

# СЕЙСМОРАЗВЕДКА

Бакалавриат

● **Сейсморазведка** – представляет собой раздел разведочной геофизики, в котором изучаются поля упругих деформаций происходящих в геологических средах вследствие механических воздействий. Это взрывы, удары, техногенные вибрации, тектонические процессы, в частности землетрясения. Как и в других разделах геофизики поля разделяются на искусственные, используемые преимущественно в сейсморазведке, и естественные, которые изучают в основном в сейсмологии.

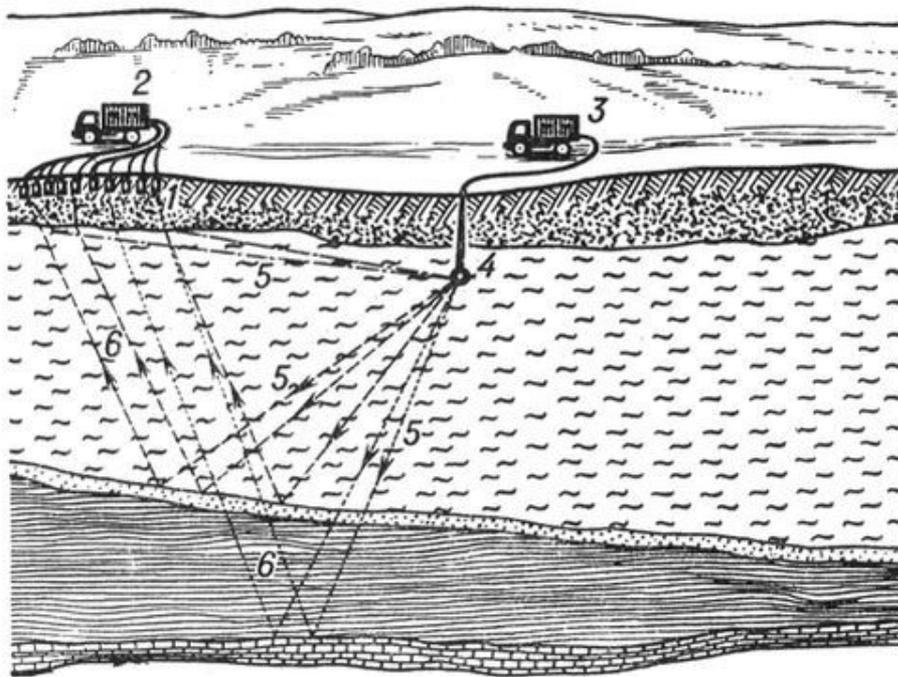


Схема сейсморазведочных работ методом отраженных волн: 1 — сейсмоприёмники; 2 — сейсморазведочная станция; 3 — взрывной пункт; 4 — место взрыва; 5 — прямая волна; 6 — отраженная волна.

- Если в природном объекте частицы жестко связаны между собой, то смещение одной частицы вызывает смещение другой (принцип домино). Происходит распространение упругой деформации с некоторой скоростью.
- В общем случае сейсмоволновое поле описывается дифференциальным уравнением 2-го порядка:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, \text{ где}$$

- $U$  – звуковой потенциал сейсмоволнового поля;
- $t$  – время;
- $V$  – скорость распространения продольной волны в породе;
- $x$  – координата смещения частиц.

- Волновое уравнение составлено на основе:
- 1) 2-го закона Ньютона:

- $F = a * m,$

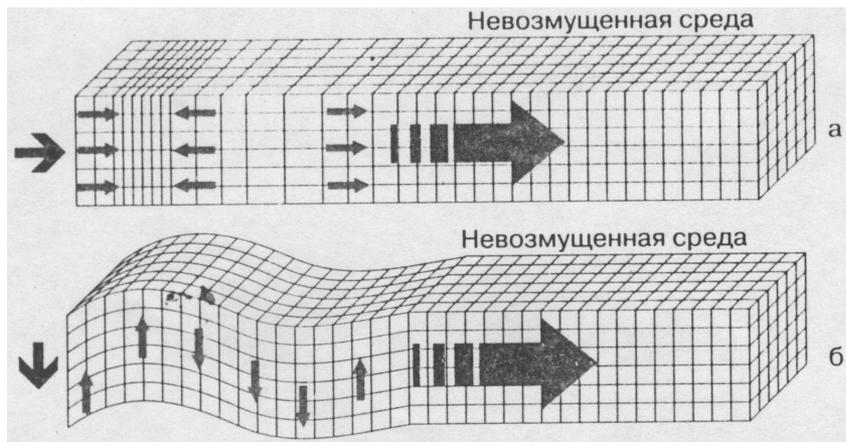
- где  $F$  – сила действующая на массу  $m$  с ускорением:

$$a = \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$$

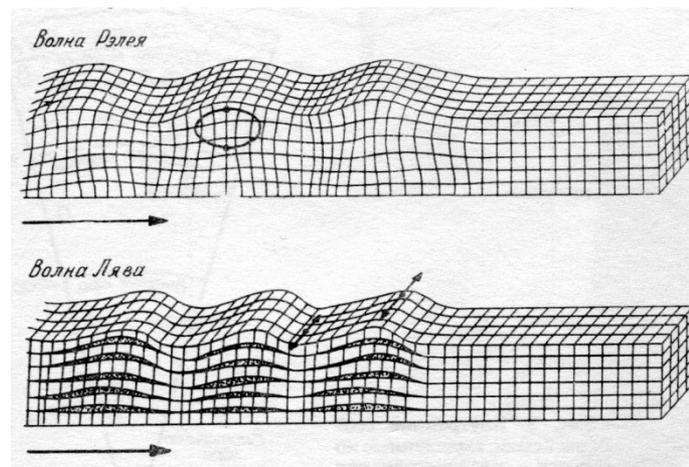
- 2) закона Гука:  $P_x = E * e_x$ , где  $P_x$  – приложенное напряжение,  $e_x$  – деформация,
- $E$  – модуль упругости (модуль Юнга).
- $E = \delta * V^2$ , где  $\delta$  – плотность.

