/с. Обладая скоростью  $V_1$ , тело не упадёт на Землю. Однако этой скорости не достаточно для того, чтобы тело могло выйти из сферы земного притяжения, т.е. удалиться от Земли на такое расстояние, что притяжение к Земле перестанет играть существенную роль. Необходимая для этого скорость  $V_2$  называется второй космической скоростью. Для выхода из Солнечной системы требуется уже третья космическая скорость  $V_3$ .

## Эвстатические колебания уровня мирового океана

Эвстатическими колебаниями называются медленные («вековые») колебания уровня мирового океана, вызываемые изменением общего запаса его воды. Одна из причин эвстатического колебания – таяние покровных ледников на материках.

Например, если бы все ледники Антарктиды и Гренландии растаяли, то уровень Мирового океана поднялся бы на 67 м. В итоге значительная часть суши покрылась бы водой.

## 4. Фигура Земли

Известно, что потенциал силы тяжести  $W$  равен сумме потенциалов притяжения  $V$  и центробежного ускорения  $U$

$$W(x, y, z) = V(x, y, z) + U(x, y)$$

Производная от потенциала силы тяжести по любому направлению  $S$  равна составляющей силы тяжести по этому направлению:

$$\frac{\partial W}{\partial S} = g \cos(g, S) = g_s$$

Отсюда, если положить  $g \cos(g, s) = 0$ , то  $dW = 0$  или  $W = C$ .

А это есть уравнение некоторой поверхности, в любой точке которой сила тяжести направлена по нормали к ней. Такая поверхность соответствует поверхности, находящейся в состоянии равновесия, и

называется уровенной или экипотенциальной поверхностью. При специальном значении постоянной  $C_0$  уравнение  $W = C_0$  будет уравнением уровенной поверхности, совпадающей с уровнем невозмущенной воды в океанах. Эта поверхность, мысленно продолженная под континенты, называется поверхностью геоида. Фигура, ограниченная такой поверхностью, называется геоидом.

Потенциал силы тяжести  $W$  в сферических координатах следующий:

$$W = G \frac{M}{r} + G \frac{C-A}{\alpha \cdot r^3} (1 - 3 \sin^2 \Phi) + \frac{\omega^2}{2} r^2 \sin^2 \Phi$$

$M$  - Масса Земли

$C, A$  – осевые моменты инерции эллипсоида вращения ( $C > A$ )

$\Phi$  – геоцентрическая широта

Придавая  $W$  различные  $C_1$ , получаем различные уровенные поверхности. Заслуживает внимания та, которая на экваторе касается земного эллипсоида.

Преобразуя формулу  $W$ , получим уравнение идеального геоида (сфероида Клеро):

$$\frac{r}{a} = 1 - \left( \frac{3\mu}{2M} + \frac{q}{2} \right) \sin^2 \Phi$$

где  $a$  – радиус экватора,  $\mu$  - избыток массы, которую для получения разности осевых моментов инерции можно представить в виде кольца, одетого на тело шара по экватору:  $\mu = (A - C) a^2$  и  $q = \omega^2 a / g_e$

$g_e$  – значение силы тяжести на экваторе.

Представляет интерес сопоставление этой поверхности с эллипсоидом вращения.

Если обозначить в уравнении геоида выражение в скобках через  $\alpha$ , то получим уравнение эллипсоида вращения:

$$r = a(1 - \alpha \sin^2 \Phi)$$

Величина имеет смысл сжатия:  $\alpha = (a - b) / a$

Идеальный геоид и эллипсоид соприкасаются только на полюсах и экваторе, их максимальное расхождение при  $\Phi = 45^\circ$ .

## 5. Вращение Земли

Параметры, характеризующие вращательное движение Земли.

Ньютон первым показал, что вращающаяся Земля должна быть эллипсоидом вращения, слабо сжатым у полюсов (так называемый сфероид).

Если предположить, что Земля симметрична относительно своей полярной оси, тогда у неё будет два главных момента инерции:  $A$  – относительно экваториальной и  $C$  – относительно полярной оси. Их можно определить следующим образом:

1. Величину  $(C - A)$  можно найти по формуле Мак-Кулло:

$$(C - A)/Ma^2 = \frac{1}{3}(\alpha - \frac{1}{2}m) = 0.00108265$$

$a$  – средний экваториальный радиус;

$\alpha$  – сжатие  $((a - c)/a)$ ;  $a$  и  $c$  – большая и малая полуоси геоида;

$$m = 3.4578 \cdot 10^{-3} = \omega^2 a^3 / GM$$

2. Теория вращения симметричного тела позволяет по периоду прецессии определить величину постоянной прецессии (динамического сжатия) Земли  $H = (C - A) / C$ . Для Земли  $H = 0,003275 = 1/305.51$ .

### Процессы, осложняющие вращение Земли

К ним относятся прецессия земной оси, нутация земной оси, приливные явления и колебания полюса.

**Прецессия земной оси.** Как известно, ось Земли имеет наклон к эклиптике (нормали к плоскости, проходящей через орбиты Земли и составляет  $23,5^\circ$ ). Моменты количества движения, возникающие из-за действия Луны и Солнца на экваториальное вздутие, вызывают прецессию земной оси. Прецессией называется медленное вращение земной оси вокруг нормали к эклиптике Земли. Конус вращения составляет  $47^\circ$  и возврат земной оси к прежнему положению происходит через 25800 лет. Если бы прецессия не была такой медленной, то навигация по звёздам была бы очень сложной.

Средняя скорость прецессии земной оси составляет около  $50,2''$  в год и равна

$$\bar{\omega}_p = \bar{\omega}_{p\text{Солнце}} + \bar{\omega}_{p\text{Луна}} = 50,2'' / \text{год}$$

$$\bar{\omega}_{p\text{Солнце}} = -\frac{3}{2} \frac{G}{\omega} \frac{C - A}{C} \frac{M_{\text{Солнце}}}{R^3} \cos \theta$$

где  $\omega_p$  – угловая скорость вращения Земли

$C, A$  – полярный и экваториальный моменты инерции Земли

$M_{\text{Солнце}}$  – масса Солнца

$R$  – радиус орбиты Земли вокруг Солнца

$\theta$  – угол, образованный экваториальной плоскостью Земли с экваториальной

круговой орбитой Солнца вокруг Земли.

Формула  $\omega_{p\text{Луна}}$  аналогична формуле  $\omega_{p\text{Солнце}}$

**Нутация.** Наряду с вращением земной оси вокруг вертикали происходят колебания оси в вертикальной плоскости, сопровождающиеся изменением по широте угла  $\alpha$  в пределах от  $\alpha_1$  до  $\alpha_2$ . Эти колебания земной оси называются нутацией. В зависимости от начальных условий конец земной оси вычерчивает на воображаемой сферической поверхности кривую, подобную гармонической частоте.

## Приливные явления, обусловленные Луной и Солнцем

Градиент потенциала притяжения Луны вызывает появление приливных выступов на Земле, в частности, в океанах. Процессы диссипации энергии приводят к запаздыванию приливов. Градиент гравитационного потенциала приливного выступа создаёт силу, ускоряющую орбитальное движение Луны, и силу, замедляющую вращение Земли. Это заставляет Луну переходить на орбиты с возрастающими радиусами и убыванием её угловой скорости, т. е. в настоящее время Луна удаляется от Земли.

Замедление вращения Земли вызывается также и Солнцем. Однако на долю солнечных приливов приходится менее четверти всей диссипирующей энергии.

## 6. Механо-физические свойства Земли

Механические свойства вещества Земли отличаются сложностью и в известной мере противоречивостью. Например, вещество верхней мантии Земли реагирует на внешние нагрузки достаточной длительности и масштабов почти как вязкая жидкость. Вместе с тем даже в слое низких скоростей достаточно хорошо распространяются все виды упругих волн.

В итоге, если на Землю воздействуют упругие колебания (напряжения) с периодом от долей секунд до суток и более, то Земля ведёт себя как идеально упругое тело, если же воздействие на Землю длится от тысяч лет до десятков тысячелетий, то Земля ведёт себя как вязкая жидкость.

