

Курс лекций по специальности
25.00.03 «Геотектоника и геодинамика»
(по программе кандидатского минимума по геолого-минералогическим наукам)

занятие 7, раздел 3

Методы изучения тектонических движений, (часть 1)

Институт физики Земли РАН,
аспирантура ИФЗ РАН
доцент Ф.Л. Яковлев, 2020-2021,
Дата занятия 18-01-2021

ПЛАН ЗАНЯТИЙ (18-01-2021)

раздел 3. Методы изучения тектонических движений (3 часа)

А

Современные тектонические движения, вертикальные и горизонтальные. Методы их изучения, в том числе лазерная геодезия, метод лазерных отражателей на спутниках, радиоинтерферометрия, GPS. Изучение современного напряженного состояния земной коры, сейсмогенные движения и решение фокальных механизмов землетрясений.

Методы изучения движений геологического прошлого.

Анализ фаций и мощностей, в том числе применительно к горизонтальным движениям по сдвигам и шарьяжам.

Объемный метод.

Анализ перерывов и несогласий.

(18-01-2021; длительность 2 часа)

Б

Палеомагнитные методы, основанные на определении ориентировки векторов остаточной намагниченности и на изучении линейных аномалий океанского дна.

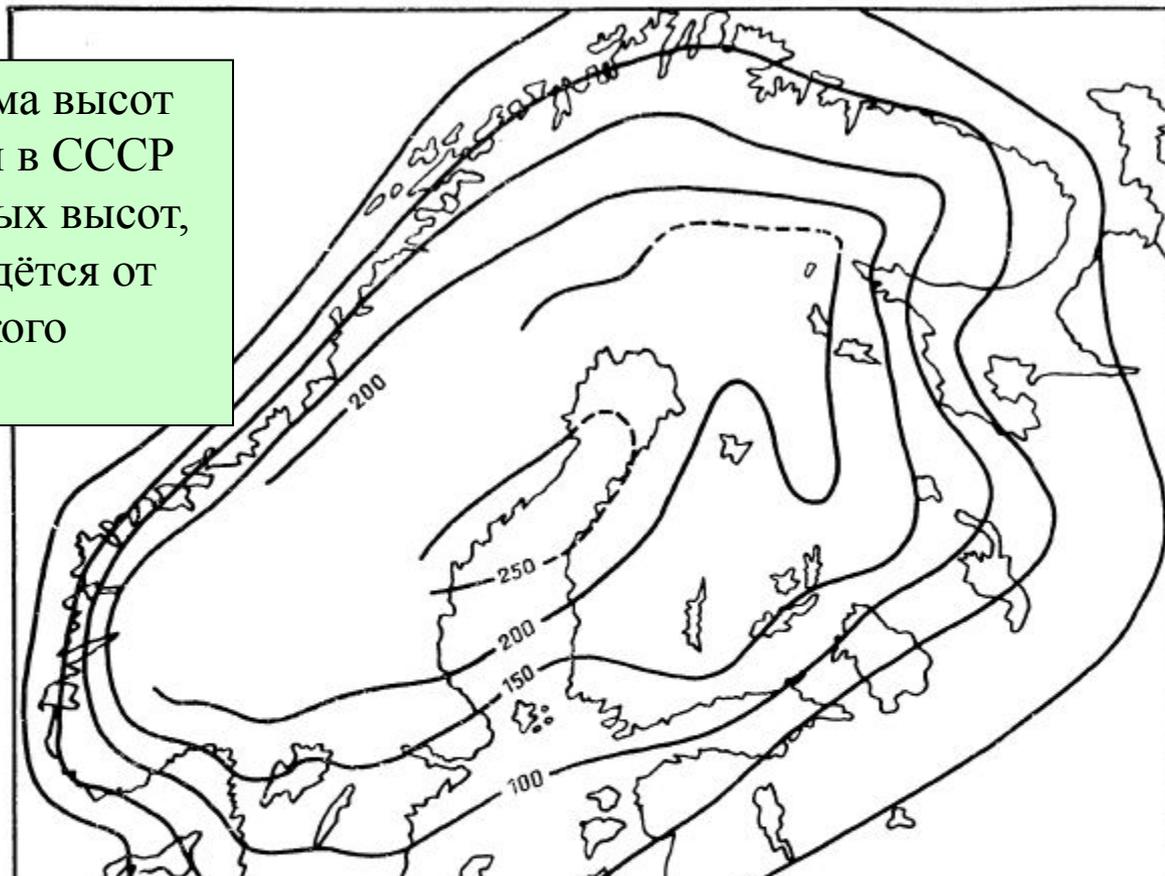
Специфика изучения новейших (неотектонических) движений, структурно-геоморфологический анализ.

(длительность 1 час)

Современные тектонические движения, вертикальные и горизонтальные.

Вертикальные

Балтийская система высот (БСВ) — принятая в СССР система нормальных высот, отсчёт которых ведётся от нуля Кронштадтского футштока



риборы
за

Общая амплитуда поднятия в центре свода за 9 тыс. лет составила около 250 м. Установлено, что движение носило замедленный характер: 9 тыс. лет назад оно происходило со скоростью 13-8 см/год, 7-6 тыс. лет назад скорость снизилась до 2 см/год, а сейчас она составляет 1 см/год.

В Голландии, где жители уже много веков строят плотины, чтобы защититься от наступающего моря, земная кора опускается сейчас со скоростью 0,1-0,7 см/год.

(Белоусов)

Эвстазия

[от эв... и гр...

Мирового океана

воды (гляци...

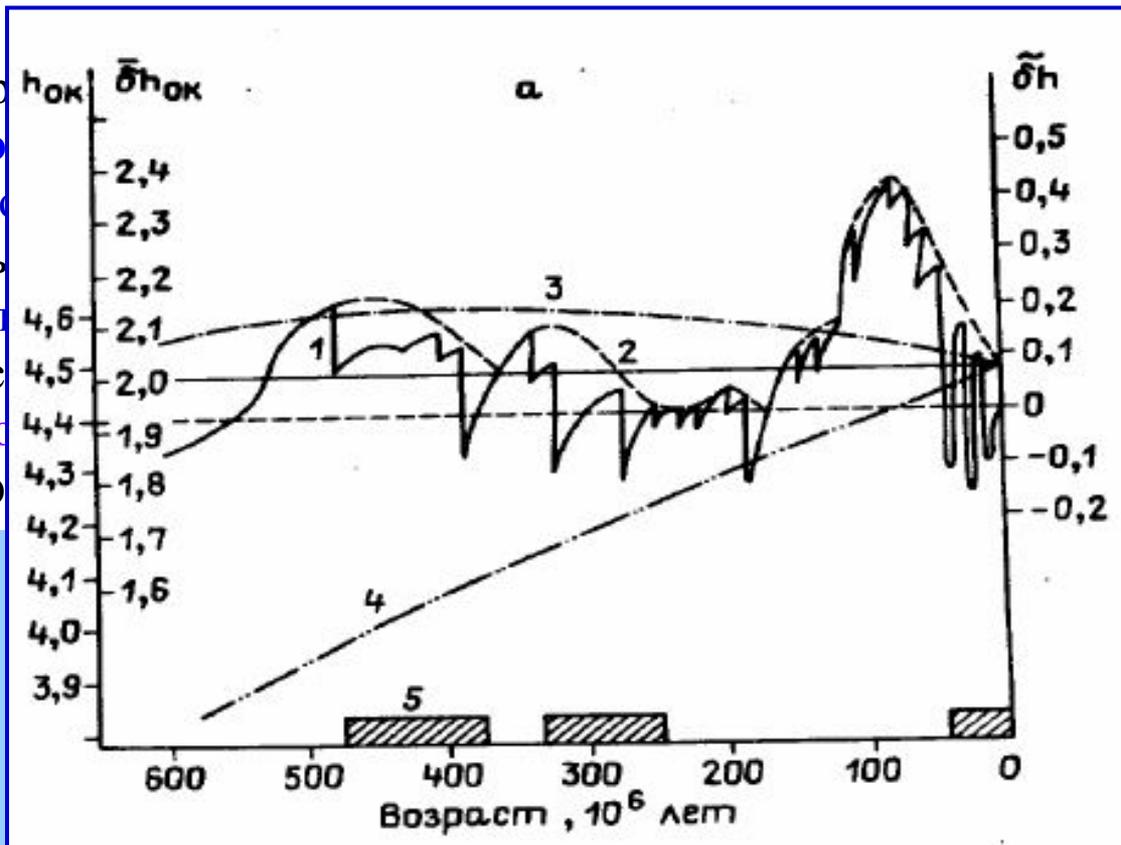
температуры

(тектонэвст...

которых дос...

частях Мир...

вливают на ф...



колебаний уровня

океана либо морской

воды, вариации

уровня

амплитуда

колебаний во всех

частях Мирового

океана, существенно

Рис. 1

—

эво...

глю...

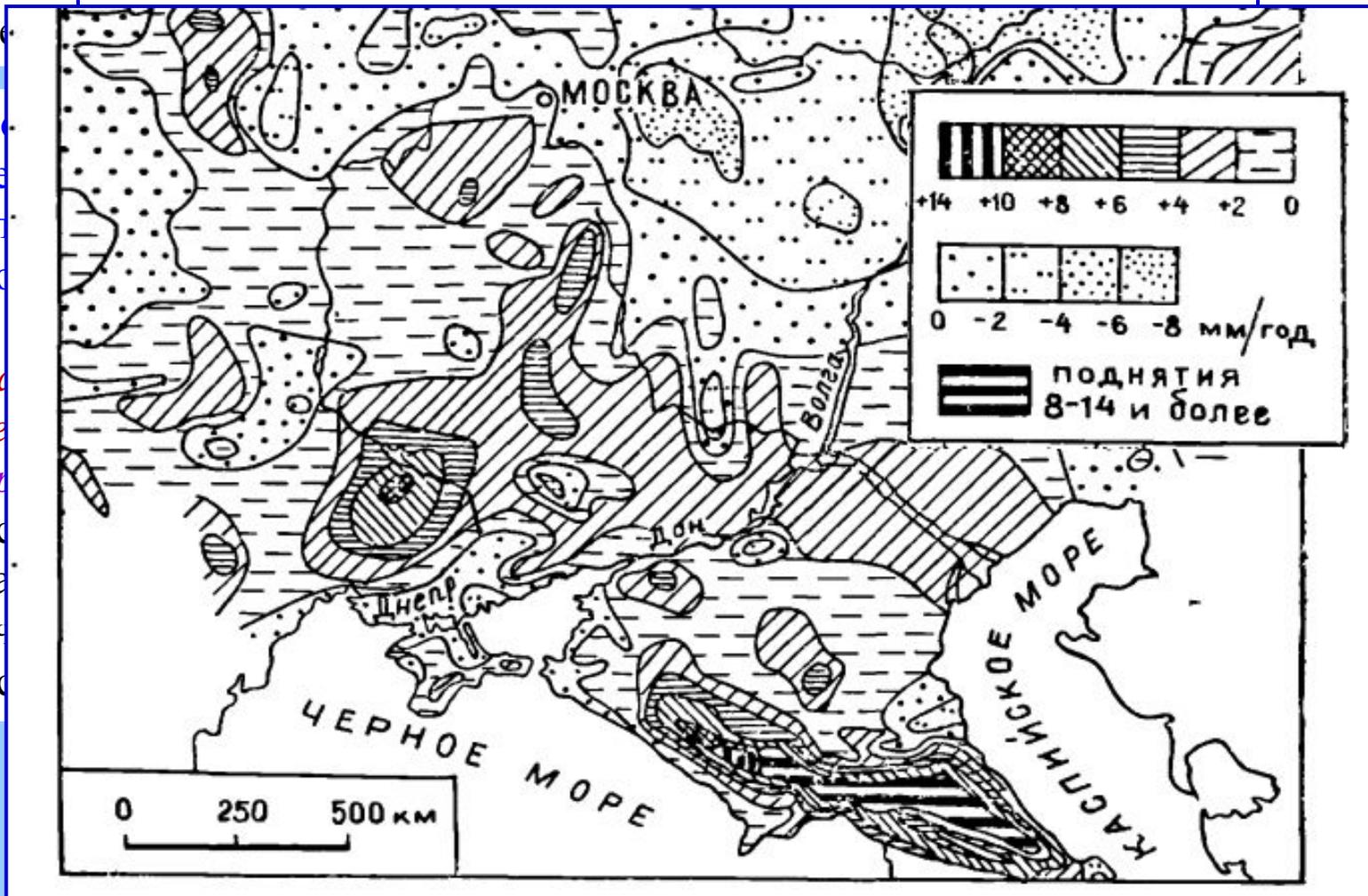
оке...