# Виды сейсмических волн

- Деформации, возникающие в природных средах под действием механических напряжений, вызывают различные по своей природе волны: продольные ( $P$ ) и поперечные ( $S$ ).
- $P$ -волны – волны растяжения–сжатия.
- $S$ -волны – волны сдвига (колебания в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны).
- На свободной поверхности возникает особый вид колебаний, называемый поверхностными волнами (волны Релея и Лява).



Продольные ( $P$ ) и поперечные ( $S$ ) волны

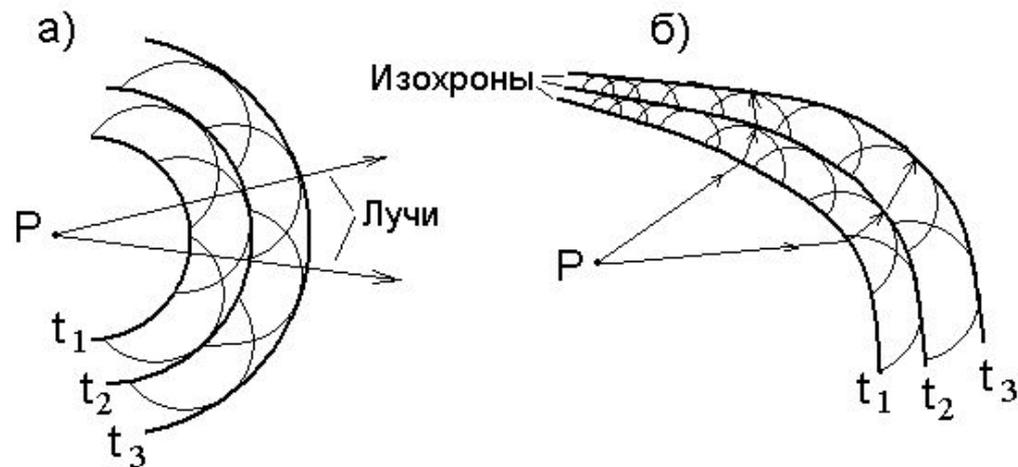


Волны Рэлея и Лява

# Принципы геометрической сейсмологии

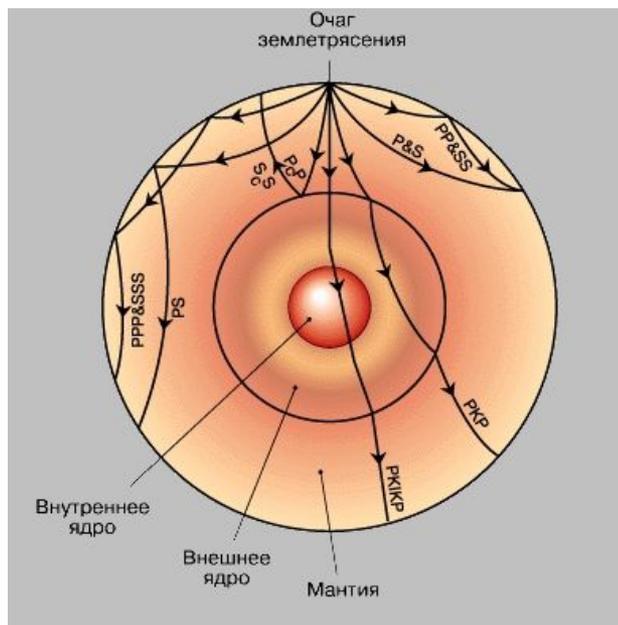
## сейсмологии

- В сейсморазведке при изучении особенностей распространения упругих волн пользуются законами геометрической оптики. Наиболее простыми являются кинематические схемы с лучевыми построениями. В их основе лежат два основных принципа:
  - 1) Гюйгенса-Френеля, 2) Ферма.
- Согласно принципу Гюйгенса-Френеля каждая точка среды самостоятельный источник волн. Форма этих волн - вид затухающих синусоид. Вся волновая поверхность является огибающей семейства элементарных волн (сфер малых радиусов). В однородной изотропной среде все лучи распространения волн прямолинейны, а в неоднородно-слоистой, в силу преломления, эти лучи криволинейны.



Принцип Гюйгенса для нахождения плоского волнового фронта в однородной (а) и неоднородной (б) средах

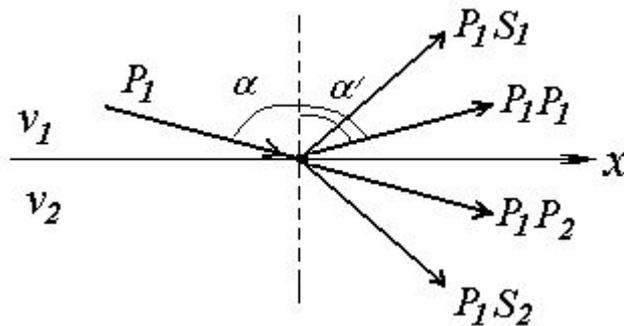
- Принцип Ферма формулируется следующим образом: волна распространяется между двумя точками по такому пути, который требует наименьшего времени для ее распространения. Следствием этого принципа является прямолинейность распространения волн в изотропной среде, когда скорость постоянна во всех направлениях.



- Важный принцип геометрической сейсмологии - **принцип суперпозиции**, согласно которому при наложении (интерференции) нескольких упругих волн их распространение можно изучать по отдельности для каждой волны, пренебрегая влиянием волн друг на друга.