Уравнение движения среды в случае воздействия на неё плоской продольной волны с произвольной формой колебания записывается так:

$$E (\partial^2 U / \partial x^2) = \rho (\partial^2 U / \partial t^2),$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $x$  – расстояние вдоль оси  $x$ ;  $t$  – время;  $U$  – смещение частиц среды,  $\rho$  – плотность среды.

Теоретическое изучение упругих волн в средах, состоящих из изотропных идеально-упругих однородных пластов, обеспечивает приемлемую точность для большинства практических целей.

Для характеристики свойств таких сред используют пары упругих констант, имеющих наглядную физическую интерпретацию: скорости  $V_p$  и  $V_s$ , модуль Юнга и коэффициент Пуассона ( $E$  и  $\sigma$ ), модуль всестороннего сжатия и модуль сдвига ( $K$  и  $G$ ).

Модуль Юнга – коэффициент пропорциональности между напряжением и продольной деформацией однородного упругого стержня.

Коэффициент Пуассона – отношение поперечной деформации стержня к продольной.

Модуль всестороннего сжатия – коэффициент пропорциональности между давлением и относительным уменьшением объёма.

Модуль сдвига – коэффициент пропорциональности между касательным напряжением и деформацией сдвига.

Если в материальной среде протекают колебательные процессы и если возникают потери энергии колебаний или энергия деформаций в плоской волне изменяется со временем, то среду называют **неидеально-упругой** или **поглощающей**.

Наиболее характерными явлениями неидеальной упругости являются процессы ползучести и релаксации напряжений.

Идеально пластическое тело обладает пределом текучести, по достижении которого тело течёт. Какова бы ни была скорость нагружения, оно начинает течь при достижении определённого касательного напряжения.

Процесс постепенного нарастания деформации  $U(t)$  во времени при постоянном напряжении  $\tau_0(t) = \text{Const}$ , меньшем прочности на течение для данного материала, носит название **ползучести**.

Энергия сейсмической волны складывается из кинетической энергии, обусловленной движением частиц, и потенциальной, обусловленной деформациями. Движение энергии при распространении волны характеризуют плотностью потока энергии. →

Вектор плотности потока энергии  $P_E$  направлен в сторону движения волны, а по абсолютной величине равен отношению энергии  $dE$ , проходящей через перпендикулярный к лучу малый участок, к его площади  $ds$  и к длительности времени прохождения волны  $dt$ :

$$P_E = dE / dt ds$$

Существуют четыре причины, ослабляющие амплитуду (энергию) сейсмического сигнала при его распространении в недрах Земли.

## 7. Сейсмология

Сейсмология – это наука, занимающаяся измерениями и анализом всех движений, которые регистрируются сейсмографами на поверхности твёрдой Земли.

Основная задача сейсмологии состоит в изучении внутреннего строения Земли. Поэтому очень важно знать, как отклонения от однородности влияют на распространение сейсмических волн.

По существу все прямые данные о внутреннем строении Земли, имеющиеся в нашем распоряжении, получены из наблюдений за распространением упругих волн, возбуждаемых при землетрясениях. Землетрясения можно рассматривать как специфические колебательные движения земной коры, характеризующиеся небольшой длительностью периодов (от десятков минут для собственных колебаний Земли до долей секунд). Под сейсмичностью подразумевается географическое распределение землетрясений, их связь со строением земной поверхности и распределение по магнитудам (или энергиям).

Землетрясения классифицируют в соответствии с положением глубины очага. Выделяют поверхностные (0 – 70 км), промежуточные (70 – 300 км) и глубокие (300-700 км) очаги. На поверхностные (неглубокие) землетрясения приходится выделение примерно 85% энергии, на промежуточные – 12% и на глубокие – 3%.

**Магнитудой** землетрясения называется его численная характеристика, определяемая по амплитудам сейсмических волн, возбуждаемых при этом землетрясении.

**Сейсмические волны и их траектории в теле планеты. Годографы.**

Вне очага землетрясения деформации носят преимущественно характер упругих и распространяются от него по законам распространения упругих волн. В данном случае эти волны носят название сейсмических. К ним применяются обычные понятия фронта и луча. Сейсмические волны – это, по существу, низкочастотные звуковые волны в твёрдой упругой Земле. Они делятся на объёмные и поверхностные. Объёмные волны бывают двух типов – продольные и поперечные. Продольные (primary) волны представляют упругие волны сжатия, а поперечные (secondary) волны – упругие волны сдвига.

Продольные и поперечные сейсмические волны, в отличие от поверхностных волн, распространяющихся вдоль земной поверхности, пронизывают весь объём (всё тело) нашей планеты. Поэтому они названы объёмными волнами.

Скорости объёмных волн выражаются через модули упругости ( $K$  – модуль сжатия,  $\mu$  – модуль сдвига) и плотность  $\rho$  среды в данной точке простыми формулами:

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad \text{- продольные волны}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{- поперечные волны}$$

Скорость P- и S- волн с глубиной в недрах Земли возрастает, что приводит к искривлению их пути. Таким образом, Земля выступает в роли преломляющей линзы для P и S- волн.

Движение в P- волнах происходит в продольном направлении и поэтому они не могут быть поляризованы. Поперечные волны могут быть поляризованными. При падении S- волны на резкую границу возникают S- волны разной поляризации SH и SV.

Кроме объёмных волн P и S существуют два типа поверхностных волн, распространяющихся вблизи земной поверхности: волны Релея и Лява. Волна Релея – движение частиц происходит в вертикальной плоскости, лежащей в направлении распространения

волны. Волна Лява – движение частиц в горизонтальной плоскости в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.

До 50-х годов прошлого века наибольшее число открытий в сейсмологии было сделано в результате измерений времён пробега объёмных волн землетрясений. Так например, в 1909 г. была установлена резкая сейсмическая граница между земной корой и мантией, называемая границей Мохоровичича. На этой границе скачкообразно возрастают скорости  $V_p$ ,  $V_s$  и плотность  $\rho$ .

Сейсмическая граница на глубине 2898 км между мантией и ядром Земли была открыта в 1914 г. немецким сейсмологом Гутенбергом. Граница мантия-ядро является наиболее резкой границей раздела в недрах Земли. Она сильно отражает объёмные Р и S волны и сильно преломляет Р-волны. На этой границе скорость Р-волн ( $V_p$ ) скачком падает от значения 13.6 км/сек в мантии до значения 8.1 км/сек в ядре, скорости поперечных волн соответственно уменьшаются от 7.3 км/сек до нуля; плотность, наоборот, возрастает от 5.5 до 10 г/см<sup>3</sup>. Следовательно, если  $V_s = 0$ , то и  $\mu = 0$ , а это значит, что земное ядро является жидким. Этот фундаментальный вывод сейсмологии подтверждается и всеми остальными геофизическими явлениями, имеющими отношение к земному ядру.

В сейсмологии для определения конкретных значений скоростей на определённых глубинах  $\ell$ :  $V_p(\ell)$  и  $V_s(\ell)$  экспериментально определяют годограф – время пробега сейсмических волн  $t$  как функцию эпицентрального расстояния  $\Delta$  (расстояние в градусах или км по дуге большого круга между эпицентром и приёмником волн; для Земли 1° соответствует ~ 111 км). Ясно, что функция  $T = T(\Delta)$  должна быть связана с распределением скорости  $V(\ell)$  с глубиной  $\ell$ .

## 8. Магнитное поле Земли

**Магнетизм.** Магнетизм – особая форма материальных взаимодействий, возникающих между движущимися электрически заряженными частицами. Магнитных масс или количеств магнетизма, как особых субстанций в природе, не существует. Магнитные свойства физических тел обусловлены движением электрических зарядов, в том числе различными электрическими токами (гипотеза Ампера, ставшая теорией).

