



**Petroleum
Learning Centre**

Heriot-Watt Approved
Learning Partner



Reservoir Evaluation and Management

Stratigraphy and Correlation

Natalia Kaumova

2017 | hw.tpu.ru

Content

- Data, Stratigraphy and Models
- Graphic Correlation
- Reservoir Architecture and Reservoir Performance
- Exercises

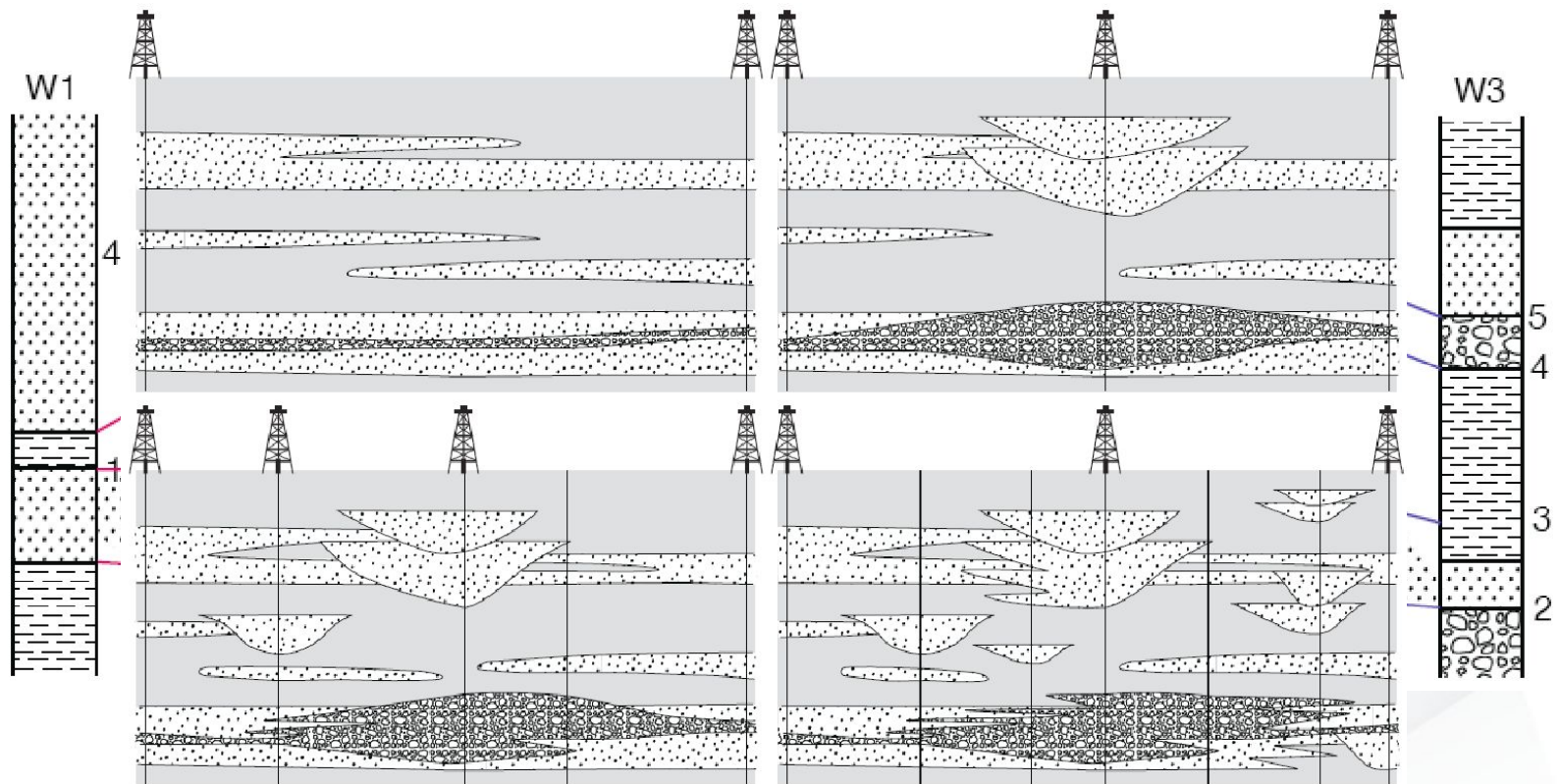
Introduction

Correlation – the identification of certain intervals in one well which relate to equivalent intervals in a second or subsequent wells:

- usually same geological age
- often (but not always) same lithological character
- Light tables and computer correlation techniques
- Artform rather than science
- Geological experience/judgement critical

Introduction

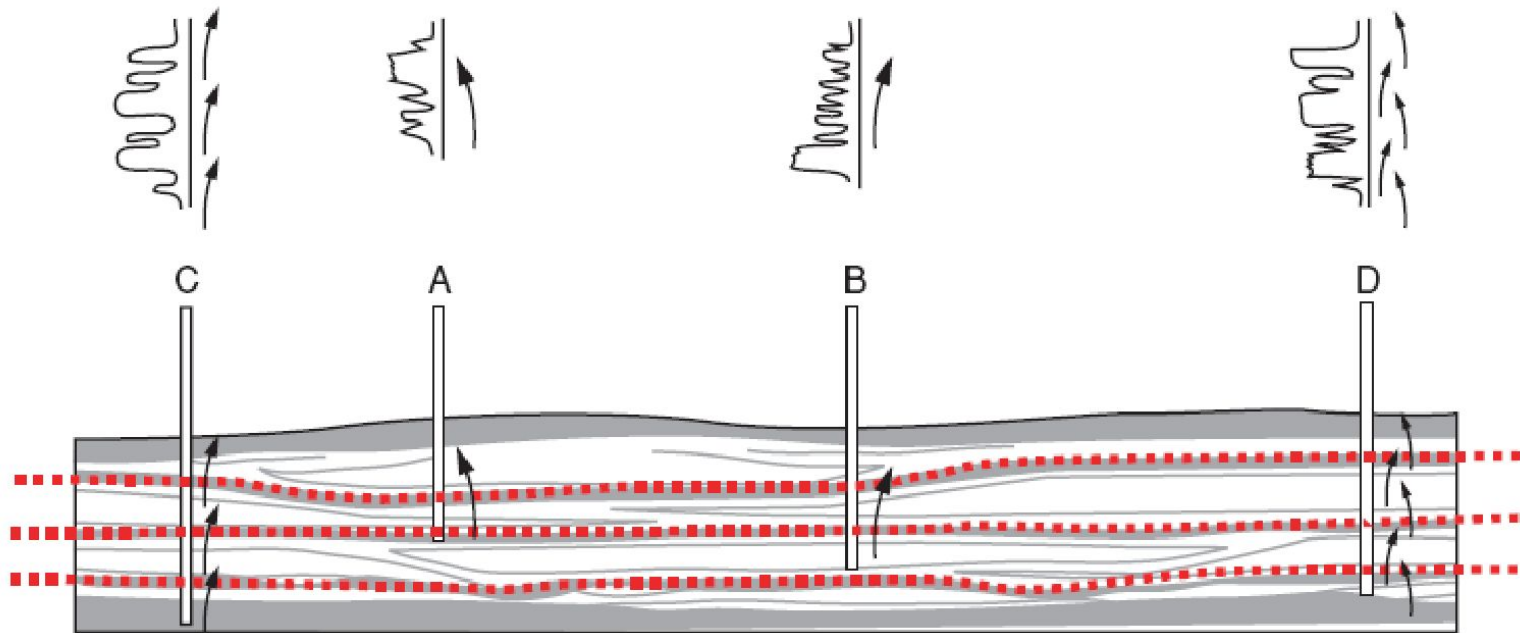
- Depends on the aims and methods
- Always is a subject of change with extra information



Importance of correlation

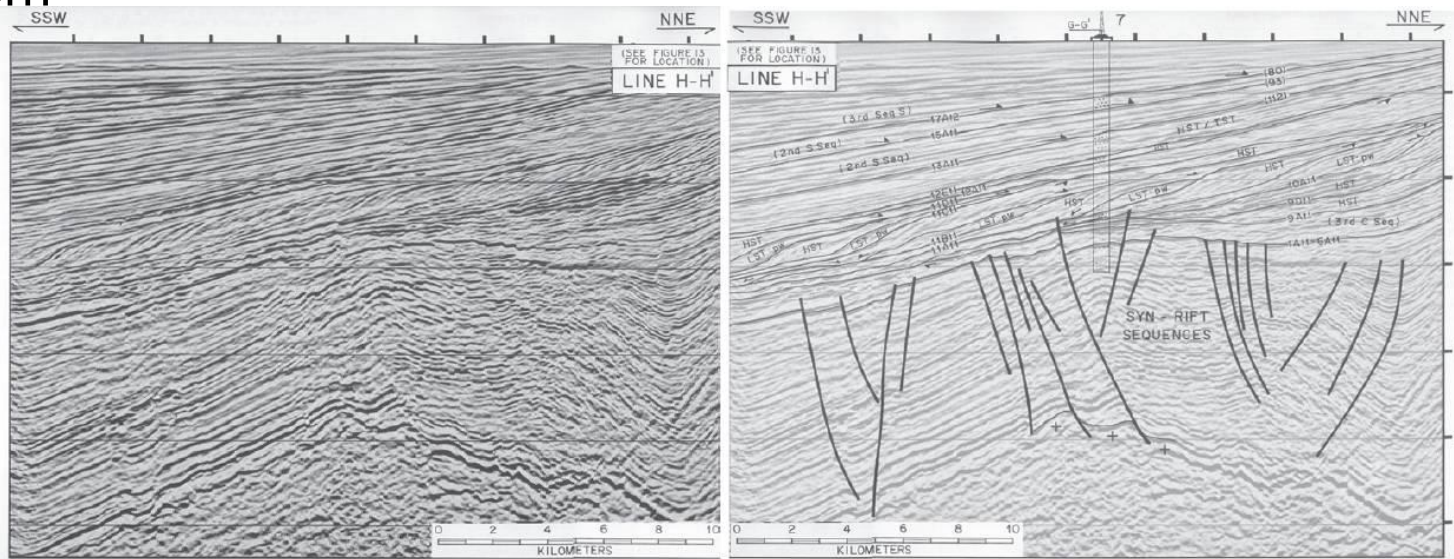
You need to correctly correlate lithofacies in the subsurface in order to

- identify flow units and to map the distribution, thickness and continuity of reservoir and seal facies
- estimate reservoir volume, porosity, permeability distributions and therefore fluid volume



Data

- **Wireline logs** (well tops and lithology) are a primary (hard) data (usually needs preparation)
- **Biostratigraphic** (chronostratigraphic) data
- **Seismic** often is the only way to get an idea of interwell communication pattern

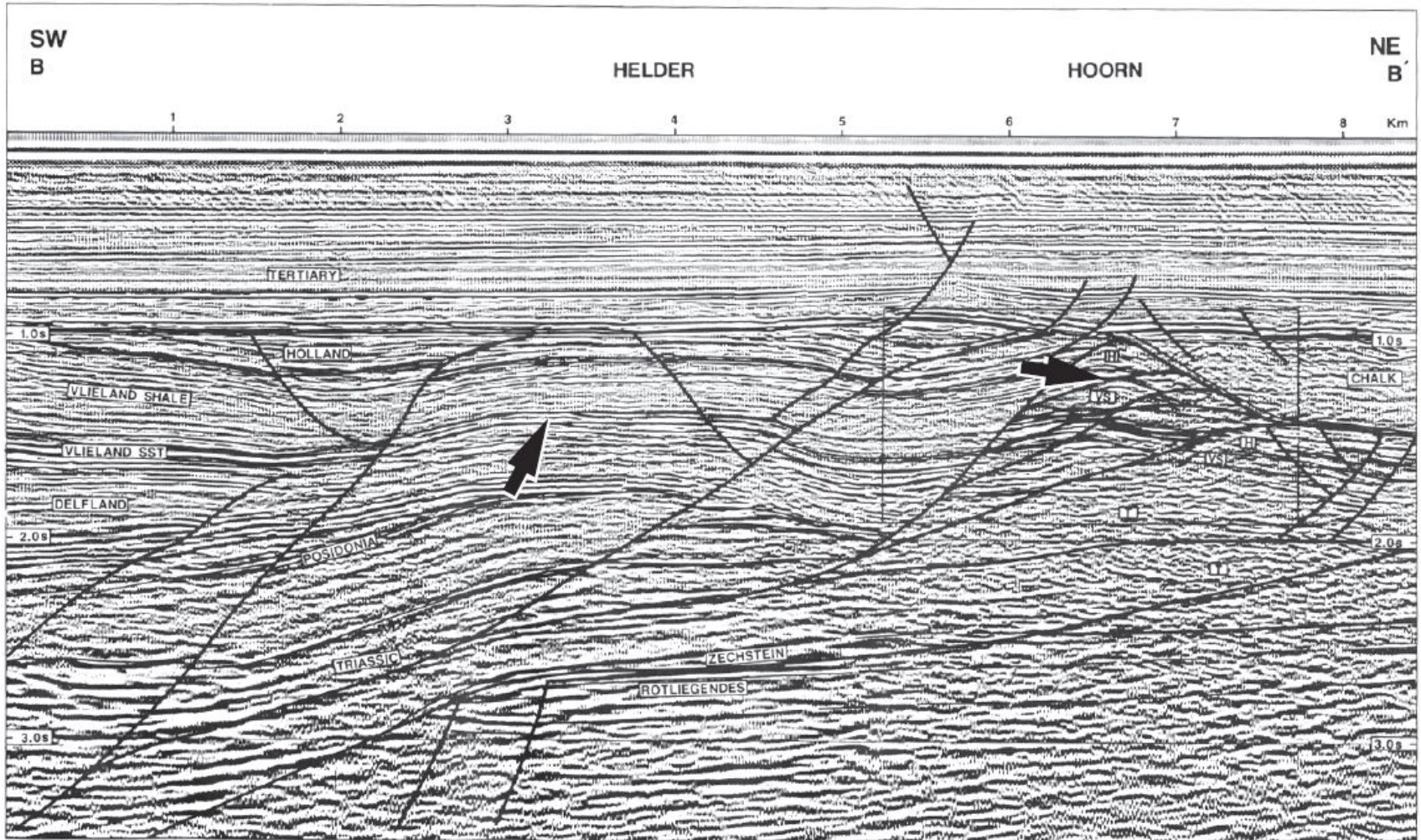


Выделение тектонических нарушений с помощью стандартных временных разрезов, на которых видны смещения осей синфазности отражающих горизонтов, а также затухание амплитуд вдоль субвертикальных линий.