# Типы сейсмических волн

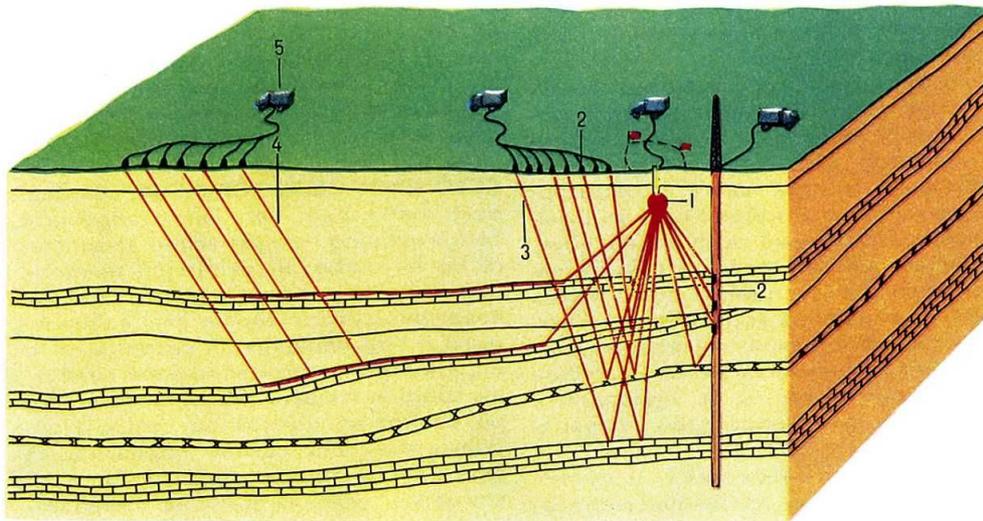
- Если в геологической среде создать источник упругих (сейсмических) колебаний, то от него, соответственно, по всевозможным направлениям будут расходиться сейсмические волны.
- Если выделить распространяющуюся от источника единичную, падающую под углом  $\alpha$  продольную волну, то в среде, где есть границы раздела, между которыми находятся слои отличающиеся по акустической жесткости  $A$  (произведение скорости  $v$  на плотность  $\delta$ , то есть  $A = v * \delta$ ), образуется еще четыре волны:  $P_1S_1$  – отраженная поперечная,  $P_1P_1$  – отраженная продольная волна,  $P_1P_2$  – проходящая продольная волна,  $P_1S_2$  – проходящая поперечная волна. Волна не поменявшая свой тип называется **монотонной**, а поменявшая **обменной**.



**Образование различных типов волн на границе двух твердых сред**  
а и  $\alpha'$  - углы падения и отражения волны

# Типы сейсмических волн

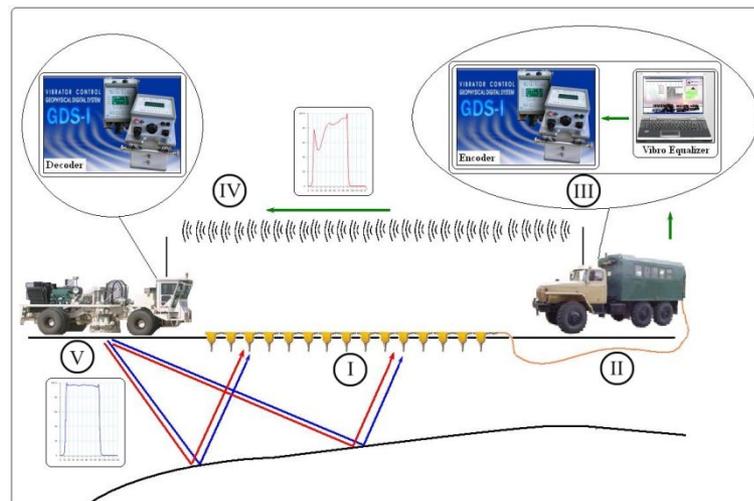
- Если в среде существует граница (границы) разделяющая среды, где нижележащий слой имеет скорость  $v_2$  большую, чем у вышележащих слоев, скорость которых  $v_1$ , то при падении лучей (сейсмических волн) на такую границу создаются головные (преломленные) волны. Они образуются только на определенном удалении от источника, когда возникает скользящая вдоль границы волна при угле падения  $\alpha$ , равному некоему критическому углу  $i$ :  $\sin(i) = v_1/v_2$



*Схема проведения сейсморазведочных работ: 1 - источники сейсмических волн; 2 - приёмники; 3 - отражённая волна; 4 - преломлённая волна; 5 - передвижная сейсморазведочная станция.*