Современное учение магнетизма можно разделить на атомный магнетизм (магнетизм изолированных молекул атомов, атомных ядер, отдельных элементарных частиц материи) и на магнетизм вещества или конденсированных систем (магнитное взаимодействие между собой групп атомов и молекул составляющих газообразные, жидкие и твёрдые тела).

**Магнитное поле.** Пространство, в котором действуют силы магнетизма, называется магнитным полем.

Между покоящимися электрически заряженными материальными частицами существует гравитационное притяжение и электрическое (точнее, электростатическое) поле в виде сил притяжения и отталкивания. Если происходит взаимное перемещение электрически заряженных частиц, то при неизбежном изменении гравитационных и электрических сил возникает ещё один вид взаимодействия – магнитное поле.

Электрическое и магнитное поля являются частным случаем единого электромагнитного поля (теория Максвелла). Одно из существенных свойств электромагнитного поля заключается в том, что при изменении электрического поля меняется магнитное поле и наоборот.

Количественной характеристикой силового поля служит его напряженность, которая в каждой точке пространства может быть изображена в виде вектора, характеризующего численное значение напряженности и её направление. Однако исторически сложилось так, что истинная напряженность магнитного поля получила название магнитной индукции  $B$ , а наименование напряженности магнитного поля  $H$  закрепилось за другой, производной от индукции величиной.

Магнитная индукция в вакууме может быть определена по закону Био-Савара-Лапласа:

$$\text{(в векторной форме)} \quad d\vec{B} = k \frac{i[dl \cdot r]}{r^3};$$

$$\text{(в модульной форме)} \quad d\vec{B} = k \frac{idl \cdot \sin \alpha}{r^2}, \quad \text{где}$$

$\alpha$  – угол между  $dl$  и  $r$ ;

$\vec{dB}$  – магнитная индукция, создаваемая элементом  $dl$  проводника с током  $i$ ;  
 $r$  – радиус-вектор, проведенный из элемента проводника в рассматриваемую точку;

$k$  – коэффициент, зависящий от выбора единиц измерения.

В СИ  $k = \mu_0/4\pi$ , где  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Силовые линии магнитной индукции замкнуты (не имеют ни начала, ни конца).

Единицей магнитной индукции в СИ является Тесла (Тл), размерность  $\text{кг}/(\text{с}^2 \cdot \text{А})$ .  $\text{Тл} = \text{Вб}/\text{м}^2 = \text{В} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ .

Возникающая **намагниченность вещества**  $I$  характеризуется магнитным моментом единицы объёма. Направление  $I$  совпадает с направлением поля  $B^1$ , зависящим от физических свойств среды, формы и размеров области, заполненной этой средой.

Единица намагниченности специального наименования не имеет, а её размерность  $\text{А}/\text{м}$ .

Напряженность магнитного поля  $H$  считается вспомогательной величиной и определяется следующим образом:

$$\vec{H} = \vec{B} / \mu_0 - \vec{I}, \text{ измеряется в } \frac{\Gamma_{\text{H}}}{\text{м}} = \text{В} \cdot \text{с} / (\text{А} \cdot \text{м}) = \text{кг} \cdot \text{м} / (\text{с}^2 \cdot \text{А}^2)$$

где  $\vec{I}$  – вектор намагниченности;

$\mu_0$  – магнитная постоянная ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м)

Силовые линии  $H$  разрывны. Они начинаются и кончаются на поверхностях раздела тел с различными магнитными характеристиками. Единица напряженности в СИ названия специального не имеет, а её размерность А/м.

### Магнитное поле Земли

Магнитные поля широко распространены во Вселенной. Они существуют у звёзд, в космическом пространстве; имеется магнитное поле у Солнца и у планет Юпитер и Сатурн. Имеются определённые данные о наличии собственного магнитного поля у планет Уран и Нептун. В то же время космическим аппаратам не удалось обнаружить магнитного поля у наших трёх ближайших космических соседей. Верхние пределы для магнитных моментов следующие:

$$M_{\text{Луны}} < 10^{-5} M_{\text{Земли}}; M_{\text{Марса}} < 3 \cdot 10^{-4} M_{\text{Земли}}; M_{\text{Венеры}} < 3 \cdot 10^{-3} M_{\text{Земли}}$$

Момент инерции Марса гораздо меньше Земли. Это указывает на малые размеры его ядра, в котором не могут генерироваться существенные электромагнитные процессы. Венера вращается очень медленно, её период равен  $\sim 243$  суткам. А скорость вращения является одним из необходимых условий существования магнитного поля. Нижним пределом самоподдержания магнитного поля в ядре Земли считается значение  $0.08 M_{\text{Земли}}$ .

Пусть точка  $P$  находится на поверхности сферической Земли, в центре которой помещён диполь. В этом случае относительно поверхности Земли горизонтальная и вертикальная составляющие поля  $H$  и  $Z$  в точке  $P$  находятся следующим образом:

$$H = \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = \frac{M}{r^3} \sin \theta$$

$$Z = \frac{\partial V}{\partial r} = \frac{2M}{r^3} \cos \theta$$

Тогда величина полной напряженности поля  $B$  составит:

$$B = (H^2 + Z^2)^{1/2} = \frac{M}{r^3} (1 + 3 \cos^2 \theta)$$

и наклонение поля  $I$  – угол относительно горизонтали:

$$\operatorname{tg}l = \frac{Z}{H} = 2\operatorname{ctg}\theta = 2\operatorname{tg}\varphi, \quad \text{где } \varphi - \text{геомагнитная широта, } \varphi = 90^\circ - \theta$$

Считают, что  $\sim 90\%$  современного геомагнитного поля может быть представлено полем диполя, расположенного в центре Земли; ось диполя составляет с осью вращения Земли угол около  $11.5^\circ$ . Недипольное поле получается в результате вычитания наиболее подходящего дипольного поля из наблюдаемого поля, существующего в данное время.

### Свойства геомагнитного поля

1. Геомагнитное поле разделяется на внутреннее и внешнее, т.е. на поля, источники которых расположены внутри и вне поверхности Земли. Источники внутреннего поля находятся в земном ядре, за исключением небольшого фона от намагниченности горных пород. Внешнее магнитное поле на поверхности Земли в магнитоспокойное время не превышает  $3 \cdot 10^{-4} \text{ Э}$  ( $30\gamma$ ) и возрастает в несколько раз во время магнитных бурь.

2. Главное магнитное поле не является постоянным. Оно испытывает вековые вариации, когерентные на большей части поверхности Земли. За последнее столетие дипольное поле уменьшалось примерно на  $0.04\%$  в год или в среднем на  $50 \gamma/\text{год}$ . Относительная величина годового изменения недипольного поля составляет в среднем  $10 \gamma/\text{год}$ .

3. Западный дрейф недипольного поля составляет  $0.2^\circ$  в год по долготе и совершает оборот вокруг земной оси за 2000 лет.

4. Западное прецессионное вращение диполя на  $0.05^\circ$  в год по долготе и вращении диполя относительно географической оси на  $0.02^\circ$  в год по широте.

5. Центр земного магнитного диполя смещён относительно центра планеты на  $r_0 = 0.07 \cdot R_3$ .

6. Инверсия (обращение) геомагнитного поля устанавливается по результатам палеомагнитных исследований, проведенных в прошлом веке на территориях Франции, Исландии, СССР, Японии, Австралии, Африки и др.

### Природа геомагнетизма

Вопрос о причинах магнетизма у космических тел и, в частности, у Земли привлекал внимание многих ученых. В последние десятилетия ученые как будто нащупали правильные пути, позволяющие в принципе объяснить геомагнетизм, но законченная теория всё ещё не создана.

Современные теории геомагнетизма исходят из предположения, что магнитное поле Земли создаётся и поддерживается за счет так называемого динамо-механизма. В грубых чертах считается, что создание магнитного поля в ядре происходит также, как и в динамо-машине с самовозбуждением.

## 9. Электрическое поле Земли

В недрах Земли и её атмосфере регистрируются различные естественные электрические поля постоянного и переменного типов.

