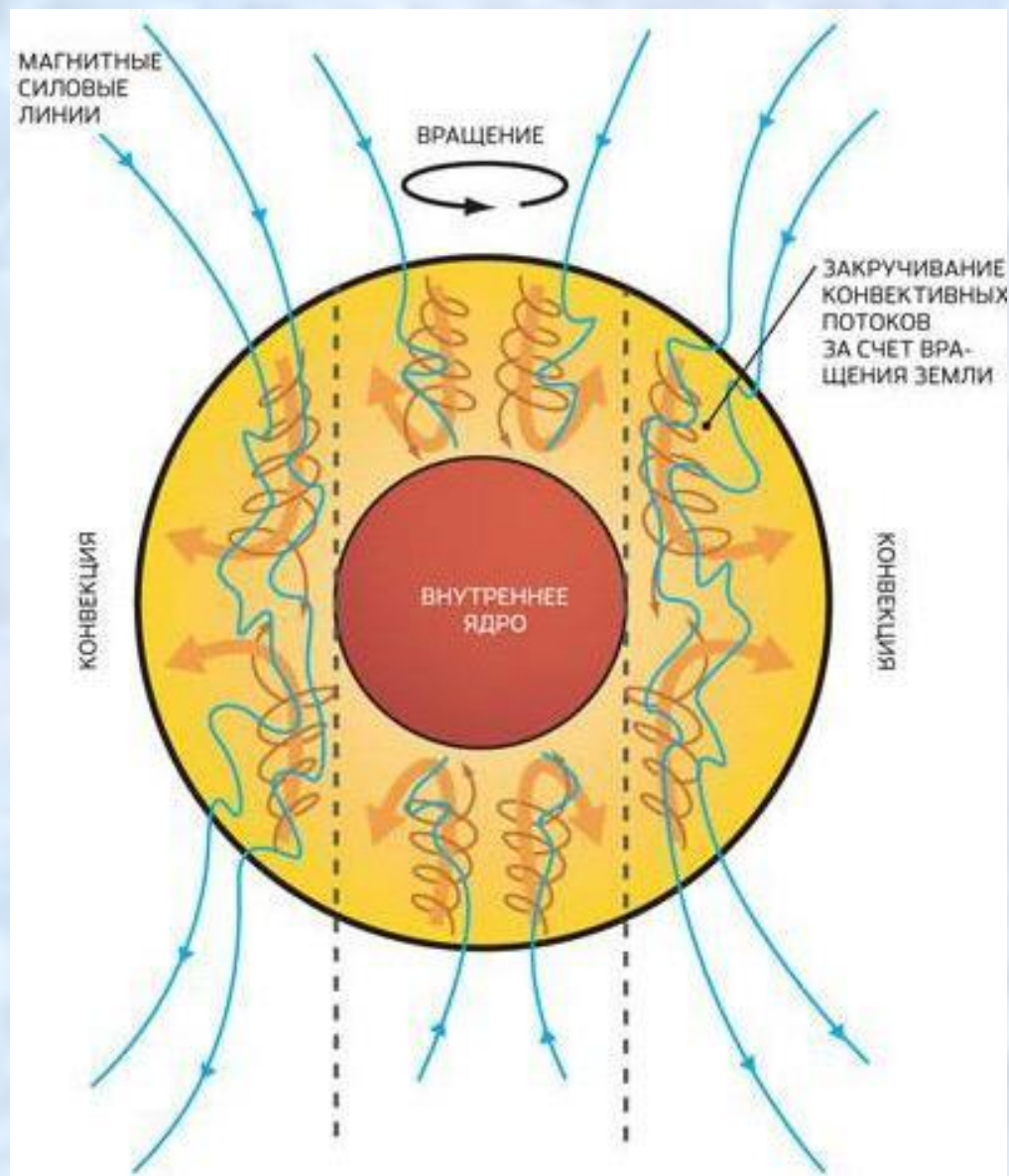


Ядро Земли – что о нем известно?



Семенец Н.В. 22.03.2021г
Астроклуб СПАГО, г.СПетербург

Кольская сверхглубокая скважина
Мурманская область (Россия).
Глубина: **12 262 м.**

Литосфера

Земная кора

150 – 200 км

1000°C

3500°C

4000°C

6000°C

Твёрдое ядро

6370 км

Внешнее ядро (жидкое)

Мантия

3000 км

5000 км

Астеносфера

Марианская впадина

Западная часть Тихого океана.
Глубина: **10 994 м.**
Самая глубокая точка на поверхности Земли, доступная человеку.

Марианская впадина

10994 м

Гранитный слой

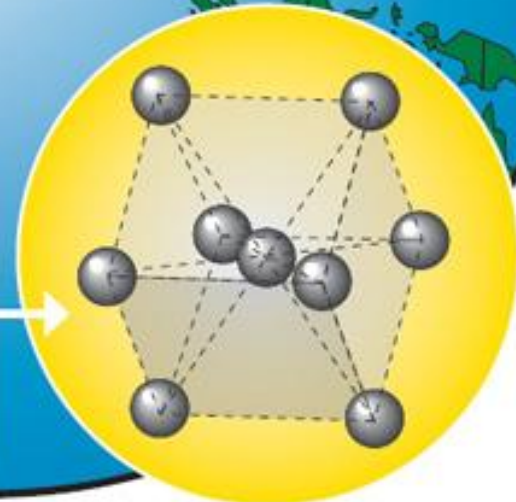
12262 м

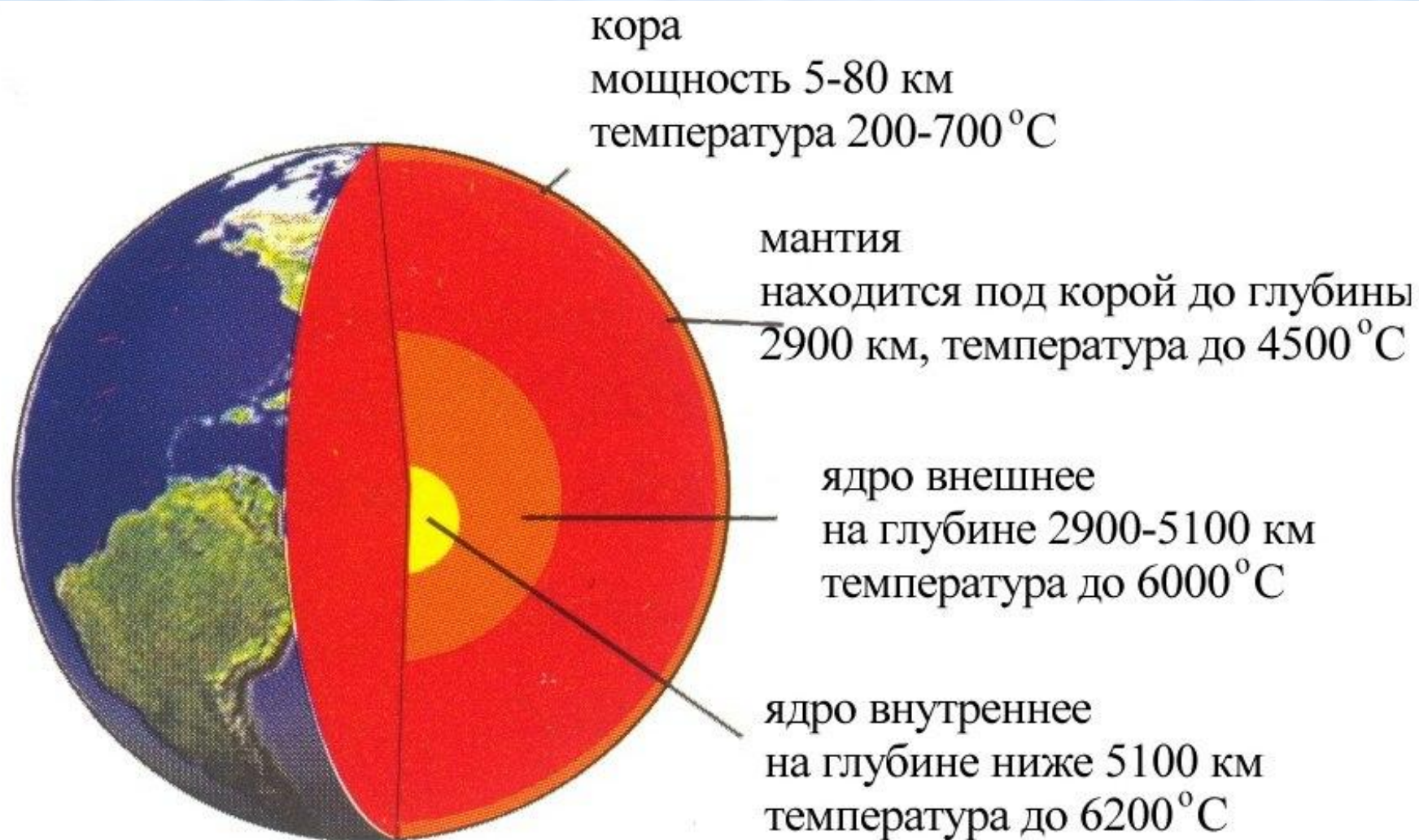
Базальтовый слой

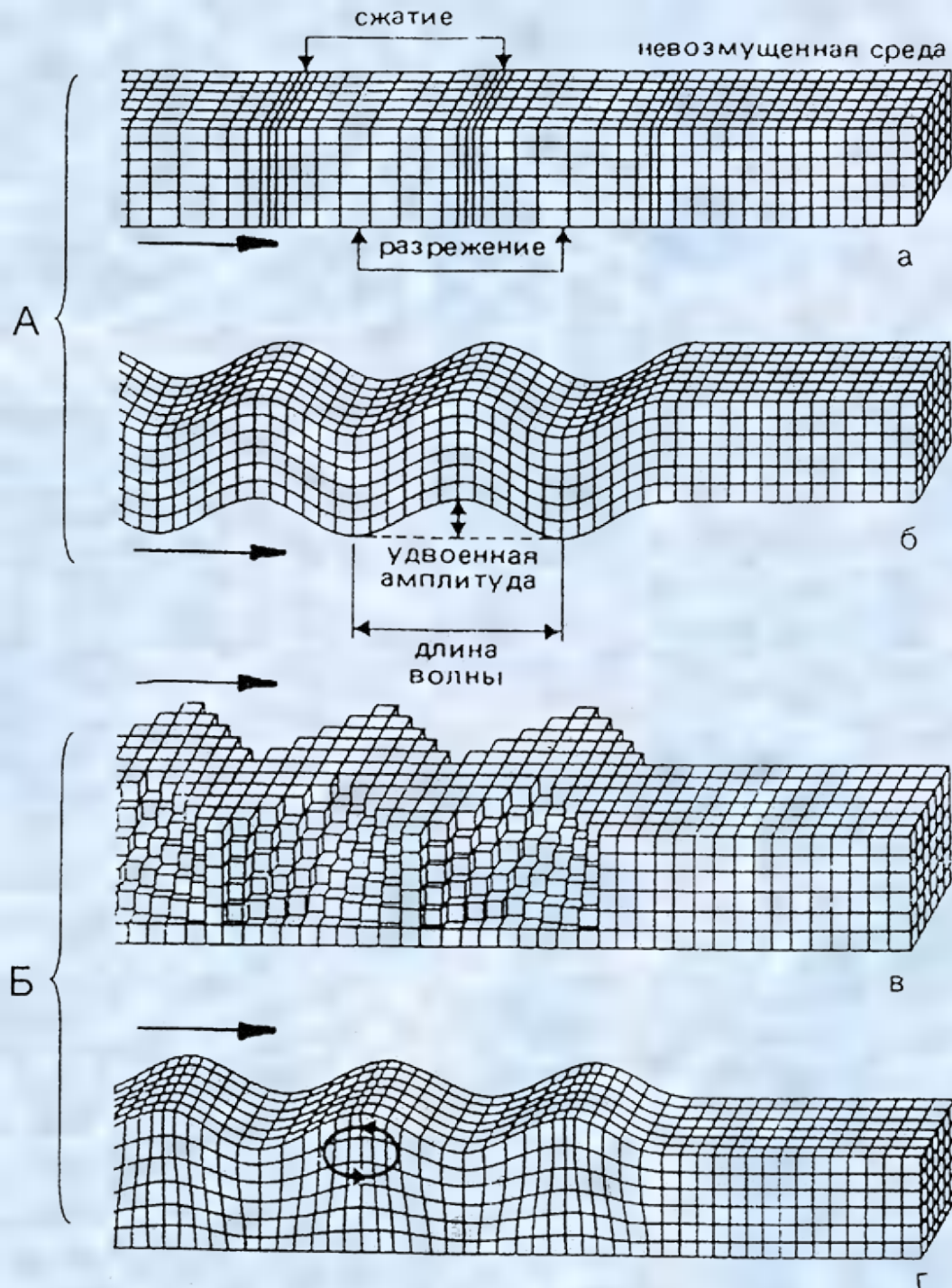
80 км

Астеносфера

Из таких ячеек-кубиков, по версии Борье Йоханссона, состоит твёрдое ядро. В вершинах куба и в его центре - атомы железа.