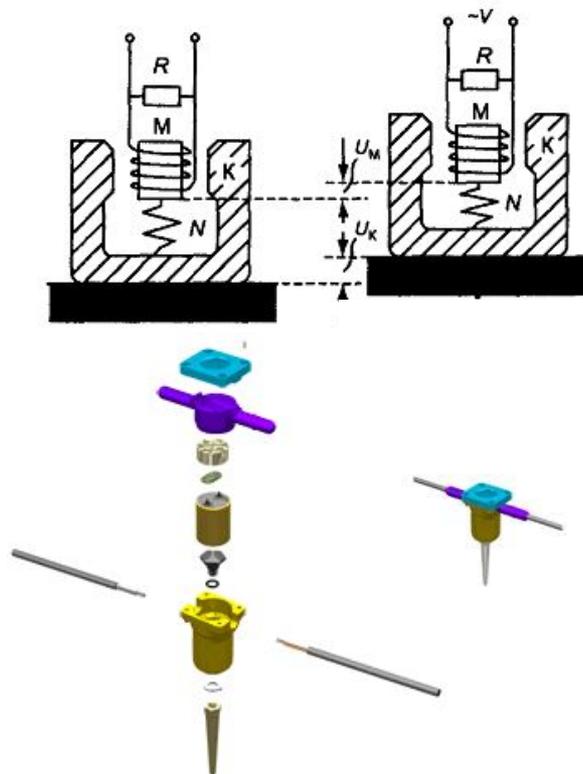
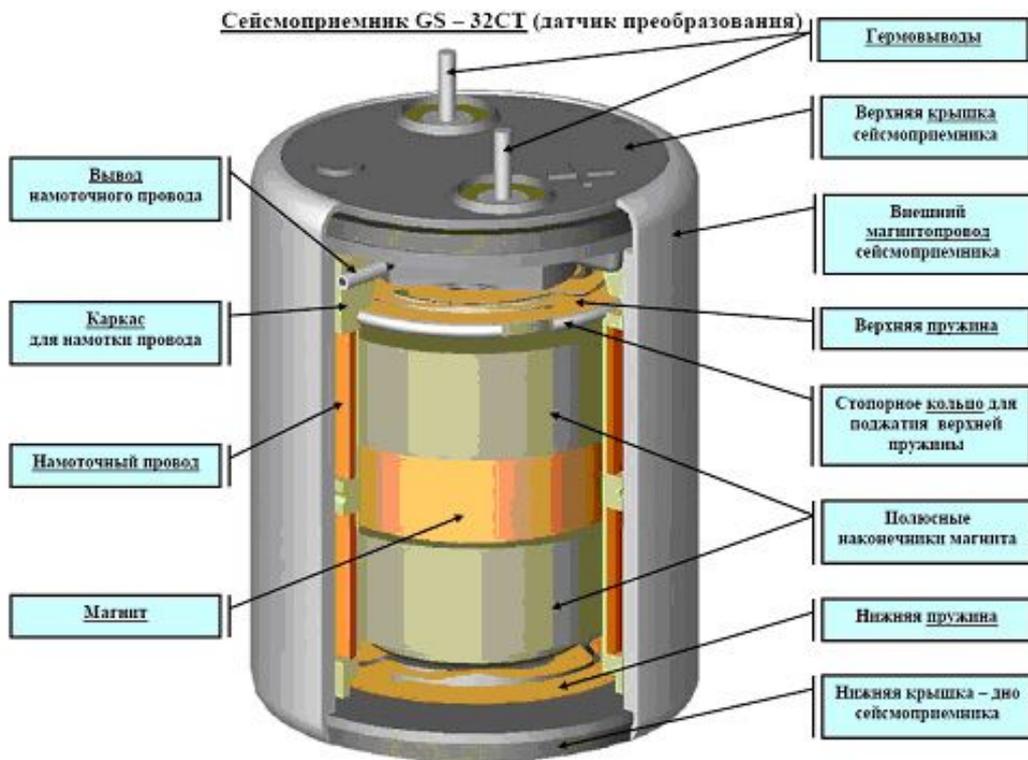
# Источники упругих колебаний

- Для возбуждения упругих волн на земной поверхности, в неглубоких (до 50 м) скважинах или в водоемах используются различные источники. Простейшими являются удары молотком, кувалдой или падающим грузом по земной поверхности.
- Долгое время основным способом создания упругих волн являлся подрыв взрывчатых веществ (ВВ) типа тротил, аммонит, порох весом от 100 г до сотен килограмм в скважинах, водоемах. Подрыв ВВ осуществляется с помощью электродетонаторов и специальной взрывной машинки, подающей в них высоковольтный электрический импульс.
- Ввиду сложности организации и проведения взрывных работ, а также их экологического вреда в последнее время используются разного рода невзрывные источники с импульсным ( $10^{-3}$  -  $10^{-1}$  с) или квазинепрерывным (2 - 20 с) возбуждением. По виду используемой энергии различают механические, гидравлические, газодинамические, пневматические, электродинамические и электрогидравлические невзрывные источники.
- В электроискровых источниках упругое поле создается электрическим разрядом в воде от электрической энергии, накопленной от какого-нибудь источника в конденсаторах. Под воздействием электровзрыва окружающая его жидкость образует перегретый пар или парогазовую полость давления, которая в окружающей жидкости создает упругую волну.
- В пневматической пушке в воду под высоким давлением выбрасывается воздух, накапливаемый в специальной камере.



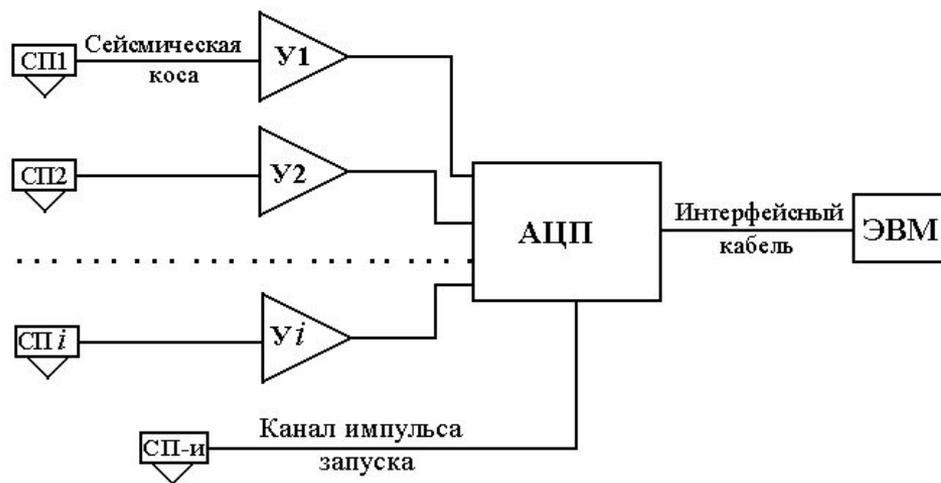
# Сейсмоприемники

- *Сейсмоприемники и пьезоприемники.* Для восприятия упругих колебаний почвы и преобразования их в регистрируемые электрические сигналы используются электродинамические сейсмоприемники (геофоны). Они состоят из магнита, в зазорах которого на пружинах подвешена алюминиевая катушка с проводом. При смещении магнита под воздействием упругой волны катушка по инерции остается на месте, но относительно магнита перемещается. В результате в ней индуцируются электрические сигналы, пропорциональные скорости смещения почвы.
- Для морских работ используются пьезоприемники (гидрофоны). Их работа основана на пьезоэлектрическом эффекте, т.е. возникновении э.д.с. на гранях некоторых кристаллов (например, титаната бария) при приложении к ним давления. Упругая волна, распространяясь в воде, изменяет давление, приложенное к сейсмоприемнику, и на его выходе появляются электрические потенциалы. Сейсмо- и пьезоприемники подключаются к сейсмическим косам - жгуту проводов (по два на приемник) а те к блоку усилителей.