1. В частности, как правило, в горно-складчатых областях наблюдаются постоянные естественные электрические поля амплитудой до 0.2-1.3 В над выходами на дневную поверхность электрических проводников сульфидных руд и углисто-графитистых сланцев. Эти поля широко распространены и являются объектом исследований человеком.

2. Перед началом землетрясений в земной коре возникают тектонические напряжения с выделением механической энергии. Часть этой энергии преобразуется в электрическую. В итоге в земной коре возникают различные механо-электрические явления (пьезоэлектрический эффект, электризации при трении, разрушении или разрыве двойных электрических слоёв и т.д.). Возникающие при этом электрические поля  $E = 10^8 - 10^9$  В/м достаточны, чтобы сделать пробой в горных породах и в жидкостях.

3. В Земле существует магнитотеллурическое поле. К нему относится естественное переменное электромагнитное поле, обусловленное короткопериодными колебаниями (КПК), возникающими под воздействием заряженных частиц, которые излучаются Солнцем и попадают в околоземное пространство. Предполагается, что в плазме, окружающей Землю, поток заряженных частиц возбуждает магнитогидродинамические волны, которые, достигая ионосферы, превращаются в электромагнитные и воспринимаются земными наблюдателями в виде колебаний, имеющих планетарное распространение.

По современной классификации КПК делятся на две основные группы:

1) устойчивые колебания, обозначаемые символом  $P_c$ . Эти колебания встречаются в виде длительных серий и, как правило, имеют квазисинусоидальную форму.

2) иррегулярные колебания, обозначаемые символом  $P_i$ . Эти колебания встречаются в виде коротких серий, разделенных длительными перерывами.

В падающей электромагнитной волне выделим электрическое поле  $E(z)$  с составляющими  $E_x(z)$ , 0, 0 и магнитное поле  $H(z)$  с составляющими 0,  $H_y(z)$ , 0.

В каждом из горизонтальных слоёв Земли составляющая  $E_x(z)$  удовлетворяет волновому уравнению:

$$\frac{d^2 E_x(z)}{dz^2} = k_m^2 E_x(z)$$

где  $k_m$  – волновое число  $m$  – го слоя

$$k_m = \sqrt{-\varepsilon_m \omega^2 - \frac{4\pi i \omega}{\rho_m}}$$

где  $\varepsilon_m$  - диэлектрическая проницаемость  $m$  – го слоя.

Общее решение уравнения (1) будет следующим:

$$E_x(z) = A_m e^{-k_m z} + B_m e^{+k_m z}$$

Здесь  $A_m$  и  $B_m$  - постоянные величины, зависящие от параметров разреза и частоты вариаций.

Для определения составляющей  $H_y(z)$  воспользуемся известным соотношением, вытекающим из второго уравнения Максвелла, и окончательно получим:

$$H_y(z) = \frac{k_m}{i\omega} (B_m e^{+k_m z} - A_m e^{-k_m z})$$

Взяв отношение  $E_x(z)$  к  $H_y(z)$  и решив, получим рекуррентную формулу, связывающую входные импедансы  $n$  – слойного и  $(n - 1)$  слойного разрезом:

$$Z_n = -\frac{i\omega}{k_1} \operatorname{cth} \left[ k_1 h_1 - \operatorname{arcth} \frac{k_1 Z_{m-1}}{i\omega} \right]$$

В свою очередь известна связь кажущегося сопротивления среды  $\rho_T$  (проводимости  $\sigma = 1/\rho_T$ ) от параметров геоэлектрического разреза и периода вариаций:

$$\rho_T = 2T |Z_n|^2$$

В результате, на основе расчетов для длиннопериодных вариаций, включая до вариаций в полгода, определено распределение  $\sigma(z)$  Земли до глубины 1000 км.

### Атмосферное электричество

Причины возникновения и длительного существования в проводящей атмосфере электрического поля и заряда Земли в этом поле давно вызывают большой интерес. Известны многочисленные локальные, региональные и глобальные источники зарядов на поверхности Земли – осадки, облачность, снежные и песчаные бури, метели и позёмки, грозовые явления и молнии, конвективные токи и токи с острий и др. Согласно современным представлениям в качестве источника глобального атмосферного электрического поля и заряда Земли принято считать мировые грозы.

## 10. Тепловое поле Земли

Изучение тепловых процессов, протекающих в Земле, - один из самых умозрительных разделов геофизики. Объясняется это тем, что

данные о наблюдаемом на поверхности тепловом потоке и температуре в недрах Земли можно интерпретировать многими различными способами. Для областей Земли глубже 100 км наши знания о распределении температуры весьма ненадёжны. Однако изучение теплового режима весьма важно, поскольку потеря тепловой энергии Землёй может быть, прямо или косвенно, причиной большей части тектонических и магматических процессов.

Рассмотрим основные энергетические процессы, в которых участвует Земля (таблица)

1.	Солнечная энергия (получаемая и переизлучаемая обратно)	$10^{32}$ эрг/ год
2.	Геотермическая потеря тепла	$10^{28}$ эрг/ год
3.	Энергия, теряемая при замедлении вращения Земли	$3 \cdot 10^{26}$ эрг/ год
4.	Упругая энергия, высвобождаемая землетрясениями	$10^{25}$ эрг/ год

Примечание: эрг =  $10^{-7}$  Дж (теплота), а Дж = Вт · с = кг · м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> (работа)

О том, что температура земных недр высока, свидетельствуют вулканические извержения и рост температуры при погружении в глубокие шахты. Скорость возрастания температуры с глубиной носит название геотермического градиента. Величина его заметно варьирует от места к месту и лежит в интервале 1-5°C на каждые 100 м. В среднем у поверхности Земли геотермический градиент составляет 20 град/км. Второй геотермической величиной, которая может быть определена экспериментально, является тепловой поток из земных недр:

$$Q = \chi \frac{dT}{dz}$$

где  $\chi$  – коэффициент теплопроводности;

$\frac{dT}{dz}$  - градиент температуры в направлении оси  $z$ .

### Процессы генерации и передачи тепла

Возможные источники тепла внутри Земли:

1. Долгоживущие радиоактивные изотопы.
2. Короткоживущие радиоактивные изотопы.
3. Тепло, запасенное при образовании Земли.
4. Преобразование энергии вращения Земли в тепло.
5. Образование ядра.

Обычно полагают, что Земля образовалась в процессе аккреции примерно однородного материала. Кора, мантия и ядро выделились впоследствии в процессе дифференциации вещества. Образование ядра должно было освободить большое количество гравитационной энергии

вследствие концентрации железо-никелевой фазы высокой плотности в центре Земли.

Тозер оценил суммарное изменение гравитационной энергии и энергии напряжений при образовании ядра из вещества первоначально недифференцированной Земли. Он нашёл, что выделившееся тепло в объёме 94% должно было разогреть Землю до 1500°C. Полное тепло, образовавшееся при выделении ядра сопоставимо с суммарным теплом радиоактивного распада долгоживущих изотопов, выделившимся за всю историю Земли.

### Передача тепла в Земле

1. **Теплопроводность.** Большая часть теряемого Землёй тепла достигает поверхности посредством теплопроводности пород земной коры.
2. **Перенос тепла лучеиспусканием и экситонами.** При температурах выше 800-1500°C значительное количество тепла передаётся через породу лучеиспусканием.
4. **Перенос тепла тепловой конвекцией.** Тепловая конвекция в жидкой среде может вынести наверх большое количество тепла даже при сравнительно небольшом температурном градиенте. По-видимому, именно конвекцией передаётся тепло вверх через внешнее ядро.