В геологической литературе долго шли споры о том, что служит основной причиной колебания уровня океана и связанных с ним морей — тектонические движения земной коры континентов или собственные, эвстатические, колебания уровня океана обусловленные изменениями объема бассейнов или заключенных в них масс воды. Это противоречие было разрешено лишь в 20-е годы нашего века финским геологом В. Рамзаем, указавшим, что в действительности взаимодействуют оба фактора — тектонический и эвстатический. (Хаин)

и
ния

Метод повторного нивелирования. По мере строительства железных дорог появилась необходимость периодического высокоточного нивелирования вдоль их линий для выявления изменений

Скорость
 выше
 отдален
 геоморф
 Этот
 1) *ре*
совре
 2) *вер*
 предост
 доста
 отлич
 недос



$$0.01 \text{ м} * 1.000.000 = 10.000 \text{ м}$$

Горизонтальные движения (Хаин)

Основным методом изучения горизонтальных движений до недавнего времени служили **повторные триангуляции**, которые вначале также проводились не в целях выявления тектонических смещений и лишь затем стали использоваться в этом направлении.

«В настоящее время изучение горизонтальных движений производится с помощью **лазерных дальномеров**». Основные виды работ - **изучение деформаций при землетрясениях** (база 2-5 км). Смещения при крупных землетрясениях достигают 1 - 10 м.

В настоящее время используются два других, значительно более точных метода повторного **измерения расстояния между удаленными пунктами**:

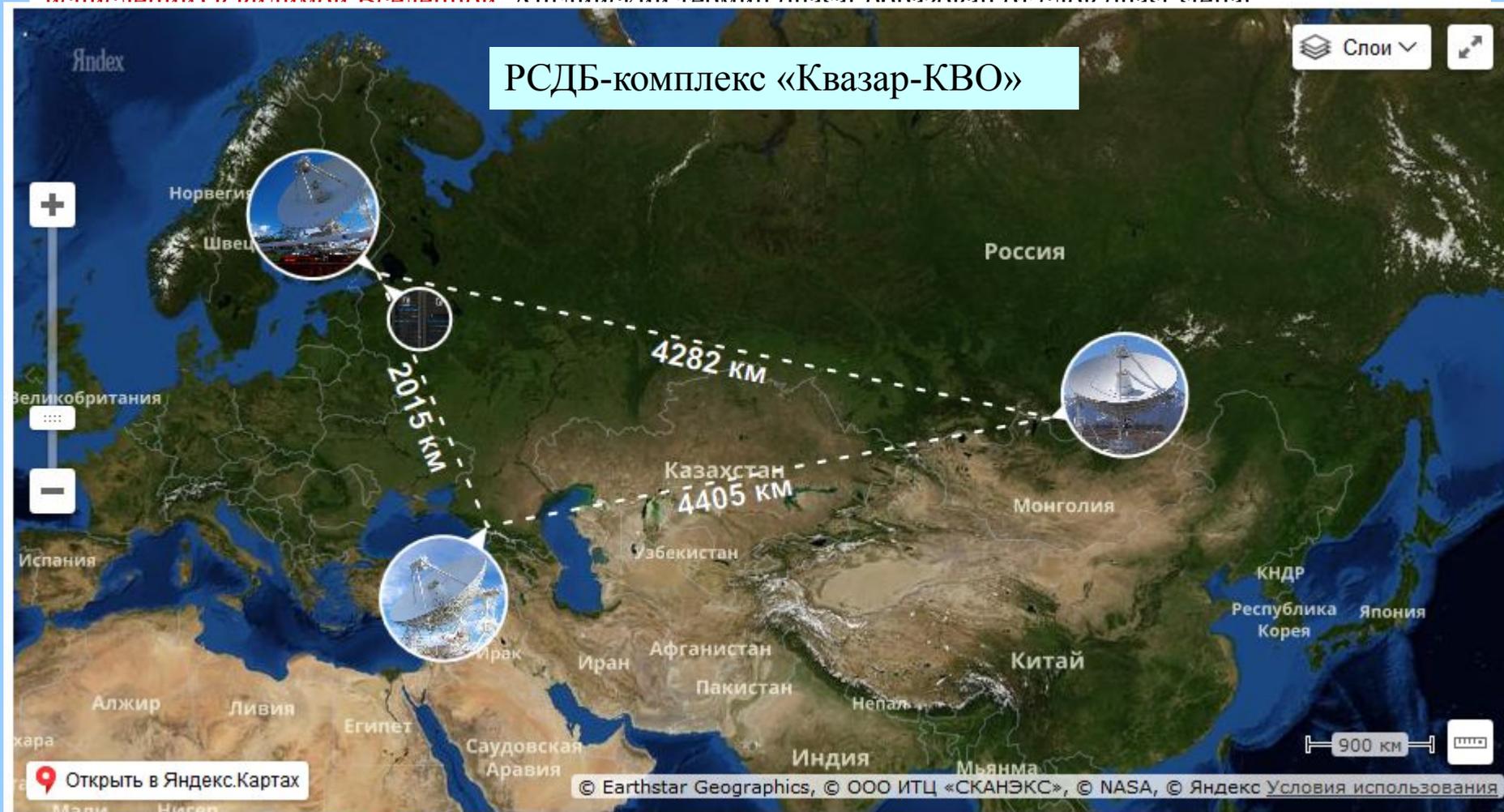
- 1) с помощью **лазерных отражателей**, установленных на Луне или на искусственных спутниках Земли;
- 2) с помощью регистрации **радиосигналов от квазаров** (**длиннобазовый радиоинтерферометрический метод**).

Точность определения относительного смещения плит этими методами достигла порядка сантиметра в год. Поскольку скорость смещения плит составляет обычно несколько сантиметров в год (для некоторых плит более 10 см/год), то данные, накопленные за несколько лет измерений, уже по крайней мере на порядок превосходят возможную ошибку этих измерений.

На основании изучения современных вертикальных и горизонтальных движений установлено, что вся поверхность Земли охвачена этими движениями, **первые носят колебательный**, а вторые — **направленный характер**.

Длиннобазовый интерферометрический метод

Кваза́р (англ. quasar) — класс астрономических объектов, являющихся одними из самых ярких (в абсолютном исчислении) в видимой Вселенной. Английский термин quasar образован от слов quasi stellar



национальная радиоинтерферометрическая сеть со сверхдлинными базами (РСДБ)

<http://iaaras.ru/quasar/>

Данные, получаемые с помощью РСДБ-комплекса «Квазар-КВО», по своему пространственно-временному разрешению, по крайней мере, **на три порядка**

превыша

- доли милл
- Земли,
- микросеку
- фундамент
- миллиметр
- **миллиметр**
- и десятки п

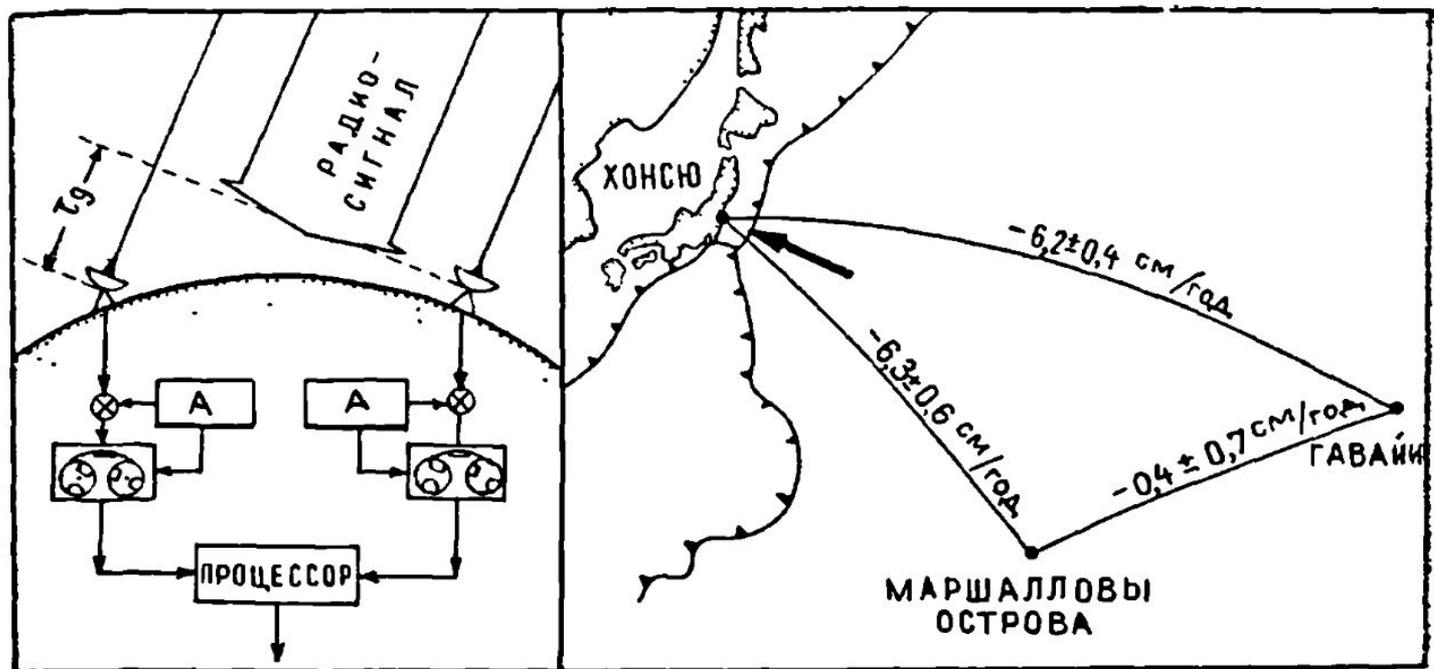


Рис. 4.3. Схема, поясняющая высокоточное измерение расстояний между удаленными радиотелескопами методом радиоинтерферометрии, и результат определения этим методом скорости субдукции Тихоокеанской плиты под Японскую островную дугу. По К. Хэки, 1989.

На схеме: А — атомные часы; τ_g — время опоздания радиосигнала

РСДБ-компл

высокоточ

- проблемно
- построени
- построени
- определени
- картографи
- построени
- исследова

- синхронизация атомных шкал времени, разнесенных на большие расстояния;
- колокация ГЛОНАСС/GPS – приемников и лазерных дальномеров с РСДБ-средствами;
- эфемеридно-временная поддержка глобальной навигационной системы ГЛОНАСС;
- наблюдения совместно с космическим радиотелескопом;
- разработка программно-аппаратных средств для радиоастрономии.

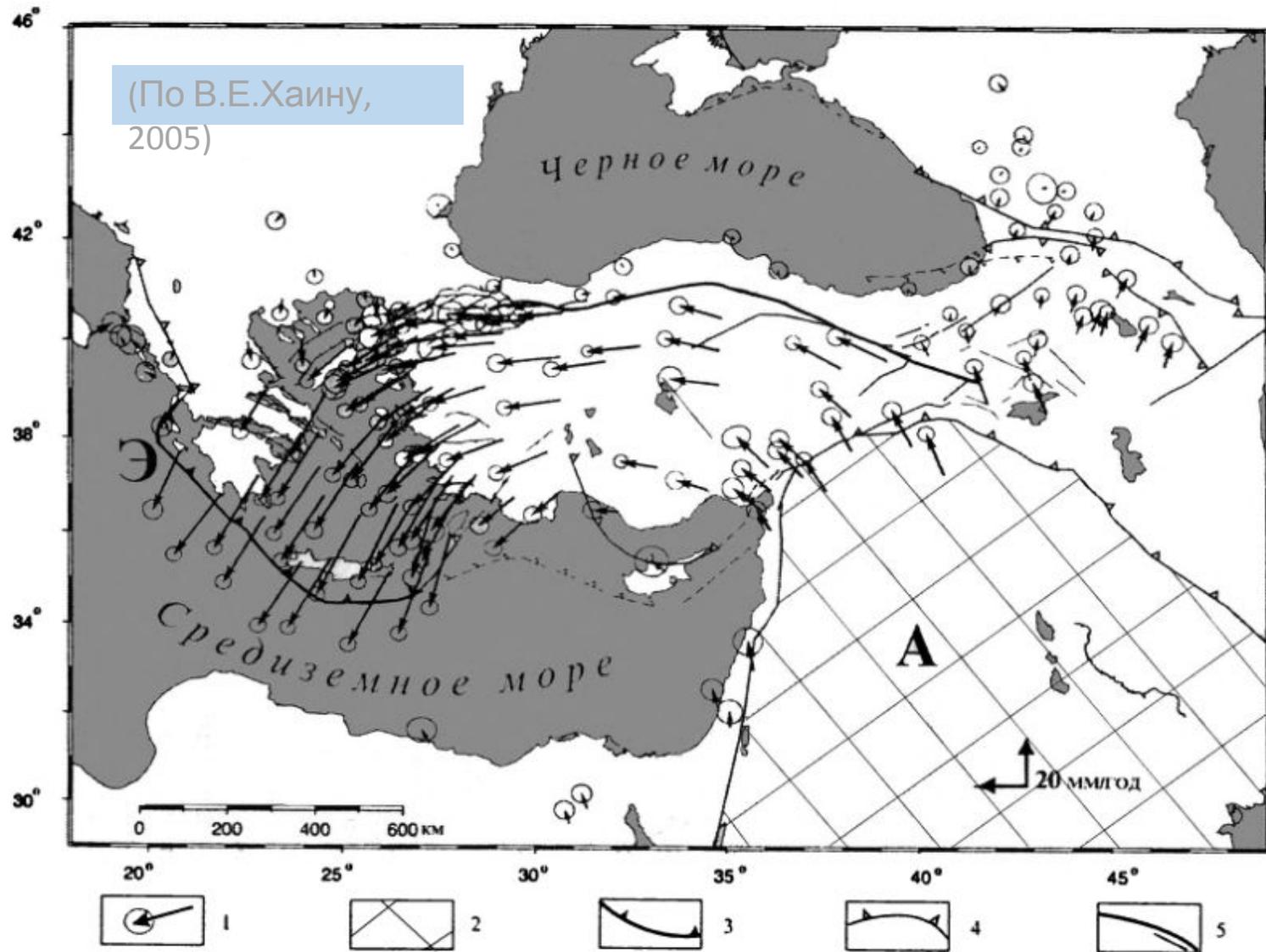
GPS (англ. Global Positioning System — система глобального позиционирования, читается Джи Пи Эс) — спутниковая система навигации, обеспечивающая измерение расстояния, времени и определяющая местоположение во всемирной системе координат WGS 84. Позволяет в любом месте Земли (исключая приполярные области), почти при любой погоде, а также в околоземном космическом пространстве