# Сейсмостанции

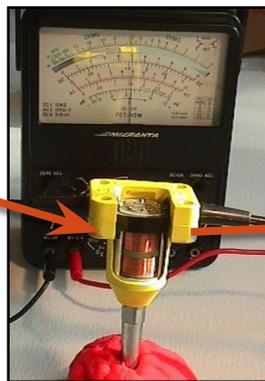
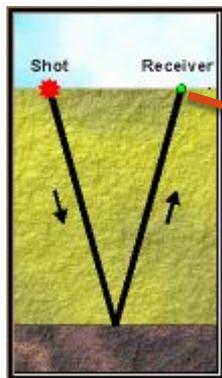
Совокупность усилительных каскадов и регистрирующих устройств составляют сейсморазведочную станцию. Электрические сигналы от сейсмоприемников поступают на входы сейсмических усилителей и далее через коммутирующее устройство на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). Кодирование сигналов начинается лишь с момента поступления сигнала синхронизации с усилителя-формирователя импульса запуска, на вход которого подключается сейсмоприемник, устанавливаемый на землю рядом с пунктом возбуждения.



# Сейсмотрасса

- Данные, записанные от одного «взрыва» (одна детонация взрывного или невзрывного источника энергии) на одну точку приема, именуется сейсмической трассой, и записывается как функция времени (время с момента взрыва). Т.к. это время представляет собой время, которое потребовалось энергии, чтобы пройти сквозь землю, отразиться и затем вернуться к поверхности, его было бы правильнее назвать «временем в оба конца», а вертикальная шкала обычно измеряется в миллисекундах (одна тысячная секунды – 0,001 сек).

Сейсμοприемник преобразует механические колебания в электрические сигналы

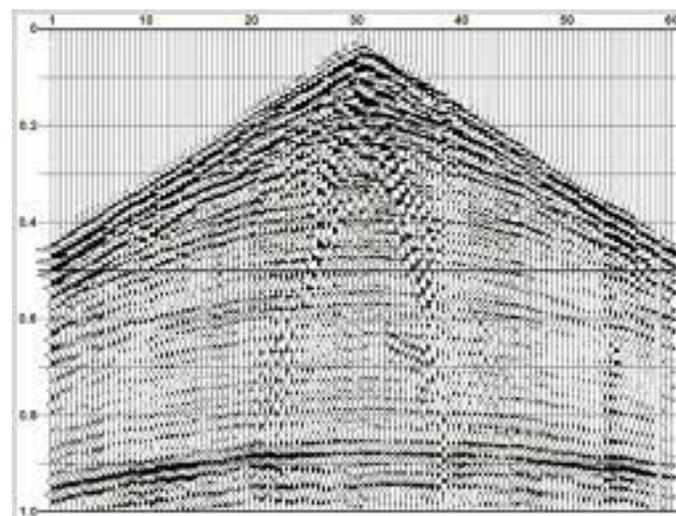
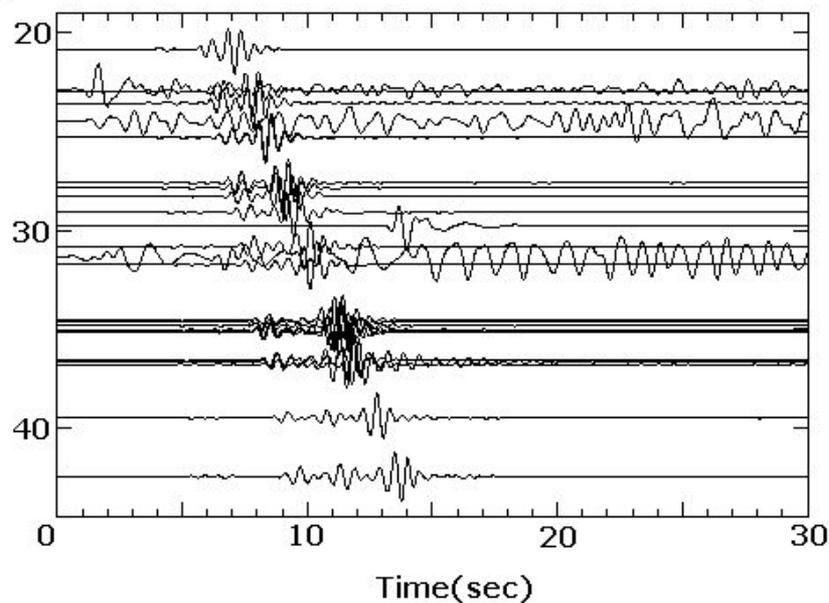


То, что мы видим, как сейсмическую трассу, есть ни что иное, как ряд чисел, где каждое число представляет собой амплитуду (или высоту) сейсмической трассы в определенный момент времени.