## Раздел 2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

### № 1 (+ заочное)

*Задание. «Составление схемы структурной связи «Адрон - система «Земля-Луна»» и создание базы физико-химических и др. параметров по разделам: Адрон, Вселенная, Галактика, Черные дыры, Звезды, Солнечная система, Солнце, планеты».*

*Исходные данные:*

**Земля:**  $R_3 = 6371$  км,  $M_3 = 5.976 \cdot 10^{21}$  т;  $\rho = 5.517$  г/см,  $\omega = 7.29211 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$ ;  
 $\omega_p = 50.25''/\text{год}$ ;  $H=1/305.51$

**Галактики:** всего  $10^{14}$ ; форма: эллиптические, спиральные, линзовидные, неправильные

**Солнце:** Излучает энергию  $3.9 \cdot 10^{20}$  МВт, нормальный карлик, желтый цвет;  $R_c = 696265$  км;  $R_{\text{ядро}} = 0,3 R_c$ ;  $M_c = 2 \cdot 10^{27}$  т;  $\rho = 1,41$  г/см<sup>3</sup> (ядро  $150$  т/см<sup>3</sup>);  $t^0 = 14$  млн.°С,  $V_c = 250$  км/с. Состав: водород 70%, гелий 27%, тяжелые эл-ты 3%; время обращения вокруг центра Галактики 212 млн. лет

**Галактика Млечный путь:**  $\sim 200$  млрд. Звезд с общей  $m = 3 \cdot 10^{38}$  т;  $V = 600$  км/с;  $D = 100$  тыс. свет. лет; Толщина 1 тыс. свет. лет

**Звезды:** Масса всех звёзд Галактики  $m = 97\%$  ;  $0,1 M_c < M_{\text{звезды}} < 10 M_c$ ;  $M_c = 2 \cdot 10^{27}$  т

**Адрон:**  $T = 10^{-44}$  с,  $D = 10^{-33}$  см,  $\rho = 10^{93}$  г/см<sup>3</sup>,  $t^0 = 10^{33}$  °К

**Солнечная система:** Облако имело массу  $2 - 3 M_c$ ;  $T = -220^\circ\text{C}$ ; Состав: водород,

	гелий, азот, кислород, пары воды, метила и углерода; пылинки: оксид кремния, магния, железа.
<b>Планеты:</b>	Тела с $m = 10^{17} - 10^{26}$ т; Меркурий, Венера, Земля, Марс, Пояс астероидов, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон, 10-ая планета, Облако астероидов Оорта
<b>Вселенная:</b>	
<b>Эра адронная –</b>	Взрыв; $T = 10^{-44} - 10^{-4}$ с; $D = 10^{-33} - 10^9$ км, $\rho = 10^{93} - 10^{15}$ , $t^0 = 10^{33} - 10^{12}$ ; Состав: барионы, мезоны
<b>Эра лептонная -</b>	$T = 10^{-4} - 10$ с; $D = 10^9 - 3 \cdot 10^{12}$ км, $\rho = 10^{15} - 1.5 \cdot 10^5$ , $t^0 = 10^{12} - 10^{10}$ °К; Состав: мюоны, электроны, позитроны, нейтрино, антинейтрино, фотоны
<b>Эра излучения -</b>	$T = 10$ с – $10^6$ лет $D = 3 \cdot 10^{12} - 6 \cdot 10^{20}$ км, $\rho = 1.5 \cdot 10^5 - 10^{-20}$ , $t^0 = 10^{10} - 3 \cdot 10^3$ °К; Состав: электроны, протоны, ядра гелия, фотоны
<b>Эра вещества -</b>	$T = 10^6 - 2 \cdot 10^{10}$ лет $D = 6 \cdot 10^{20} - 2 \cdot 10^{23}$ км, $\rho = 10^{-20} - 3 \cdot 10^{-29}$ г/см <sup>3</sup> , $t^0 = 3 \cdot 10^3$ °К; Состав: атомы, квазары, черные дыры, галактики, звёзды, планеты

Примечание:  $D$  – поперечные размеры      Единицы измерения: 1 а.е. = 149600000 км  
 $\rho$  – плотность объекта (тела)      1 пк(парсек) = 206265 а.е. = 3.26 св. лет  
 $^{\circ}\text{K}$  – температура в градусах Кельвина      1 св. год =  $9.46 \cdot 10^{12}$  км  
 $m$  – масса объекта (тела)  
 $M$  ( $M_{\text{с}}$ ,  $M_{\text{з}}$ ) – масса Солнца, Земли  
 $R$  ( $R_{\text{с}}$ ,  $R_{\text{з}}$ ) = радиус Солнца, Земли  
 $\omega$  – угловая скорость Земли  
 $\omega_{\text{р}}$  – прецессия Земли  
 $V$  – скорость вращения

### *Содержание работы:*

1. Составить схему структурно-подчиненной связи космических систем во времени, начиная с Большого взрыва и завершая планетами, в частности, Землей.
2. Построить график для эр Вселенной. По оси абсцисс отложить следующие равные доли величины времени: 1 с, 10 с, 1 год,  $10^3$  лет,  $10^6$  лет,  $10^9$  лет,  $10^{12}$  лет, а по оси ординат – размер эр также равными долями: 1 см, 1 км,  $10^3$  км,  $10^6$  км,  $10^9$  км,  $10^{12}$  км,  $10^{15}$  км,  $10^{18}$  км,  $10^{21}$  км,  $10^{24}$  км. Для каждой эры провести границы значений (горизонтально и вертикально) до их пересечения. Каждую эру заштриховать или закрасить. Дать анализ современного состояния Вселенной. Обосновать, в какой фазе она находится – сжатия, расширения?

## **№ 2 (+ заочное)**

### ***Задание .Геолого-геофизический анализ сейсмических скоростей.***

Исходные данные: Скоростной сейсмогеологический разрез по одному из районов Западной Сибири.

	Вариант														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
слой1															
Vp, км/с	2,58	2,6	2,62	2,64	2,66	2,68	2,7	2,72	2,74	2,76	2,78	2,8	2,82	2,84	2,86
Vs, км/с	1,16	1,18	1,2	1,22	1,24	1,26	1,28	1,3	1,32	1,34	1,36	1,38	1,4	1,42	1,44
h, км	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4	4,1	4,2	4,3	4,4
слой2															
Vp, км/с	3,68	3,7	3,72	3,74	3,76	3,78	3,8	3,82	3,84	3,86	3,88	3,9	3,92	3,94	3,96
Vs, км/с	1,88	1,9	1,92	1,94	1,96	1,98	2	2,02	2,04	2,06	2,08	2,1	2,12	2,14	2,16
h, км	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9	10	10,1	10,2	10,3	10,4	10,5
слой3															
Vp, км/с	6,98	7	7,02	7,04	7,06	7,08	7,1	7,12	7,14	7,16	7,18	7,2	7,22	7,24	7,26
Vs, км/с	3,98	4	4,02	4,04	4,06	4,08	4,1	4,12	4,14	4,16	4,18	4,2	4,22	4,24	4,26
h, км	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9	16	16,1	16,2	16,3	16,4	16,5	16,6	16,7	16,8
слой4															
Vp, км/с	6,08	6,1	6,12	6,14	6,16	6,18	6,2	6,22	6,24	6,26	6,28	6,3	6,32	6,34	6,36
Vs, км/с	3,48	3,5	3,52	3,54	3,56	3,58	3,6	3,62	3,64	3,66	3,68	3,7	3,72	3,74	3,76
h, км	24,4	24,5	24,6	24,7	24,8	24,9	25	25,1	25,2	25,3	25,4	25,5	25,6	25,7	25,8
слой5															
Vp, км/с	6,28	6,3	6,32	6,34	6,36	6,38	6,4	6,42	6,44	6,46	6,48	6,5	6,52	6,54	6,56
Vs, км/с	3,68	3,7	3,72	3,74	3,76	3,78	3,8	3,82	3,84	3,86	3,88	3,9	3,92	3,94	3,96
h, км	34,4	34,5	34,6	34,7	34,8	34,9	35	35,1	35,2	35,3	35,4	35,5	35,6	35,7	35,8
слой6															
Vp, км/с	7,28	7,3	7,32	7,34	7,36	7,38	7,4	7,42	7,44	7,46	7,48	7,5	7,52	7,54	7,56
Vs, км/с	4,08	4,1	4,12	4,14	4,16	4,18	4,2	4,22	4,24	4,26	4,28	4,3	4,32	4,34	4,36
h, км	41,4	41,5	41,6	41,7	41,8	41,9	42	42,1	42,2	42,3	42,4	42,5	42,6	42,7	42,8

Содержание работы:

3. Построить график изменения сейсмической скорости как функции глубины:

$$V = V(h) \quad (1.1)$$

4. Найти формулу, аппроксимирующую реальную зависимость скорости от глубины, и оценить ее точность. Формула может иметь вид:

$$V = V_0 \exp(-\alpha h), \quad (1.2)$$

где  $V_0$  - значение скорости в верхней части разреза,  $h$  – текущее значение глубины,  $\alpha$  - коэффициент, подлежащий определению.