Основной принцип использования системы — **определение местоположения путём измерения моментов времени приёма синхронизированного сигнала от навигационных спутников антенной потребителя**. Для определения трёхмерных координат GPS-приёмнику нужно иметь четыре уравнения: «расстояние равно произведению скорости света на разность моментов приёма сигнала потребителем и момента его синхронного излучения от спутников»

ГЛОНАСС, имевшая изначально военное предназначение, была запущена одновременно с системой предупреждения о ракетном нападении (СПРН) в 1982 году для оперативного навигационно-временного обеспечения неограниченного числа пользователей наземного, морского, воздушного и космического базирования, например, пассивных метео-РЛС типа [РАЗК «Положение-2»](#). Дополнительно система транслирует гражданские сигналы, доступные в любой точке земного шара, предоставляя навигационные услуги российским и иностранным потребителям на безвозмездной основе и без ограничений.

Основой системы являются 24 [спутника](#) Основой системы являются 24 спутника, движущихся над поверхностью [Земли](#) Основой системы являются 24 спутника, движущихся над поверхностью Земли в трёх [орбитальных](#) плоскостях с наклоном

(По В.Е.Хайну,
2005)

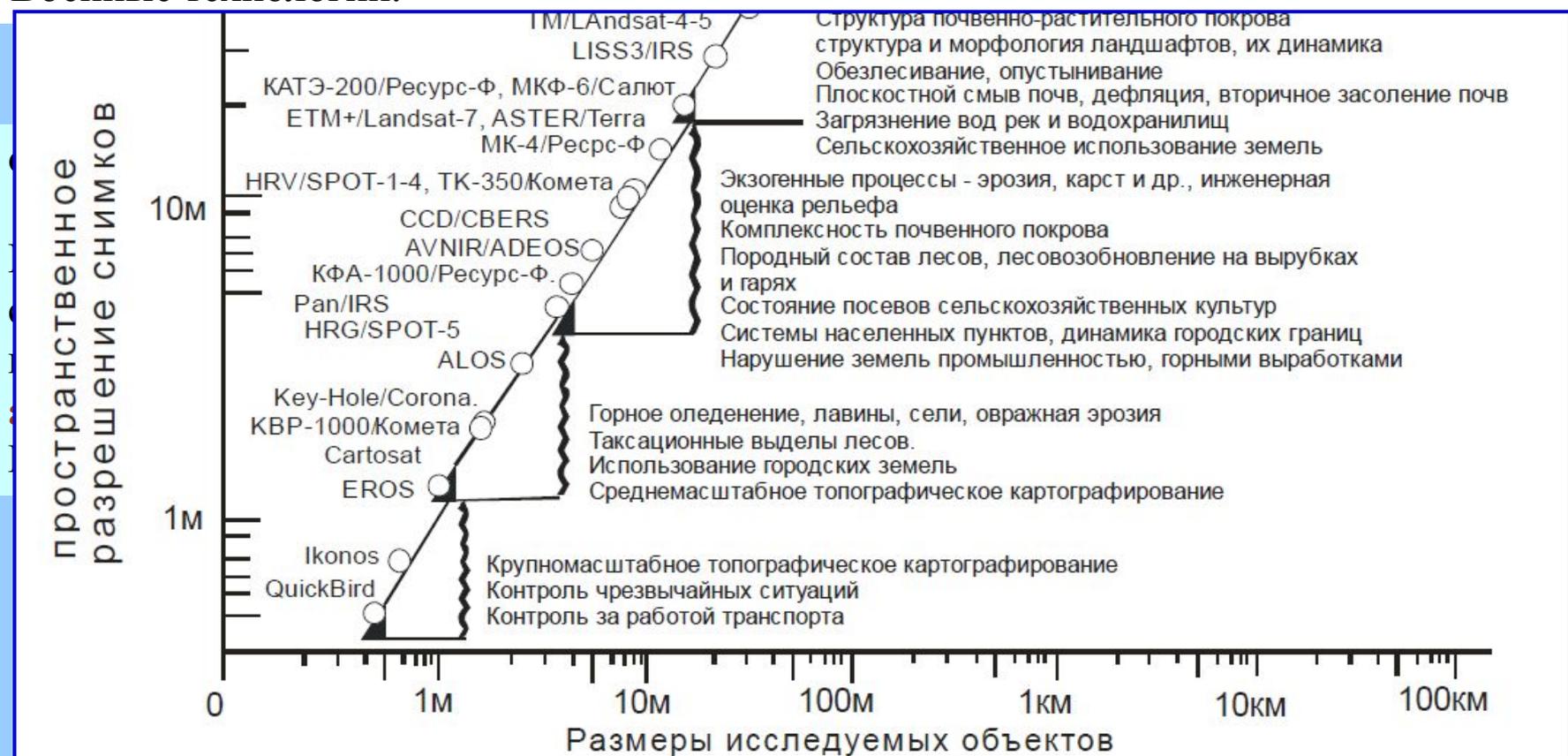


Данные космической геодезии (GPS – системы глобального позиционирования) о современном горизонтальном движении литосферных масс Средиземноморского складчатого пояса, отжимаемых Аравийским индентором (А) в область задуговых рифтов Эгейской зоны субдукции (Э). По наблюдениям за 1988–1997 гг., С. МакКлуски и др. (2000):

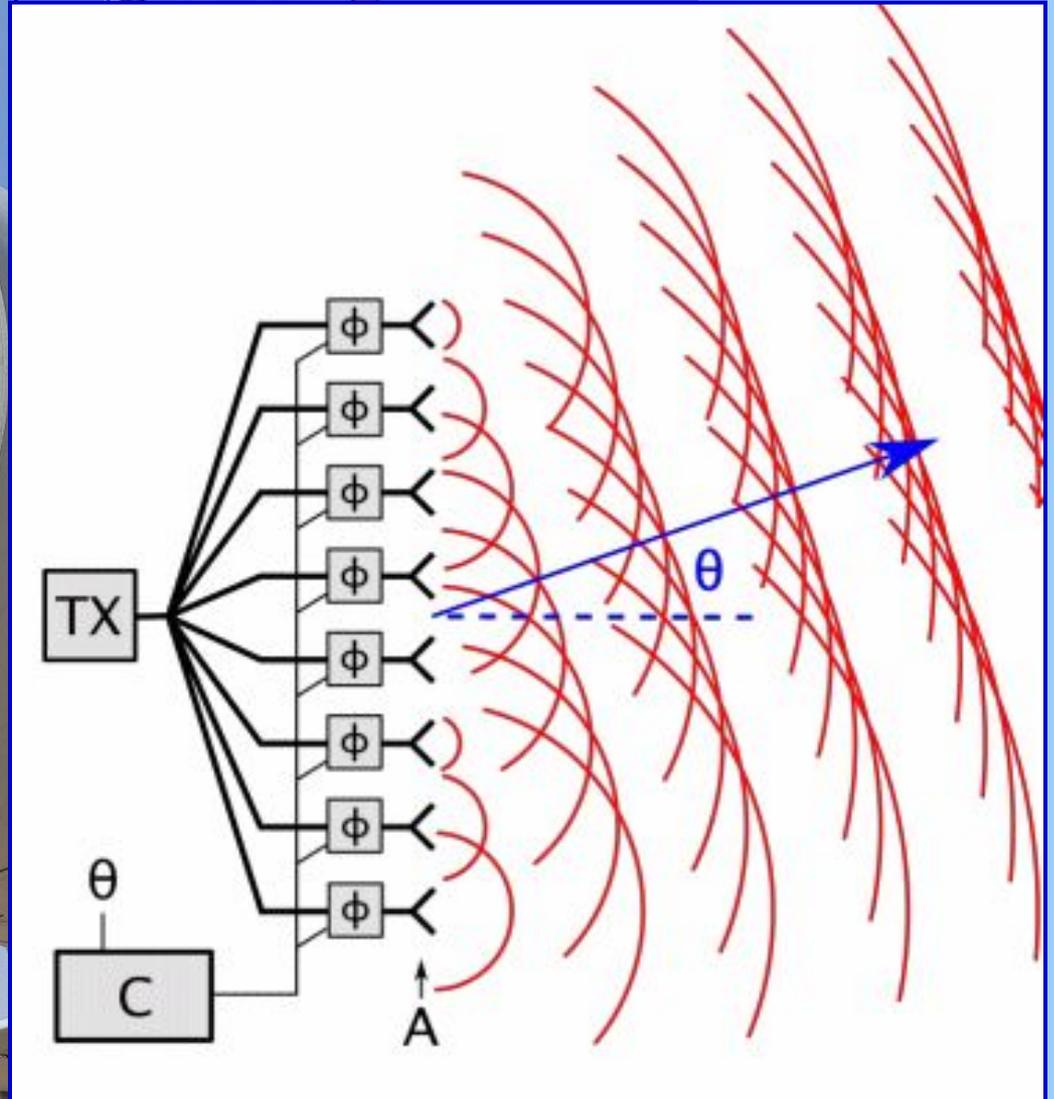
Использование для исследования локальных структур лазерной и радиоинтерферометрии

Лазерная съемка местности производится с летательных аппаратов с целью создания цифровой модели местности. Общая идея использования этой технологии для изучения вертикальных тектонических движений состоит в сравнении двух моделей рельефа, созданных в разное время (до и после землетрясения, например).