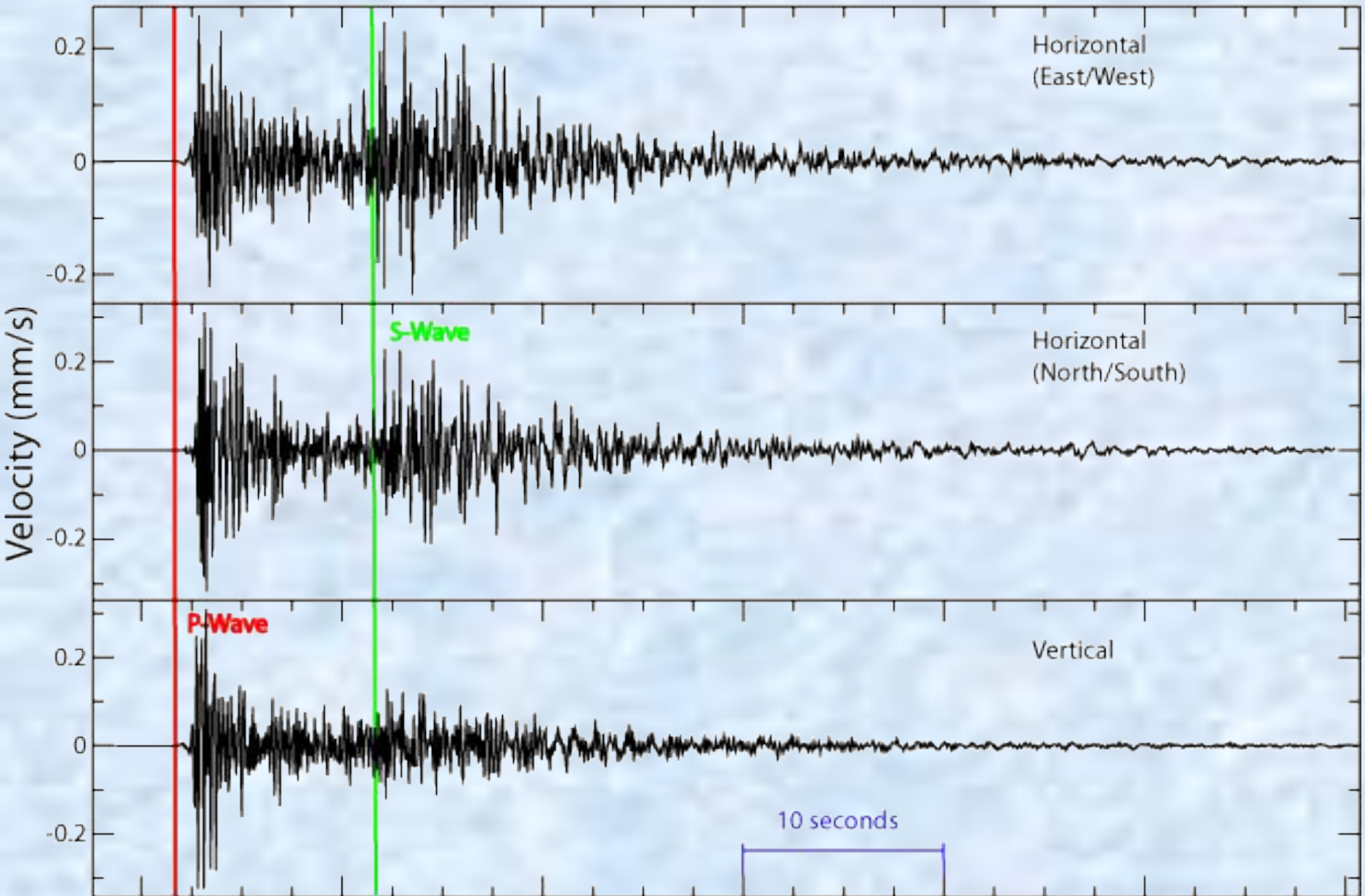


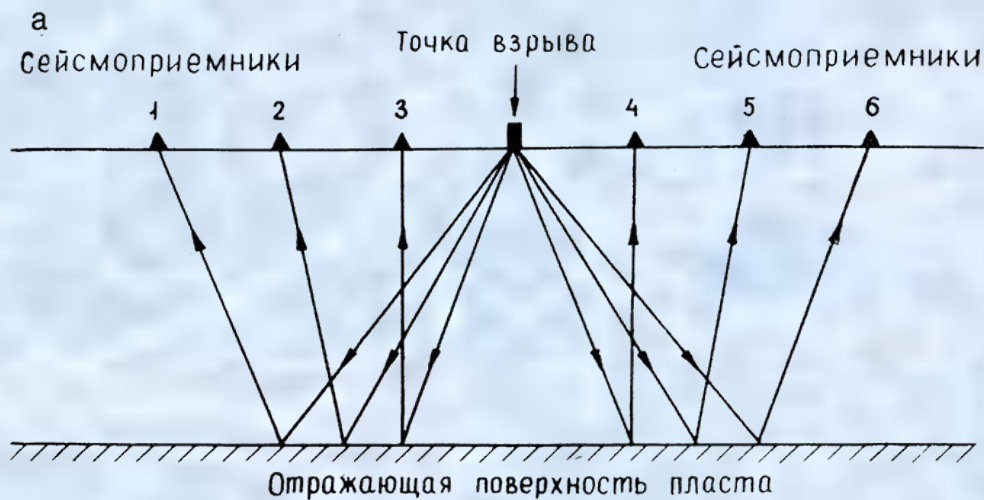


Типы сейсмических волн. А — объемные волны: а — продольные, б — поперечные. Б — поверхностные волны: в — Лява, г — Рэлея.

Стрелками показано направление движения волны

P- и S-волны на показаниях сейсмографа





б

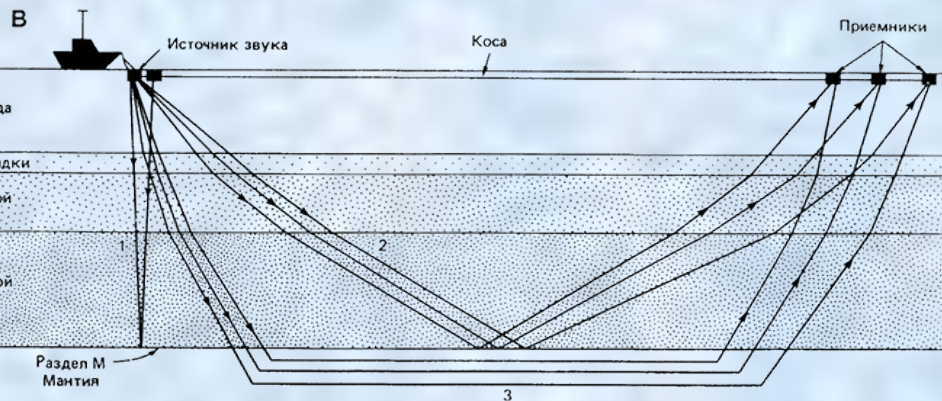
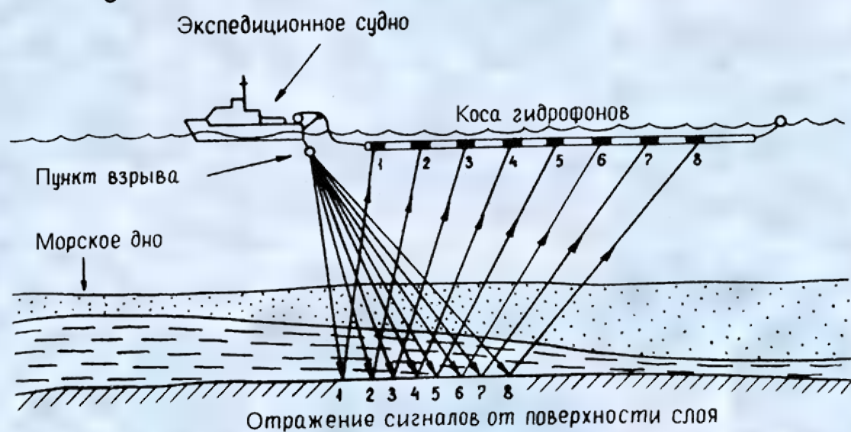


Схема отражения сейсмических волн

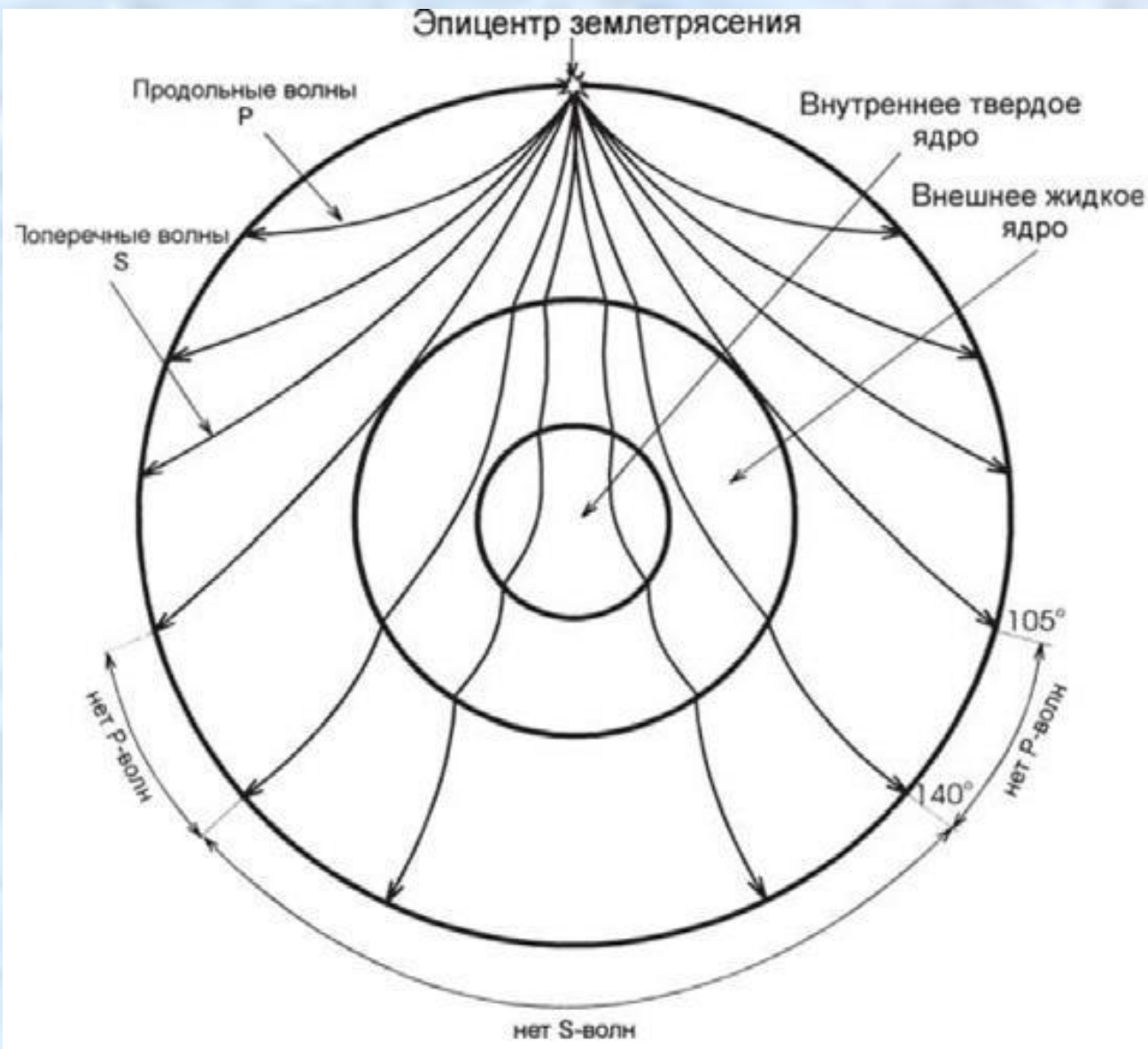
а) от поверхности пласта горных пород

б) метод работы НСП (непрерывное сейсмическое профилирование);

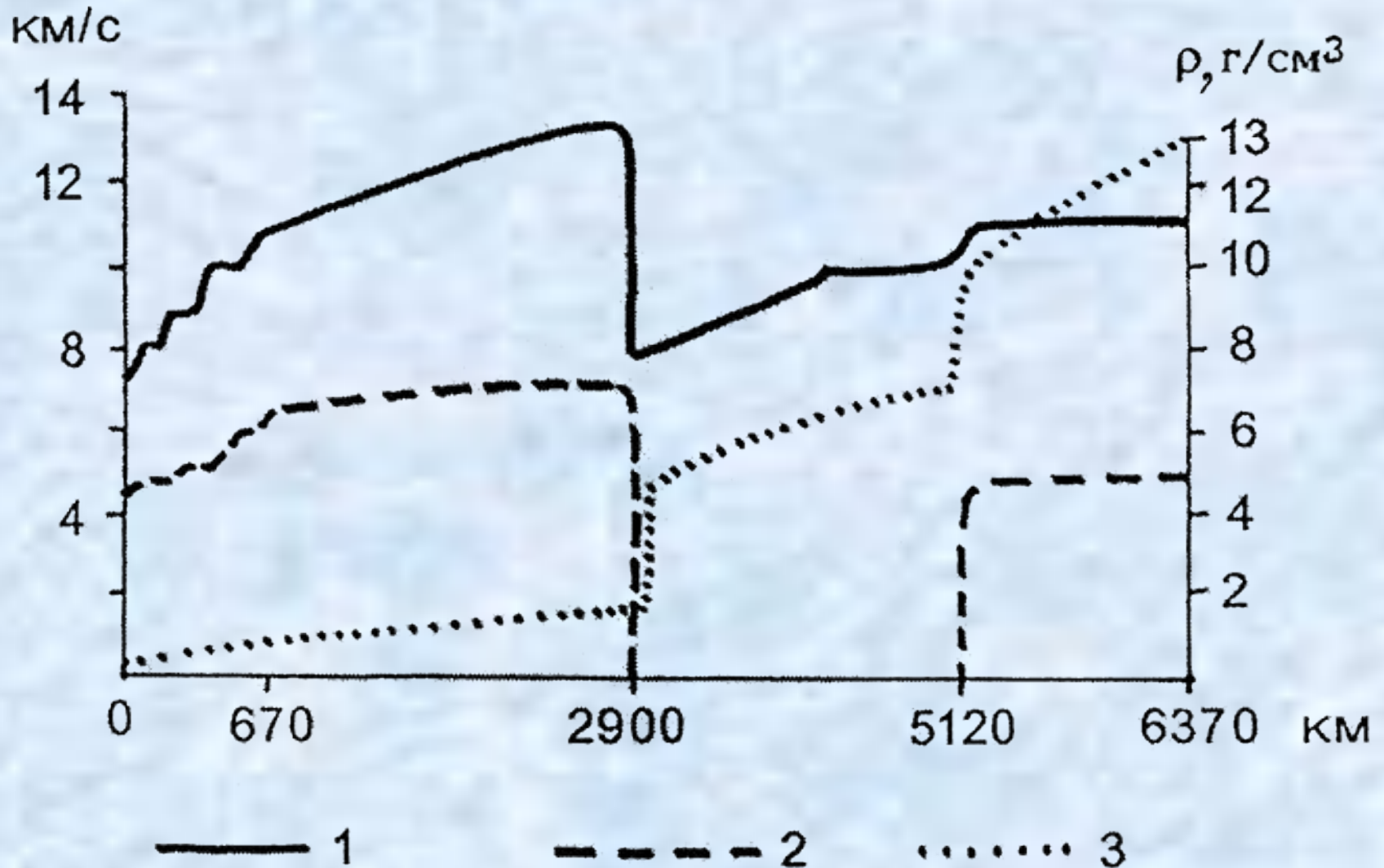
в) прохождение отраженных и преломленных волн через слои земной коры

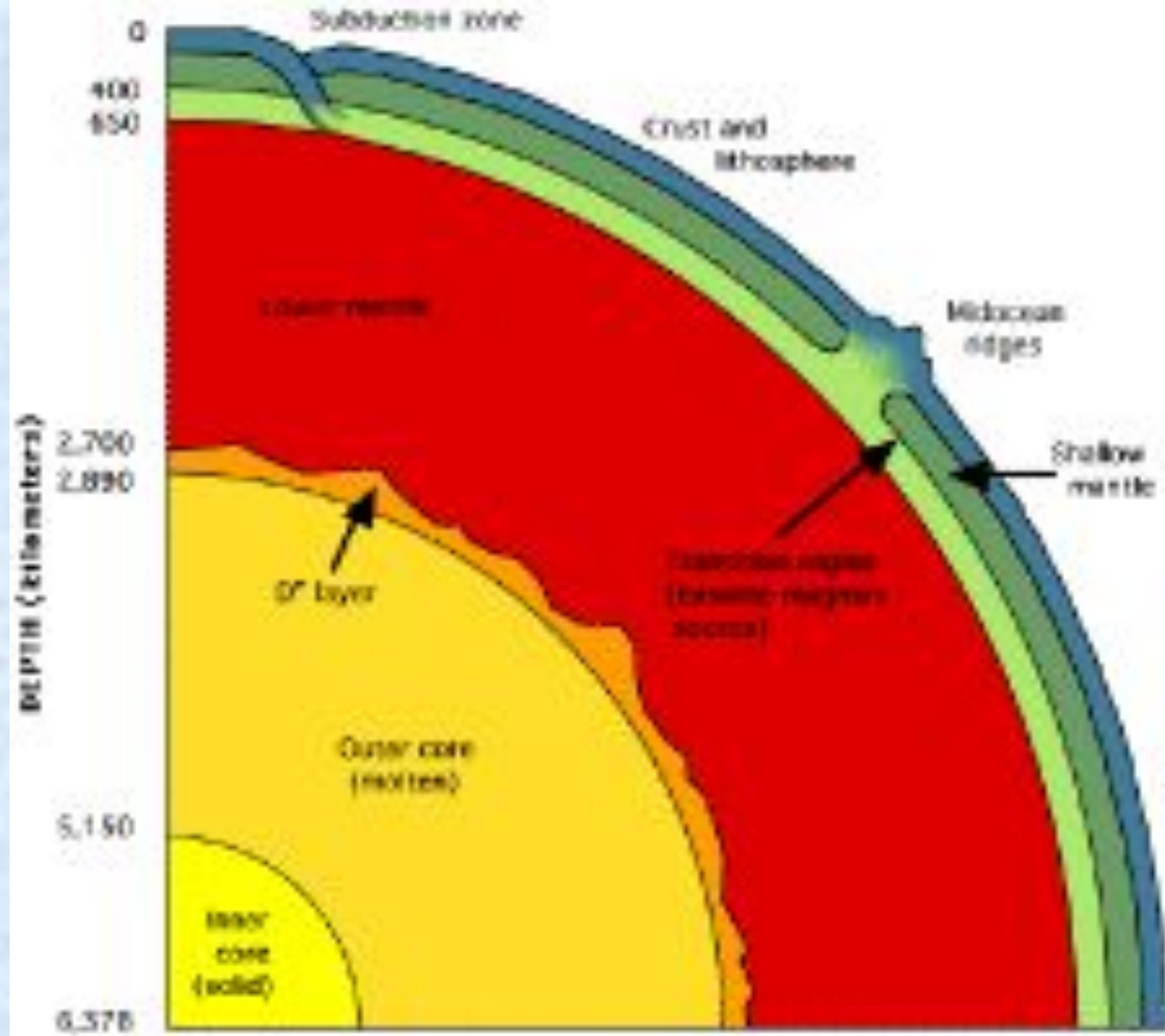
от источника до приемника: 1 — вертикальное отражение, 2 — широкоугольные отражения, 3 — преломленные волны