Важность знаний о наличии и положении разломов для разработки месторождений трудно переоценить: они могут являться тектоническими экранами и оказывать решающее влияние на потоки как извлекаемой нефти, так и закачиваемой воды.

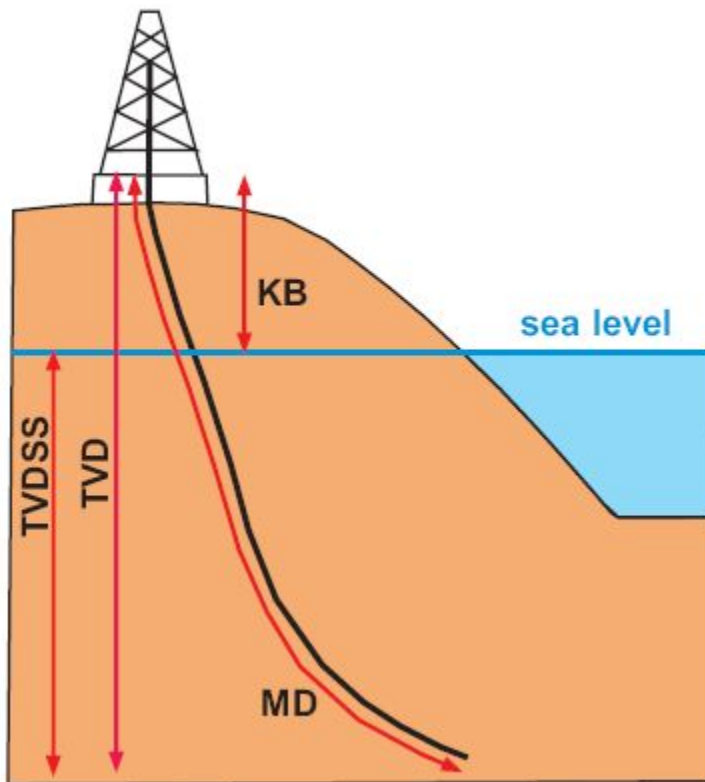
Data

Compare the complexity of Helder and Hoorn Fields
(Roelofsen et al., 1991)



Data preparation

- Wire log data transformation to True Vertical Depth (TVD) or TVDSS (subsea)



KB Vertical distance from kelly bushing to sea level

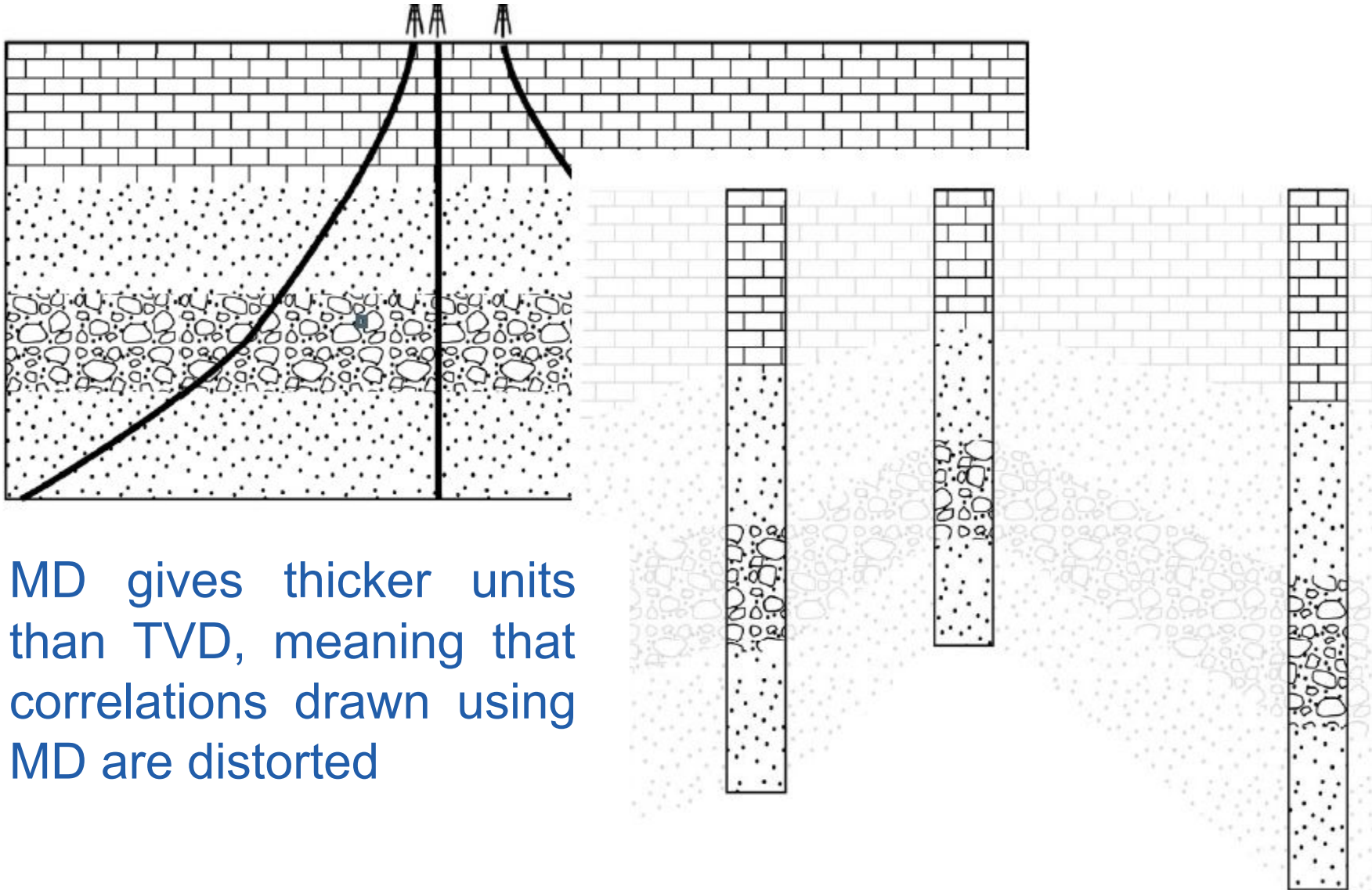
MD Measured depth. Measured distance along the path of wellbore from kelly bushing to any point in the subsurface

TVD True vertical depth. Vertical distance from kelly bushing to any point in the subsurface

TVDSS True Vertical Depth Subsea. Vertical distance from mean sea level to any point in the subsurface

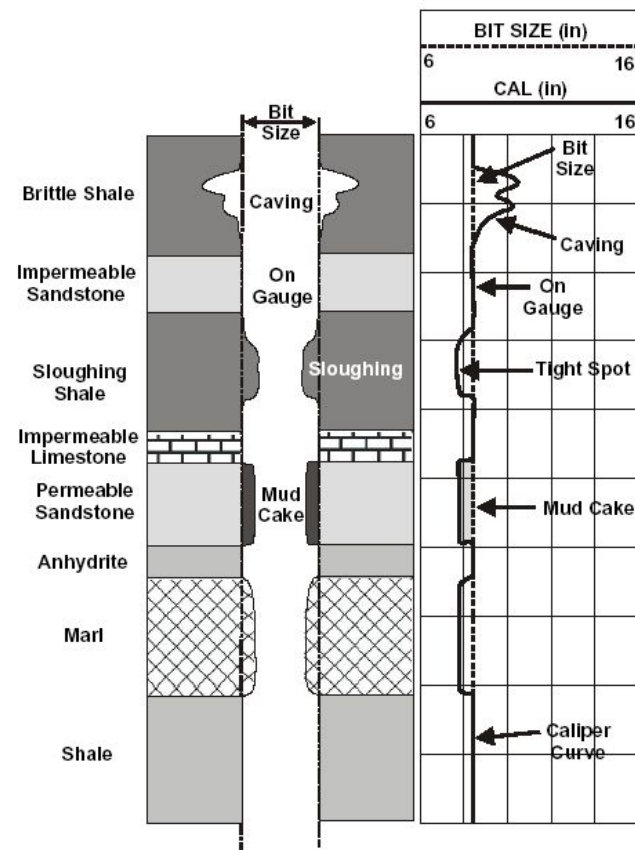
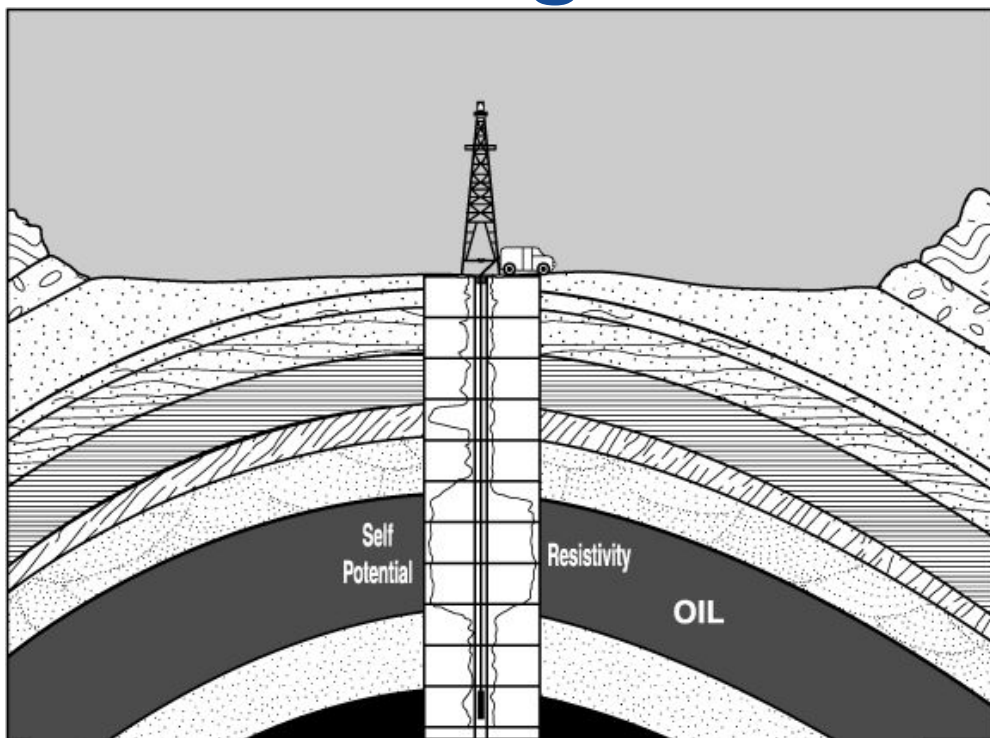
- Альтитуда - высота точки местности над уровнем моря (среднеголетний уровень моря), определяемая Нивелированием.

Why normalize scales?



MD gives thicker units than TVD, meaning that correlations drawn using MD are distorted

Wireline Logs



Caliper – кавернометрия, результатом измерения является кавернограмма — кривая, отражающая изменение диаметра скважины с глубиной.

Mud log - диаграмма удельного сопротивления бурового раствора.

Dipmeter - определение в скважине азимута и угла падения пластов. Азимут и угол наклона пластов определяют в скважине с помощью специального глубинного прибора — пластового наклономера.

Sonic (AK) – измеряет скорость пробега упругих волн в породе. Если известна литология, позволяет рассчитать пористость. Совместно с нейтронным позволяет определить вторичную пористость.

GR – это по сути индикатор глин, и обычный инструмент для корреляции. (но не отличает радиоактивные минералы от глины, искажая значение содержания глин).