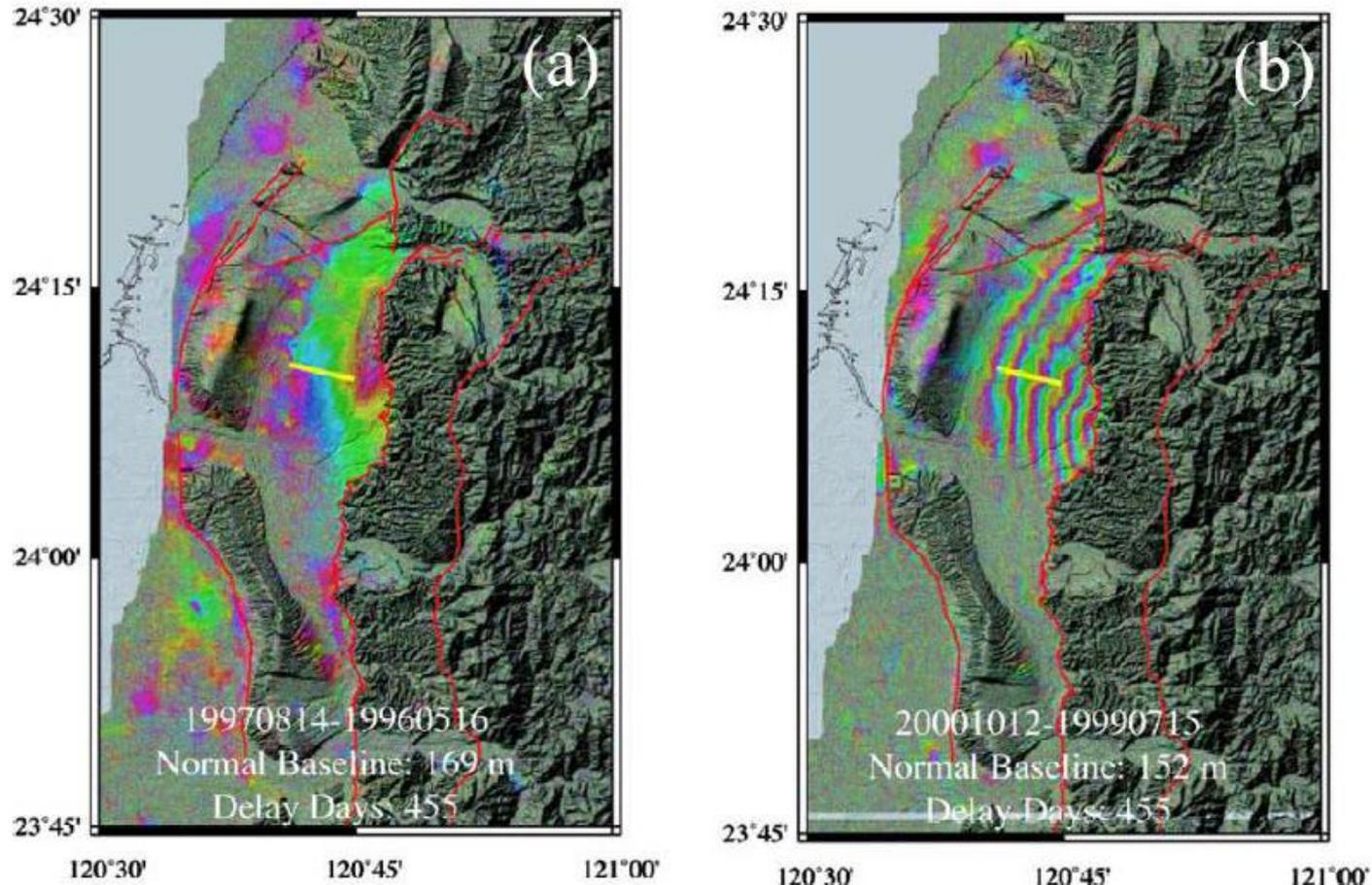
Военные технологии.



Технология радаров АФАР (активная фазированная решетка)



Пресейсмические и косейсмические деформации при землетрясении Чи-чи (Тайвань, 20 Сентября 1999, $M=7.6$)



(a) Пресейсмические деформации с 16 мая 1996 по 14 августа 1997.

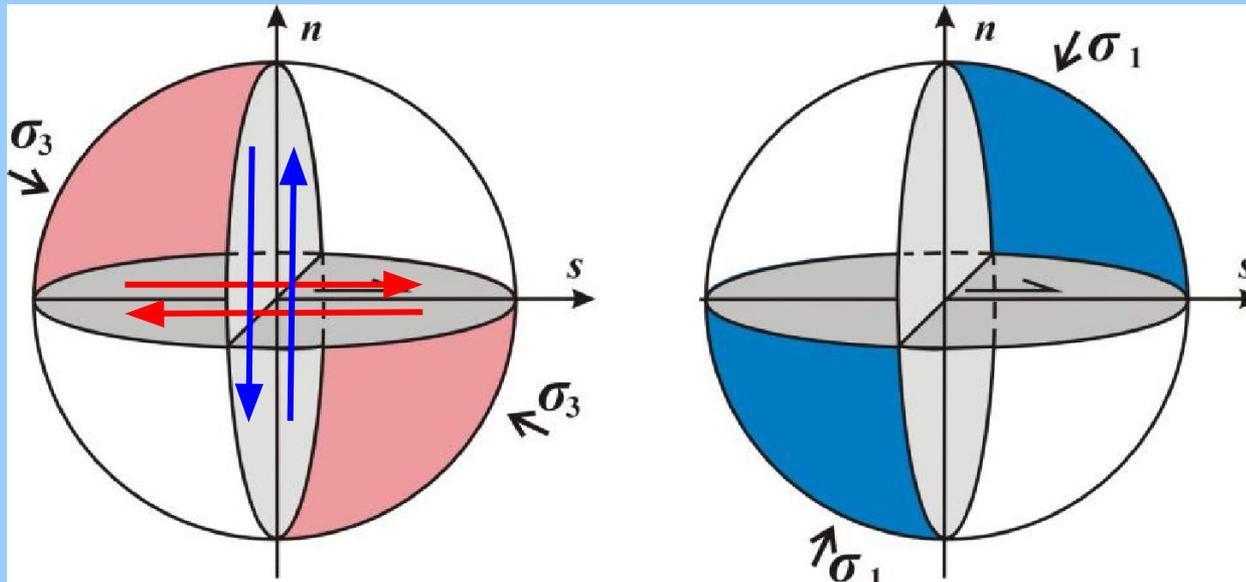
(b) Косейсмические деформации с 15 июля 1999 по 12 октября 2000.

Изучение современного напряженного состояния земной коры, сейсмогенные движения и решение фокальных механизмов землетрясений.

определение современного напряженного состояния земной коры производится на основе данных о механизмах очагов землетрясений

Считается, что ориентация осей главных напряжений совпадает с ориентацией осей P и T механизмов очагов землетрясений.

Одна из проблем в рамках сейсмологии - выбор реализованной нодальной плоскости. В тектонофизике по совокупности механизмов очагов землетрясений определяют поле тектонических напряжений.



Сеймотектоническая деформация

[seismotectonic deformation] – деформация объема горных пород, обусловленная многочисленными подвижками по сейсмогенным разрывам. Феноменологически может рассматриваться подобно описанию пластической деформации среды в рамках физической теории пластичности. Количественно оценивается посредством суммирования тензоров деформации, численно эквивалентно количеству сейсмогенных разрывов и числу землетрясений в регионе.

Перерыв

Сейсмический момент и сейсмическая деформация

В 1977 году сейсмолог Хидэо Уэно, сотрудник Геологического института Японии, предложил принципиально новую оценку интенсивности землетрясений, основанную на понятии сейсмического момента.

Сейсмический момент землетрясения определяется как $M_0 = \mu S u$, где

μ — модуль сдвига горных пород, порядка 30 ГПа;

S — площадь, на которой землетрясение произошло;

Исследуя сейсмичность на определенной площади за определенное время (с учетом механизмов очагов и магнитуды землетрясений) можно установить тип и величину деформации региона. Сравнение с величинами смещения по GPS показало, что землетрясениями осуществляется около 10% общей деформации.

Работы Сергея Львовича Юнга по оценке сеймотектонической деформации
[geo Юнга.pdf](#), [Юнга сеймотект - деформ.pdf](#)

Анализ фаций и м
движениям по сд

Хаин Ло
Анализ с

Метод фаций и мощ
Мощности и фации
восстановления исто
площади и во време
дает представление
есть фациальные пр
стратиграфического

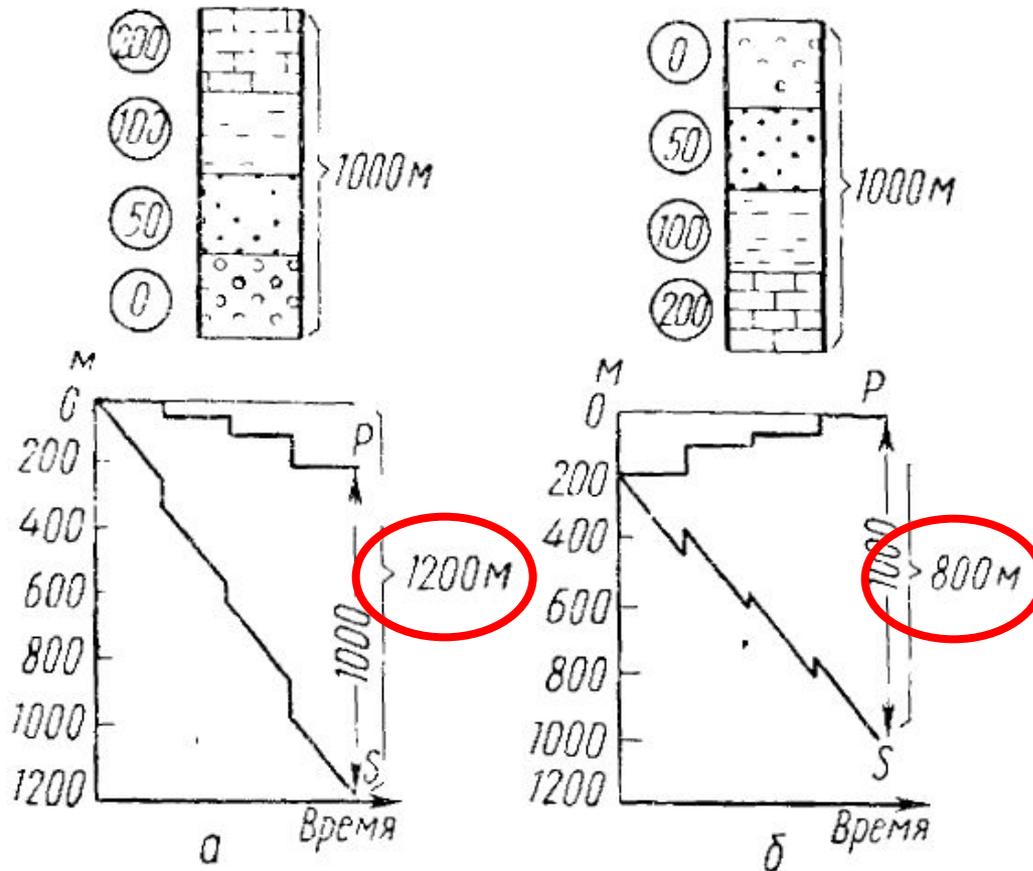


Рис. 25. Определение амплитуды прогибания земной коры в обстановке: а — углубления бассейна; б — обмеления бассейна.

Р — кривые геоморфологического выражения колебательных движений; S — кривые тектонических движений; 1200 и 800 м — амплитуды суммарного прогибания; 1000 м — мощность; 0 — 200 м — глубина образования осадка

прошлого.

БНЫМ

стр. 77

ть для
ения на
кдения осадков
м случае, если
ния данного

Анализ фаций применим в двух аспектах —
пространственном, когда изучается распределение фаций по площади для строго ограниченного стратиграфического интервала, и
временном, когда исследуется смена фаций во времени в пределах ограниченного района, часто даже точки, где расположен обнаженный разрез или пробурена скважина.

Большое значение для анализа фаций в последнее время приобрели **данные сеймостратиграфии**, по которым выявляются фациальные изменения как в латеральном, так и в вертикальном направлениях. (Хаин)

Анализ **распределения фаций по площади** проводится с помощью специальных карт. Карты эти составляются по данным изучения разрезов как в **естественных обнажениях**, так и в **буровых скважинах** и, как только что отмечалось, на **сеймостратиграфических профилях**.
Наиболее обычный **стратиграфический интервал — ярус**, подъярус, реже более мелкие (микропалеонтологическая зона, горизонт, слой) или более крупные (отдел, система) подразделения.

Интерпретация карт фаций включает прежде всего выделение **областей накопления осадков** данного стратиграфического интервала и **их отсутствия**. Естественно, что **области накопления** осадков, если только речь не идет о субаэральных образованиях, **должны рассматриваться как области тектонического опускания** — **абсолютного**, если речь идет о нормальных морских осадках, или, возможно, **относительного**, если речь идет о субаквальных осадках ненормальной солености или озерного и аллювиально-озерного происхождения.

В **областях отсутствия осадков** требуется выяснить, является ли это **отсутствие первичным**, т. е. данная область была в это время **областью сноса** и, следовательно, тектонического поднятия, **или вторичным, результатом последующего размыва**.

Решить этот вопрос можно, анализируя **фациальный состав осадков, обрамляющих область их отсутствия**, и выясняя, есть ли в этом составе признаки сноса именно с этой области. Здесь в помощь таким макроскопическим признакам, как присутствие гальки или менее крупных обломков пород, сходных со слагающими эту область, может быть использовано присутствие характерных для нее минералов, в частности минералов метаморфических пород.