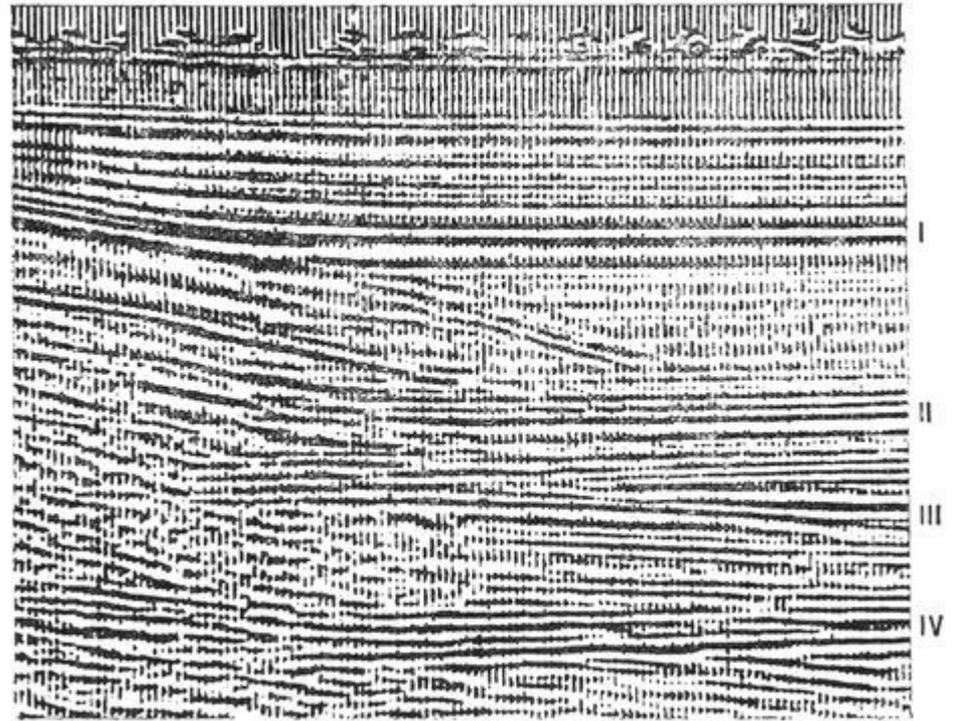
# Сейсмограмма

- Совокупность сейсмоотрасс, расположенных по установленному порядку называется сейсмограммой



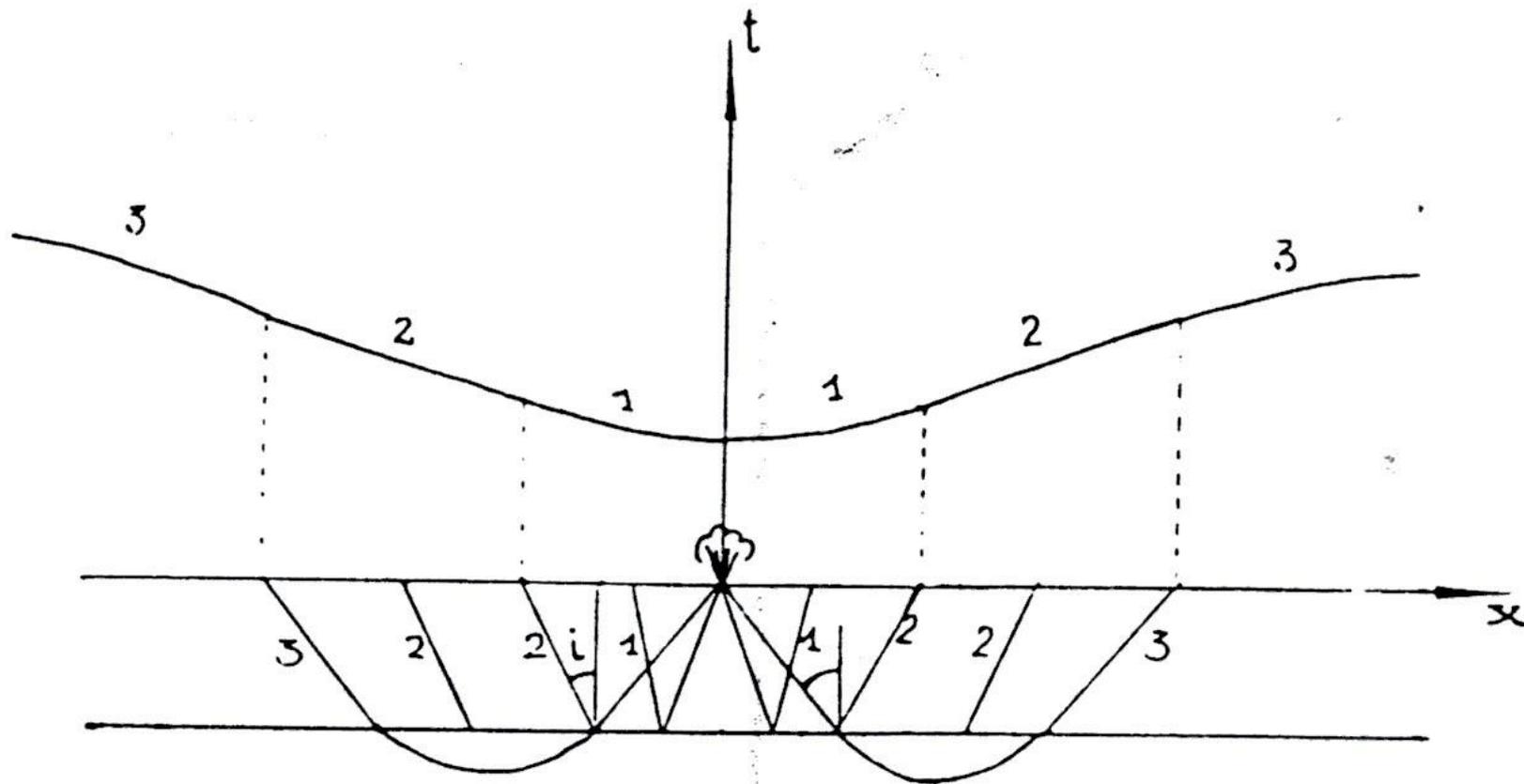
# Временной разрез

- Суммарные временной или глубинный разрезы получают путем суммирования сейсмоотрасс после введения в них статических и кинематических поправок.



На основе принципов лучевого приближения (геометрической сейсмологии) можно получать графики зависимости времени прихода волн  $t$  от расстояния  $x$ , отсчитываемого от пункта возбуждения волн. Такие графики называются годографами. Их строят для основных групп волн, отличающихся по способу распространения в среде. Это волны: 1) отраженные (отразившиеся от границ между слоями с различной акустической жесткостью), 2) преломленные или головные (образовавшиеся на границах между низкоскоростным слоем сверху и высокоскоростным слоем снизу), 3) рефрагированные (возникающие в средах, где происходит увеличение скорости с глубиной).