Data preparation

- Different purpose
 - **GR** – lithology (sand vs clay)
 - **Resistivity** – saturation character and quantity
 - **Sonic** – lithology (hard or soft) and seismic markers recognition
 - **Caliper** – sometime lithology and other log data reliability
 - **Dipmeter** – bedding (sometime fractures) orientation; deformation and faults can be recognized
 - **Mudlog** – lithology (cuttings), hydrocarbon shows

Stratigraphy

- **Lithostratigraphy:** most widely used (still), allows arranging facies, porosity and permeability zones. / *раздел стратиграфии, использующий для расчленения разрезов и прослеживания выделенных литостратиграфических подразделений особенности вещественного состава осадочных, вулканогенно-осадочных и эффузивных толщ.*
- **Biostratigraphy:** fossil assemblages used for correlation and (usually) dating the rocks / *раздел стратиграфии, изучающий распределение в осадочных толщах ископаемых остатков организмов с целью выяснения относительного возраста этих отложений.*
- **Chronostratigraphy:** using a timelines of sedimentation / *раздел стратиграфии, имеющий дело с установлением относительного возраста и возрастных соотношений геологических тел.*
- **Magnetostratigraphy:** correlation of zones with the same polarity.
- **Chemostratigraphy:** use of chemical/isotopic markers/ *раздел науки на стыке химии и стратиграфии, занимающийся изучением химического состава осадочных пород.*

Stratigraphic principles

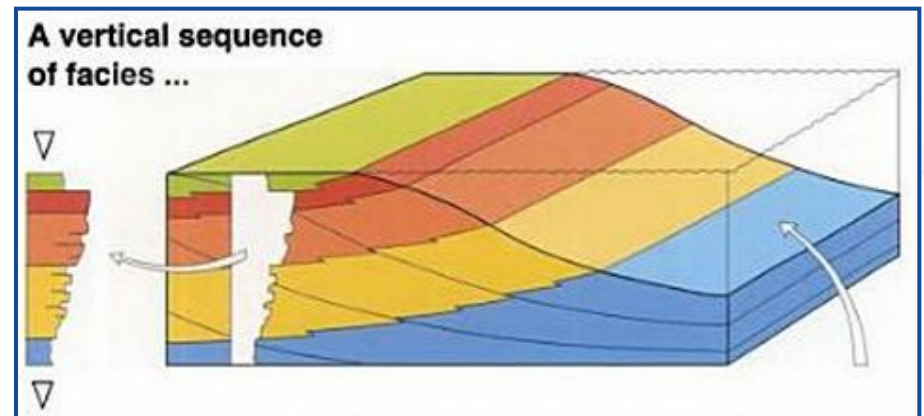
- **Uniformitarianism:** The present is the key to past
- Sedimentary rocks are deposited **horizontally**
- Sedimentary beds **continue laterally until they pinch-out positionally**
- **Unconformities** may represent the greatest amount of geological time

Теоретическую основу стратиграфии составляют два принципа: закон напластования Стено и закон соответствия флоры и фауны Гексли Теоретическую основу стратиграфии составляют два принципа: закон напластования Стено и закон соответствия флоры и фауны Гексли. Согласно закону напластования, введённому в науку Николасом Стено Теоретическую основу стратиграфии составляют два принципа: закон напластования Стено и закон соответствия флоры и фауны Гексли. Согласно закону напластования, введённому в науку Николасом Стено в XVII веке, **выше лежащие пласты горных пород, как правило, являются более**

Stratigraphic principles

- **Law of Superposition:** in any sedimentary succession that has not be overturned, the oldest rock will be at the bottom and the youngest at the top / *породы находящиеся в не нарушенном складчатостью и разломами залегании, следуют в порядке их образования, породы залегающие выше моложе, а те которые находятся ниже по разрезу — древнее.*
- **Walther's Law:** Sedimentary facies occurring in a conformable stratigraphic succession were deposited in laterally adjacent depositional environment.

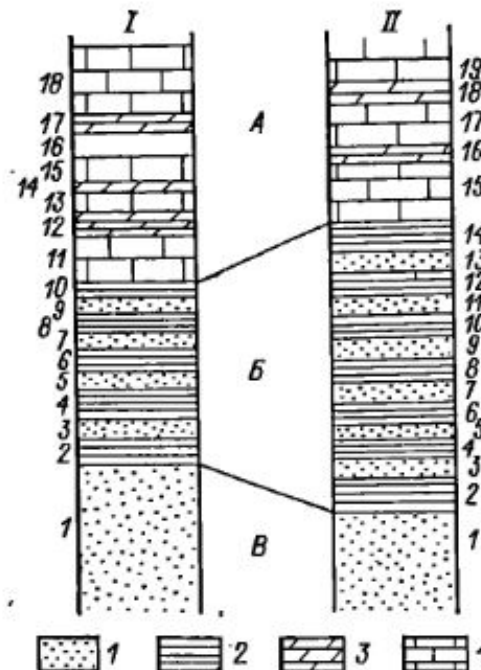
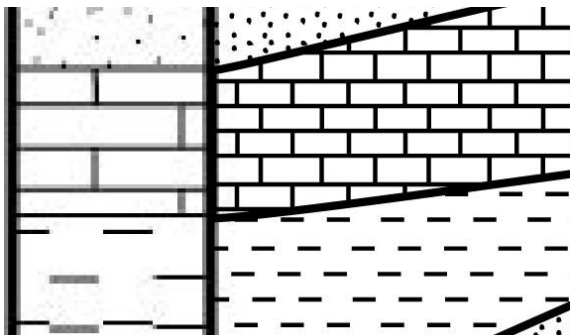
/ Только такие фации и фациальные обстановки могут залегать друг на друге в геологическом разрезе, которые в современных условиях лежат рядом.



Lithostratigraphy

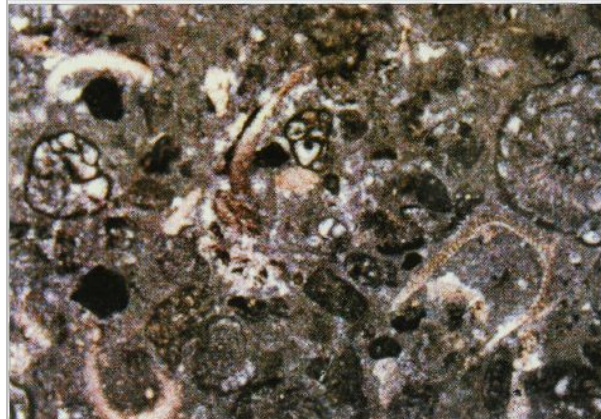
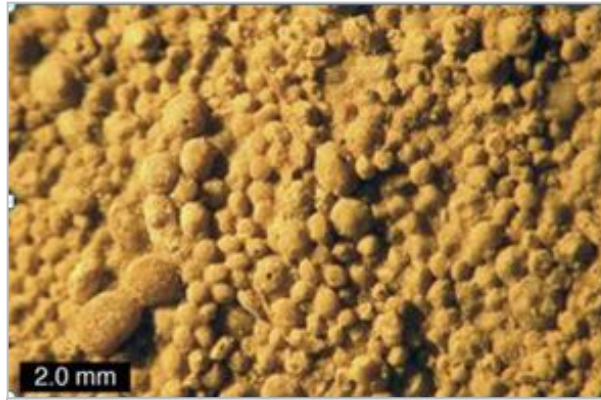
Lithostratigraphic unit – a stratum or body of strata, usually layered, often tabular, that conforms to the law of superposition and is defined on the basis of lithic characteristics and stratigraphic position

Lithology – the physical characteristics of a rock, including colour, mineralogy, grain size, textures, structures and so on.



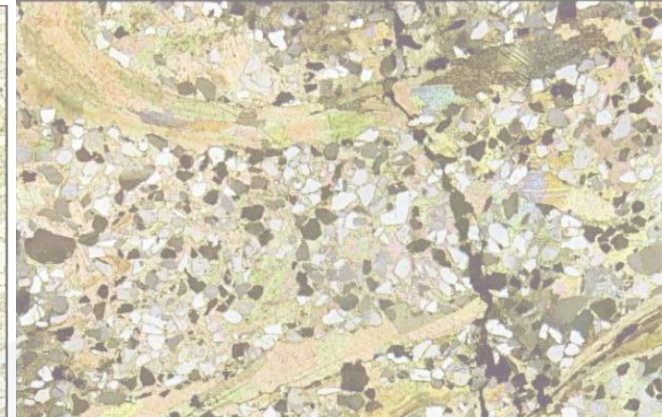
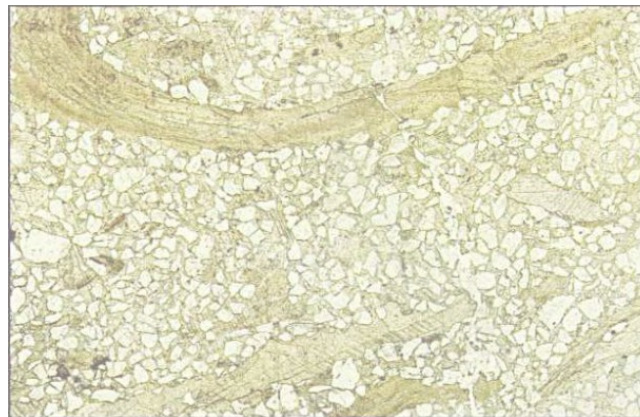
for example: this correlation implies that between these two points this bedding plane is continuous

Макро- и
микроизображения
ооидов на
поверхности
известняка
(Carmel For-
mation)



- Биокласты. Известняк микро-мелкозернистый с органическими остатками (раковины фузулинид, обломки иглокожих, остатки водорослей, пр. неопределимый детрит). Увеличение 4х, 10х, николи

*In this 10X thin section photograph, we have a **Calcareous Sandstone**, in which angular quartz grains are cemented together by calcite (here showing its distinctive rainbow hues in crossed polars), along with various pieces of calcite of different origins.*





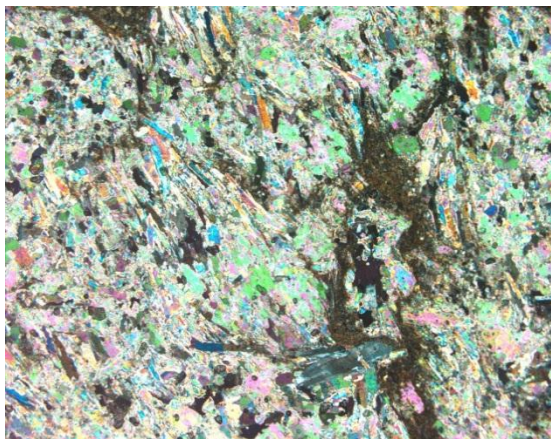
галит



карбонат кальция



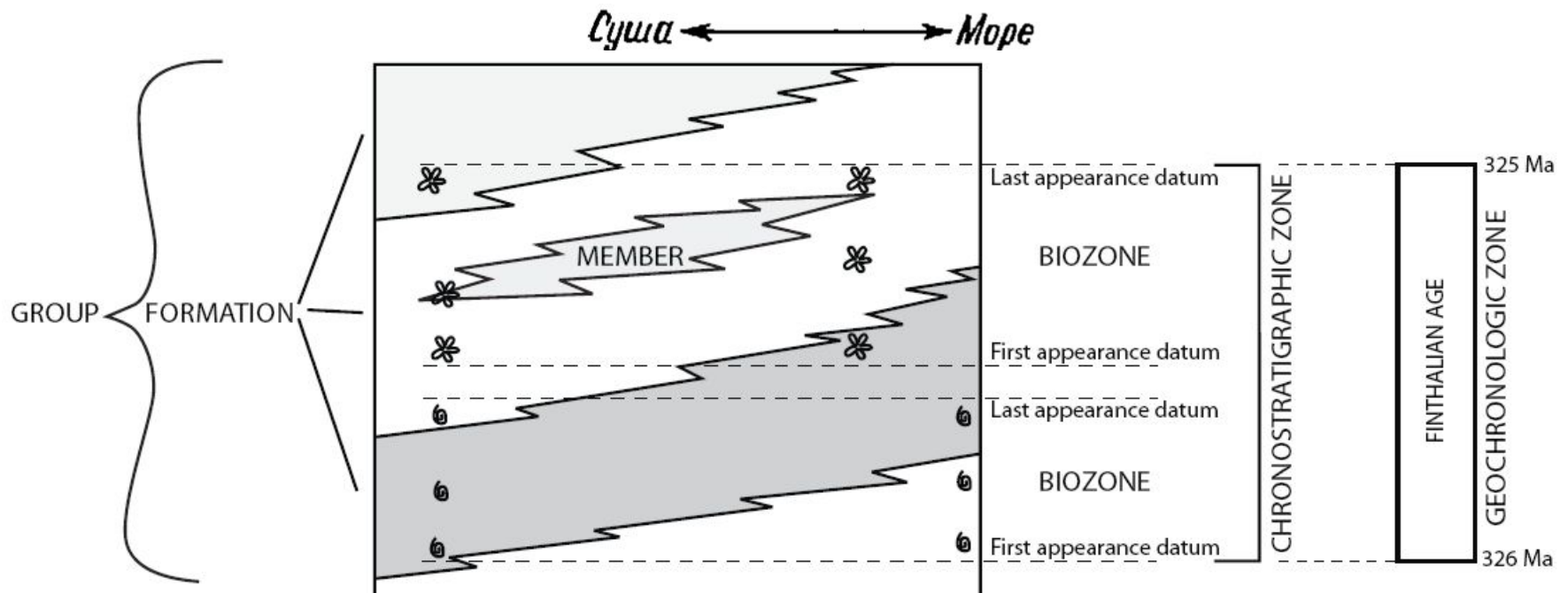
ангидрит



Призматические, брусковидные кристаллы ангидрита образуют радиально-лучистые скопления (минерал бесцветный, в скрещенных николях отличается сарафанными цветами интерференции). Увеличение 4х, николь +.

Lithostratigraphy

- The same lithology does not always mean that the rocks were deposited at the same time, often lithology is environment sensitive, not time sensitive, so that lithologic units are often **time transgressive** (occur at different times in different places)
- Lithology reflects deposition environment



Lithostratigraphy

Formal **lithostratigraphic terms** in increasing scale:

- **Member** (пачка) - smallest locally mappable unit (within field)
- **Formation (свита)** - mappable unit at the basin scale
- **Group** (серия) - mappable across several basins

Stratigraphic framework of the region

Пачка — относительно небольшая по мощности совокупность слоев (пластов), характеризующихся некоторой общностью признаков или одним определенным признаком, которые отличают ее от смежных по разрезу пачек в составе свиты (подсвиты) или толщи.

Свита — основная единица местных стратиграфических подразделений, представляет собой совокупность развитых в пределах какого-либо геологического района отложений, которые отличаются от ниже- и вышележащих составом и структурами пород, обусловленных их генезисом, комплексом остатков организмов, пр.

Серия объединяет две или более свиты, образующие крупный цикл осадконакопления и (или) охарактеризованные какими-либо общими признаками: сходными условиями формирования (морские, континентальные, вулканические), преобладанием определенных пород (осадочные, магматические, метаморфические) или их направленной сменой.