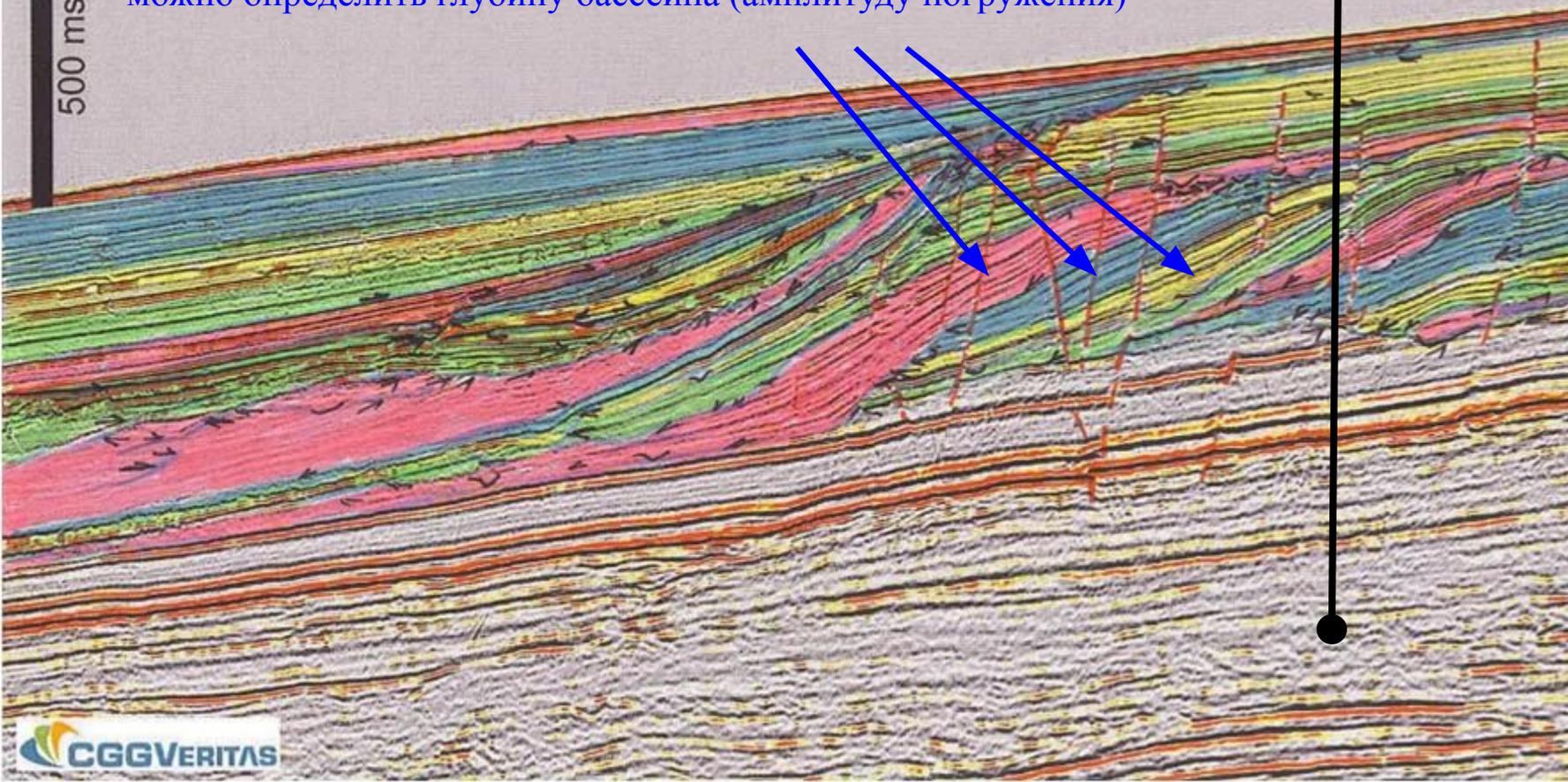
Taylor & Timpertion

5 km

Параметрическая скважина

Клиноформы – латеральное заполнение бассейна осадками, можно определить глубину бассейна (амплитуду погружения)

500 ms



CCramez, modified from

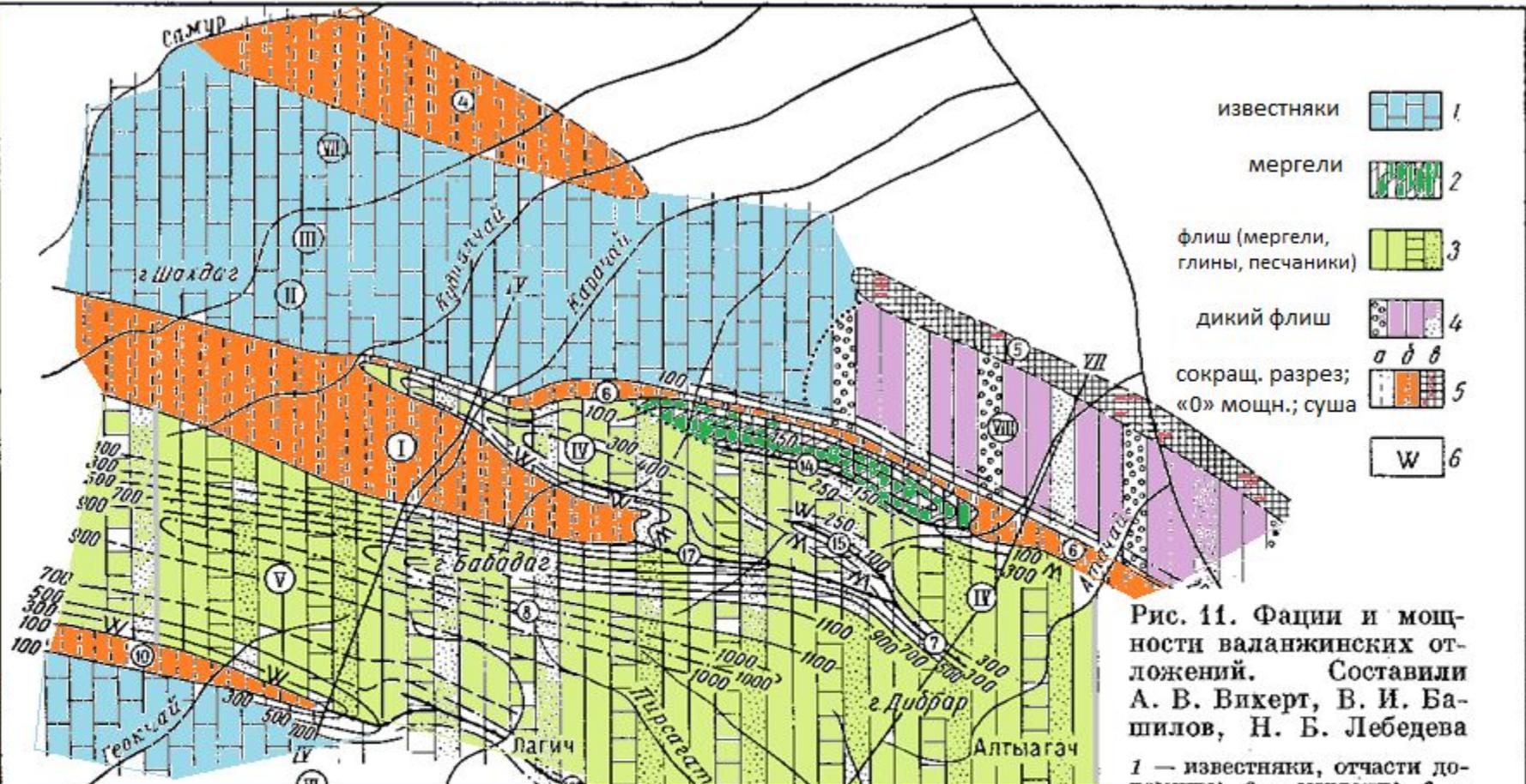


Рис. 11. Фашии и мощ-ности валанжинских от-ложений. Составили А. В. Вихерт, В. И. Ба-шилов, Н. Б. Лебедева

1 — известняки, отчасти до-
 2 — мергели; 3 —
 щиеся мергели, гли-
 песчаники (флиш);
 ны с пластами пер-
 известняков и гори-
 глыбовых конгло-
 («дикий» флиш);
 стки: а — резко со-
 ных, б — нулевых
 гей осадков, в — су-
 — участки трансгрес-
 перекрывтия более
 подстилающей свиты.
 ые обозначения те
 же, что и к рис. 9

Cowgill, E., Forte, A. M., Niemi, N., Avdeev, B., Tye, A., Trexler, C., ... & Godoladze, T. (2016). Relict basin closure and crustal shortening budgets during continental collision: An example from Caucasus sediment provenance. *Tectonics*, 35(12), 2918-2947

В статье сделано предположение о субдукции «океана» шириной 200-300 км в пространстве флишевого бассейна в олигоцене

Палинспастические реконструкции. (Хаин) В горных сооружениях шарьяжного строения, т. е. представляющих нагромождение надвинутых друг на друга тектонических пластин, для восстановления первичного расположения осадков в бассейне необходимо построение карт специального типа, получивших название палинспастических (Дж. М. Кэй).

Методика таких реконструкций излагалась Ч. Б. Борукаевым, С. В. Руженцевым, А. А. Беловым, О. А. Щербаковым, В. В. Юдиным. Принцип их заключается в **раздвижении надвиговых пластин в направлении, обратном перемещению при надвигании**, т.е. перпендикулярно простиранию надвигов, и их расположению рядом друг с другом. При этом желательно переместить пластины в область их «корней», если последние известны, что бывает, однако, не часто.

Желательно также **произвести распрямление складок в пределах пластин**, что может привести к увеличению их ширины до 20—25%.

Затем составляются карты фаций, участвующих в строении надвиговых пластин отложений. Для этого необходимо произвести увязку фациальных зон, прослеживаемых в смежных пластинах, которую начинают с наиболее характерных фаций, например, рифовых, русловых и других, обладающих линейностью распространения.

Учитывают **нормальную последовательность смены палеогеографических обстановок вкост простирания пассивных и активных континентальных окраин** (шельф — континентальный склон — континентальное подножие — абиссаль — островная дуга — желоб), а также линейность соответствующих зон.

Карты фаций могут использоваться также для определения величины горизонтальных смещений по сдвигам. Эта величина соответствует расстоянию между однотипными (изопическими) фациальными зонами, ныне разобщенными данным сдвигом. Примером может служить определение смещения по Таласо-Ферганскому сдвигу в Тянь-Шане (рис. 9.2). В случае другого крупного сдвига — Сан-Андреас в Калифорнии — для этой же цели

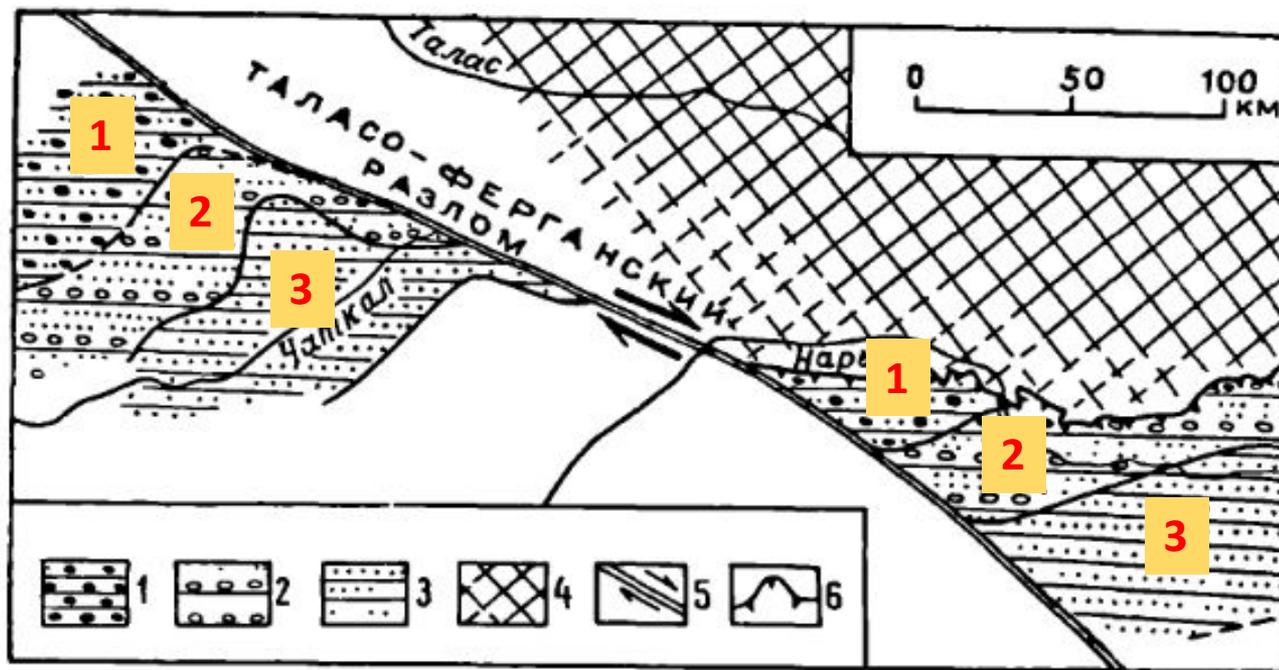


Рис. 9.2. Правосторонний сдвиг фациальных зон девона (живетского и франского ярусов) по пересекающему их Таласо-Ферганскому разлому, Тянь-Шань. По В. С. Буртману (1963), упрощено:
 1—3 — фациальные зоны; 4 — область денудации; 5 — сдвиг;
 6 — надвиг

АНАЛИЗ МОЩНОСТЕЙ (Хаин)

Анализ распределения мощностей осадочных и вулканогенных толщ — один из важнейших методов тектонического анализа. Он проводится на основе составления карт линий равных мощностей, или **изопахит**; такие карты обычно совмещаются с **картами фаций**, исходным материалом служат разрезы в естественных обнажениях или **скважинах**.