# Годографы волн



Волны: 1 – отраженная, 2 – преломлённая, 3 – рефрагированная

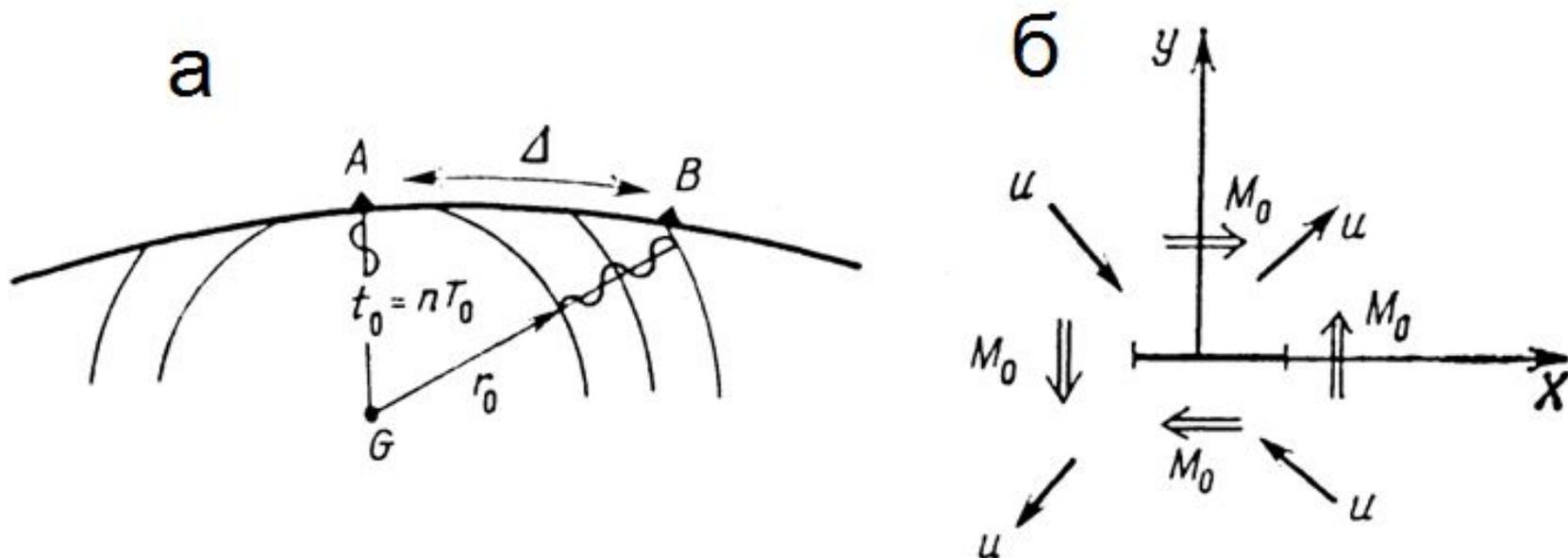
Землетрясения и сейсмология. Акустика океана.

Сейсмоволновое поле Земли в отличие от гравитационного, магнитного, теплового, являющимися преимущественно стационарными, относится к динамическим переменным полям, причём полям неравномерно-пульсирующим. По своей природе это поле близко к переменным электромагнитным полям Земли. Поэтому правильно говорить о пульсирующих сейсмоакустических полях. Последние в сейсмометрии, как и в электрометрии, разделяются на естественные, включая шумовые, и искусственные.

Из естественных сейсмических полей наиболее частыми и значимыми являются упругие поля землетрясений.

Под *землетрясением* понимают процесс, при котором выделяется энергия в виде упругих колебаний. Область локализации максимальной энергии упругих колебаний называется очагом землетрясения или его гипоцентром. Он обозначается буквой  $G$ , а радиальная проекция этого гипоцентра на поверхность Земли есть эпицентр  $A$ .

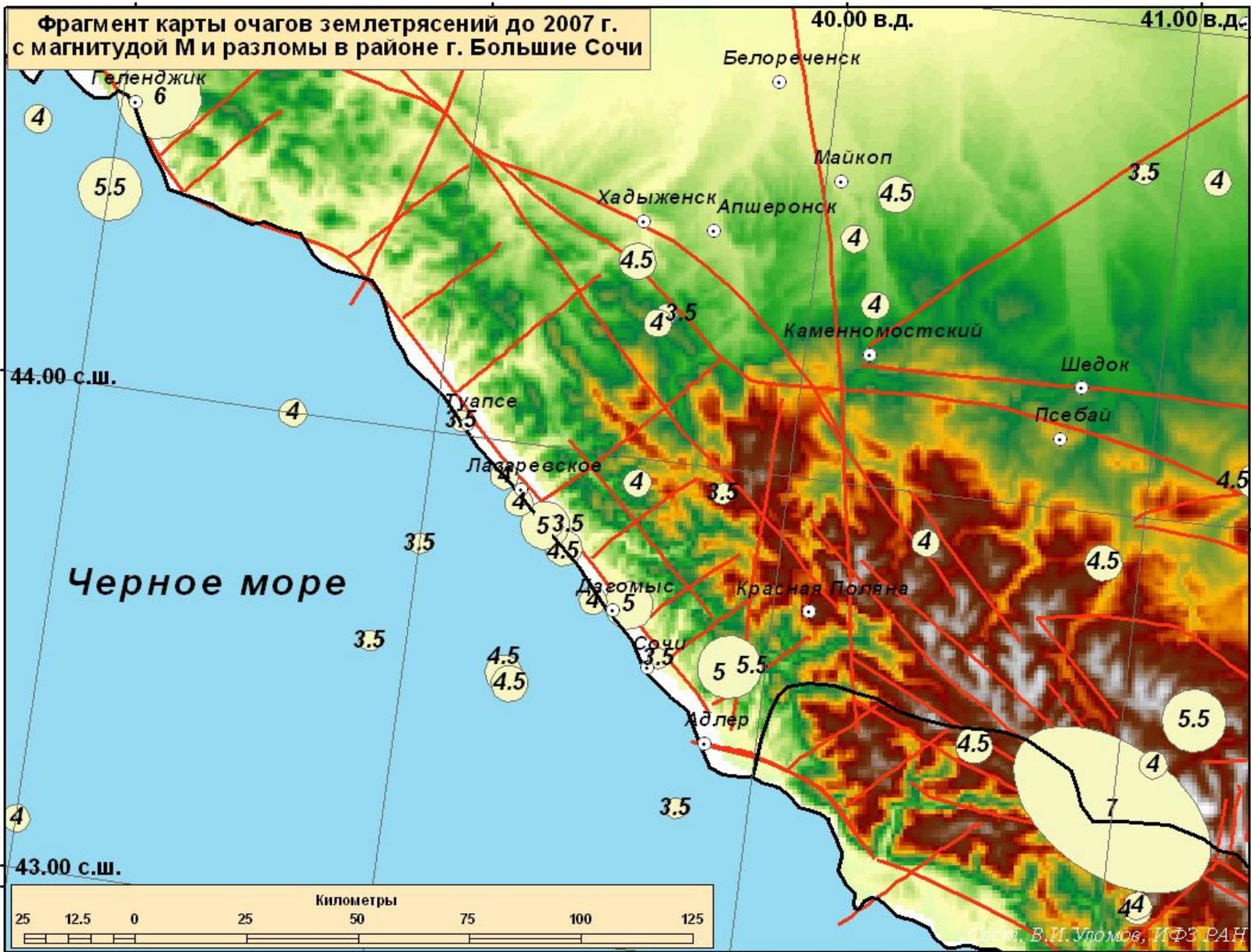
Схема распространения упругих волн от очага землетрясения (а) и направления смещений вблизи очага (б)