Прохождение продольных (P) и поперечных (S) волн через Землю. Поперечные волны не проходят через жидкое внешнее ядро, а у продольных волн есть «зона тени» в 35° , т. к. в жидком ядре волны преломляются



Скорость сейсмических волн и
плотность внутри Земли.
Сейсмические волны: 1 — продольные,
2 — поперечные, 3 — плотность





Краткое описание характеристик неоднородной (зональной) Земли приводится ниже:

- Континентальная корка - Плотность = 2,6 г / куб.см - Гранитный состав
- Океаническая кора - Плотность = 3,00 г / куб.см - Базальтовая по составу - «создана» вдоль срединно-океанических хребтов.
- Разрыв Мохо - отделяет кору от мантии - Плотность = 3,3 г / куб.см - преобладают оливин и пироксен
- «Зона низкой скорости» - примерно от 100 до 250 км под поверхностью - соответствует астеносфере - скорости продольных и поперечных волн уменьшаются - поперечные волны проходят через них, поэтому слой не является полностью жидким.
- Литосфера - включает кору и верхнюю часть мантии - вплоть до зоны низких скоростей. Литосфера создается на срединно-океанических хребтах.
- Астеносфера - примерно до 700 км. нет очагов землетрясений более 700 км.
- Мезосфера - от основания астеносферы до вершины ядра. Некоторые силикаты распадаются с образованием оксидов: $\text{MgSiO}_3 = \text{MgO} + \text{SiO}_2$.
- Разрыв Гутенберга - отделяет мантию от ядра - переход от силикатов и оксидов к расплавленному железу, никелю, кремнию, фосфорной жидкости.
- Внешнее ядро - S-волны не распространяются через внешнее ядро - создает зону тени S-волн. Зубцы Р замедляются (вспомните уравнения из предыдущей главы), что создает зону тени зубцов Р. Конвекция во внешнем ядре в сочетании с вращением Земли может создавать **Магнитное поле** Земли . Состоит из расплава железа и никеля.
- Bullen Discontinuity - отделяет жидкое внешнее ядро от твердого внутреннего ядра

- Внутреннее ядро - твердое тело, состоящее примерно из 85% железа и 15% никеля. Это состав многих «железных метеоритов». S-волны генерируются, когда Р-волна преломляется через границу внешнего ядра / внутреннего ядра. Обратите внимание, что эти S-волны ограничены внутренним ядром; они не могут вернуться в жидкое внешнее ядро. Когда эти S-волны возвращаются во внешнее ядро, создается «особый тип» Р-волны. Появление этих особых Р-волн позволило сейсмологам сделать вывод, что внутреннее ядро должно быть твердым.

Мы считаем, что в жидкости нет мирового слоя магмы, потому что Р-волны передаются по всей мантии.

S-волны передаются по всей мантии.

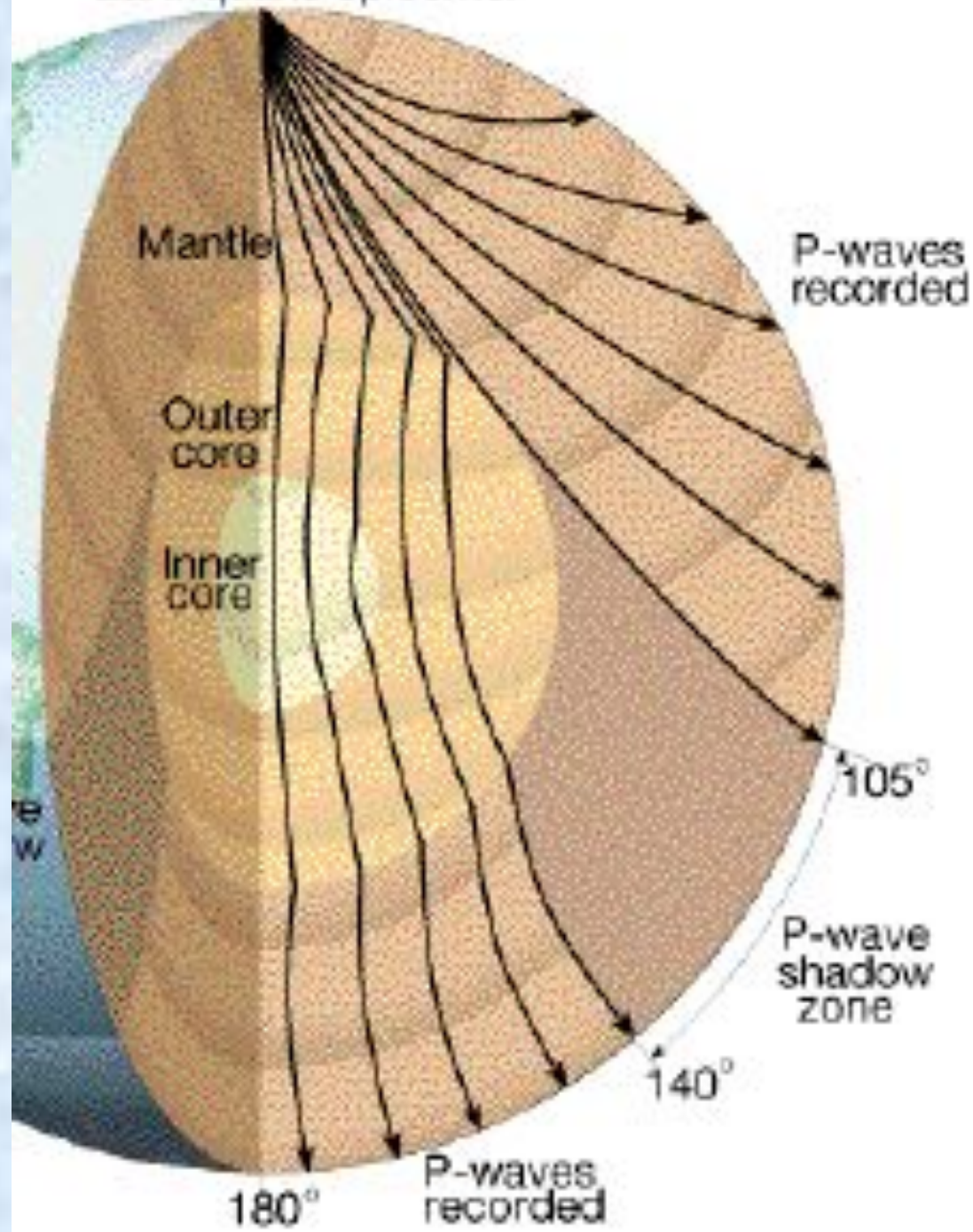
Р-волны имеют тенденцию уменьшаться с увеличением глубины проникновения мантии.

Мы считаем, что внешнее ядро жидкое, потому что Зубцы Р передаются по внешнему ядру
S-волны не передаются по внешнему ядру

Р-волны имеют тенденцию к уменьшению скорости, когда они проникают во внешнее ядро.

все вышеперечисленное

Earthquake epicenter



Зона теней P-Wave

Обратите внимание, что происходит с траекторией P-волны, которая только что входит во внешнее жидкое ядро. P-волна замедляется (жесткость G равна 0,0), и волна отклоняется к центру Земли. От 105 до 140 градусов от эпицентра зубцов P. Это создает пояс от 105 до 140 вокруг Земли, называемый Зоной Теней P-волны.

Хотя это не проиллюстрировано, подумайте, что случилось бы с S-волной, которая только что вошла во внешнее жидкое ядро. S-волны не могут проходить через жидкость, поэтому под углом от 105 до 105 градусов по обе стороны от эпицентра S-волны не регистрируются. Это зона теней S-волны.

В интервале от 105 до 140 градусов от эпицентраЗубцы P не наблюдаются

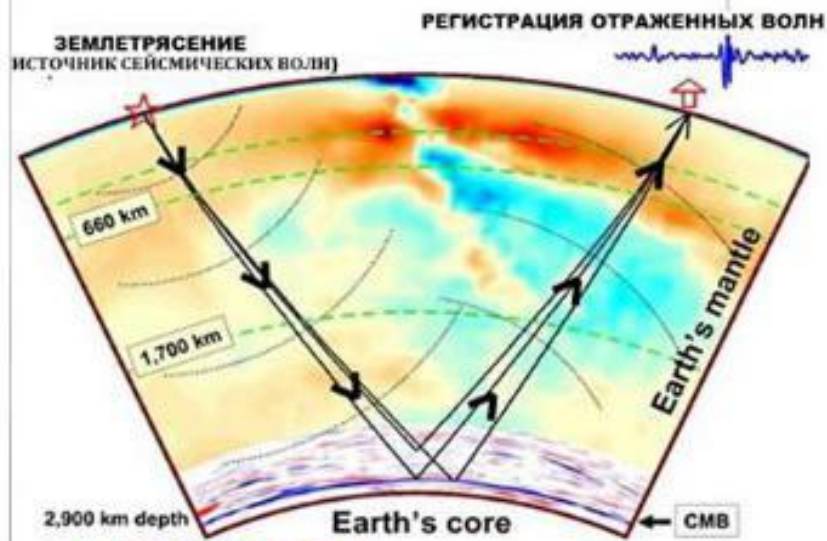
Зубцы S не наблюдаются

Ни P-волны, ни S-волны не наблюдаются.

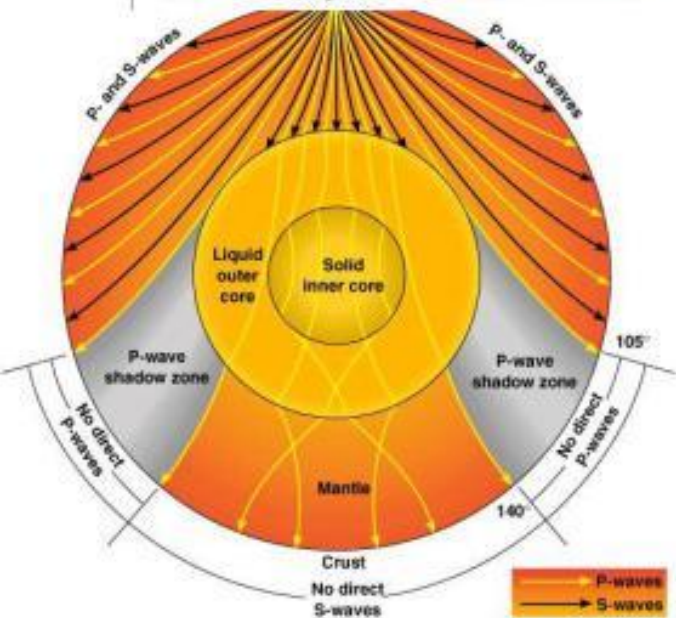
Ни P-волны, ни S-волны, ни Поверхностные волны не наблюдаются.

В интервале от 140 градусов до 140 градусов от эпицентранаблюдаются только зубцы P
Наблюдаются S-волны.

Наблюдаются как зубцы P, так и зубцы S.