5. Рассчитать вероятные значения плотности ( $\rho$ ) для слоев, отличающихся скоростями распространения упругих колебаний:

$$\rho = 0,346Vp + 0.646 \quad (1.3)$$

6. Оценить гравитационную активность каждого из элементов разреза:

$$\delta g = 2\pi \cdot f \cdot (\rho - 2.30) \cdot (h_2 - h_1) \cdot \exp\left(-\frac{2\pi h}{L}\right), \quad (1.4)$$

где  $f = 66.7 \cdot 10^{-9}$  ед. СГС,  $h_{1,2}$  - глубины залегания верхней и нижней поверхностей пластов,  $L = 100$  км – условная горизонтальная мощность пласта.

5. Рассчитать коэффициенты отражения ( $A_{pp}$ ) и прохождения (прозрачности) ( $B_{pp}$ ) изучаемой среды:

$$A_{pp} = \frac{\rho_1 V_1 - \rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2}$$

$$B_{pp} = \frac{2\rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2}$$

где  $\rho_{1,2}$  и  $V_{1,2}$  - плотности и скорости распространения продольных сейсмических волн для двух контактирующих слоев разреза.

6. Установить наиболее сильную сейсмическую границу разреза..

7. Сопоставить результаты анализа акустической и гравитационной активности выделяемых геофизических границ разреза.

### № 3

**Задание. Приближенная оценка упругих констант изучаемой геологической среды на основании сейморазведочных материалов.**

Исходные данные: сейсмогеологический разрез – данные лабораторной работы №2.

Содержание работы:

1. Рассчитать коэффициенты отношения скоростей распространения продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) сейсмических волн для всех структурных элементов разреза:

$$K = V_p/V_s \quad (3.1)$$

2. Для наиболее крупных структурных элементов геосейсмического разреза оценить следующие параметры:

а) отношение констант Ламе ( $\lambda$  и  $\mu$ ):

$$q = \frac{\lambda}{\mu} = \left( \frac{V_p^2}{V_s^2} \right) - 2 \quad (3.2)$$

б) плотность  $\rho$ :  $\rho = 0,346V_p + 0.646$  (формула 1.3 из лаб. раб. 2)

в) модуль сдвига:

$$\mu = V_s^2 \cdot \rho \quad (3.3)$$

г) постоянную  $\lambda = q \mu$ , (3.4)

д) коэффициент Пуассона:

$$\sigma = \frac{1}{2 + 2 \frac{\mu}{\lambda}} \quad (3.5)$$

е) модуль Юнга:  $E = 2V_s^2 \rho (1 + \sigma)$  (3.6)

3. Сделать заключение о характере изменения упругих модулей с глубиной и указать элементы разреза, в наибольшей степени подверженные разрывным дислокациям.

### № 4 (+ заочное)

**Задание 1. Рассчитать плотность ( $\rho$ ) внутри Земли для фиксированных глубин по формуле Роша:**

$$\rho = 11,35(1 - 1,07r_i^2), \quad \text{где} \quad r_i = 1 - r'/R_3 \quad (4.1)$$

вар-т	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$r'$ , км	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500
	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000
	1800	1850	1900	1950	2000	2050	2100	2150	2200	2250	2300	2350	2400	2450	2500
	2300	2350	2400	2450	2500	2550	2600	2650	2700	2750	2800	2850	2900	2950	3000
	2800	2850	2900	2950	3000	3050	3100	3150	3200	3250	3300	3350	3400	3450	3500
	3300	3350	3400	3450	3500	3550	3600	3650	3700	3750	3800	3850	3900	3950	4000
	3800	3850	3900	3950	4000	4050	4100	4150	4200	4250	4300	4350	4400	4450	4500
	4300	4350	4400	4450	4500	4550	4600	4650	4700	4750	4800	4850	4900	4950	5000
	4800	4850	4900	4950	5000	5050	5100	5150	5200	5250	5300	5350	5400	5450	5500

**по формуле Лежандра:**

$$\rho = 4.483 \frac{\sin(2.531r_i)}{r_i}, \quad \text{где} \quad r_i = 1 - \Delta h_i/R_3 \quad (4.2)$$

если  $r_i$  - относительное удаление от центра Земли;

$\Delta h_i$  – толщины слоев сейсмической модели земной коры (исх. данные лаб. раб. 2). Даны в км.

$\Delta h_1$	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4	4,1	4,2	4,3	4,4
$\Delta h_2$	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
$\Delta h_3$	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
$\Delta h_4$	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
$\Delta h_5$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$\Delta h_6$	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

**и по формуле Гельмерта:**

$$\rho = 11,75(1 - 1,04r_i^2 + 0,275r_i^4), \quad \text{где} \quad r_i = 1 - r'/R_3 \quad (4.3)$$

вар-т	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$r'$ , км	5	55	105	155	205	255	305	355	405	455	505	555	605	655	705
	10	60	110	160	210	260	310	360	410	460	510	560	610	660	710
	15	65	115	165	215	265	315	365	415	465	515	565	615	665	715
	20	70	120	170	220	270	320	370	420	470	520	570	620	670	720
	25	75	125	175	225	275	325	375	425	475	525	575	625	675	725
	30	80	130	180	230	280	330	380	430	480	530	580	630	680	730
	35	85	135	185	235	285	335	385	435	485	535	585	635	685	735
	40	90	140	190	240	290	340	390	440	490	540	590	640	690	740
	45	95	145	195	245	295	345	395	445	495	545	595	645	695	745
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750

$R_3$  – радиус Земли.

Полученные результаты необходимо представить в виде совместных графиков, где по оси абсцисс откладывается расстояние, по оси ординат – рассчитанные значения плотности. Дать анализ расхождению (в %)

значений плотности в интервалах пересекающихся (или близких к этому) расстояний  $r'$ .

## № 5

**Задание. Расчет основных интегральных характеристик Земли: массы  $M_{\text{земли}}$  и главных моментов энергии  $C$  и  $A$ .**

*Общие положения:* А. Моментом энергии данного тела называется отношение момента силы к вызываемому им угловому ускорению. Единица измерения момента энергии в системе СИ:  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ . Момент элемента массы  $\Delta m$ , движущегося по окружности радиусом  $r$ , равен  $J=r^2\cdot\Delta m$ . Для тела с непрерывным распределением массы используется интегральное представление

$$J = \int_0^{m_{\text{полн}}} r^2 dm$$

Б. Геоид является поверхностью постоянного геопотенциала  $U_0$ . В каждой точке Земли полный геопотенциал складывается из потенциала силы тяжести  $V$  и члена, зависящего от вращения Земли:

$$U = V - \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \varphi$$

где  $\omega$  - угловая скорость вращения Земли;

$r$ ,  $\varphi$  - координаты точек на земной поверхности.

На земной поверхности ускорение силы тяжести направлено по нормали к геоиду.