В нашей стране первые карты изопахит были составлены В. В. Белоусовым, который и дал теоретическое обоснование данного метода. Позднее В. Е. Хаин, а также А. Л. Яншин и Р. Г. Гарецкий пересмотрели некоторые выводы В. В. Белоусова.

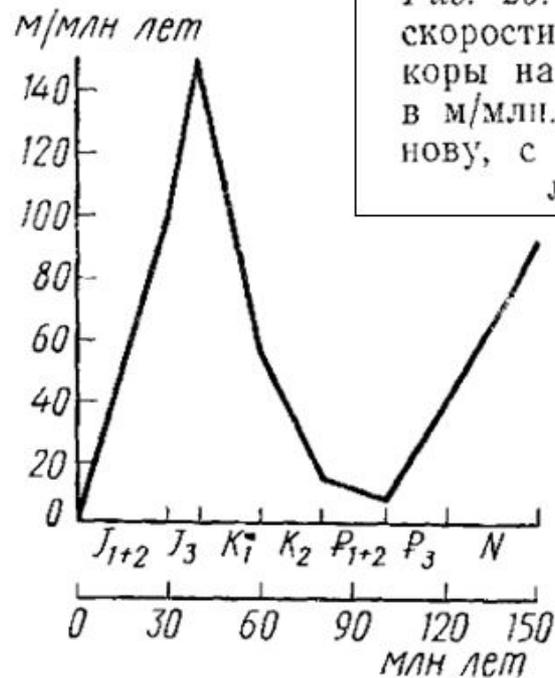


Рис. 26. График изменения скорости прогибания земной коры на Северном Кавказе в м/млн лет (по А. Б. Ронову, с исправлением шкалы времени)

Заметный интерес представляет вычисление скоростей вертикальных движений

ОБЪЕМНЫЙ МЕТОД.

В дополнение к анализу фаций и мощностей А. Б. Роновым (1949) был разработан **объемный метод изучения вертикальных движений**. Этот метод предусматривает:

- 1) подсчет суммарных объемов отложений (по картам мощностей);
- 2) измерение относительных объемов различных типов отложений (по картам фаций /литофаций/ и мощностей);

- 3) Вычисление перечисленных показателей может значительно дополнить обычный
- 4) качественный палеотектонический анализ.

- 5) Так, определение среднего размера погружения дает надежный критерий для
- 6) оценки относительной интенсивности движений различных геоструктурных зон в течение одной эпохи или одной и той же зоны в разные геологические эпохи.

- 7) В первом случае оно позволяет отвлечься от **неравенства площадей отдельных зон**, а во втором — **от влияния эвстатических колебаний уровня океана**, изменяющих площадь осадконакопления.

Сами эти колебания могут быть объективно выявлены путем сравнения изменения площадей накопления в различных зонах и в различные промежутки времени.

Вычисление средней скорости погружения или поднятия позволяет устранить влияние неравенства продолжительности различных геологических веков, эпох, периодов.

Ронов А. Б. Стратисфера или осадочная оболочка Земли: количественное исследование. – " Наука", 1993.

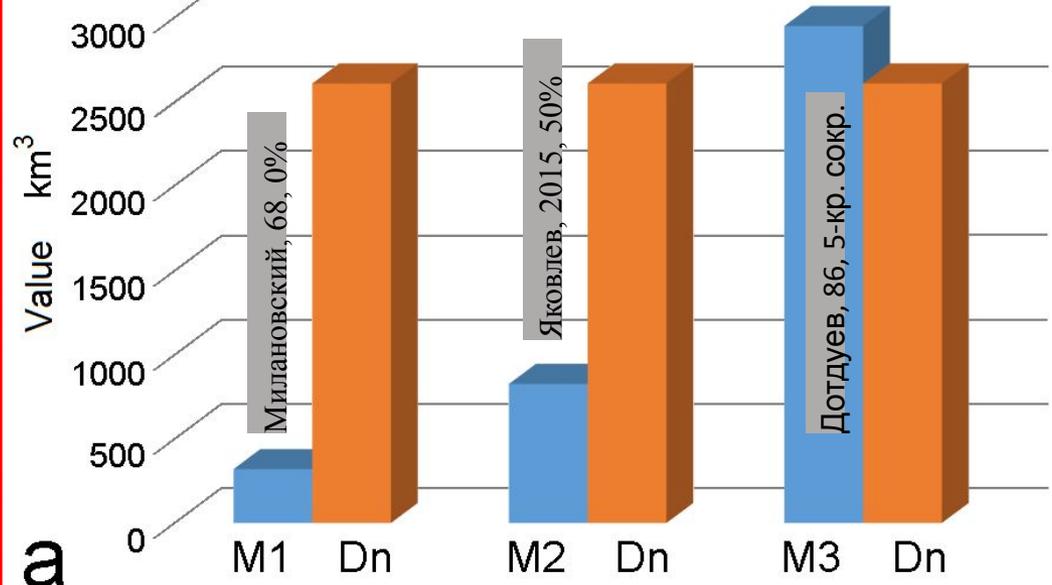
СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Часть I. СТРОЕНИЕ СТРАТИСФЕРЫ, ОБЪЕМ И РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ СЛАГАЮЩИХ ВЕЩЕСТВ И ИХ СРЕДНИЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ	
Схема строения осадочной оболочки Земли	8
Глобальные неоднородности строения осадочной оболочки	10
Строение осадочной оболочки океанов	31
Глобальные закономерности в распределении формаций	38
Средний эрозионный срез и средняя скорость денудации континентов	42
Распространенность основных, средних и кислых вулканических пород в осадочной оболочке Земли	44
Теоретические и эмпирические оценки распространенности пород в осадочной оболочке Земли	51
Средний химический состав осадочных и вулканических пород осадочной оболочки Земли	53
Часть II. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭВОЛЮЦИИ СТРАТИСФЕРЫ	
Периодические процессы	70
Необратимые эволюционные процессы	78
Общие тенденции эволюции химического состава осадочных и магматических пород	89
Часть III. ГЛОБАЛЬНАЯ ГЕОХИМИЯ УГЛЕРОДА	
Баланс углерода и кислорода в неогее	102
О корреляции массы рассеянного органического углерода и запасов нефти в осадочной оболочке Земли	112
Материальные ресурсы углерода	125
Основной закон карбонатонакопления	127
Геохимический принцип сохранения жизни	133
ПОСЛЕСЛОВИЕ	136
ЛИТЕРАТУРА	138

Пример использования
 решения геодинамики
 Яковлев Ф.Л., Сорочинский
 альпийского Большого
 214-222

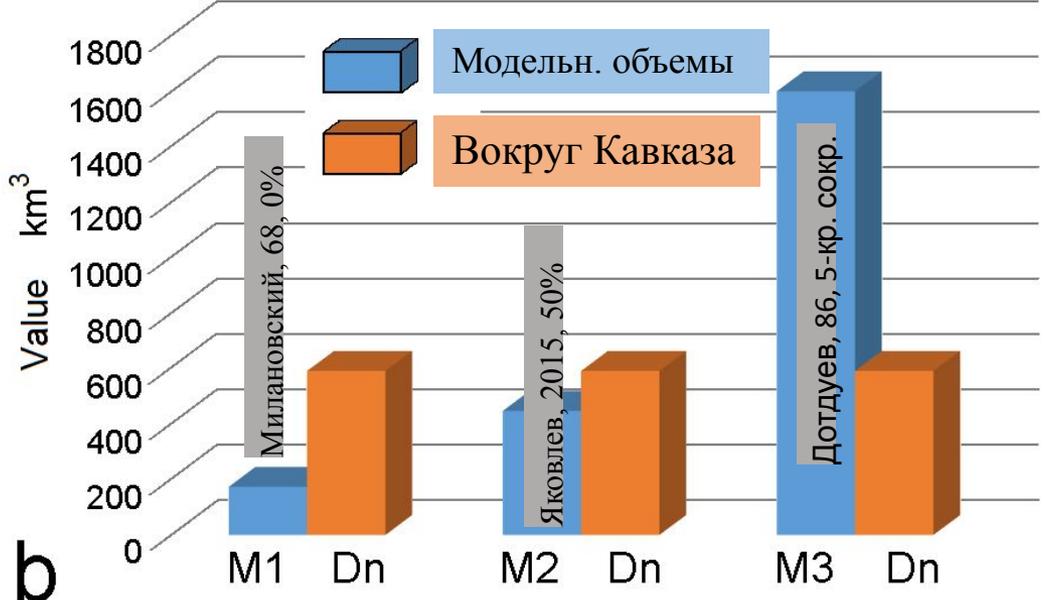
ДКОВ для
 ИФЗ. 2016.

Сравнение для Большого Кавказа целиком

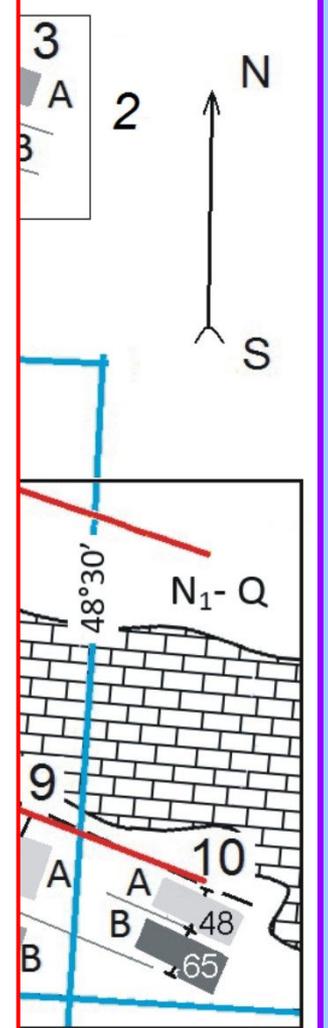
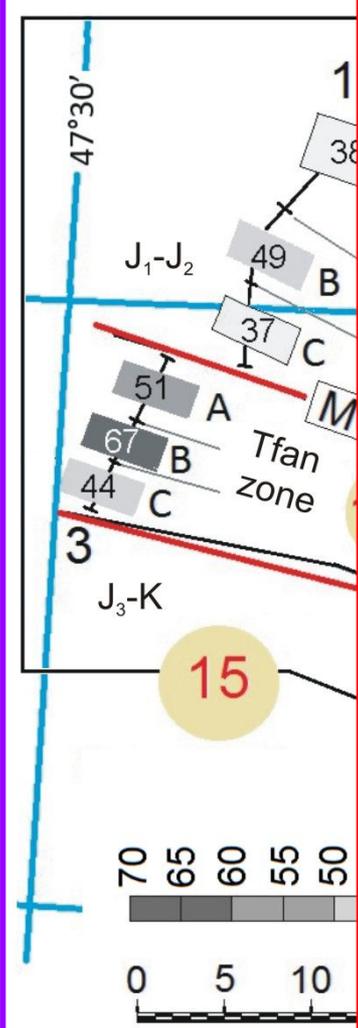