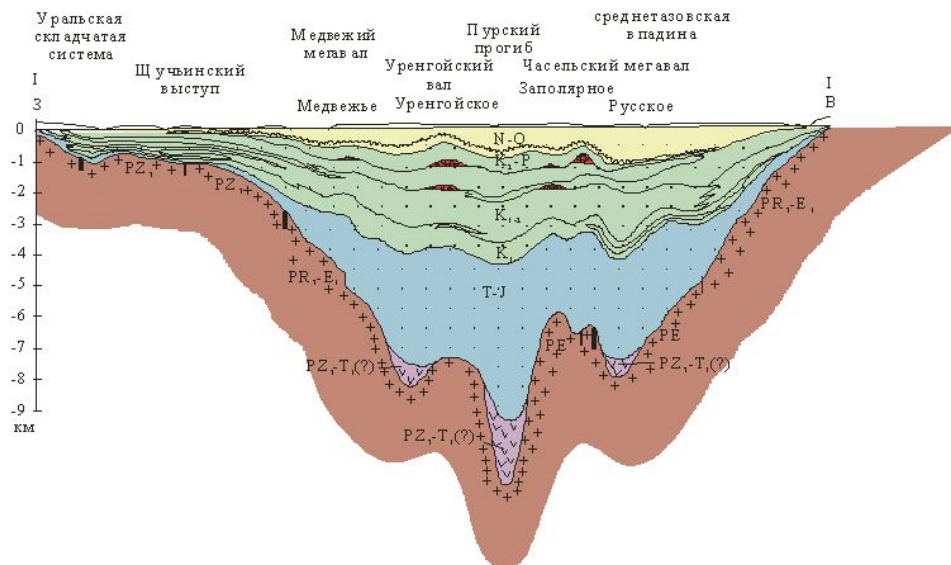
Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция



В строении Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции принимают участие метаморфизованный фундамент докембрийско-палеозойского возраста и полого залегающий мезокайнозойский осадочный чехол. Фундамент погружается от периферии к центру плиты, в пределах которой в соответствии с мощностями чехла и характером платформенных структур выделяют несколько тектонических элементов.

MZ-KZ

PZ



Lithostratigraphy: markers

- **Stratigraphic markers** are widespread units **or boundaries** that may be recognized and correlated over an area – **that must have been deposited all at the same time** (simultaneously) **over the entire basin**
- abrupt lithology change (Bazhen Fm)
- platform limestones
- shallow-marine sandstone (not basin-wide)
- coal beds in deltaic successions
- excellent marker – tephra (volcanic ash)

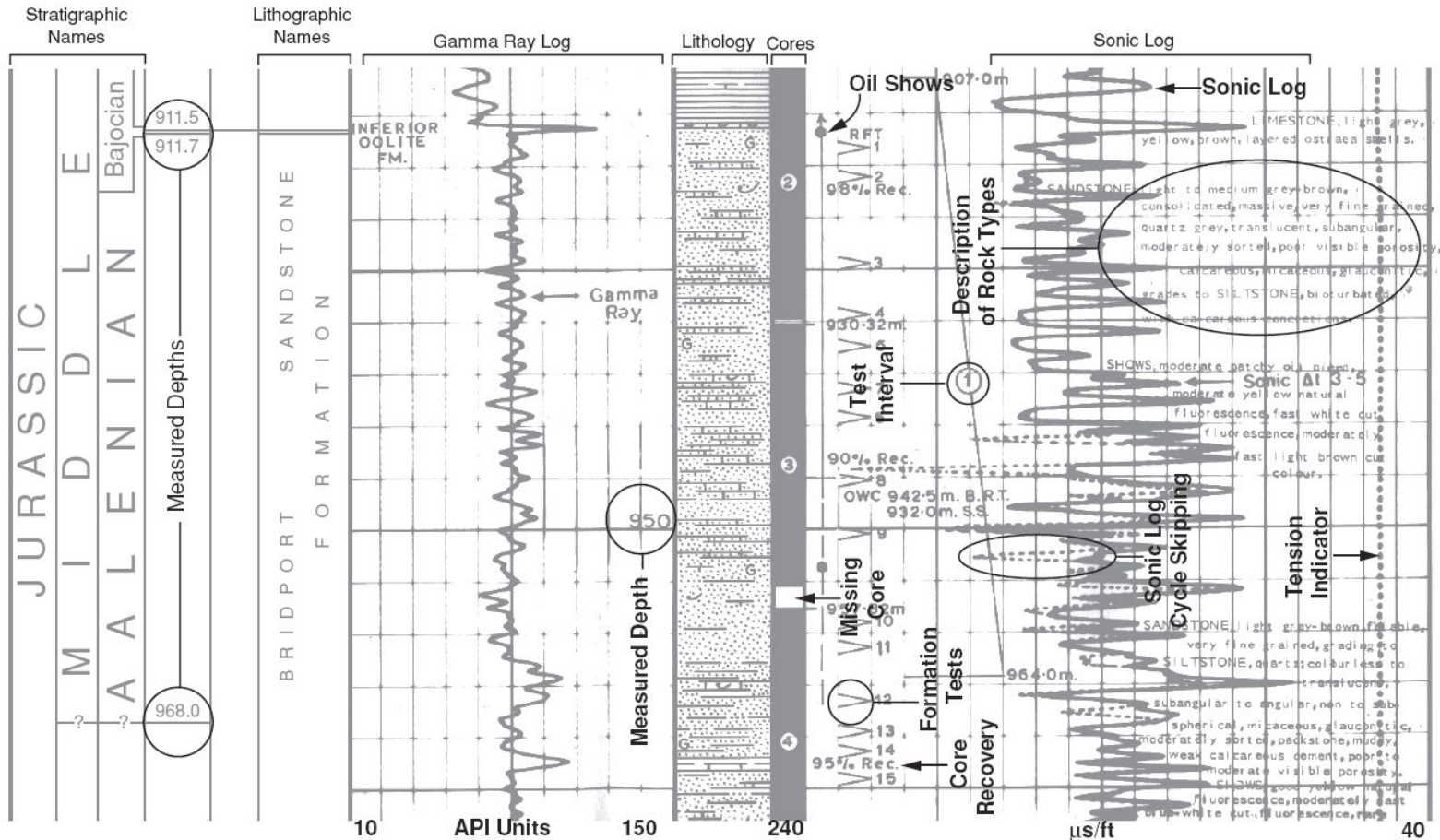
Lithostratigraphy: non-markers

- Channel sandstones
- Reefal limestones (across the body)

(Рифовые — обязанные своим происхождением жизнедеятельности прикрепленных ко дну водоема колониальных рифостроящих организмов, выделяющих для постройки своего скелета углекислую известь).

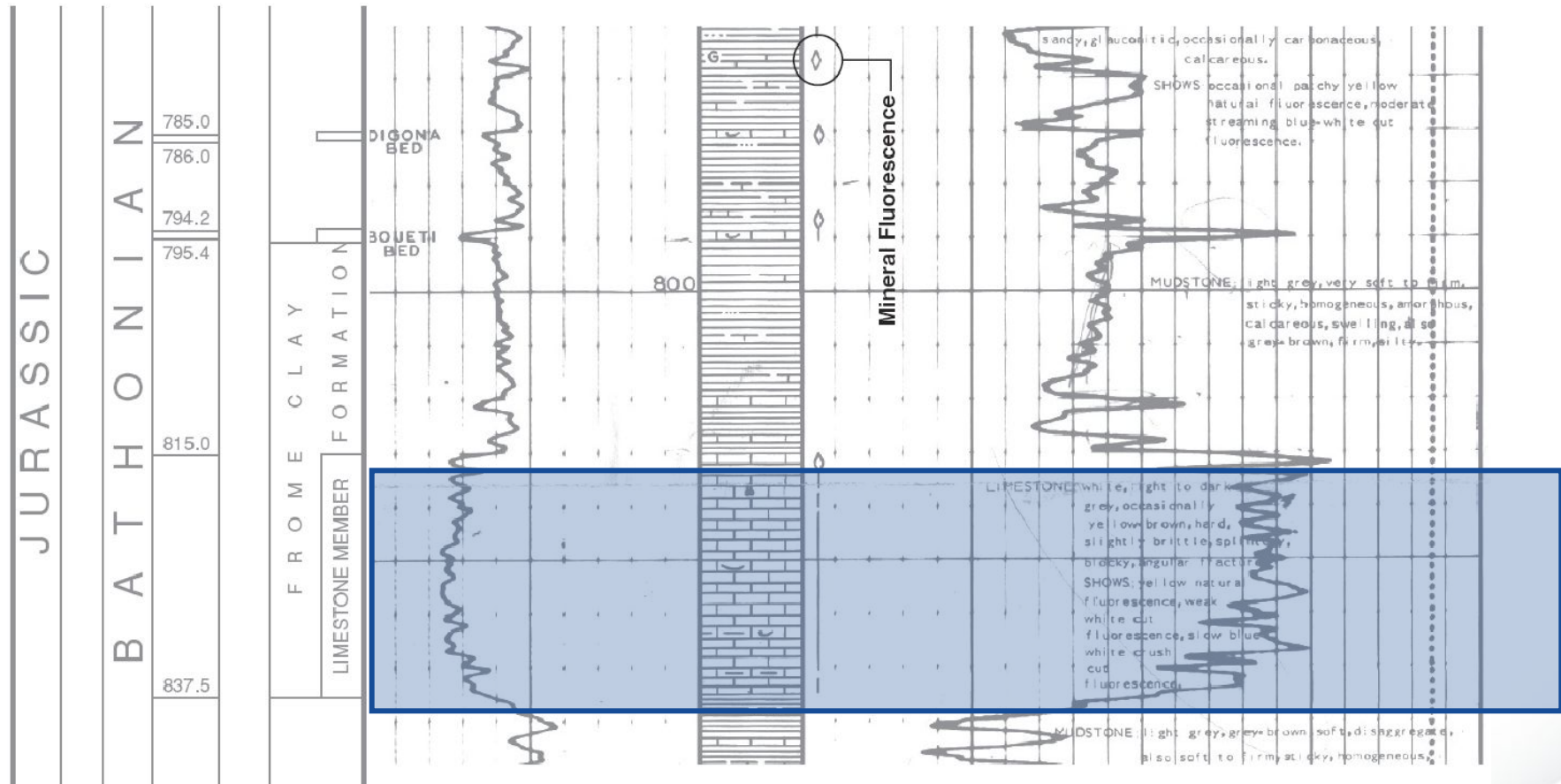
- Fluvial coals (sometime are only markers can be used)
- Alluvial fan deposits (*отложения конусов выноса*)
- Mudstones (if difficult to distinguish between them).

Lithostratigraphy: markers



1. The top of the Bridport Sandstone Formation is marked by a thin, easily recognisable, high radioactivity unit (Inferior Oolite Formation) at 911,6 m.
2. The Gamma Ray and Sonic log have been used for the basis of a Composite Log

Lithostratigraphy: markers

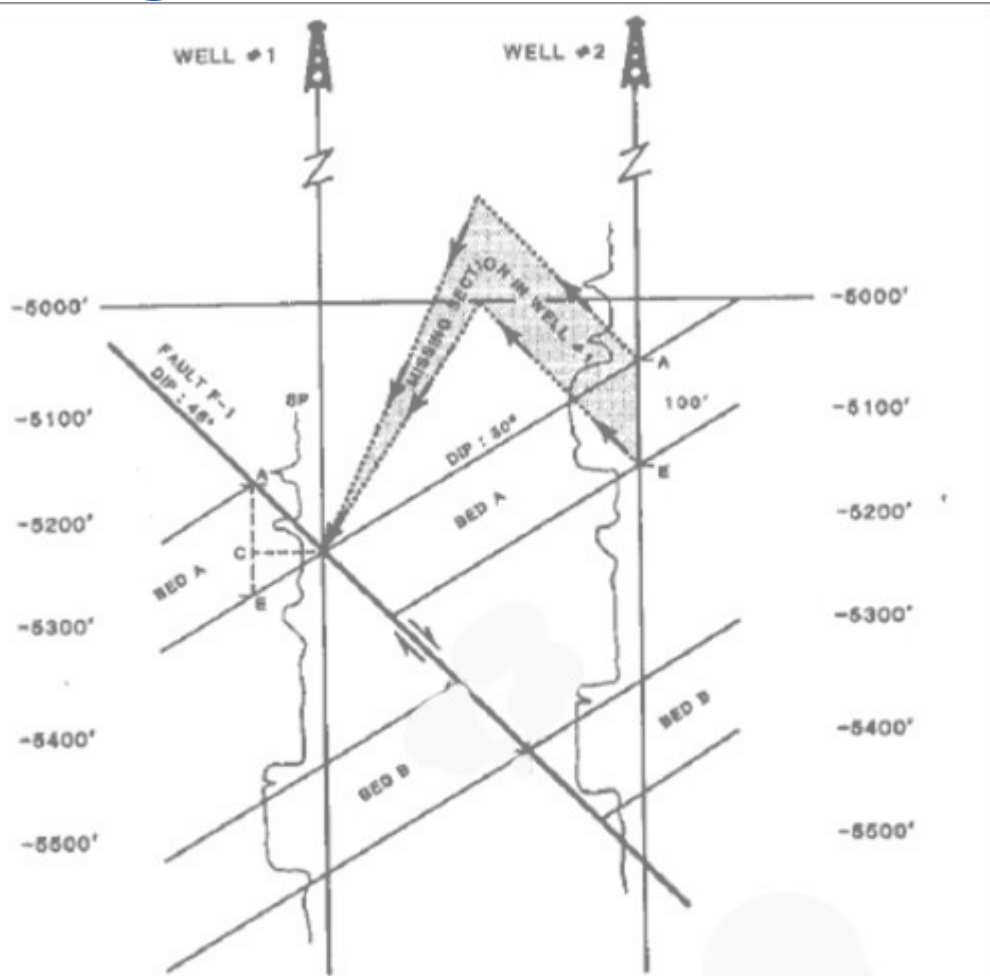


- Clear wireline log response and good acoustic contrast with under- and overlying rocks – **Limestone Member** of Frome Clay Fm