*Исходные данные:*

$R_{\text{земли}} = 6371$  км (средний радиус Земли);

$\rho_{\text{ср}} = 5.517$  г/см<sup>3</sup> (средняя плотность Земли);

$G = 6.67 \cdot 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/(г·с<sup>2</sup>) =  $6.67 \cdot 10^{-11}$  см<sup>3</sup>/(г·с<sup>2</sup>) (гравитационная постоянная);

$H = 1/305.51$  (константа);

$J_2 = 1.0827 \cdot 10^{-3}$  (константа);

$a = 6378,2$  км (экваториальный радиус Земли);

$\varphi_1 = 0^0, 10^0, 20^0, 30^0, 40^0, 50^0, 60^0, 70^0, 80^0$ ;

$\omega = 7.29211 \cdot 10^{-5}$  с<sup>-1</sup> (угловая скорость Земли).

*Содержание работы:*

7. Вычислить полярный момент инерции Земли:

$$C = \frac{J_2}{H} M_{\text{земли}} \cdot a^2 \quad (\text{г} \cdot \text{см}^2)$$

8. Вычислить экваториальный момент инерции Земли  $A$  из выражения:

$$H = \frac{C-A}{C}$$

9. Вычислить значения поверхности геоида:

$$r_i = a(1 - \varepsilon \sin^2 \varphi_i),$$

где  $\varepsilon = \frac{3}{2} J_2 + \frac{1}{2} m$ , а  $m = \frac{\omega^2 a}{GM_{\text{Земли}}}$

4. Вычертить поверхность геоида для 4-х четвертей, вынести на его поверхность условные материки и указать направления ускорения силы тяжести для углов  $\varphi = 0^0, 30^0, 60^0, 90^0$ . Дать пояснения. Отметить (жирными линиями) главные оси моментов инерции C и A.

№ 6

*Çàäàìèä. Прямая и обратная задачи для однородного шара в гравиметрии.*

Исходные данные: Однородный шар свинцовых руд с плотностью  $\sigma$ , общей массой  $M$ , радиусом  $R$  и глубиной залегания  $h$ , равной расстоянию от дневной поверхности до центра шара.

*Содержание работы:*

1. Решить прямую задачу - вычислить значения вертикальной составляющей потенциала притяжения  $V_z$  (в мГл) на дневной поверхности от однородного шара в точках наблюдения  $P_i$  вдоль линии,

$$V_z(r_i) = G \cdot M_{ш} \cdot \frac{h_y}{(h_y^2 + r_i^2)^{3/2}} 10^4 \quad (6.1)$$

проходящей через его эпицентр:

где  $r_i$  - расстояние от эпицентра до точки вычисления  $P_i$  вдоль выбранной линии; текущие значения  $r_i$  для вычисления  $V_z(r_i)$ : 0, 25, 50, 75, 100, 125, 150..... 400, 5000 (в метрах).

$M_{ш}$  – масса шара в граммах, вычисляется по формуле:

$$M_{ш} = 4\pi R^3 \sigma_{изб}/3; \quad (6.2)$$

$R$ ,  $h_{ц}$  и  $r_i$  – расстояния в см;

$G = 66.7\delta 10^{-9}$ , см<sup>3</sup>/(Г·с<sup>2</sup>).

$\sigma_{св}$  - плотность свинцовых руд, г/см<sup>3</sup>;  $\sigma_{изб} = (\sigma_{св} - 2.7)$ , г/см<sup>3</sup>;

2. Построить график  $V_z(r_i)$ .

3. Вычислить значения вертикальной составляющей потенциала притяжения  $V_z^n$  при тех же условиях, что и в п.1, но по заданному

значению амплитуды  $V_z^n$  в эпицентре  $V_z^n(0) = 1.5V_z(0) = E_{max}$ :

$$V_z^n(r_i) = E_{\max} \cdot \frac{h_u^3}{(h_u^2 + r_i^2)^{3/2}} \quad (6.3)$$

4. Построить график  $V_z^n(r_i)$ .

5. Решить обратную задачу для  $V_z^n(r_i)$ :

à) вычислить значение глубины расположения центра шара по формуле

$$h_n = 1.305r_{1/2}, \quad (6.4)$$

где  $r_{1/2}$  – расстояние от эпицентра до точки P, для которой потенциал притяжения равен  $E_{\max}/2$ ;  $E_{\max}/2 = (E(0) + E(400))/2$ ;

á) вычислить радиус шара по формуле

$$R_n = 3.3 \cdot 3 \sqrt{\frac{E_{\max} h_n^2}{10 \cdot \sigma_{изб}}} \quad (6.5)$$

зная  $E_{\max}$  и  $h_n$ . Здесь  $E_{\max}$  в мГл,  $h_n$  – в м, тогда  $R_n$  – в м. Теперь находим:

$$\sigma_{изб}^n = \frac{3}{4} \frac{E_{\max} h_n^3}{(h_n^2 + r_i^2)^{3/2}} \frac{(h_u^2 + r_u^2)^{3/2}}{h_u} \frac{1}{\pi R^3 G \cdot 10^4} \quad (6.6)$$

5. Выполнить анализ соотношений  $h_n/h$ ,  $\sigma_{пизб}^n/\sigma_{изб}$  и  $R_n/R$ , исходя из заданного условия  $V_z^n(0)/V_z(0) = 1.5$ . Объяснить, способны ли вновь рассчитанные параметры пласта создать аномалию, в 1.5 раза превышающую исходную аномалию. Сделать расчет по формуле (6.1).

### № 7 (+ заочное)

**Задание. Расчет прецессии Земли  $\omega_p$ , обусловленной приливными влияниями Луны  $\omega_{pL}$  и Солнца  $\omega_{pC}$ .**

Исходные данные:

$G$  – гравитационная постоянная,  $6.67 \cdot 10^{-11}$ ,  $\text{м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$ ;

$\rho$  – средняя плотность Земли,  $5.517$   $\text{г}/\text{см}^3$ ;

$k_C$  – отношение массы Солнца к массе Земли и равно  $3.329 \cdot 10^5$ ;

$k_L$  – отношение массы Луны к массе Земли и равно  $0.0123$ .

$\Omega$  – угловая скорость Земли,  $7.29212 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ; – согласно варианту

$R_C$  – радиус орбиты Земли относительно Солнца,  $1.496 \cdot 10^8$ ;

$R_L$  – радиус орбиты Луны относительно Земли,  $384.4 \cdot 10^3$ ;

$(C-A)/C$  – динамическое сжатие Земли,  $3.2732 \cdot 10^{-3}$ ;

$\theta$  – угол наклона подвижной оси Земли относительно вертикальной оси,  $23.5^\circ$ .

P.S. Дуга, равная радиусу, имеет  $57^\circ 17' 44''.8$  (=) радиан;  $1'' = 0.484814 \cdot 10^{-5}$ .

*Содержание работы:*

1. Вычислить величину прецессии Земли в год ( $\omega_p$ ,  $''/\text{год}$ ), обусловленной приливными влияниями Луны и Солнца:

$$\omega_p = \omega_{pL} + \omega_{pC}, \text{ где}$$

$$\omega_{pC} = -\frac{3}{2} \frac{G}{\Omega} \frac{C-A}{C} \frac{M_C}{R_C^3} \cos \theta$$

и

$$\omega_{pL} = -\frac{3}{2} \frac{G}{\Omega} \frac{C-A}{C} \frac{M_L}{R_L^3} \cos \theta$$

Указания: вычислить массы Луны ( $M_L$ ) и Солнца ( $M_C$ ) через массу Земли ( $M_Z$ ) и отношения масс Луны и Солнца к массе Земли.

2. Сделать заключение о степени влияния каждого объекта (Луны и Солнца) на прецессию Земли, исходя из отношений:

$$a = \omega_p / \omega_{pL} \text{ и } b = \omega_p / \omega_{pC}$$

### № 8 (+ заочное)

**Задание. Построить поле времен прямой волны и годограф отраженной волны в случае источника, расположенного внутри упругой земной среды.**

Исходные данные: Источник сейсмических колебаний расположен под земной поверхностью в точке с координатами  $P(0,0,-z)$ , где  $z = -50$  м. Приемники расположены на линии профиля в точках:

$x_i(-500, 0, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500, 7000, 7500)$ , м;

$y_i(-500, 0, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500, 7000, 7500)$ , м.