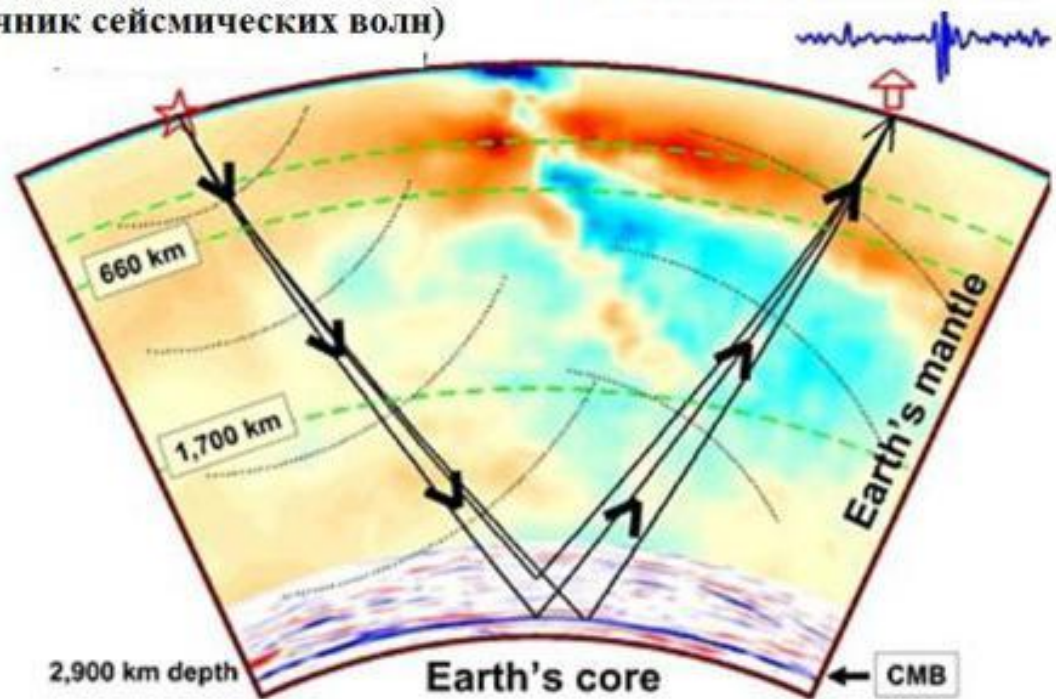


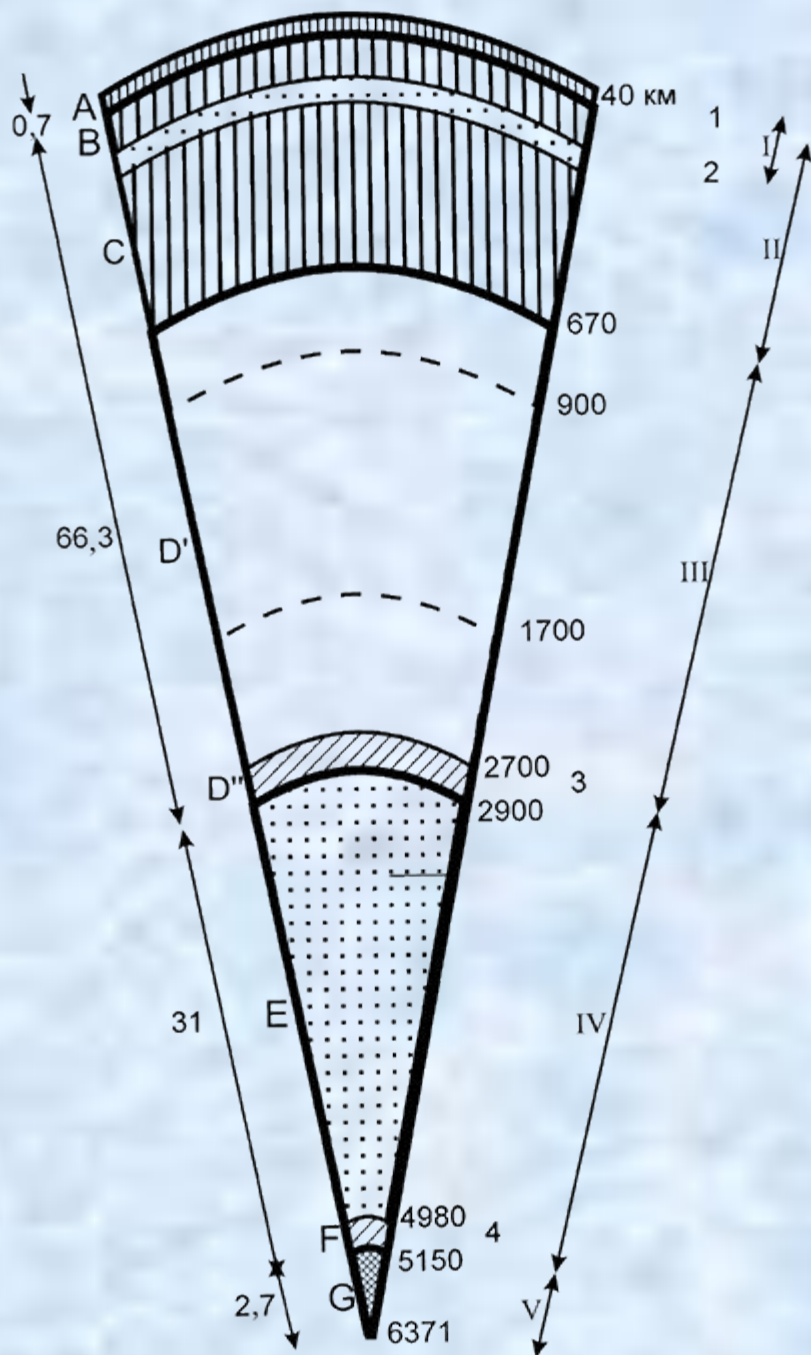
Виды сейсмических волн (слева),
отраженные волны (справа) и
преломленные сейсмические волны в
разрезе Земли(внизу)



Землетрясение
(источник сейсмических волн)

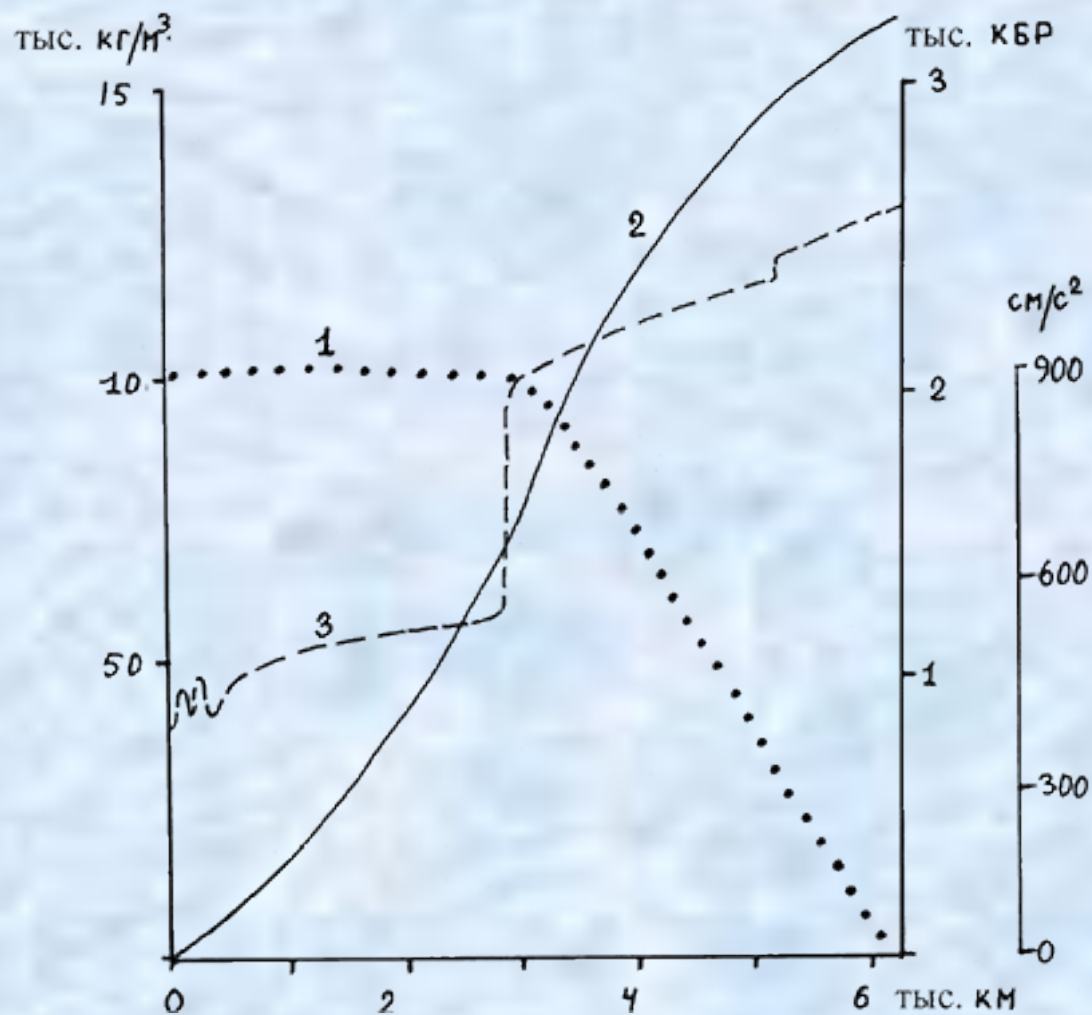
Регистрация отраженных волн



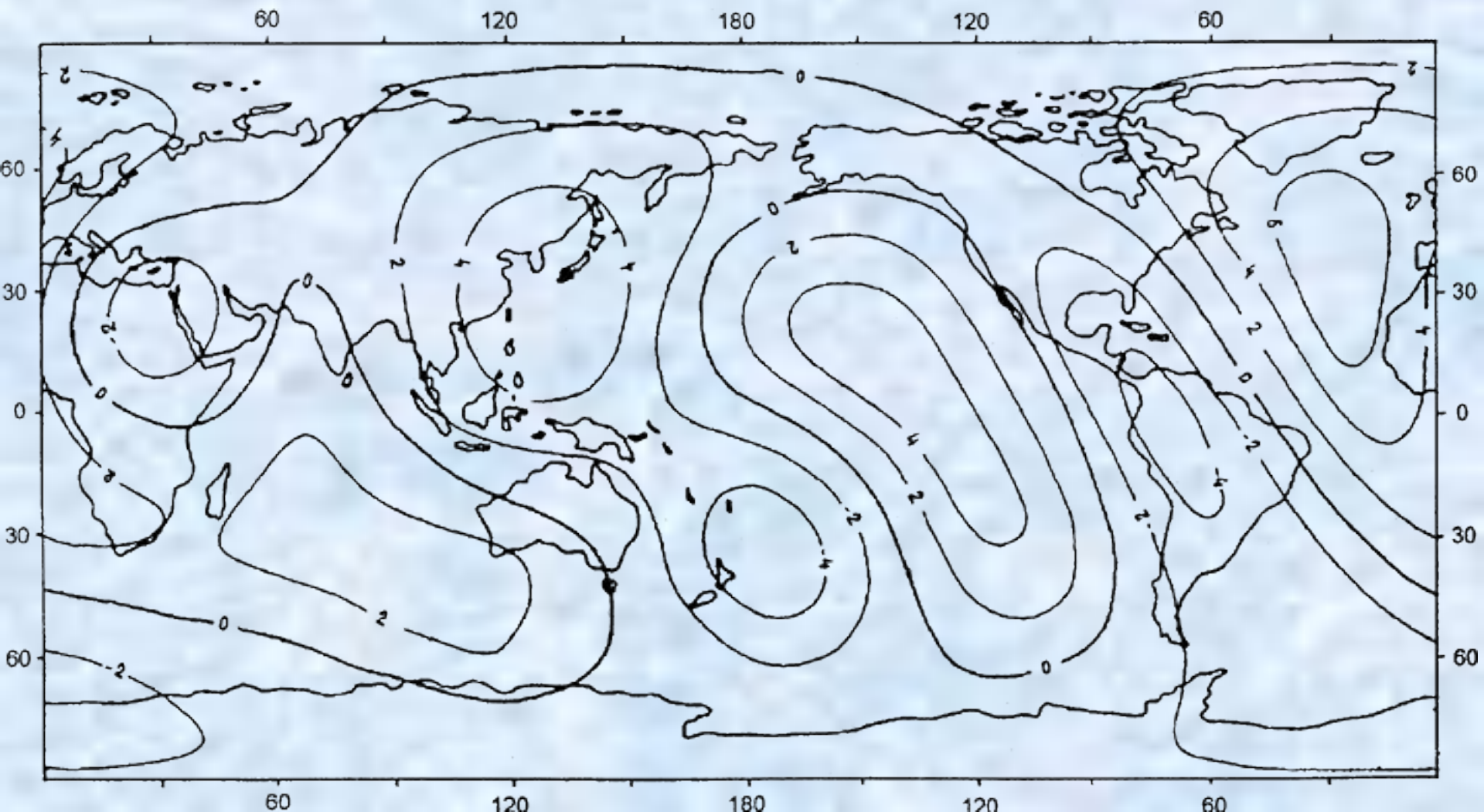


Внутреннее строение Земли. I — литосфера, II — верхняя мантия, III — нижняя мантия (пунктиром показаны уровни второстепенных разделов), IV — внешнее ядро, V — внутреннее ядро. 1 — земная кора; 2 — астеносфера; переходные слои: 3 и 4. Цифры слева — доля геосфер в процентах от объема Земли, буквы слева — геосферы по К. Буллену

Изменение ускорения силы тяжести (1),
давления (2)
и плотности (3) внутри Земли



Рельеф земного ядра,
по данным сейсмической томографии Земли
(изолинии проведены через 2 км)



Средний химический состав (в %) земной коры и верхней мантии

Компонент	Верхняя часть континентальной коры	Океаническая кора	Верхняя мантия
SiO_2	63,83	49,89	45,3
TiO_2	0,54	1,38	0,2
Al_2O_3	14,92	14,81	3,6
Fe_2O_3	1,75	1,79	
FeO	3,68	8,6	7,3 ¹
MnO	0,09	0,18	0,1
MgO	2,83	7,38	41,3
CaO	4,08	11,93	1,9
Na_2O	3,02	2,38	0,2
K_2O	2,84	0,23	0,1
P_2O_5	0,14	0,14	?
$\text{C}_{\text{орг.}}$	0,05	?	?
CO_2	0,9	0,42	?
H_2O	1,17	0,85	?

**Корреляция минеральных преобразований в мантии,
уровней глобальных сейсмических разделов (выделены
курсивом)
и предложенных границ глубинных геосфер, основанных на
данных
сейсмической томографии (по Д. Ю. Пущаровскому)**

Глубина, км	Минеральные преобразования	Границы сфер	
140	Структурная перестройка оливина $\alpha - (\text{Mg}, \text{Fe}) \text{SiO}_4$ в вадслеит $\beta - (\text{Mg}, \text{Fe}) \text{SiO}_4$	Верхняя мантия	Верхняя часть
520	Структурная перестройка вадслеита в рингвуд — γ -модификацию оливина (Mg, Fe) SiO_4 со структурой шпинели		
400–600	Трансформация пироксена (Mg, Fe) SiO_3 в гранат-мейджорит Mg_3 ($\text{Fe}, \text{Al}, \text{Si}$) $2 \text{Si}_3\text{O}_{12}$		Нижняя часть
670	Шпинелеподобный рингвудит трансформируется в ассоциацию (Mg, Fe) перовскита и Mg-вюстита		
850–900	Пироп $\text{Mg}_3 \text{Al}_2 \text{Si}_3 \text{O}_{12} \Rightarrow$ в ромбический перовскит (Mg, Fe) SiO_3 $\Downarrow \Rightarrow$ в твердый раствор корунд-ильменита $\text{Al}_2 \text{O}_3$	Нижняя мантия	
1200	Перестройка SiO_2 со структурой стишовита в структурный тип CaSiO_3 (ромбический аналог рутила TiO_2)		
1700	Изменение характера межатомных связей (металлизация) вюстита FeO		
2000	SiO_2 со структурой CaSiO_3 переходит в фазу со структурой, промежуточной между $\alpha\text{-PbO}_2$ и ZrO_2 ; происходит распад перовскитоподобного MgSiO_3 ; изме- нение электронной структуры атомов Fe ($\text{HS} \Rightarrow \text{LS}$) в структуре вюстита FeO ; образование FeO со структурой типа никелина NiAs		
2200–2300	Трансформация $\text{Al}_2 \text{O}_3$ со структурой корунда в фазу с ромбической структу- рой $\text{Rh}_2 \text{O}_3$ (II)		
2700–2900	Слой D. Постперовскитовая фаза (MgSiO_3) 75 % и CaSiO_3 со структурой пироксена		