a

Сравнение для запад. полов. Б. Кавказа



b



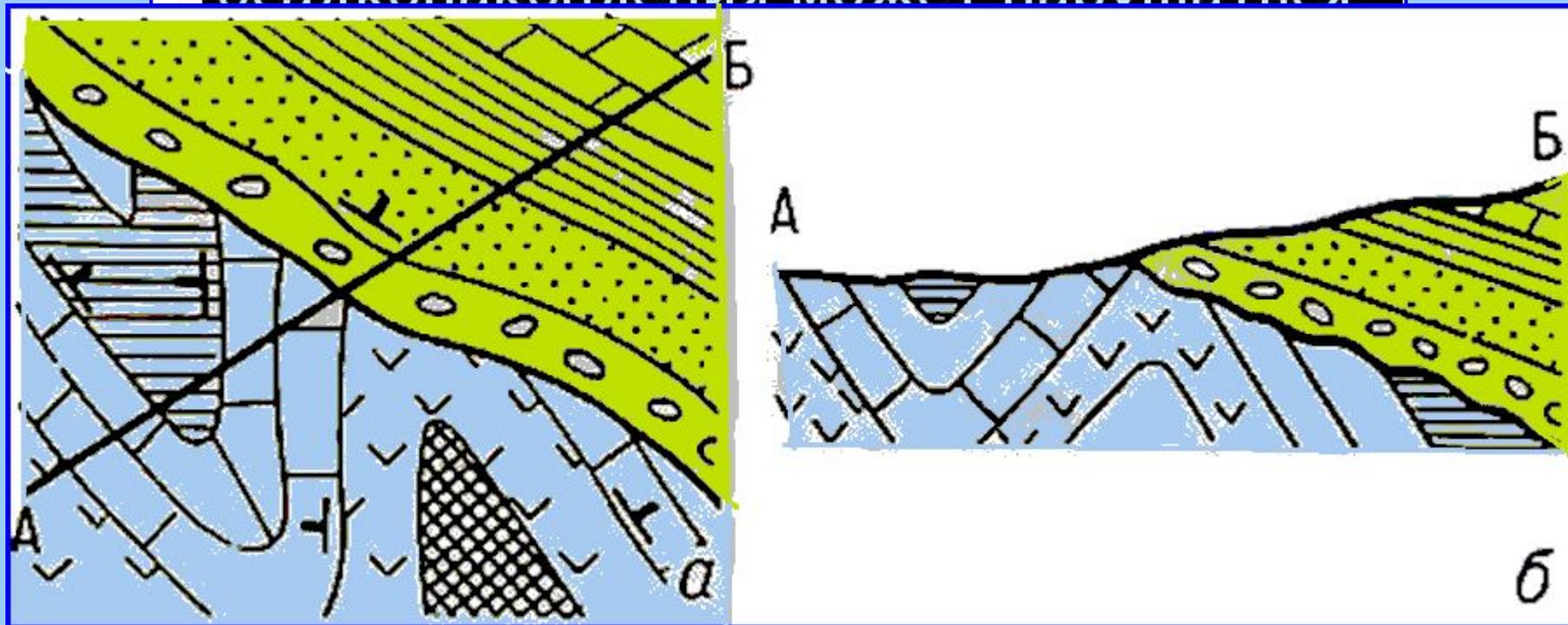
АНАЛИЗ ПЕРЕРЫВОВ И НЕСОГЛАСИЙ

Тектонические движения, развивающиеся на фоне общего погружения и накопления осадков, фиксируются в изменениях фаций, мощностей и формаций, изучаемых соответствующими методами. Когда тектонические движения проявляются в условиях господства суши, они деформируют земную поверхность и образуют формы наземного рельефа, исследуемые структурно-геоморфологическими методами.

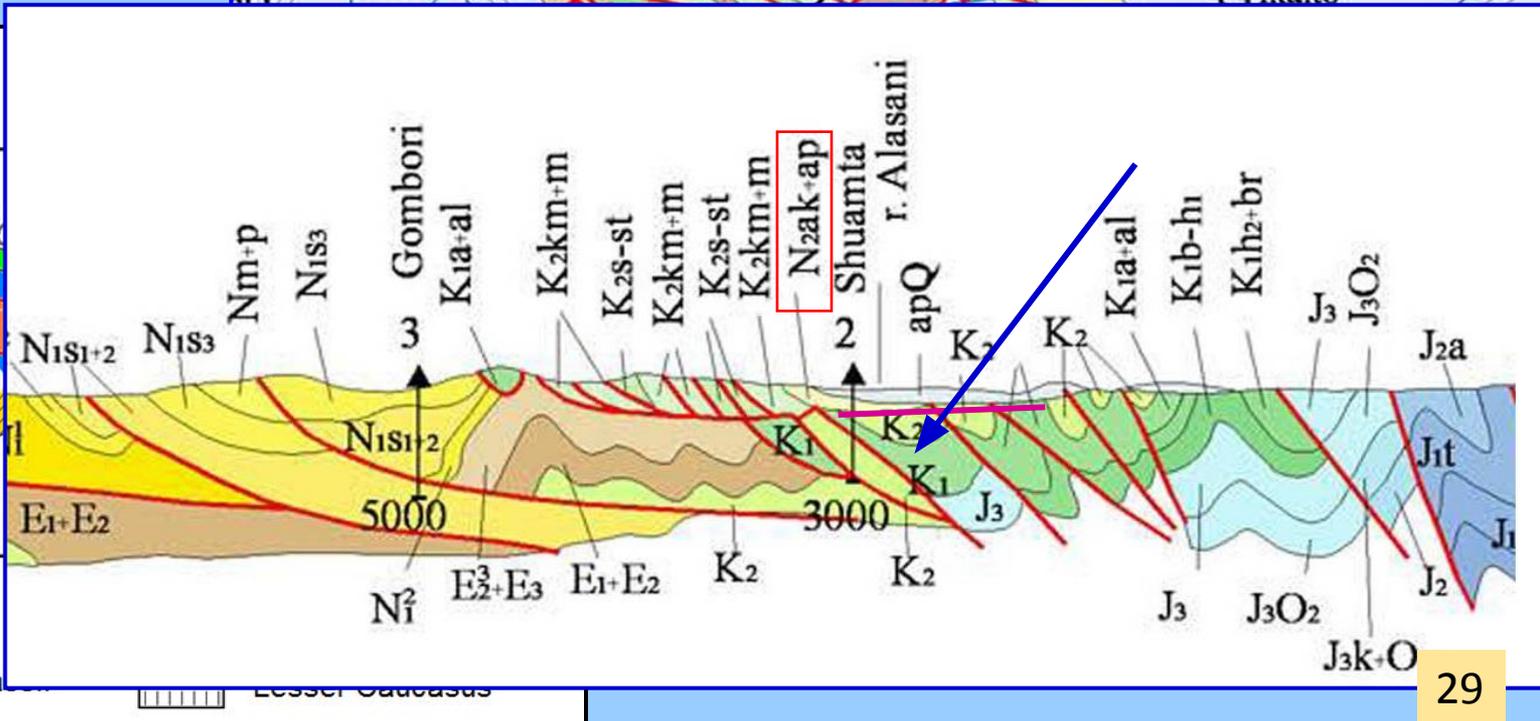
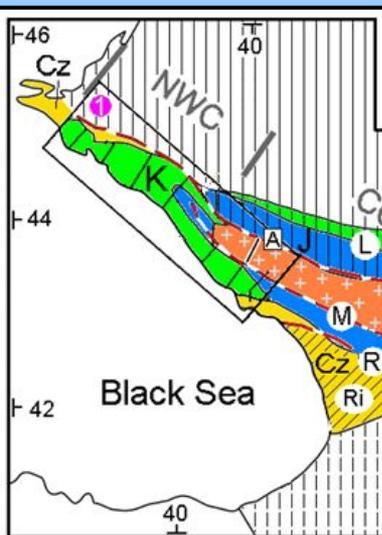
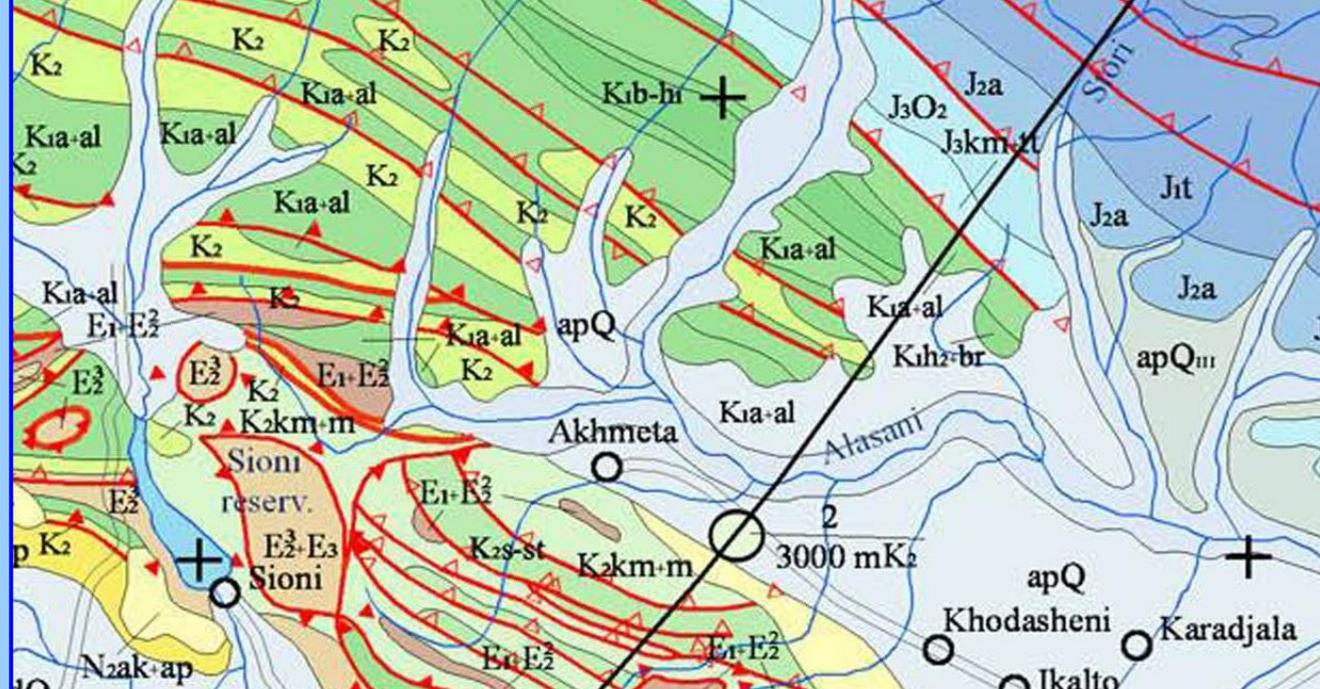
Но особые условия создаются в периоды обычно **относительно кратковременных общих или местных поднятий** (осушений), которые затем снова сменяются погружениями (затоплениями). Эти события отмечаются **перерывами в отложении осадков, а также несоответствием залегания разделенных перерывами толщ, получившим название несогласий**. Движения и деформации, сопровождающие **отсутствие осадков, как бы конденсируются в плоскости перерывов и несогласий**. **Перерывы совпадают с фазами усиления движений, деформаций и перестроек структурного плана.**

Не случайно поэтому вследствие относительной легкости фиксации несогласий и благодаря их наглядности **рассматриваемый метод является, по существу, старейшим методом изучения истории движений земной коры**. Им пользовался еще Н. Стено при восстановлении истории геологического развития Тосканы на основе разработанных им принципов.

Последовательность осадконакопления может нарушаться



Примеры из геологии
Большого Кавказа



Сложный пример из геологии Большого Кавказа Воронцовский покров и время складчатости БК



Верхнее ограничение времени движения Воронцовского покрова и периода образования складчатости задается временем формирования неоавтохтона. В нашем случае это «мергелисто-глинистая» толща, время ее формирования – средний – поздний миоцен (с 15 по 10 млн. лет).

Анализ перерывов и несогласий – эффективный комплекс методов выявления реальной истории развития сложных структур

сформированы.

(несколько позднее 35 млн. лет).

Самостоятельное исследование 1.