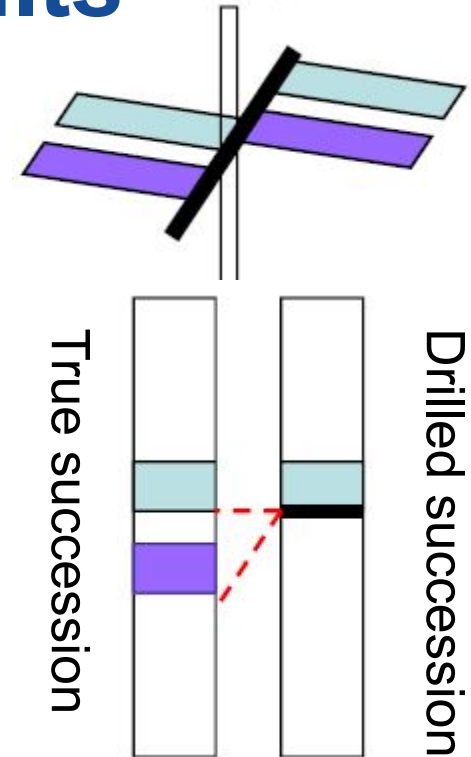
методы (НГК, ГГКП) отражают общую пористость пород, а АК – только ее межзерновую часть

СРЕДА	ΔT, мкс/м	ПРИМЕЧАНИЕ
каверна большого диаметра	580-600	максимальные показания
плотные известняки $K_p > 1\%$	155-160	минимальные показания
плотные доломиты $K_p < 1\%$	140-145	
незацементированная обсадная колонна		
глина	200-270	
песчаник		

Missing sections: normal faults

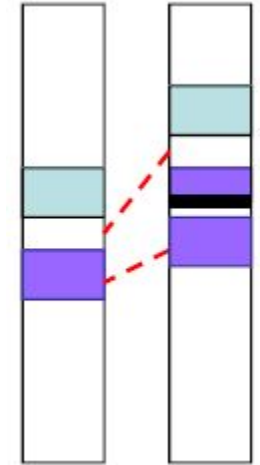
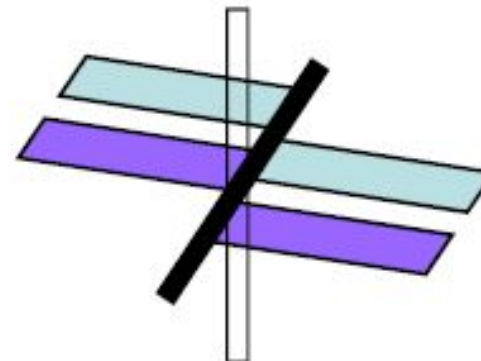
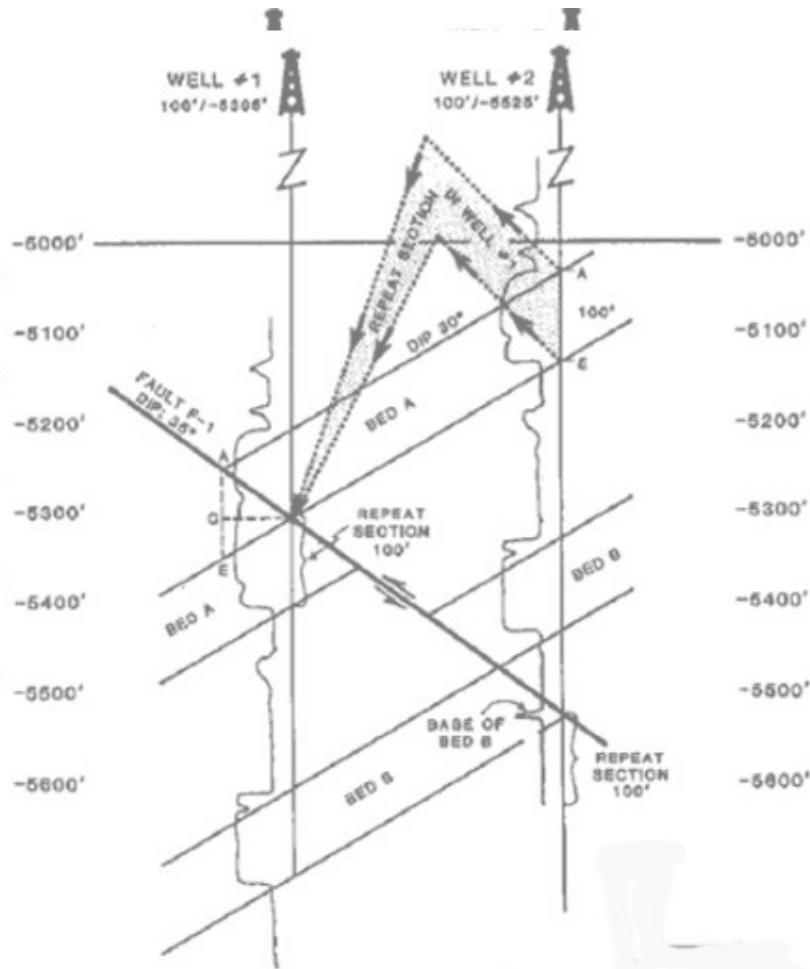


(from Tearpock and Bischke, 1991)



- Well №1 shows reduced section because of **normal fault** penetrated
- Dipmeter would be useful to recognize the fault plane

Repeated sections: reverse faults



True succession

Drilled succession

Dipmeter would be useful to recognize the fault plane

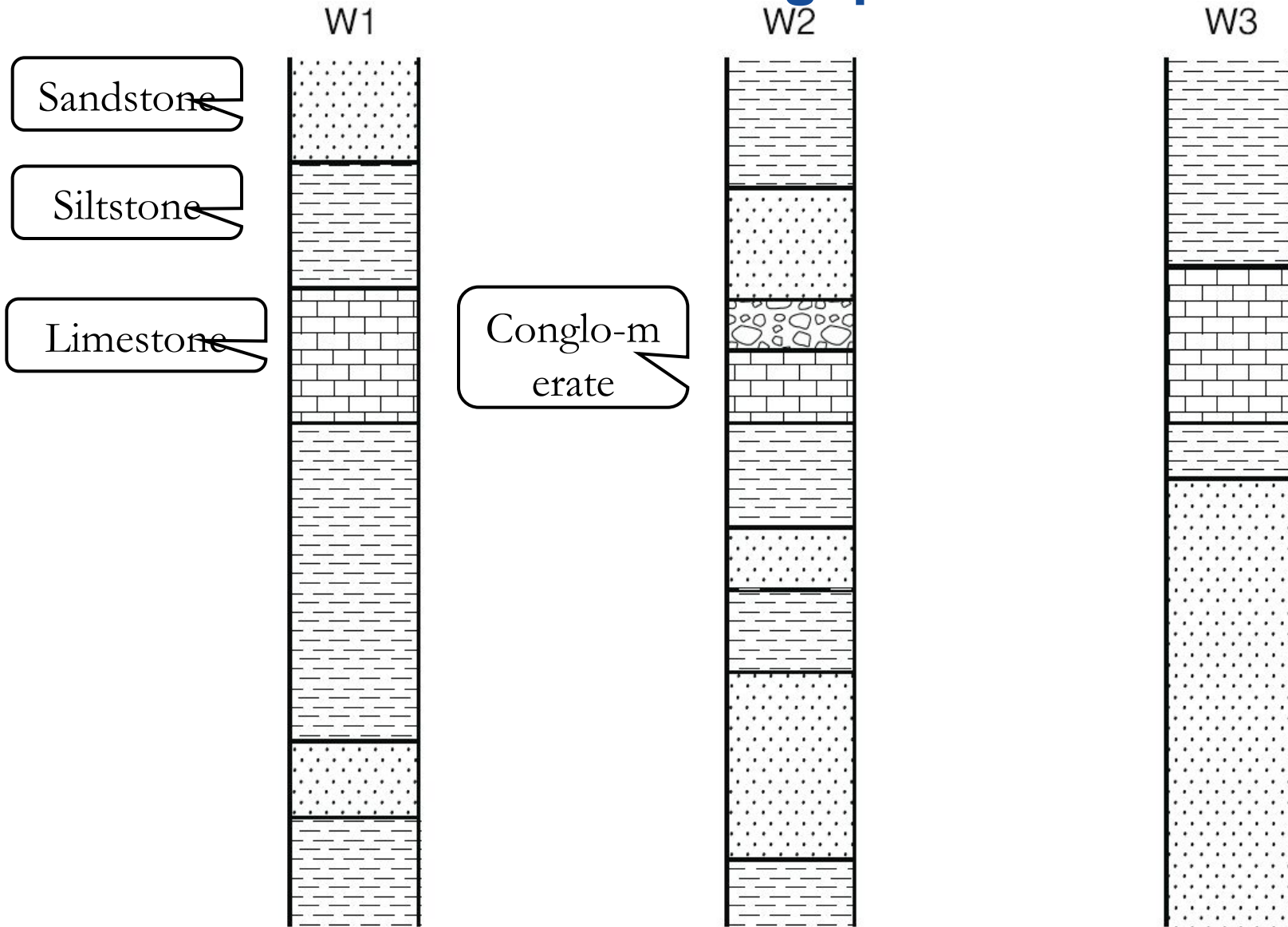
NOTE: structural features are not only reasons for repeating sections!

(from Tearpock and Bischke, 1991)

Correlation Guideline

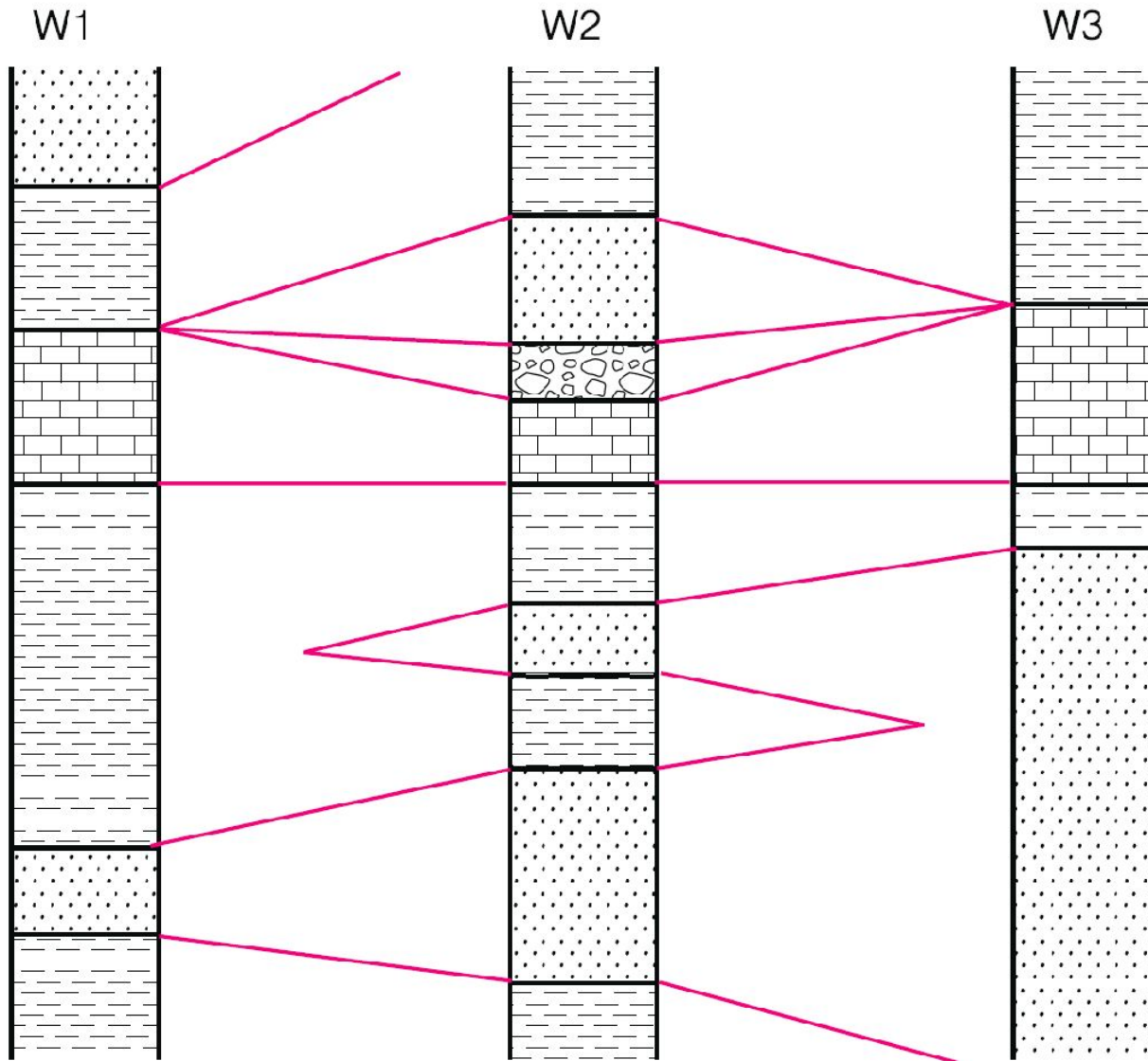
- **Beware** of probable differences in resistivity logs response due to the saturation
- **Always** correlate from **the base to top** – as the rocks were deposited
- **Always** correlate from the **large scale** to smaller scale – worry first about formation top and markers
- **Check** for missing and repeated sections
- **Always** correlate both the top and bottom of a bed/formation
- Pinching out units indicated by **merging lines** (< or >)
- **Never** correlate top and bottom of the well – nothing common with the stratigraphy
- **Check** for mudstone (shale) color change in the mudlog
- Keep in eye **caliper log** as locating damaged (permeable) rock and probable loss of the other logs quality
- **Dipmeter** sudden response change may indicate faults or unconformity
- **Volcanoclastic** is one of the best marker
- **Non-geological** features (scale change, casing shoes, sonic log cycle skip)