От  $G$  расходятся продольные и поперечные волны, а от  $A$  поверхностные волны Лява и Релея.

Зоны землетрясений распределены по земному шару неравномерно и приурочены к активным региональным разломам или связаны с резкой сменой физических показателей земной коры и мантии. На таких границах образуются объемные (отраженные и преломленные) и обменные (переход продольной волны в поперечную и наоборот) волны.

Фрагмент карты очагов землетрясений до 2007 г.  
с магнитудой  $M$  и разломы в районе г. Большие Сочи



Различные по энергии землетрясения оцениваются по показателю, называемому магнитудой  $M$ .

$$M = \log \left[ \frac{a(\Delta)}{a_0(\Delta)} \right], \text{ где}$$

$a$  и  $a_0$  – амплитуды колебаний:  $a$  – в точке наблюдения,  $a_0$  – стандартная (отклонение в 1 мк на 100 км),  $\Delta$  - эпицентрального расстояние.

После каждого землетрясения образуются упругие волны с частотами  $f = 0,01 - 10$  Гц. Дальность распространения зависит от  $h$ , интенсивности землетрясения, поглощающих свойств среды.

Различают землетрясения:

а) Неглубокие.  $h$  30-70 км. Причина образования связана с разрядкой напряжений в результате деформаций земной коры.

б) Промежуточные.  $h$  70-300 км. Причина образования, по всей видимости, связана с перенапряжениями при перемещении блоков земной коры.

в) Глубокие.  $h$  300-700 км.. Причина образования связана с неустойчивым состоянием вещества в астеносфере и дифференциацией вещества в мантии Земли.

«Спусковым механизмом» практически для всех групп землетрясений является пульсационная активность Солнца (в частности, замечена 22-х летняя периодичность).

Количество землетрясений в год около 800 тыс. При сильных землетрясениях возникают собственные колебания Земли, которая подобно колоколу излучает сверхинфрахастотные колебания с частотой менее 0,001 Гц. Поэтому поле упругих (сейсмических) колебаний существует в Земле практически постоянно.

При изучении сейсмического поля Земли главная задача состоит в прогнозировании катастрофических землетрясений в сейсмоопасных зонах. Важен также сейсмический мониторинг в зонах, где возникают местные землетрясения.

Возбуждаемые землетрясениями поверхностные волны играют большую роль в изучении литосферы и верхней мантии Земли. Эти волны характеризуются большими периодами колебаний (от 30 до 300 с). Их скорости меньше скоростей объемных поперечных волн, амплитуды колебаний уменьшаются с глубиной по экспоненциальному закону.

К шумовым полям относят две категории полей:

1) Поля деформационных процессов при извержении вулканов, возникновении горных ударов в шахтах и карьерах, а также обвалов, оползнеобрушений в горной местности и по берегам водоемов и рек. Это шумовые поля преимущественно звукового диапазона частот (10 Гц–10 кГц).

2) Поля деформаций земной коры вследствие технологической деятельности. К ним относятся участки разработки нефтегазовых, угольных и рудных месторождений, а также территории мощных вибрационных сооружений (ГЭС, ТЭЦ и др.). Более мелкий порядок – это поля от вибраций на железных и шоссейных дорогах, заводах и др. промышленных объектах крупных городов.

Особое значение для изучения сейсмического поля Земли имеют её собственные колебания. Последние, как уже выше подчеркивалось, возникают вследствие землетрясений большой магнитуды.

Возбуждаемые колебания делят на два класса: Крутильные – сдвиговые колебания, где вектор смещения перпендикулярен к радиусу Земли.

Сфероидальные – объемные пульсации, где вектор смещения изменяется по радиусу в различных азимутальных направлениях.

Крутильные колебания обозначаются буквой *T*. Они связаны только с твердой оболочкой Земли.

Сфероидальные колебания обозначаются буквой *S*. Они связаны с распределением зон сжатия и расширения Земли и захватывают весь объем планеты.

Совершенствование приборов и развитие математического аппарата позволяет исследовать не только сферически симметричную модель Земли, но и наличие в ней неоднородностей.