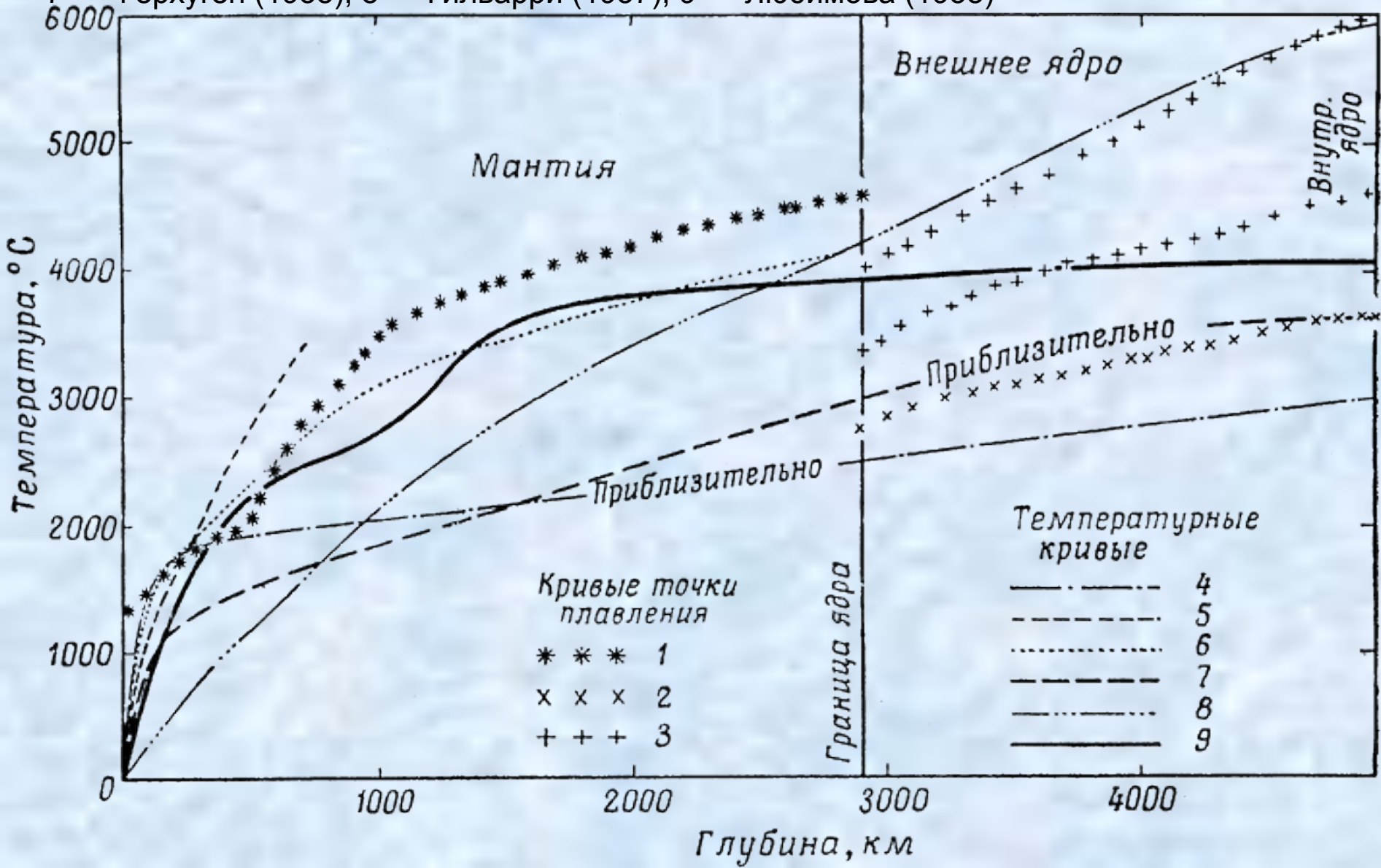
Оценки температур внутри Земли разными авторами (по Б. Гутенбергу, 1963).

Все кривые содержат неопределенные предположения. 1 — Аффен (по Гутенбергу, 1956);

2 — Симон (по Гутенбергу, 1954); 3 — Галвари (по Дю Буа, 1957);

4 — Гутенберг (1951); 5 — Джеффирис (1952); 6 — Джекобс (1956);

7 — Ферхуген (1958); 8 — Гилварри (1957); 9 — Любимова (1958)



Силикатные минералы

Структура силикатов	Группировка	Минерал	Примеры
Островная	$(\text{SiO}_4)^{4-}$	Оливин	Форстерит Mg_2SiO_4
Цепочечная (одна цепь)	$(\text{SiO}_3)^{2-}$	Пироксен	Авгит $(\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al}) \times$ $\times (\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6)$
Ленточная (двойная цепь)	$(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{6-}$	Амфибол	Роговая обманка $(\text{Ca}, \text{Na})_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4$ $\text{Al}, \text{Fe}^{3+}) \times (\text{OH})_2 \times$ $\times [(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{11}]_2$
Листовая (слоевая)	$(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$	Слюда	Мусковит $\text{KAl}_2(\text{OH})_2 \times$ $\times [\text{AlSi}_3\text{O}_{11}]$
Каркасная	(SiO)	Кварц Полевой шпат	Кварц (SiO_2) Ортоклаз $(\text{KAlSi}_3\text{O}_8)$

**Наиболее распространенные в земной коре (98 %)
химические элементы**

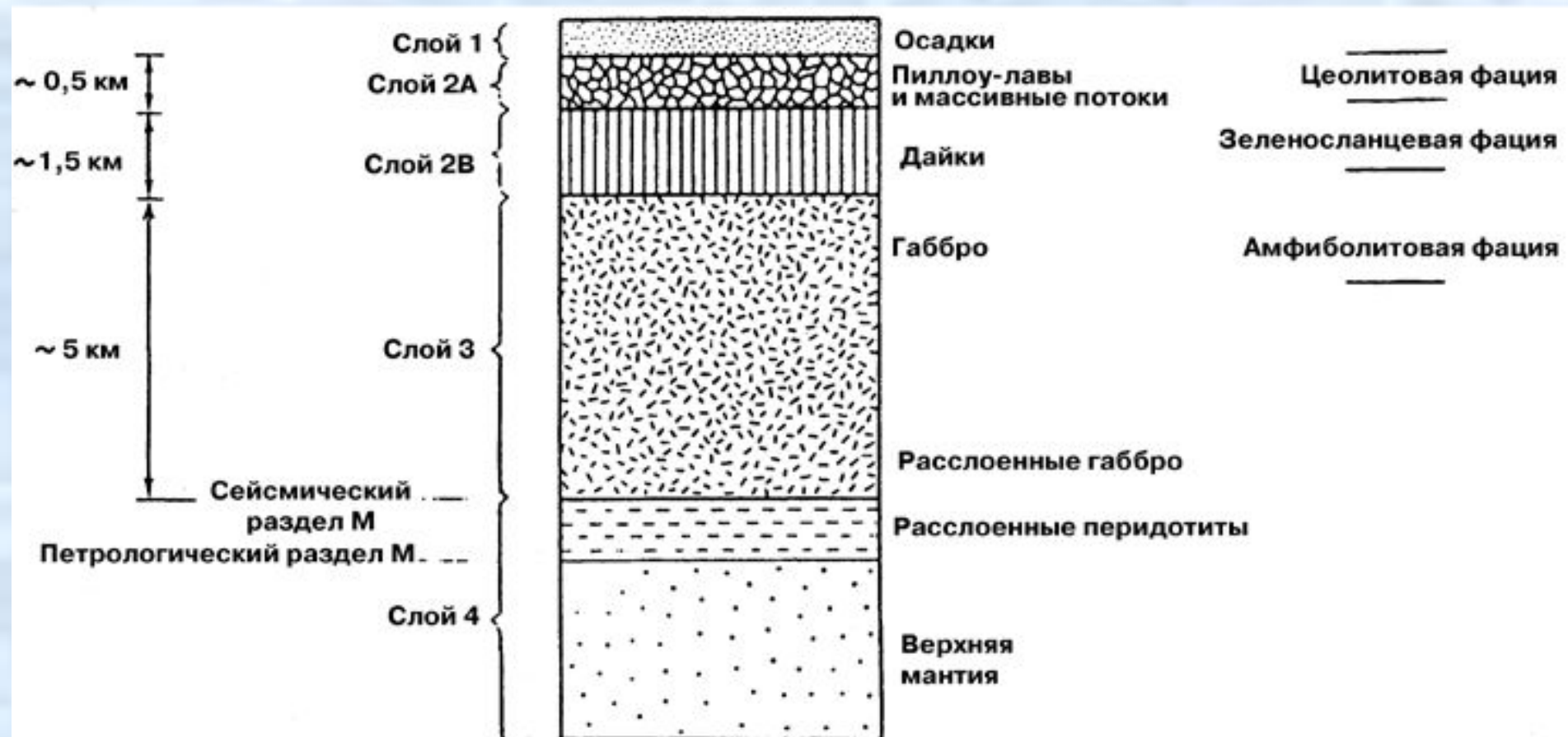
Элемент	Символ	Ионы	%
Кислород	O	O^{2-}	46,5
Кремний	Si	Si^{4+}	25,7
Алюминий	Al	Al^{3+}	7,65
Железо	Fe	Fe^{2+} , Fe^{3+}	6,24
Кальций	Ca	Ca^{2+}	5,79
Магний	Mg	Mg^{2+}	3,23
Натрий	Na	Na^{1+}	1,81
Калий	K	K^{1+}	1,34

На долю Ti, C, H, Mn, S и других элементов приходится менее 2 %.

Химический состав земной коры в %

Тип коры	Континентальная	Океаническая	В целом
Масса 10^{24} г	22,32	6,14	28,46
SiO ₂	54,55	49,89	53,54
TiO ₂	0,855	1,381	0,97
Al ₂ O ₃	16,17	14,81	15,87
Fe ₂ O ₃	0,92	1,79	1,11
FeO	7,32	8	7,6
MnO	0,159	0,181	0,164
MgO	4,91	7,38	5,44
CaO	8,72	11,93	9,41
Na ₂ O	2,74	2,38	2,66
K ₂ O	1,32	0,23	1,09
P ₂ O ₅	0,201	0,143	0,189
C _{орг.}	0,07		0,06
CO ₂	1,14	0,42	0,99
SO ₃	0,063	0,01	0,052
S ²⁻	0,049	0,001	0,039
Cl	0,068	0,004	0,055
F	0,025	0,002	0,02
H ₂ O	0,77	0,85	0,78
Сумма	100,056	100,002	100,039

Океаническая кора обладает 3-слойным строением (сверху вниз)



Как работает геодинамо

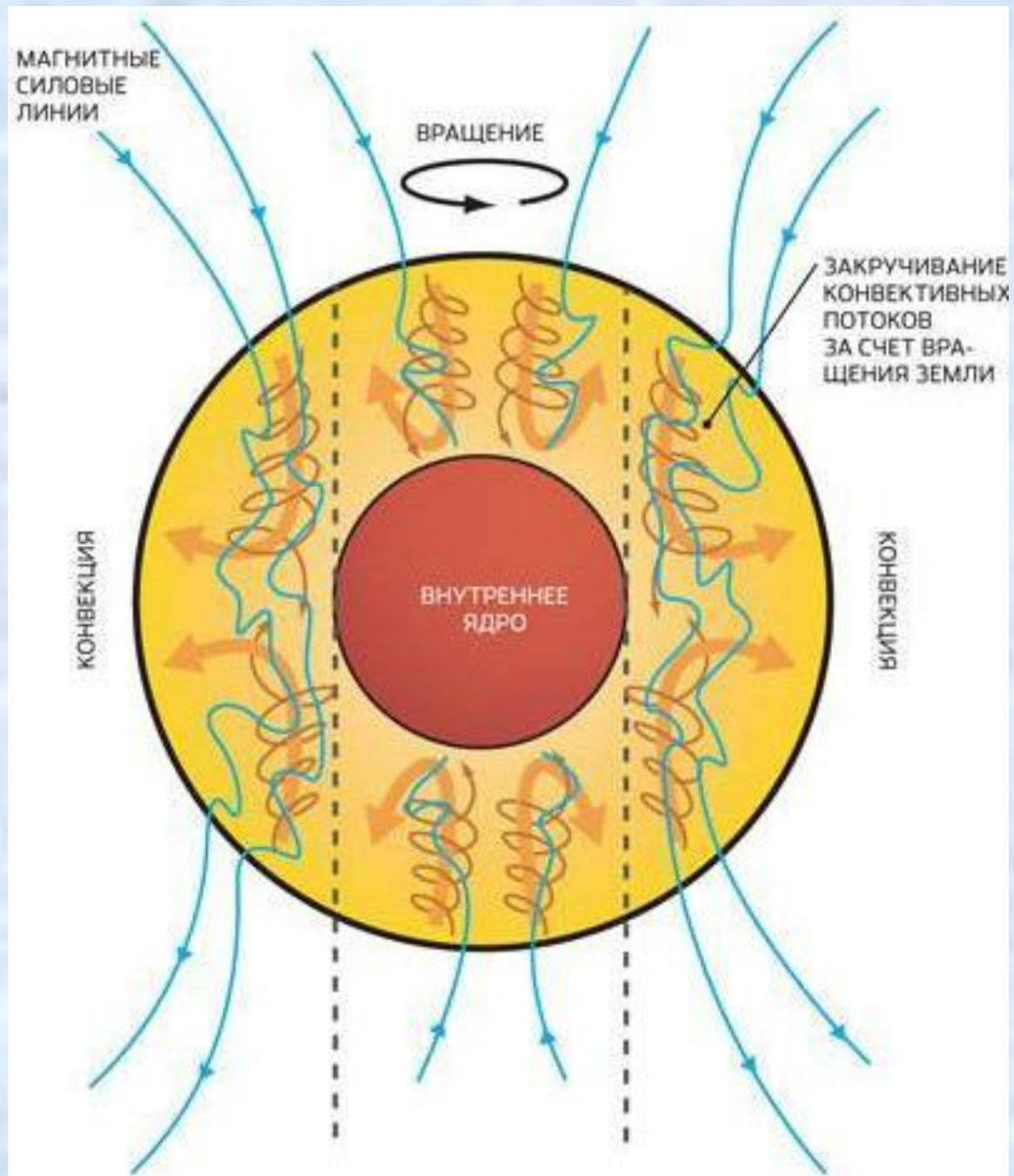


Схема строения ядра



Внешнее ядро мощностью порядка 2080 км не пропускает поперечные сейсмические волны, что свидетельствует об отсутствии здесь упругого сопротивления сдвигу, то есть слагающее его вещество ведет себя как жидкость. Переходный слой F -- сравнительно тонкая оболочка между внешним и внутренним ядром, имеет мощность около 140 км. Сейсмологические измерения указывают на то, что и внутреннее (твердое) и внешнее (жидкое) ядра Земли характеризуются меньшей плотностью по сравнению со значением, получаемым на основе модели ядра, состоящего только из металлического железа при тех же физико-химических параметрах. Это уменьшение плотности большинство исследователей связывают с присутствием в ядре таких элементов, как Si, S и даже O, образующих сплавы с железом.

Другой предполагаемой в ядре фазой является b-Fe, структура которой характеризуется четырехслойной плотнейшей упаковкой атомов железа. Температура плавления этой фазы оценивается в 5000 °C при давлении 360 ГПа. Присутствие водорода в ядре долгое время вызывало дискуссию из-за его низкой растворимости в железе при атмосферном давлении. Однако эксперименты (данные Дж. Бэддинга, Х. Мао и Р. Хэмли (1992)) позволили установить, что гидрид железа FeH может сформироваться при высоких температурах и давлениях и оказывается устойчив при давлениях, превышающих 62 ГПа, что соответствует глубинам ~1600 км. В этой связи присутствие значительных количеств (до 40 мол. %) водорода в ядре вполне допустимо и снижает его плотность до значений, согласующихся с данными сейсмологии. Общее заключение таково, что на таких глобальных сейсмических рубежах, как 410 и 670 км, происходят значительные изменения в минеральном составе мантийных пород. Это и другие обстоятельства, позволяют отказаться от представления об однородной структуре Земли.