Exercise 1. Lithostratigraphical correlation



Correlate the different lithological units represented here

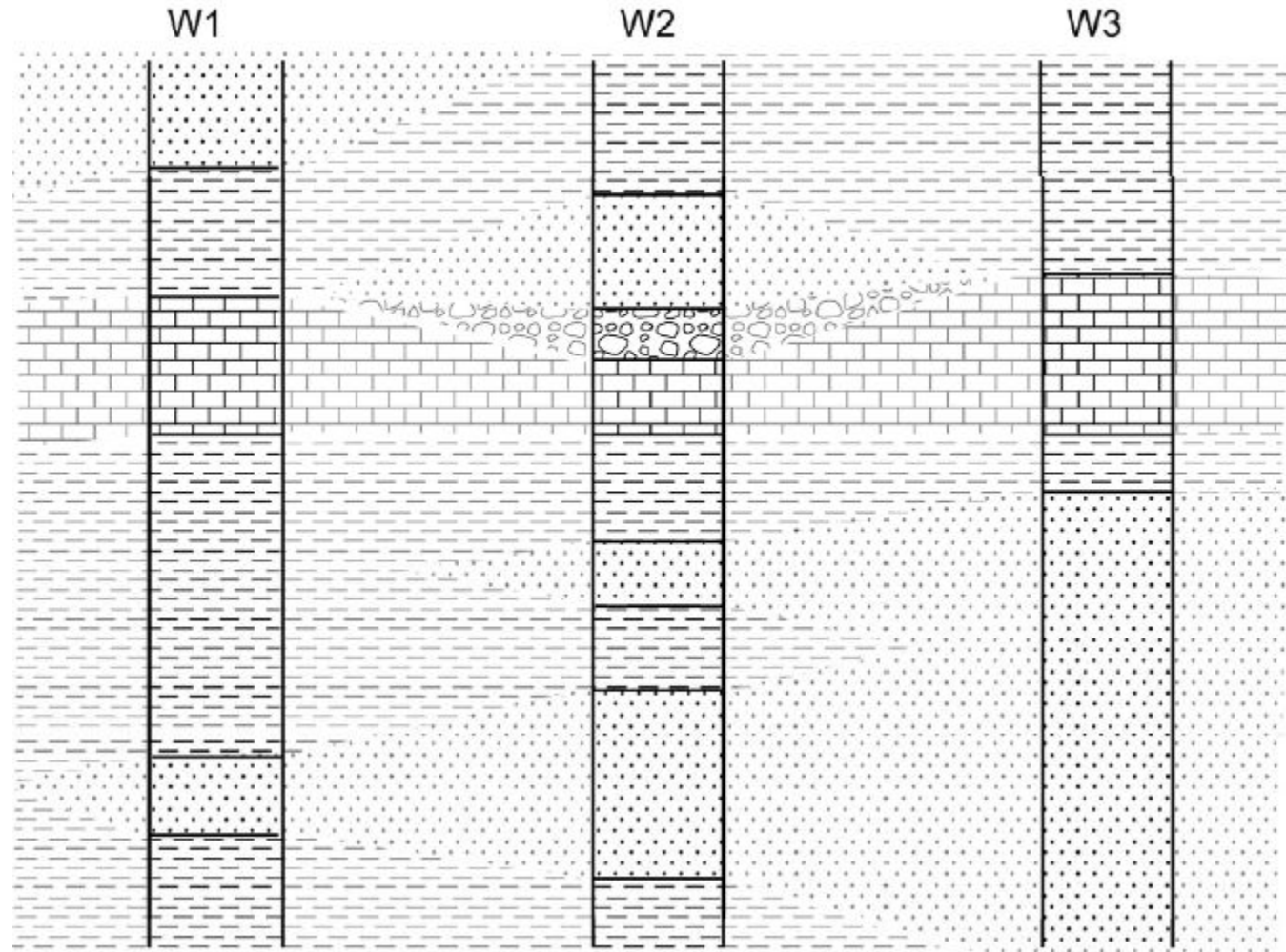
Exercise 1. Lithostratigraphical correlation



This is one of possible answers

What have we just done?

We have decided that the subsurface in the region represented by these three logs looks something like this:



Biostratigraphy

Biostratigraphic unit – a body of rock defined on the basis of its fossil content

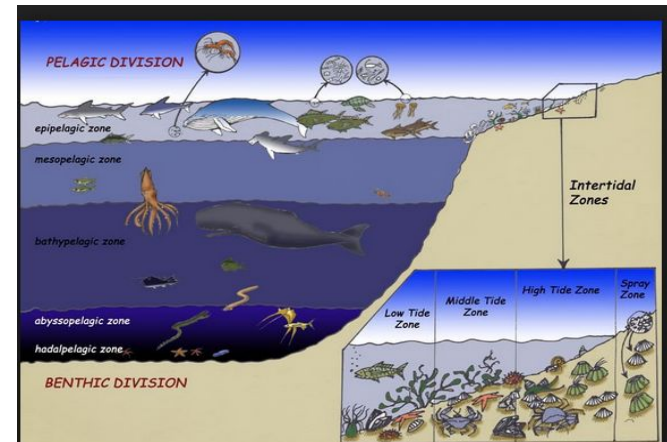
Link between lithostratigraphy and chronostratigraphy

Use appearance and disappearance of organisms to date strata

- Assuming that the organisms appearance and disappearance are related to evolution and not to environmental change.

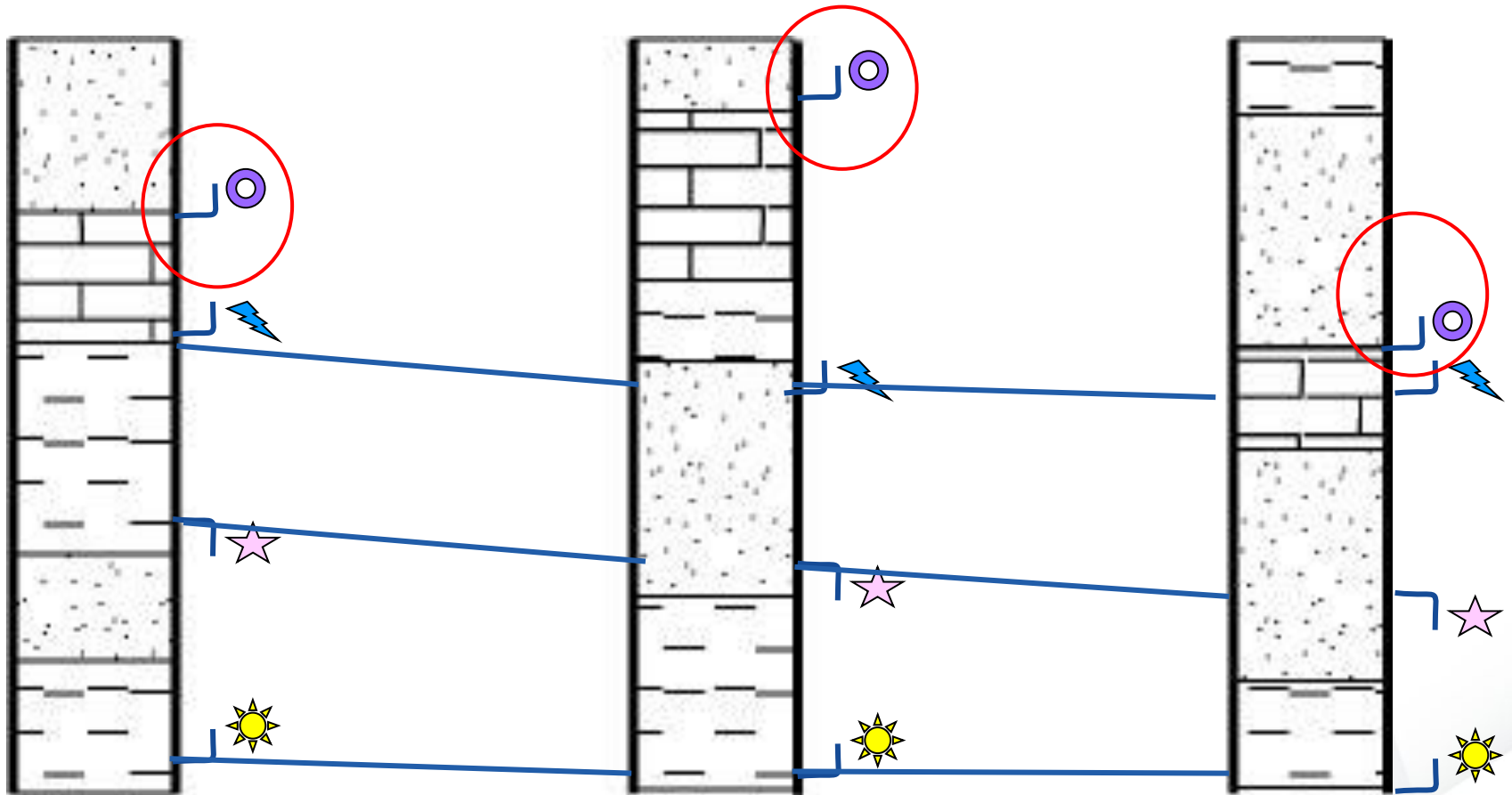
Good biostrat depends on:

- environment (marine vs non-marine)
- preservation
- sampling
- type of fauna/flora - use combination
- facies interpretation

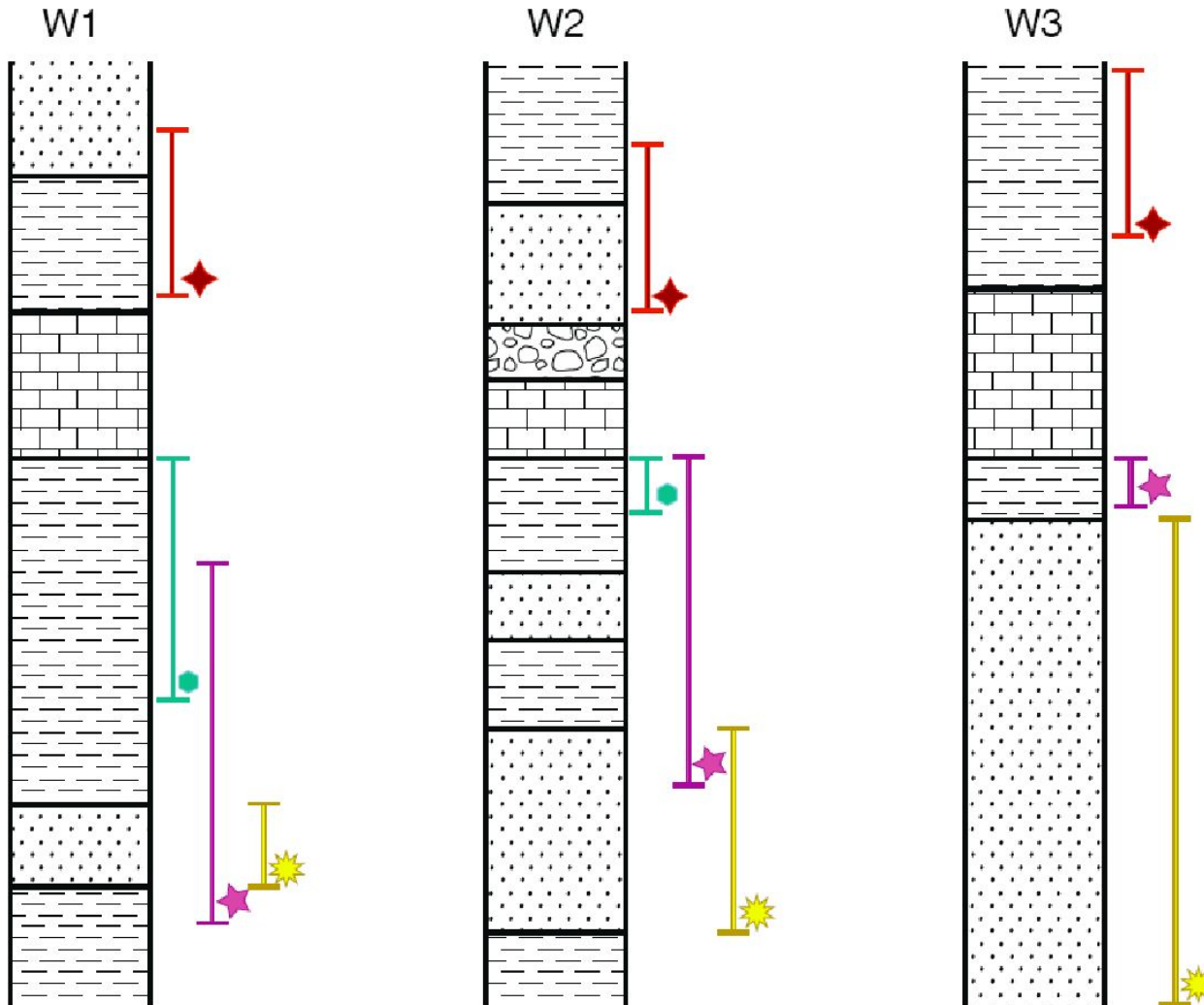


Биостратиграфия (от био-... и стратиграфия), отрасль стратиграфии, изучающая распределение ископаемых остатков организмов в осадочных отложениях с целью установления относительного возраста и соотношения разновозрастных слоев на различных территориях. Особенное значение для выделения зон, имеют группы вымерших организмов с относительно кратким сроком существования, но достигавшие широкого распространения, значительного изобилия и разнообразия.