Глубина до отражающей вогнутой границы с радиусом  $R=-2500$  м под точками наблюдения составляет:

$h_i(800, 900, 1300, 1500, 1800, 1200, 1000, 850, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350)$ , м.

Скорость распространения прямой и отраженной волны  $V_p(l)$  равна (для вариантов):

(1)3000, (2)3100, (3)3200, (4)3300, (5)3400, (6)3500, (7)3600, (8)3700, (9)3800, (10)3900, (11)4000, (12)4100, (13)4200, (14)4300, (15)4400), м/с.

*Содержание работы:*

1. Рассчитать поле времен (изохроны) для сейсмических колебаний от источника, расположенного согласно данным ( $z = -50$  м), по формуле:

$$t_i = \frac{r_i}{v(l)} = \frac{1}{v(l)} \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z^2},$$

Для построения поля времен необходимо вычислить радиус  $r'$ , откладываемый по горизонтали плоскости (земной поверхности) от эпицентра источника колебаний  $O'$ :

$$r_i' = \sqrt{r_i^2 - z^2}, \quad \text{тогда как} \quad r_i = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

2. Построить изохроны (поле времен) в аксонометрии, зная что  $t(i) = f(x_i, y_i, z) = f(r')$ .
3. Вычислить годограф сейсмической волны, отраженной от криволинейной вогнутой границы, заданной данными  $x_i, y_i, h_i$  и  $R$  при определенной скорости  $V_p(l)$  (где  $l$  – вариант) по формуле (источник волны находится непосредственно под поверхностью земли):

$$t_i = \frac{1}{v(l)} \sqrt{4h_i^2 + \frac{1 + \frac{2h_i}{R}}{1 + \frac{h_i}{R}} x_i^2},$$

4. Построить график годографа  $t_i$ .  
Выполнить анализ причины образования у годографа “петли” и показать это на схематическом рисунке.

### № 9

**Задание. Расчет температуры земной и океанической коры  $T_i$  на различных глубинах  $z_i$  относительно уровня моря.**

Исходные данные: Заданы а) общие исходные параметры модели:

- тип теплопроводности – решеточный;
- температура поверхности Земли  $T_0 = 10^0\text{C}$ ;
- температура воздуха  $T_{\text{п}} = 18^0\text{C}$ ;
- расчетные глубины, км: 20, 30, 40, 50.

б) для земной коры:

- тепловой поток  $Q_{\text{з.к.}} = 0.58 \times 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>сек;
- генерация тепла на 1 см<sup>3</sup>  $P_{\text{з.к.}} = 1.4 \times 10^{-13}$  кал/см<sup>3</sup>сек;
- коэффициент теплопроводности  $\chi_{\text{земн.кора}} =$  (в соответствии с вариантом), (кал/( см·с·К));

в) для океанической коры:

- тепловой поток  $Q_{\text{з.к.}} = 0.75 \times 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>сек;
- генерация тепла на 1 см<sup>3</sup>  $P_{\text{з.к.}} = 1.15 \times 10^{-13}$  кал/см<sup>3</sup>сек;
- коэффициент теплопроводности  $\chi_{\text{океан}} =$  (в соответствии с вариантом), (кал/( см·с·К));

$\chi_{\text{океан}}$ : 0.0252(1), 0.0253(2), 0.0254(3), 0.0255(4), 0.0256(5), 0.0257(6), 0.0258(7), 0.0259(8), 0.026(9), 0.0261(10), 0.0262(11), 0.0263(12), 0.0264(13), 0.0265(14), 0.0266(15)

$\chi_{\text{земн. кора}}$ : 0.0152(1), 0.0153(2), 0.0154(3), 0.0155(4), 0.0156(5), 0.0157(6), 0.0158(7), 0.0159(8), 0.016(9), 0.0161(10), 0.0162(11), 0.0163(12), 0.0164(13), 0.0165(14), 0.0166(15)

В скобках приведены номера вариантов.

*Содержание работы:*

10. вычислить величины температуры  $T_i$  на различных глубинах  $z_i$  для земной и океанической коры по теоретической формуле В.А. Магницкого:

$$\ln \frac{T_i}{T_n} = \frac{Q_j z_i}{\chi_n T_0} - \frac{P_j z_i}{2\chi_n T_0}, \quad \text{где } j=2, \quad i=4, \quad n=15$$

11. Построить совмещенные графики изменения температуры  $T_i$  как функции глубины от  $z_i$  для земной и океанической коры.

12. Вычислить величины температуры  $T_i$  на различных глубинах  $z_i$  для земной и океанической коры по эмпирическим формулам В.А. Магницкого соответственно:

$$T_i = (18z_i - 0.09z_i^2 + 0.00027z_i^3) \frac{0.016}{\chi_{\text{п.з.к.}}}$$

$$T_i = (20z_i + 0.05z_i^2 - 0.0017z_i^3) \frac{0.026}{\chi_{\text{п.о.к.}}}$$

13. Построить эмпирические графики  $T_i$  на предыдущих  $T_i$ .

Сделать заключение о применимости тех или иных формул для расчета температур на основе решеточной теплопроводности, если исходить из условия, что на глубине порядка 100 км температура должна быть близка к температуре плавления базальтов  $1200^{\circ}\text{C}$ , но не превышать  $2000^{\circ}\text{C}$ .

В процесс проработки теоретического материала для лучшего усвоения курса студент заочного обучения должен выполнить контрольную работу. Вариант задания контрольной работы совпадает с последней цифрой зачетной книжки.

### **Раздел 3. КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ ДЛЯ ЗАОЧНОГО ОБУЧЕНИЯ**

1. Происхождение Вселенной-Земли.
2. Гравиметрия в изучении строения Земли.
3. Фигура Земли.
4. Вращение Земли.
5. Магнитное поле Земли.
6. Сейсмология в изучении строения Земли.
7. Тепловое поле и возраст Земли.
8. Естественное электромагнитное поле Земли.

9. Атмосферное электричество Земли.  
Каждая тема выполняется по следующему плану:
- а) Введение, основные понятия;
  - б) краткий теоретический экскурс по теме;
  - в) природа явления;
  - г) анализ известных расчетов, результаты этих расчетов;
  - д) выводы
  - е) список использованной литературы.
- Оптимальный объем контрольной работы – до 10 стр.

#### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

по разделам: теория, лабораторные работы, контрольные работы

1. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М. Недра, 1965.
2. Магницкий В.А. Общая геофизика. Изд-во МГУ, 1995.
3. Стейси Ф. Физика Земли. М. Мир, 1972.
4. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М. Наука, 1978.
5. Марков М.Я. Планеты Солнечной системы. М. Наука, 1981.
6. Гурвич И.И. Сейсмическая разведка. М. Недра, 1970.
7. Маловичко А.К., Костицын В.И. Гравиразведка. М. Недра, 1992.
8. Магниторазведка. Справочник геофизика. М. Недра, 1990.
9. Электроразведка. Справочник геофизика. М. Недра, 1980.
10. Филиппов Е.М. Геофизические поля и познание планеты. Киев, 1991.
11. Ксанфомалити. Парад планет. М. Наука, 1997.
12. Кухлинг К. Справочник по физике. М. Мир, 1982.
13. Современная информация – на Интернет-сайтах.

#### **Методическое указание**

к лабораторным занятиям по дисциплине *«Физика Земли»* для студентов специальности 071900 *Информационные системы и технологии* очной и заочной форм обучения

Составил: А.Н.Дмитриев, д.г.-м.н., профессор

Подписано к печати

Заказ №

Формат 60/90 1/16

Отпечатано на RISO GR 3750

Бум. писч. №1

Уч. изд. л.

Усл. печ. л.

Тираж 100 экз.

---

**Издательство “Нефтегазовый университет”**

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

“Тюменский государственный нефтегазовый университет”

625000, Тюмень, ул. Володарского, 38

Отдел оперативной полиграфии издательства «Нефтегазовый университет»

625039, Тюмень, ул. Киевская, 52