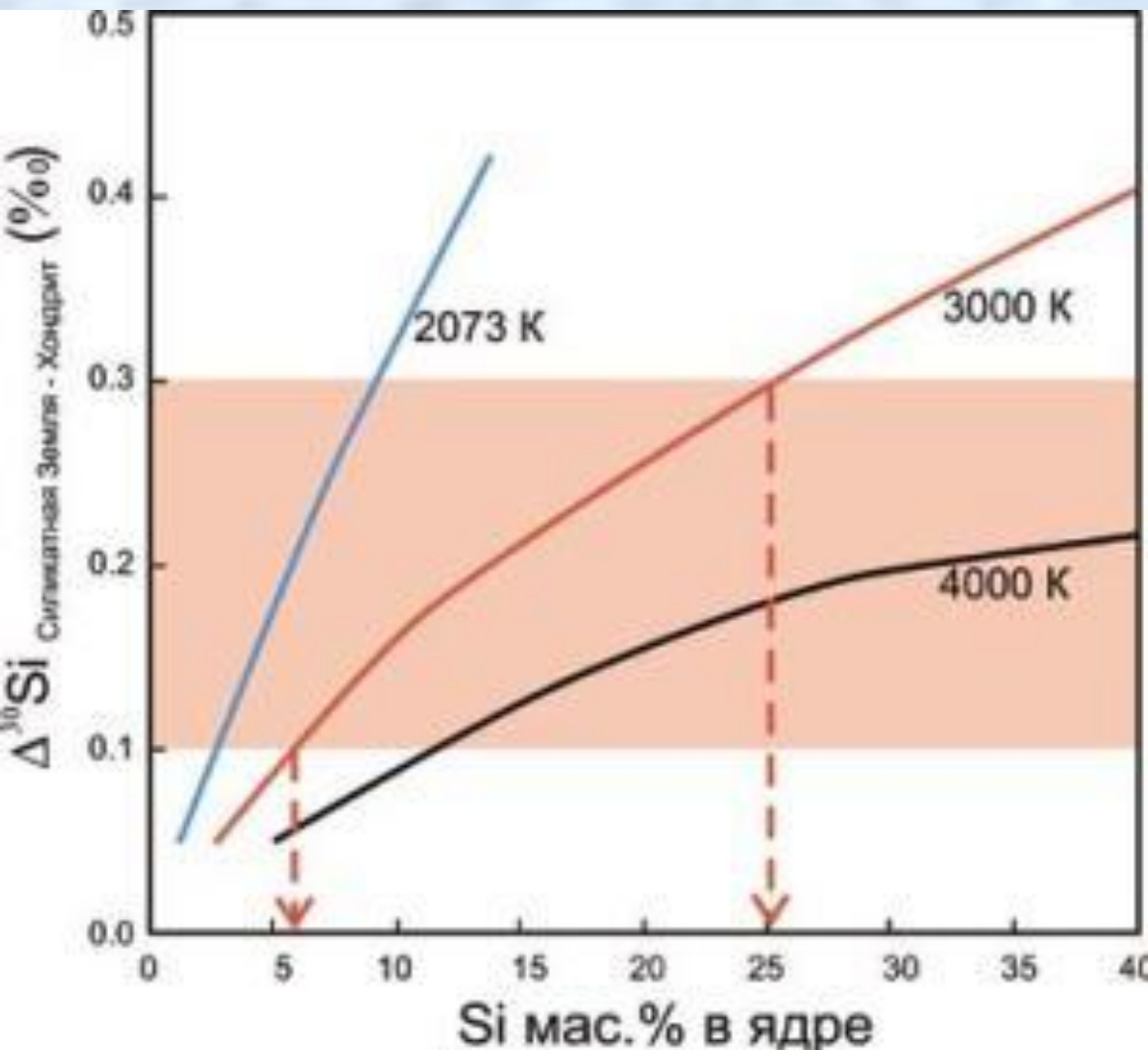
Согласно современным представлениям, **Земля** образовалась при аккреции планетезималей хондритового состава. В результате их столкновения, а также возникающего гравитационного разогрева наша планета прошла стадию магматического океана. Согласно одностадийной модели, из этого океана магмы выделялись капли железа, которые из-за своего веса тонули - оказывались на дне океана, где, собираясь в тяжелые диапиры, быстро опускались к центру Земли, формируя ядро.



Чтобы состыковать наблюдаемые данные о плотности ядра Земли с расчетными данными для чистого железа, необходимо, чтобы кроме ~5% никеля в нем присутствовало от 5 до 15% каких-то еще более легких элементов. Роль основных кандидатов традиционно отводится водороду, углероду, азоту, кислороду, магнию, кремнию и сере. Однако вопрос, в какой пропорции эти элементы входят в ядро, остается остро дискуссионным.

Используя экспериментальные данные о распределении различных элементов между силикатами и железом, был сделан вывод, что наибольшее соответствие одностадийной модели образования ядра достигается, если в ядре присутствует от 2 до 6% кислорода. При этом отмечается, что такого количества кислорода по-прежнему недостаточно, чтобы объяснить наблюдаемый дефицит массы ядра.

Содержание кремния в железном ядре, рассчитанное исходя из различия в изотопном составе между породами Земли и хондритовыми метеоритами, а также температуры формирования ядра.



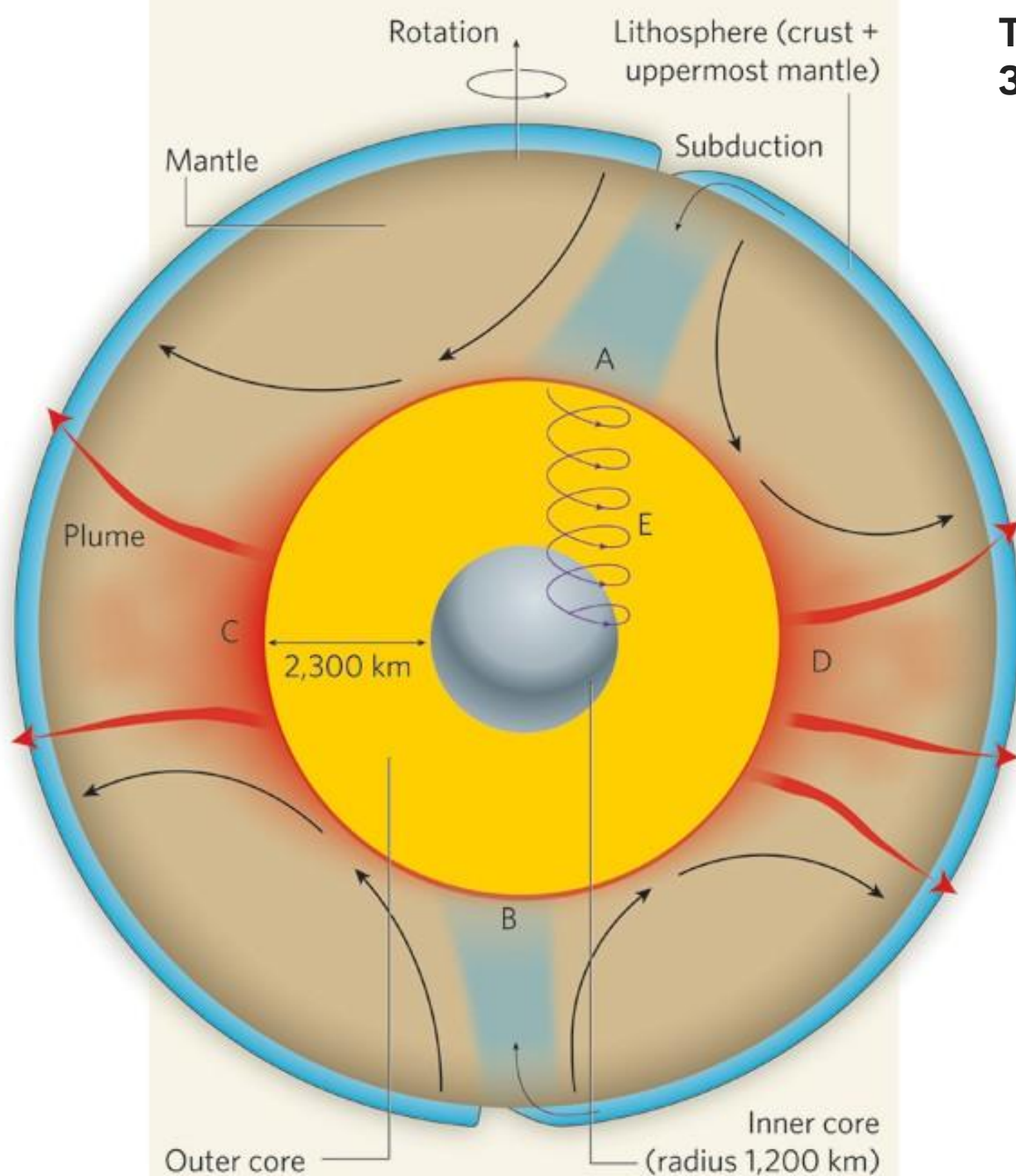
Другим широко распространенным подходом является кос-мохимический подход. Если допустить, что валовый состав Земли соответствует хондритам, то, сравнивая их состав с составом земных пород, составляющих силикатную оболочку, можно рассчитать и состав ядра. Используя этот подход, команде физиков и геологов из Калифорнийского университета в Лос-Анжелесе (University of California Los Angeles) удалось оценить, что в ядре должно присутствовать существенное количество кремния

В качестве материала для исследования взяли два метеорита — Mount Egerton и Norton County, относящихся к особому типу метеоритов — аубритах, формирование которых связано с плавлением энстатитовых хондри-тов при высокой температуре. Энстатитовые хондриты в свою очередь часто рассматриваются как исходный строительный материал Земли из-за близкого изотопного состава кислорода и отношения металлов к кремнию. Иными словами, аубриты можно рассматривать как аналоги силикатной оболочки Земли. Для сравнения с Землей анализировался также изотопный состав кремния в оливинах из мантийных пород — перидотитов.

были измерены отношения $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ в силикатных минералах аубритов и в кремнии внутри металлов, преимущественно минерале камасите (Fe, Ni), чтобы подтвердить, что фракционирование изотопов кремния зависит от температуры. Затем, используя новые данные о различии $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ в кремнии силикатных минералов и металлов, а также опубликованные и собственные данные об изотопном составе кремния в силикатных минералах хондритов и в земных породах, авторы работы [2] рассчитали, сколько кремния может находиться в ядре Земли. При температуре (3000 K) равновесного разделения железа, слагающего ядро, и силикатной оболочки Земли космохимический подход указывает на то, что в ядре может содержаться от 6 до 25% кремния

<https://trv-science.ru/2010/06/zhelezo-nikel-kremnij-kislородное-yadro-zemli/>

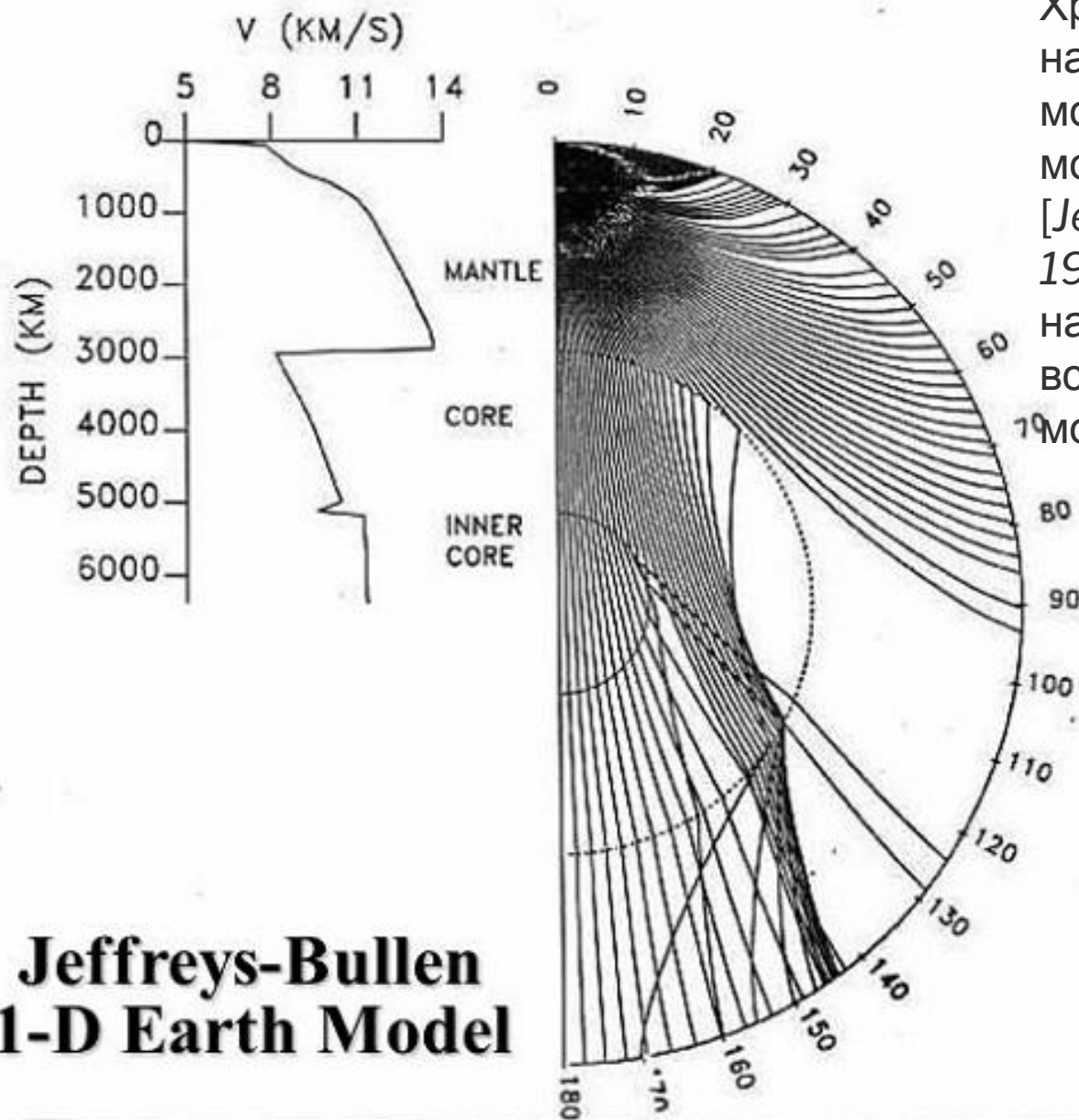
В определении различия в изотопных отношениях кремния между силикатной оболочкой Земли и ее исходным строительным материалом (хондритами) остаются большие неопределенности. Равно как и оценки температуры, при которой происходило выделение железа на стадии формирования ядра, остаются зависимыми от ряда допущений. Однако несомненным является тот факт, что в железном ядре Земли наряду с никелем присутствует сопоставимое количество кремния, а ранее было показано, что и кислорода. Так что, может быть, уже пора привыкать называть ядро не железо-никелевым, а железо-никель-кремний-кислородным.