Biostratigraphical correlation



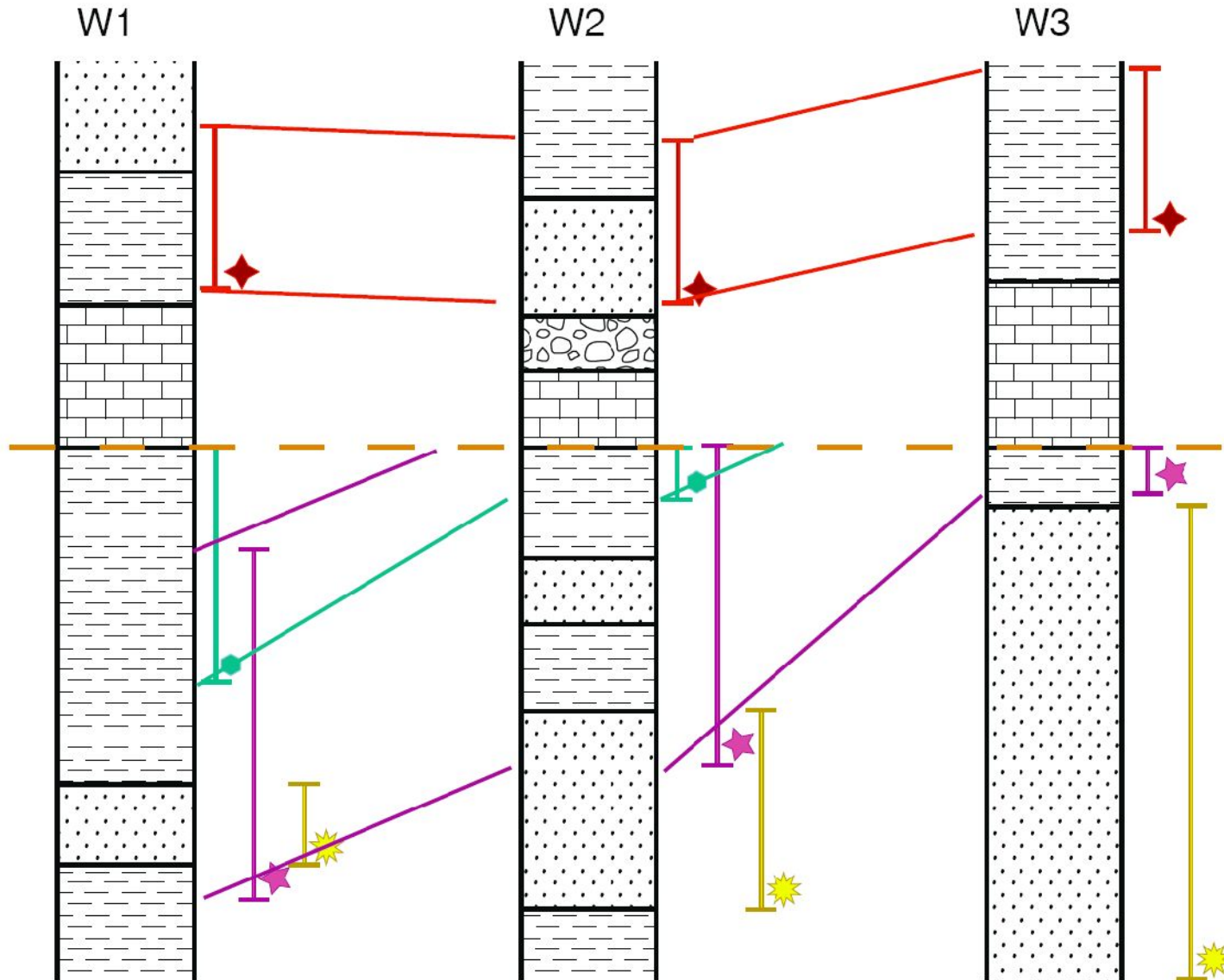
Exercise 2. Biostratigraphical correlation



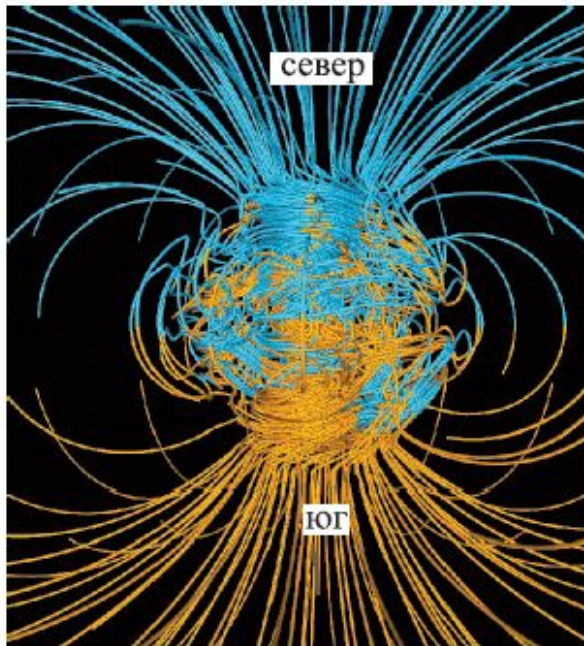
Correlate the biostratigraphic markers represented by the symbols (first and last appearance of the organisms)

Корреляция в стратиграфии — это установление одновозрастности или возрастных соотношений (моложе/древнее) сопоставляемых стратиграфических подразделений.

Exercise 2. Biostratigraphical correlation

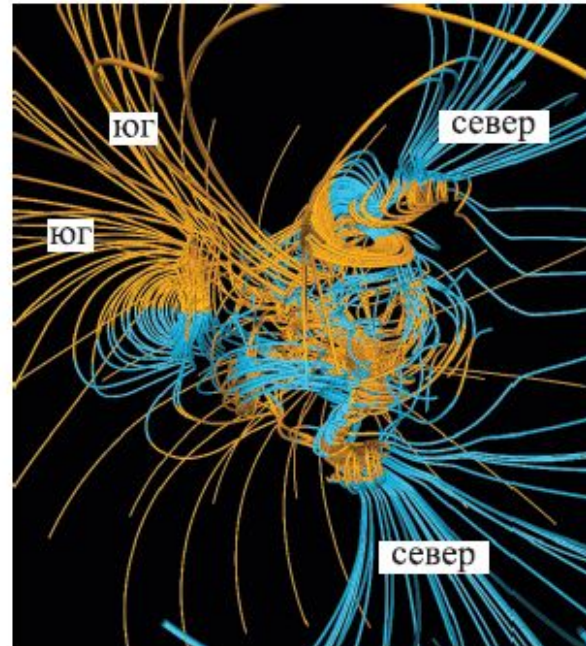


Magnetostratigraphy



Normal polarity

(computer simulation, Glatzmaier and Roberts, 1995)

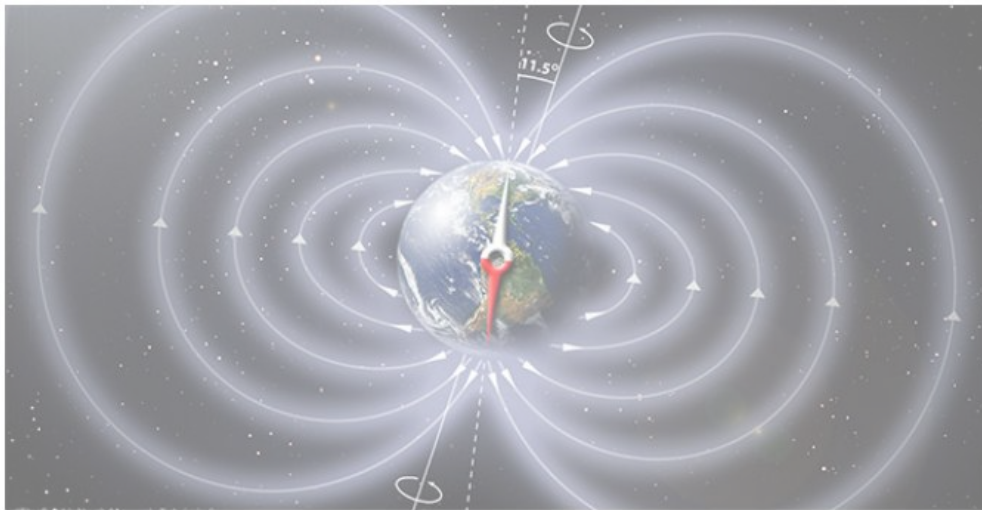


Reversed polarity

- Magnetic minerals in sedimentary rocks tend to be deposited according to the Earth magnetic field
- Earth magnetic field's polarity change over the time
- Today's polarity referred as a "normal" – black zones (in contrast to the "reversed" – white zones)

• **Магнитостратиграфия (палеомагнитный метод)** — наука, изучающая расчленение отложений горных пород на основе их прямой или обращенной намагниченности.

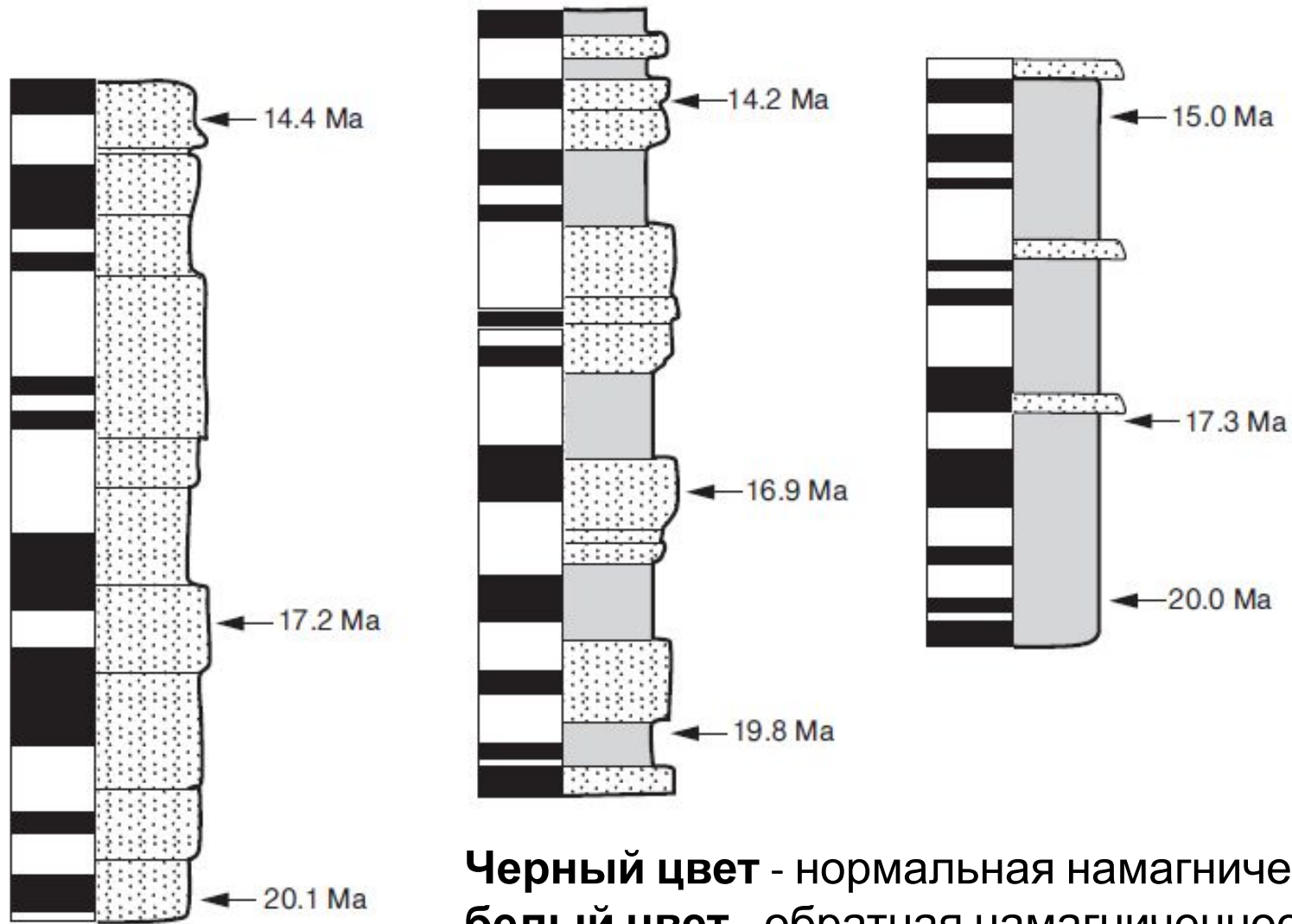
Magnetostratigraphy



- **Магнитное поле Земли** или геомагнитное поле — магнитное поле, генерируемое внутриземными источниками.
- Точки Земли, в которых напряжённость магнитного поля имеет вертикальное направление, называют **магнитными полюсами**. Таких точек на Земле две: **северный** и **южный** магнитные полюса.