История развития по мощностям и фация осадков

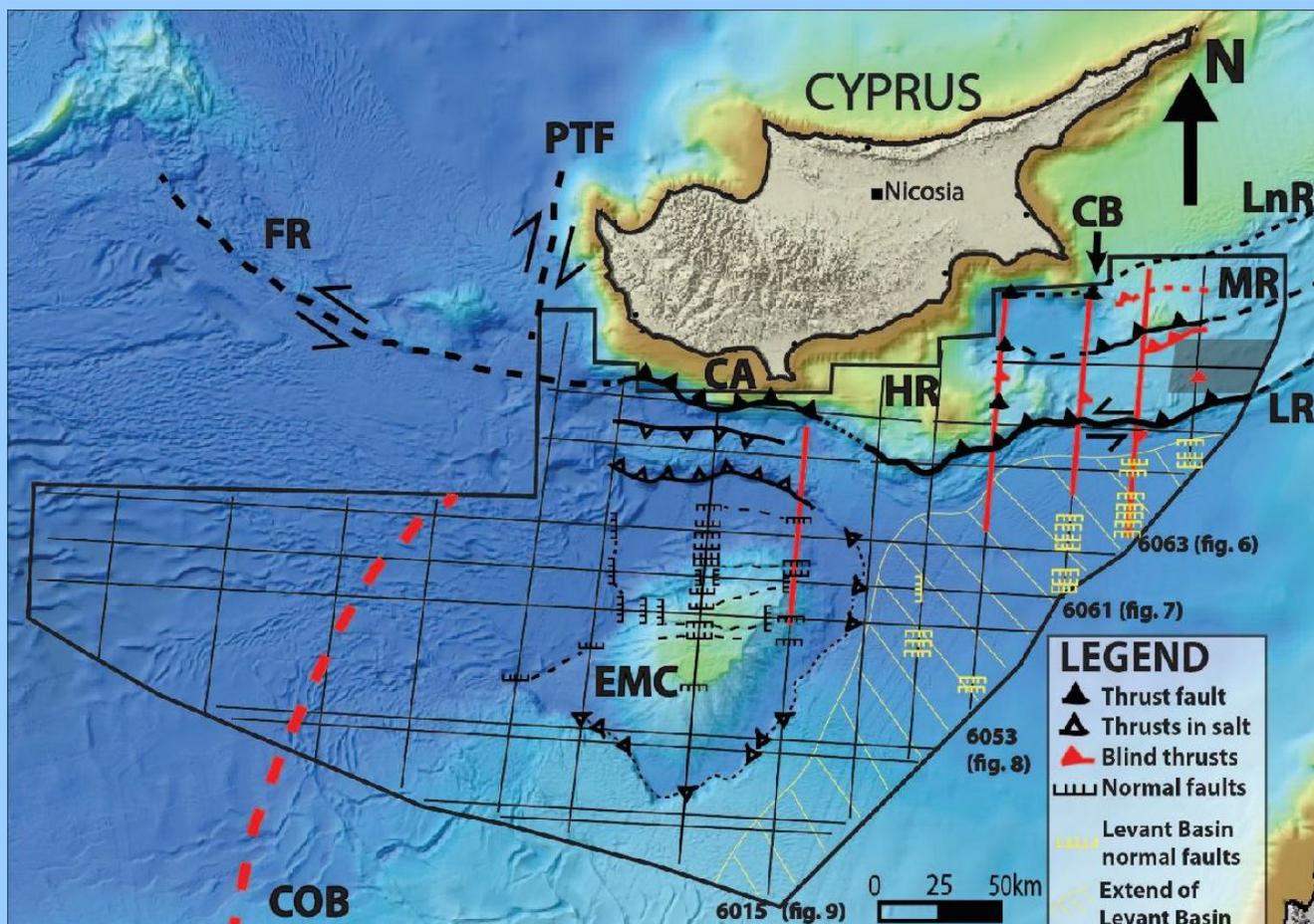


Figure 3: Map of offshore Cyprus. Main structural elements identified after seismic interpretation. Red dotted line delineates the transition boundary between continental and oceanic crust [Granot, 2016]. Black thin lines delineate the available seismic data, while the red thick lines delineate the seismic profiles illustrated in this paper.

Abbreviations:

CA=Cyprus Arc, CB=Cyprus Basin, COB=Continent-ocean boundary, ES=Eratosthenes micro-continent, FR=Florence Rise, HR=Hecataeus Rise, LnR=Larnaca Ridge, LR=Latakia Ridge, MR=Margat Ridge, PTF=Paphos Transform Fault.

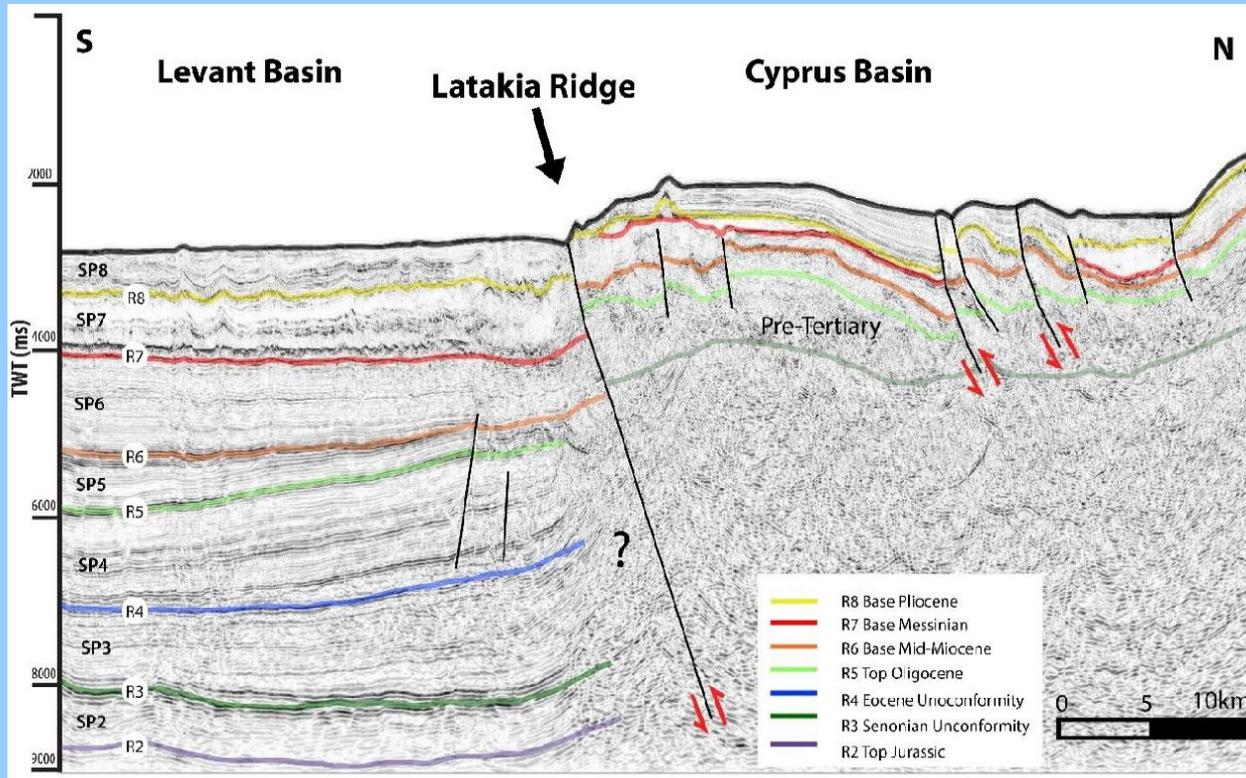


Figure 7: Seismic line 6061 trending South-North. The Letter in square is used to refer to a specific zone in the text. Position of this profile found in figure 3. Position D: Piggy back basins created due to continuous convergence of the African plate with respect to the Eurasian plate.

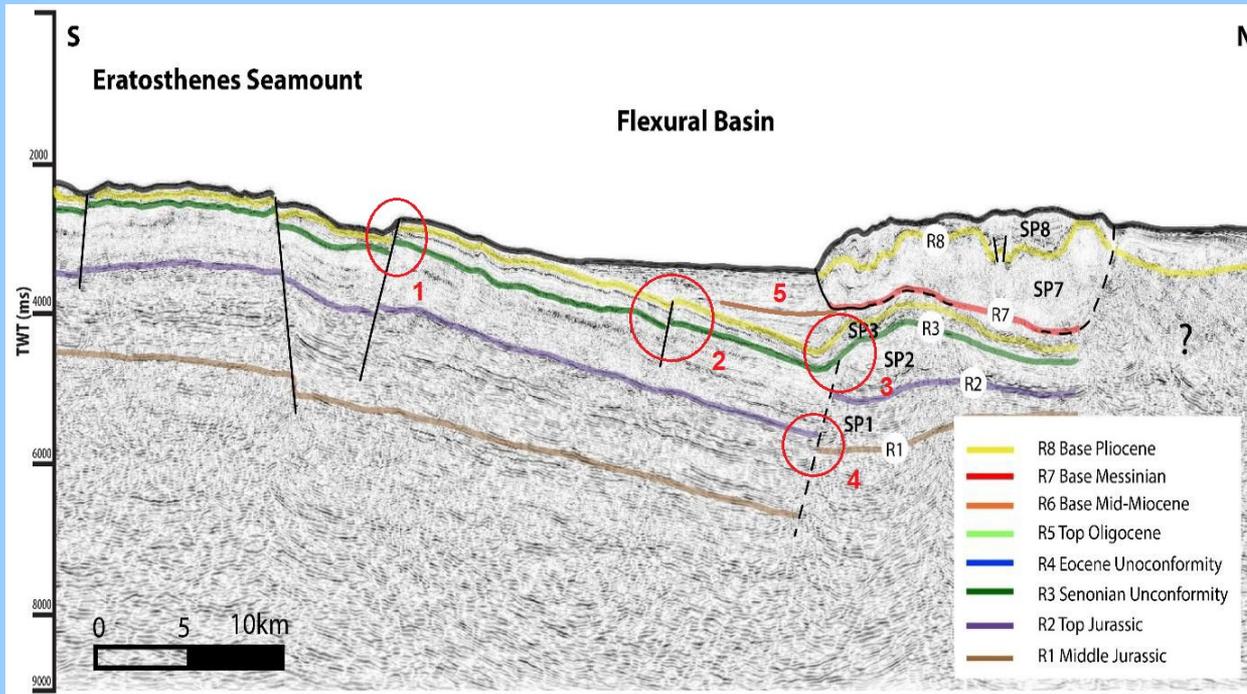
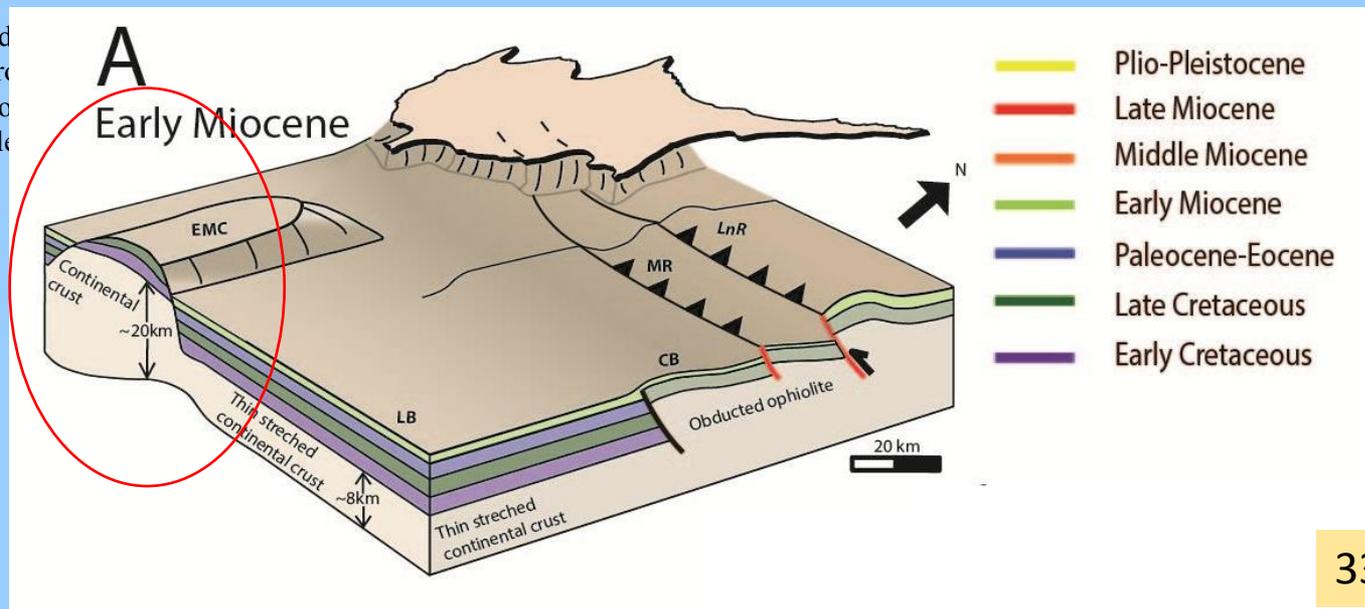


Figure 10: Seismic line 6015 trend zone in the text. Position of this pro-convergence of Eratosthenes microcontinent. A thin skinned thrust with a decollement



Следующее занятие

Палеомагнитные методы, основанные на определении ориентировки векторов остаточной намагниченности и на изучении линейных аномалий океанского дна.

Специфика изучения новейших (неотектонических) движений, структурно-геоморфологический анализ.

Конец занятия