Тепловая конвекция в Земле

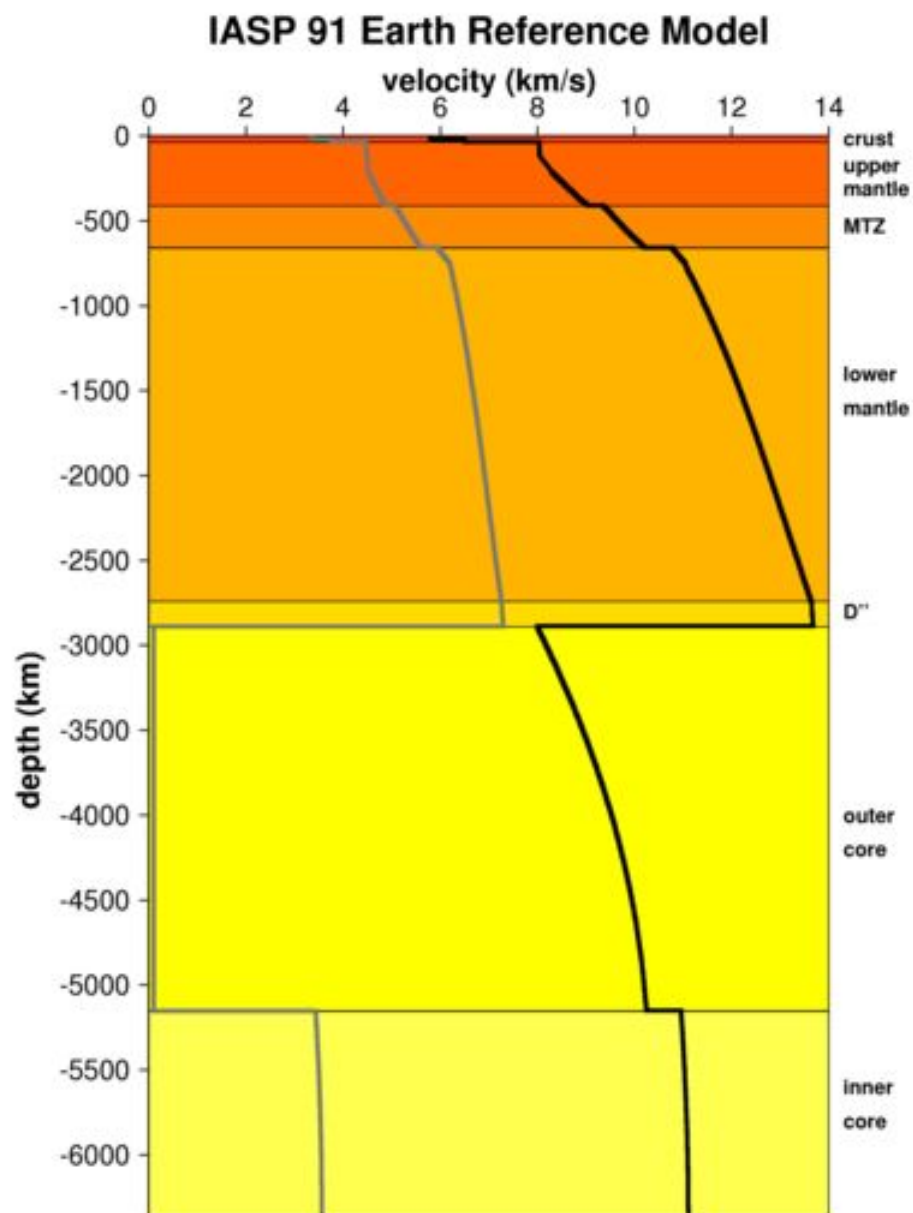
Глобальная конвекция в мантии связана с движением литосферных плит и конфигурацией зон субдукции, где холодный плотный материал медленно опускается с поверхности к границе ядро-мантия. Тепловой поток от внешнего ядра намного больше под холодными нисходящими потоками (А, В), чем под теплыми восходящими шлейфами (С, D). Более быстрая конвекция в жидком внешнем ядре вызвана охлаждением из мантии и высвобождением легкой жидкости на границе затвердевающего внутреннего ядра. Вращение Земли имеет тенденцию организовывать этот поток в спиральные конвекционные колонны (Е), которые позволяют модели охлаждения мантии влиять на долговременную картину затвердевания внутреннего ядра. Современная субдукция происходит преимущественно вокруг тихоокеанского

SEISMIC RAY PATHS THROUGH THE EARTH



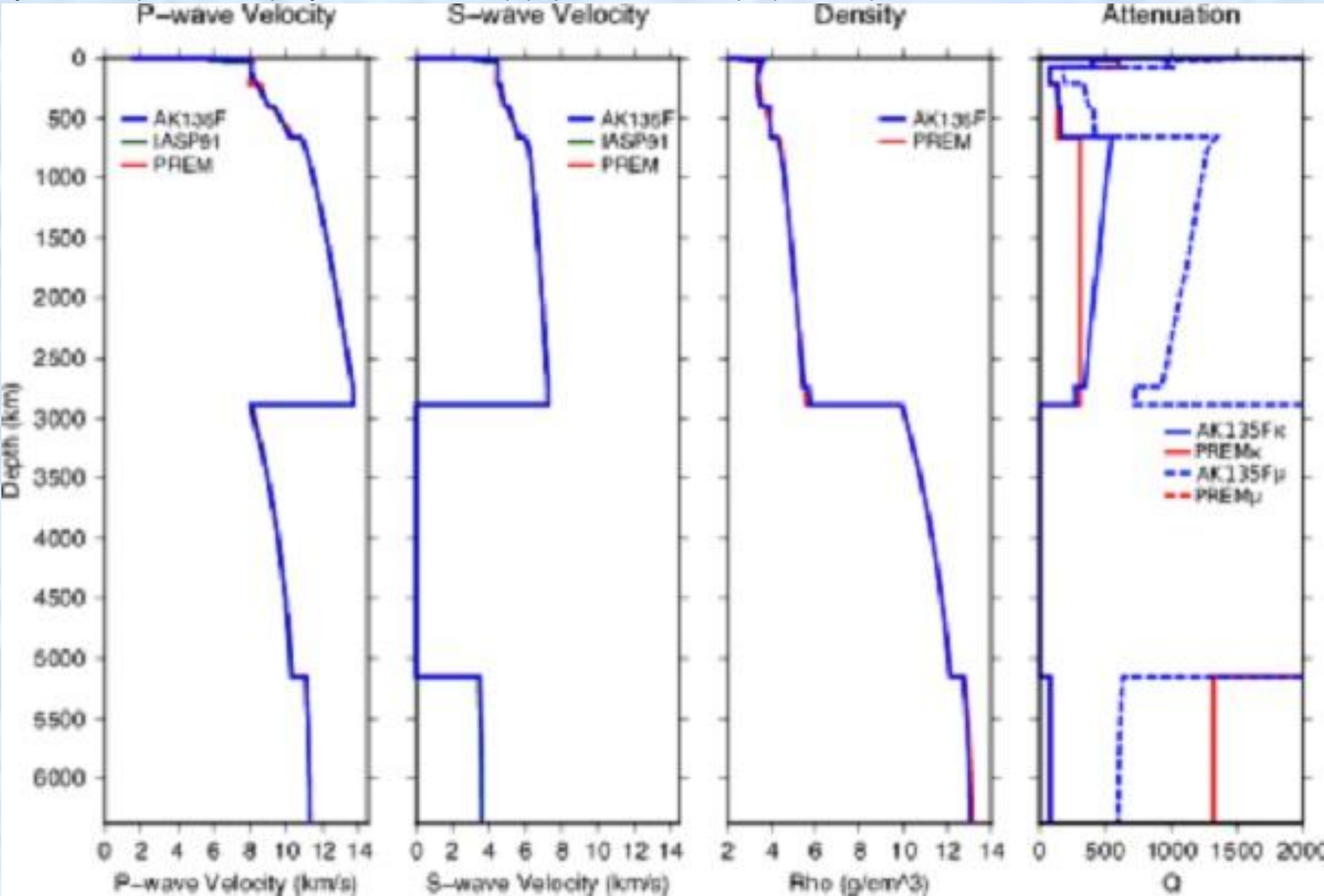
**Jeffreys-Bullen
1-D Earth Model**

Хронологически, одной из наиболее ранних, современных моделей Земли является модель Джеффриса – Буллена [Jeffreys, H., and K.E. Bullen, 1940]. Эта модель послужила надежным фундаментом для всех самых современных моделей.

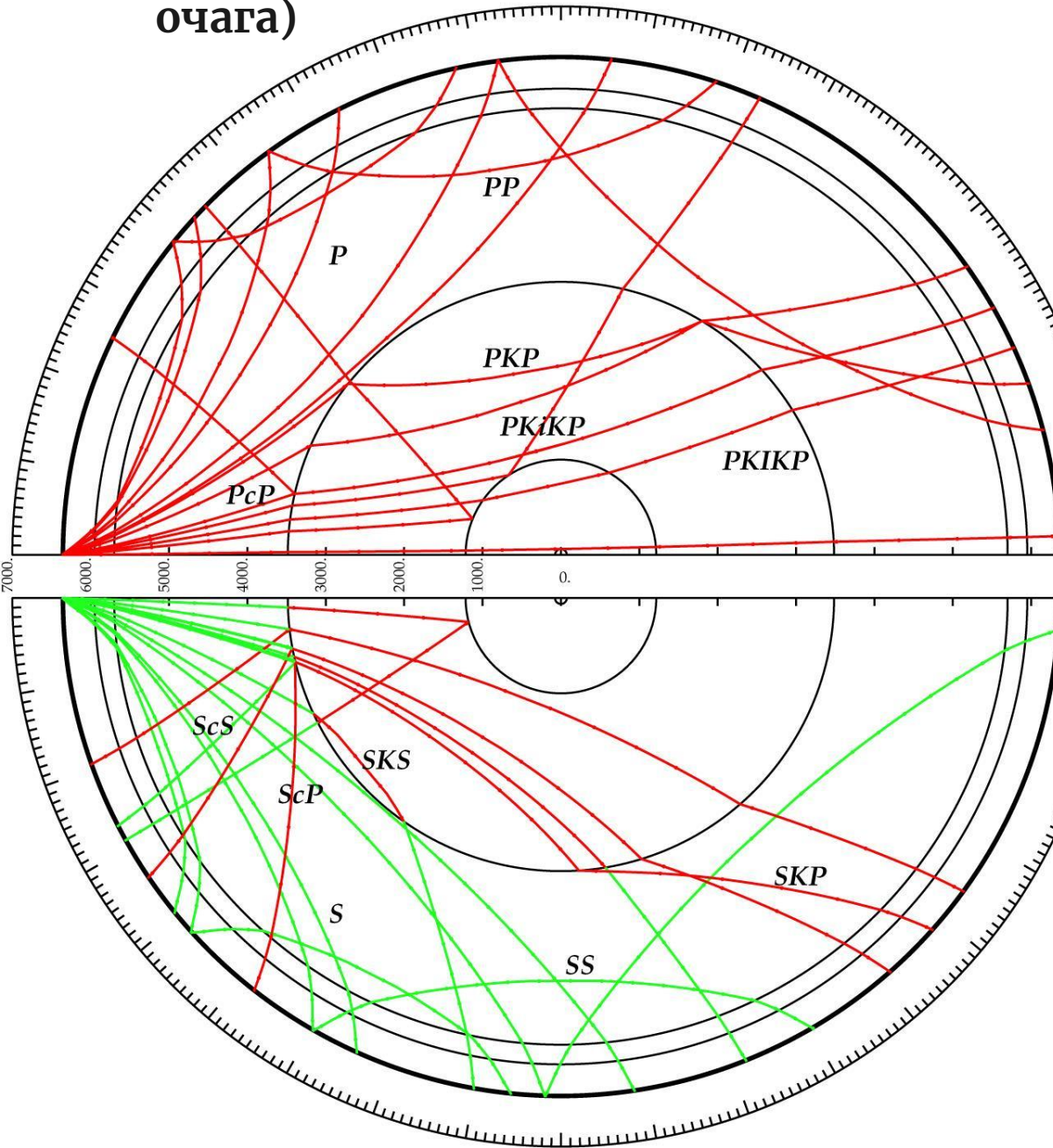


В 1991 году, была представлена одномерная скоростная модель **IASP91** [Kennett, B. L. N., E. R. Engdahl E. R., 1991]. Модель разрабатывалась в течение трех лет специальной подкомиссией по землетрясениям, Ассоциации по Сейсмологии и Физике Земных Недр (*IASPEI*). Основная цель работ – создание новых глобальных таблиц годографов сейсмических фаз, которые обновят стандартный годограф Джеффриса – Буллена (1940) и модель PREM(1981).

Различия между моделью AK135 и моделями SP6 и IASP91 в целом незначительные, кроме границы Внутреннего ядра Земли. Для этой границы был уменьшен градиент скорости, что привело к достижению удовлетворительных результатов для дифференциала годографа **PKP** фазы.



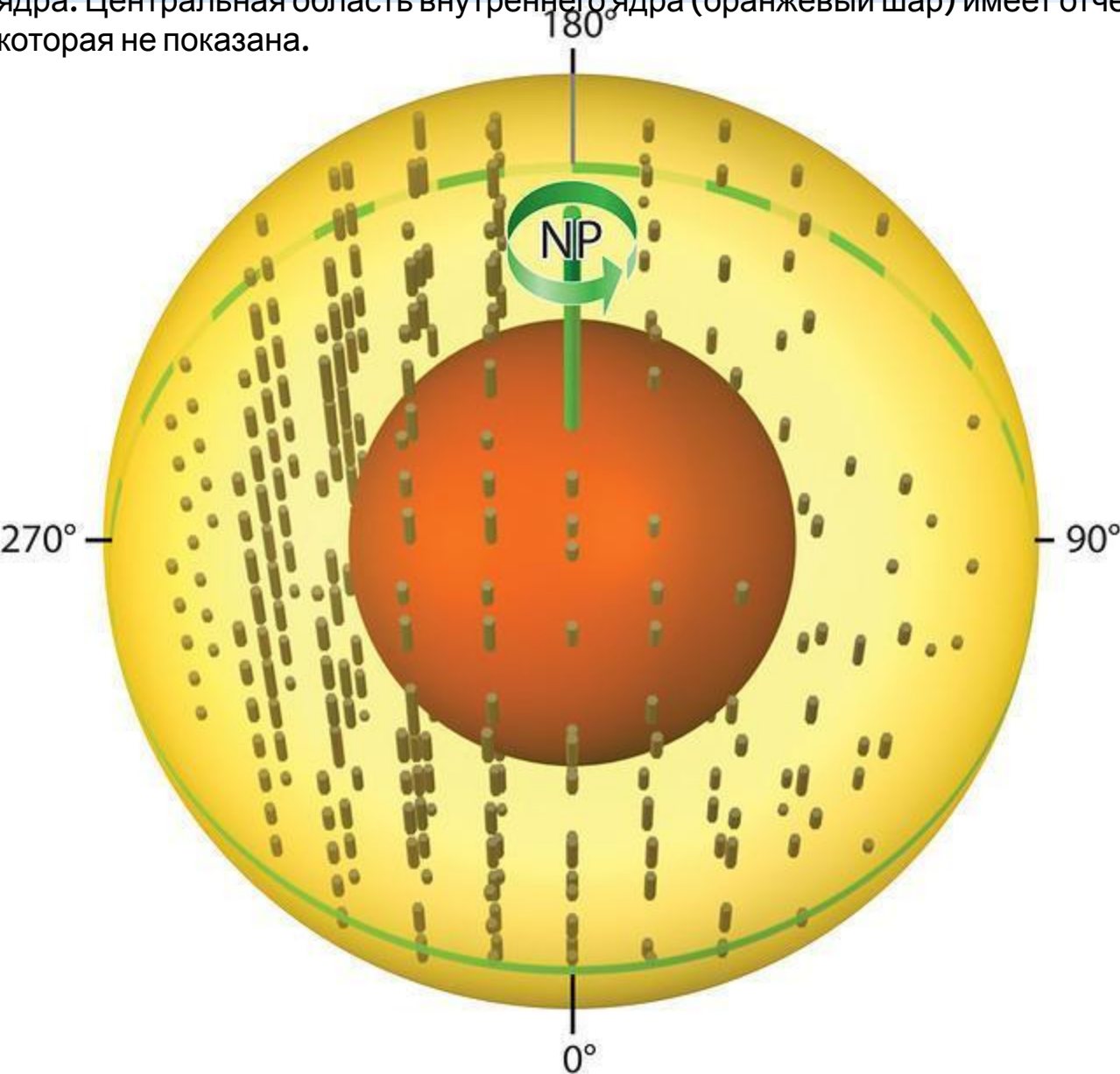
Сейсмические лучи основных фаз для модели АК135 (0 км глубина очага)



В настоящее время, ведутся работы по уточнению одномерной референтной модели Земли. Некоторые важные особенности сейсмического поля, выявленные в результате обработки сейсмограмм землетрясений и больших взрывов, в настоящее время, находятся в стадии осмысления. Анализируется достоверность таких особенностей, как:

- граница 220;
- граница 410;
- граница 520;
- граница 660;
- где находятся границы 410 и 660 и насколько они изменчивы;
- является ли граница 520 повсеместной, глобальной;
- возможно ли, чтобы природа границы 220 была обусловлена анизотропией сейсмических скоростей, а не с изменением скорости с глубиной;
- имеются ли глобальные границы в Нижней мантии;
- учет сферичности Земли, при выборе ее осредненной структуры;
- степень детальности модели;
- как учесть анизотропию скорости;

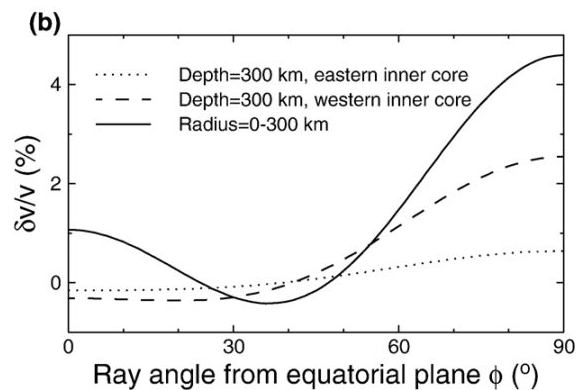
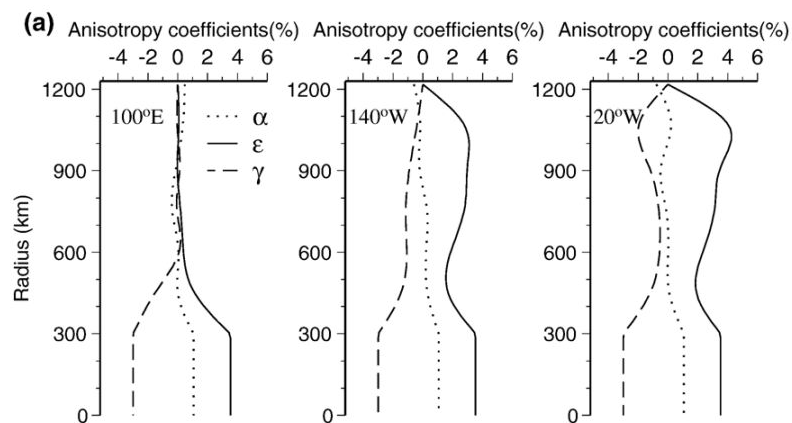
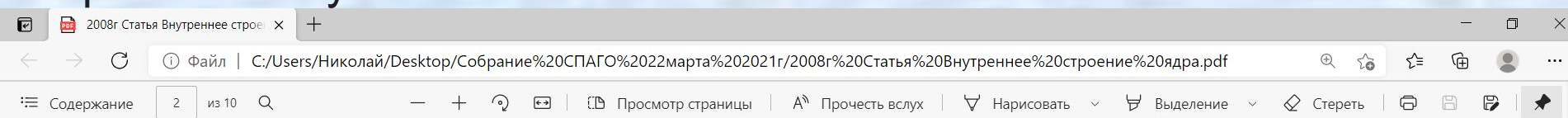
Трехмерное распределение анизотропной ткани во внешней части внутреннего сердечника. Стержни указывают направления, в которых продольные волны распространяются быстрее всего, а длина стержня указывает на контраст между быстрой и медленной скоростями в каждой точке. Внешнее внутреннее ядро имеет слабую анизотропию. Есть загадочная разница между восточным и западным полушариями внутреннего ядра. Центральная область внутреннего ядра (оранжевый шар) имеет отчетливую анизотропную ткань, которая не показана.



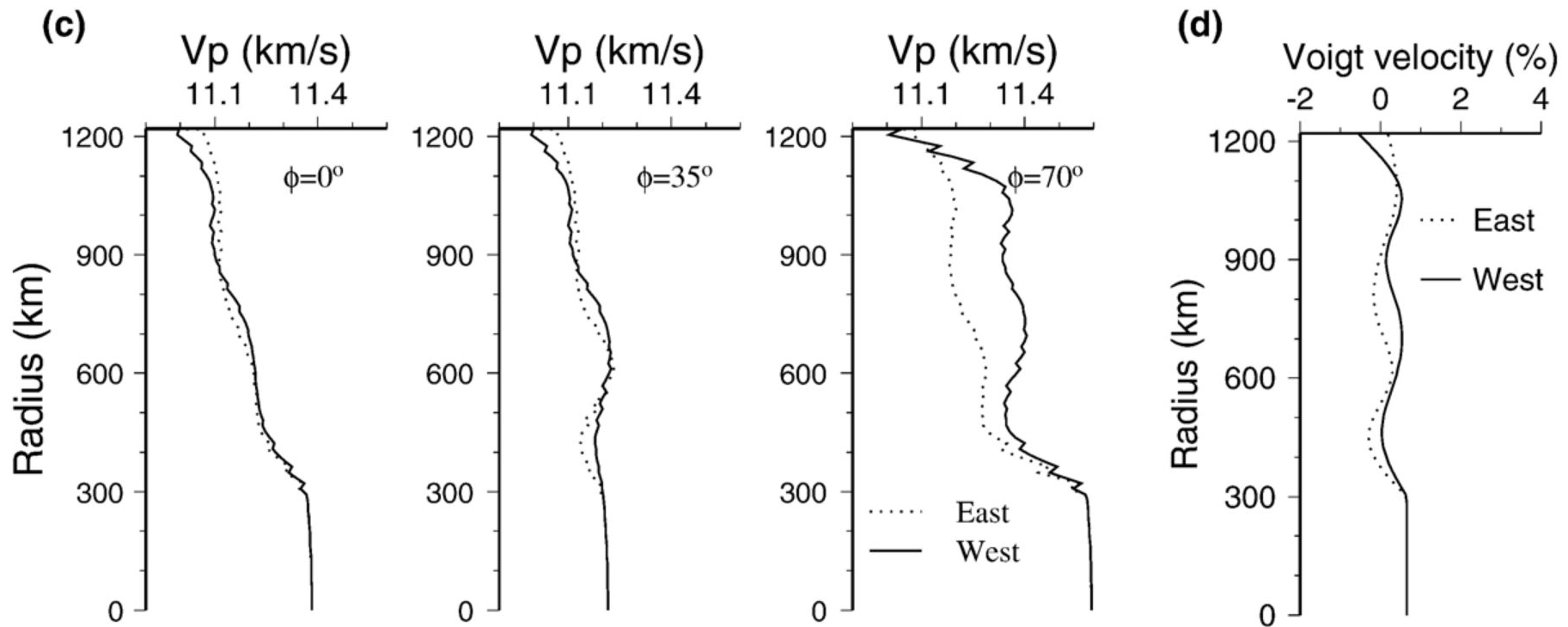
Центральная область внутреннего ядра имеет характерную анизотропию, а крайняя область почти изотропна. Крупномасштабные латеральные неоднородности возникают как по широте, так и по долготе во внешних частях внутреннего ядра; Скорости сейсмических волн выше, и сейсмические волны затухают в большей степени в восточном полушарии, чем в западном полушарии. Существует также мелкомасштабная (несколько километров) неоднородность во внутреннем ядре. Вся эта сложность является неожиданной и побудила физику минералов и геодинамическое моделирование железных фаз высокого давления и механизмов кристаллизации. Существует также мелкомасштабная (несколько километров) неоднородность во внутреннем ядре.

основные различия в конфигурации плит и в характере мантийной конвекции в прошлом могли быть отпечатаны на внутреннем ядре на более ранних стадиях его роста. Возможно, структура внутреннего ядра напоминает луковицу, в разных слоях которой записаны разные мантийные эпохи. Могут ли сейсмологи «очистить лук», чтобы выявить свидетельства истории роста внутреннего ядра и мантийной конвекции? Недавно опубликованные изображения внутреннего ядра показывают сейсмически отличное «внутреннее ядро» радиусом 600 км, за пределами которого восточное полушарие, но не западное, состоит из слоев

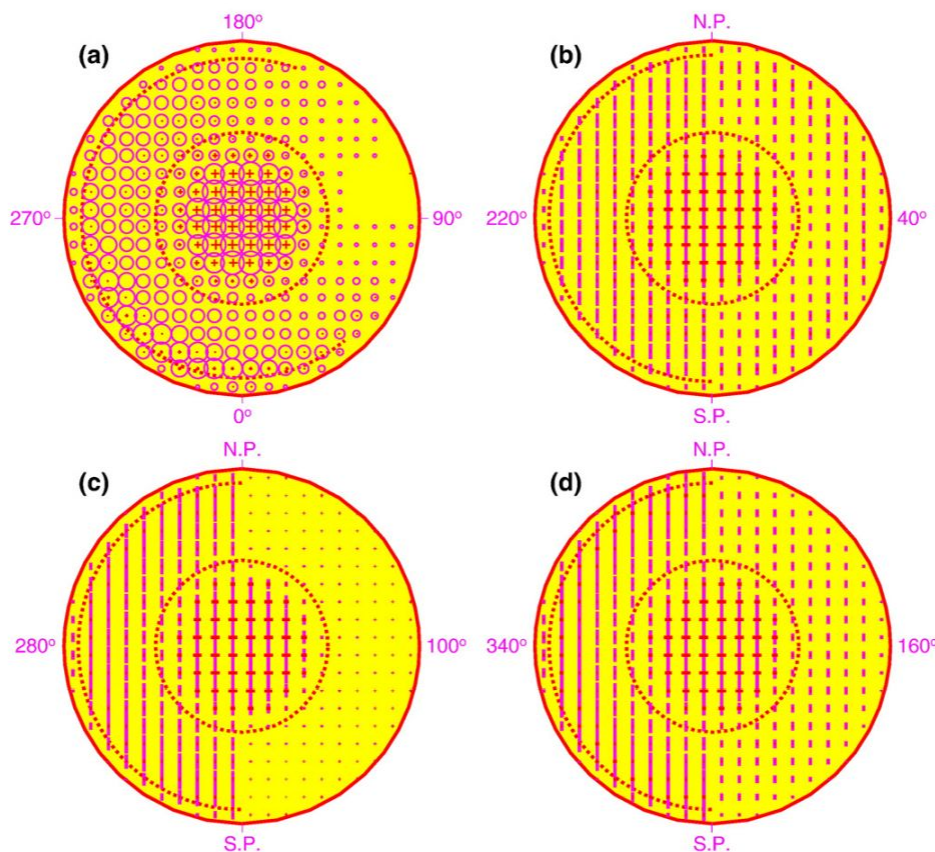
инверсии. (а) Коэффициенты анизотропии как функция радиуса на трех контрольных долготах. Значения для другие долготы представлены линейной интерполяцией этих значений. (б) Сравнение возмущений Р-скорости на разных глубинах внутреннего ядра как функции направления луча

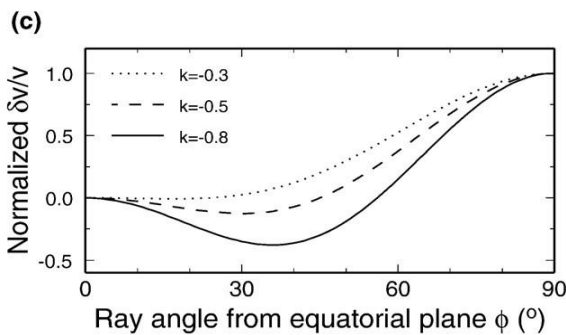
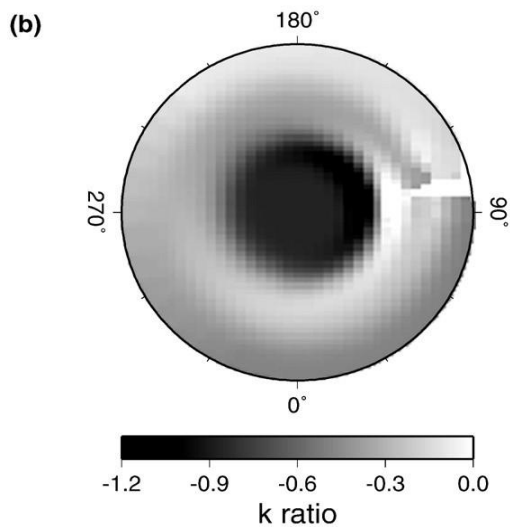
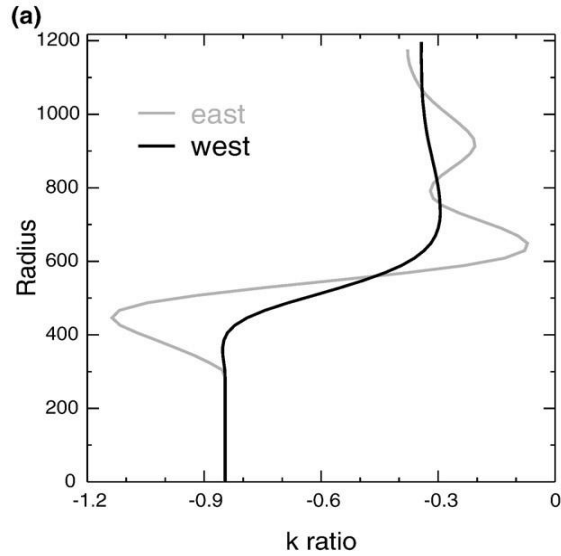


Усредненные профили скорости для восточного и западного полушарий внутреннего ядра в разных направлениях. (d) Средние значения Фойгта для восточных и западных полушария.



Изображение двухуровневой модели текстурирования внутреннего ядра, вид с Северного полюса (а) и вдоль меридианов 40° и 220° (b), 100° и 280° (с), и 160° и 340° (г). Внешний круг и внутренний круг ядра (пунктирные) обозначают ICB и радиус 590 км соответственно. Пунктирная линия в западном полушарии самого верхнего внутреннего core отмечает область, где анизотропия резко увеличивается с глубиной. (а) Кружки и плюсы указывают доли полярного выравнивания (f_1) и экваториального выравнивания (f_2) быстрая ось кристалла железа соответственно. Размер символа пропорционален дроби. (b – d) Сегменты линии показывают доли полярного и экваториального выравнивания.





Распределение коэффициента k для нашей трехмерной модели анизотропии внутреннего ядра. (a) Усредненное отношение k для восточного (серый) и западного (черный) внутреннего ядра в зависимости от радиуса. (b) Полярный вид отношения k как функции радиуса и долготы. Обратите внимание, что значение k изменяется примерно на половине радиуса внутреннего ядра на всех долготах.

https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BD%D1%83%D1%82%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%B5%D0%B5_%D1%8F%D0%B4%D1%80%D0%BE_%D0%97%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D0%B8

<https://uh.edu/~jbutler/physical/chapter19notes.html>

<https://studfile.net/preview/3068360/>

https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D0%B9%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%B0

<https://bookonline.ru/lecture/glava-2-stroenie-i-sostav-zemli>

https://studwood.ru/1218180/geografiya/yadro_zemli

<https://trv-science.ru/2010/06/zhelezo-nikel-kremnij-kislородnoe-yadro-zemli/>

<http://www.olegyakupov.com/blog/one-dimensional-reference-model-of-the-earth/>

<http://lowermantle.com/earth-models/one-dimensional-reference-model-of-the-earth/>

<https://www.iris.edu/gallery3/research/lrsp/SB20>

<https://www.nature.com/articles/454701a>

<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.210.7027&rep=rep1&type=pdf>