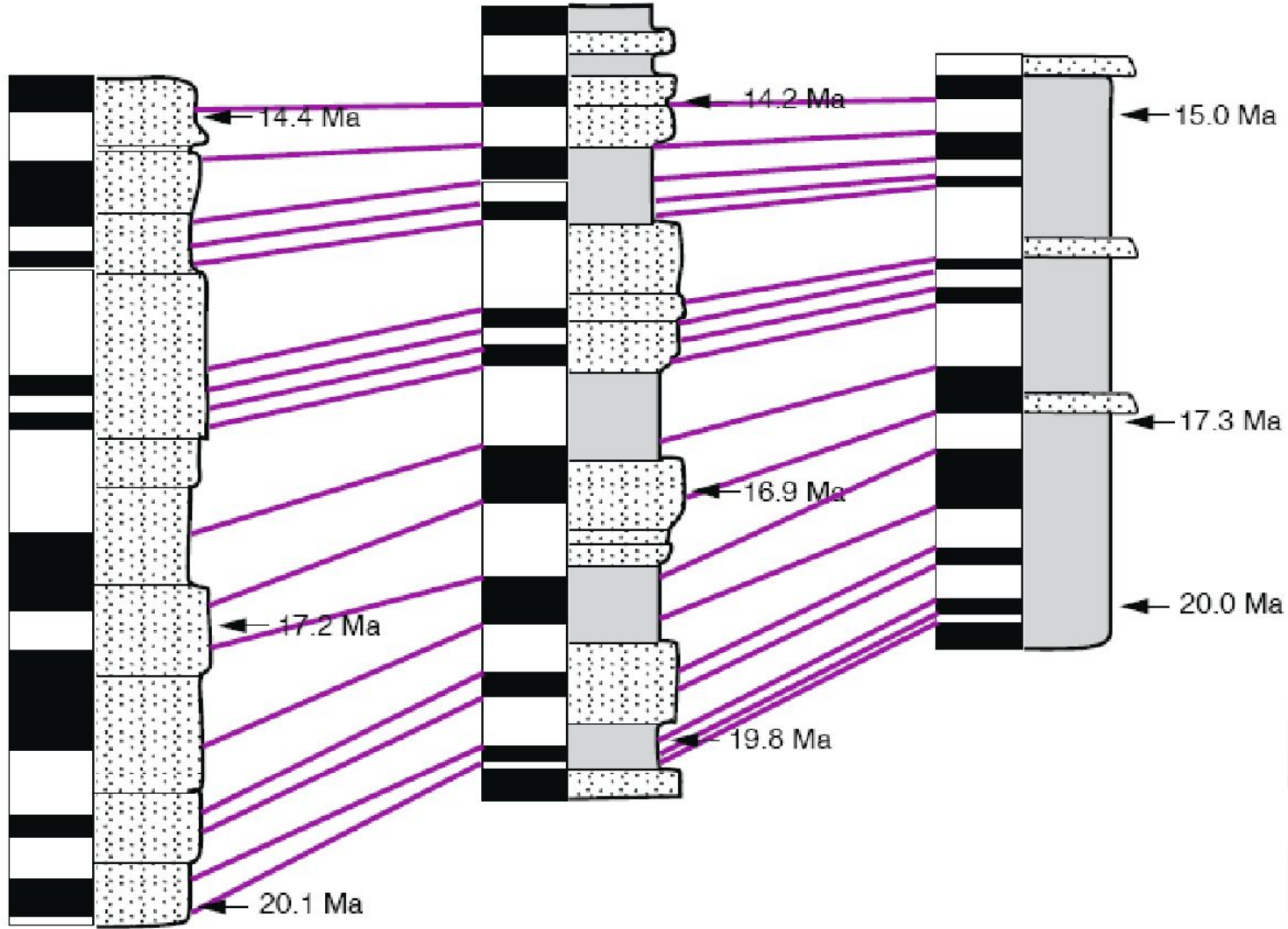
- Подобно тому, как окаменелости и отпечатки организмов, живших в геологическом прошлом, позволяют изучать историю развития органического мира, синхронизировать содержащие их пласты и определять возраст этих пластов, "Окаменелый геомагнетизм" - намагниченность J горных пород - позволяет изучать историю магнитного поля Земли.
- Палеомагнитология изучает магнитное поле Земли **геологического прошлого**, закрепленное в своеобразных отпечатках этого поля — **векторах естественной остаточной намагниченности горных пород**, которые фиксируют магнитное поле времени и места образования горных пород. В истории Земли многократно происходили инверсии магнитного поля, когда векторы первичной намагниченности (J_n) менялись на 180° , т.е. северный магнитный полюс становился южным и наоборот.

Exercise 3. Magnetostratigraphical correlation



Черный цвет - нормальная намагниченность,
белый цвет - обратная намагниченность

Exercise 3. Magnetostratigraphical correlation



Chronostratigraphy

Chronostratigraphic unit – a body of rock laid down at the same time.

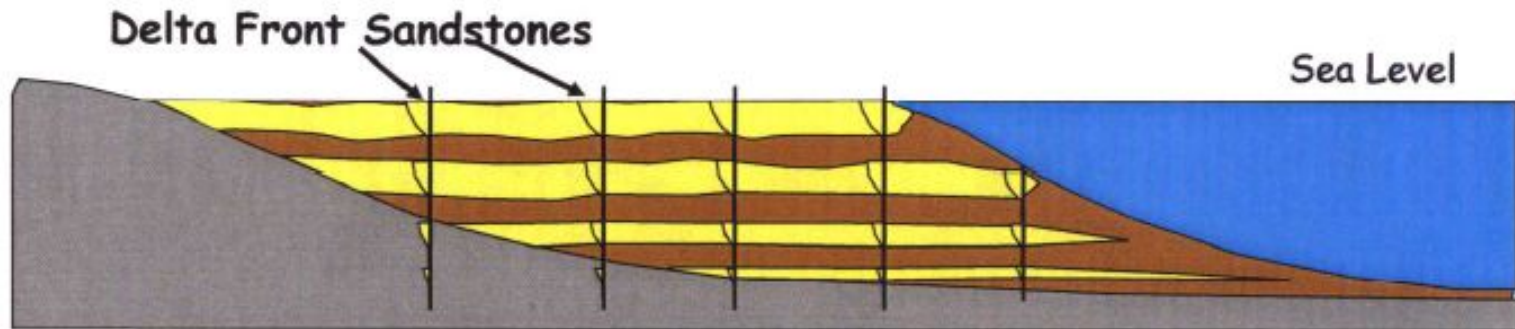
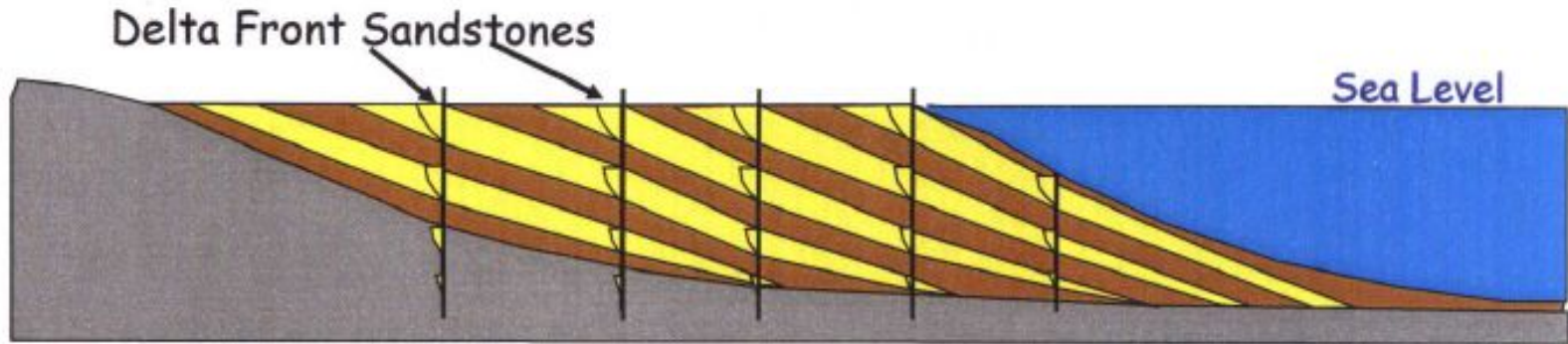
(Хроностратиграфия (гр. *chronos* - время, лат. *stratum* - настил, слой и гр. *grapho* - пишу) - раздел стратиграфии, имеющий дело с установлением относительного возраста и возрастных соотношений геологических тел).

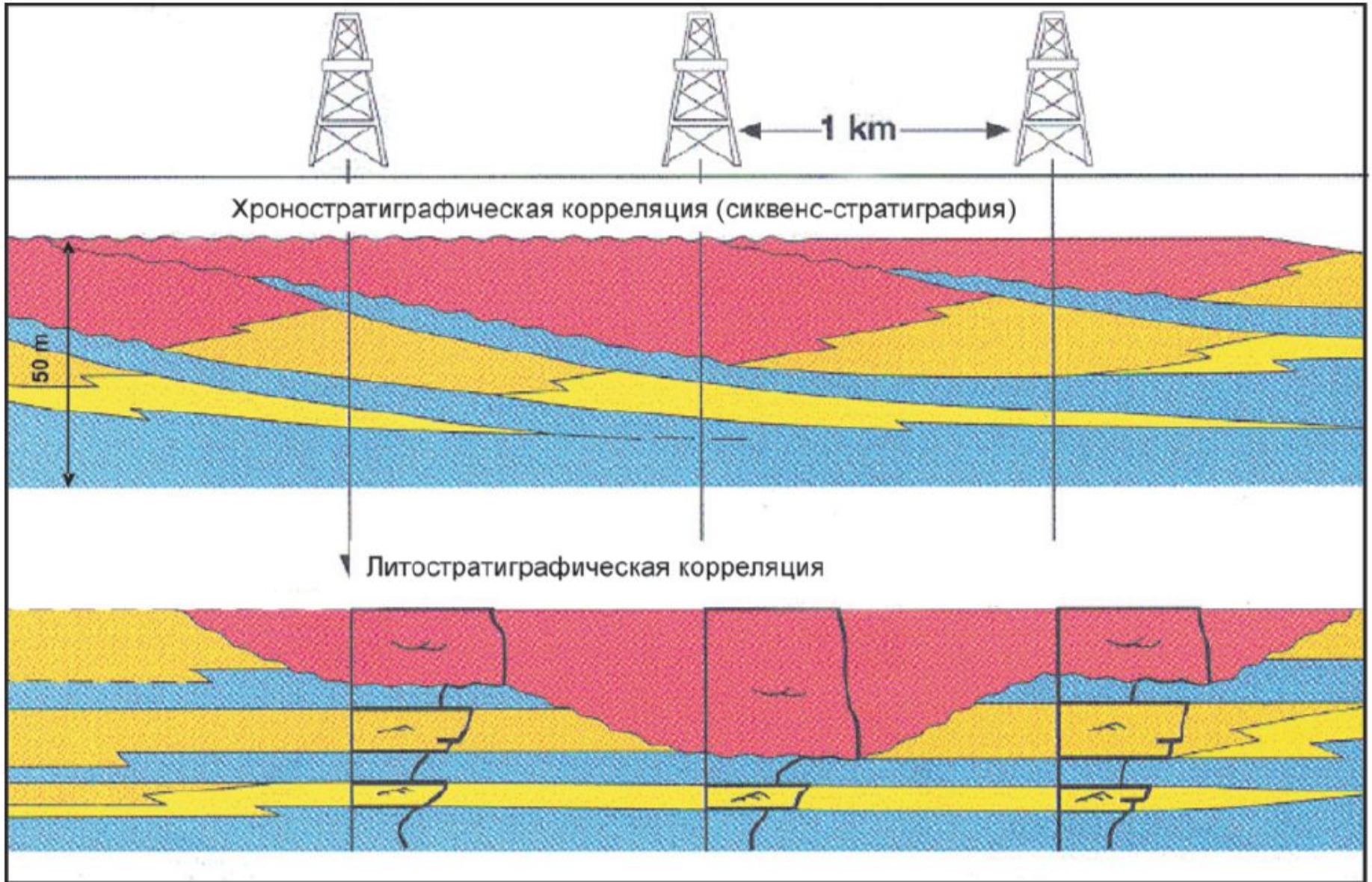
ЗОНАТЕМА (ЗОН)	ЭРАТЕМА (ЭРА)	СИСТЕМА (ПЕРИОД)	ОТДЕЛ (ЭПОХА) (ДЛЯ ЧЕТВЕРТИЧНОЙ СИСТЕМЫ – РАЗДЕЛ)	ЯРУС (ВЕК)		ИНДЕКС ЯРУСА	КОЛИЧЕСТВО ПОДЪЯРУСОВ
КАЙНО-ЗВЙСКАЯ		ЧЕТВЕРТИЧНАЯ Q (АНТРОПОГЕНОВЫЙ) 1,6 Денуайе, 1829 г. 1,6	ГОЛОЦЕН 0,01				
			ПЛЕЙСТОЦЕН 0,8				
КАЙНОЗВЙСКАЯ 65 KZ		НЕОГЕНОВАЯ N (НЕОГЕНОВЫЙ) 23,0 Хорнс, 1853 г. (бывш. верхний отдел третичной системы) 24,6	ПЛИОЦЕН N ₂ 3,5 Ч.Лебель, 1833	Общепринятых ярусов нет			
			МИОЦЕН N ₁ 19,5 Ч.Лебель, 1833				
		ПАЛЕОГЕНОВАЯ P (ПАЛЕОГЕНОВЫЙ) 40,4 Н.Науман, 1866 г. (бывш. нижний отдел третичной системы)	ОЛИГОЦЕН P ₃ 13,4 Бейрих, 1854	ХАТТСКИЙ	хатты – древнее племя, Германия	P _{3h}	–
			ЗОЦЕН P ₂ 16,9 Ч.Лебель, 1833	РЮПЕЛЬСКИЙ	р.Рюпель, Бельгия	P _{3r}	–
				ПРИАБОНСКИЙ	Приабона, Италия	P _{2p}	–
ПАЛЕОЦЕН P ₁ 10,1 Шинцел, 1874	ЛЮТЕТСКИЙ	устье Бартон, Англия Лютетия – древнеримское назв. Парижа	P _{2l}	–			
	ИПРСКИЙ	Ипр, Бельгия	P _{2i}	–			
ТАМЕТСКИЙ	МОНСКИЙ	ЛАТСКИЙ	п-ов Тамет, Англия	P _{1t}	–		
			Монс, Бельгия	P _{1m}	–		
			Ланга	P _{1d}	–		

Formal chronostratigraphic terms in increasing length of time:

- Stage - smallest unit of defined time (Volgian)
- Epoch - Upper Jurassic
- Period - longer period (Jurassic)
- Era - Largest time period (Mesozoic)

Chronostratigraphy vs. Lithostratigraphy



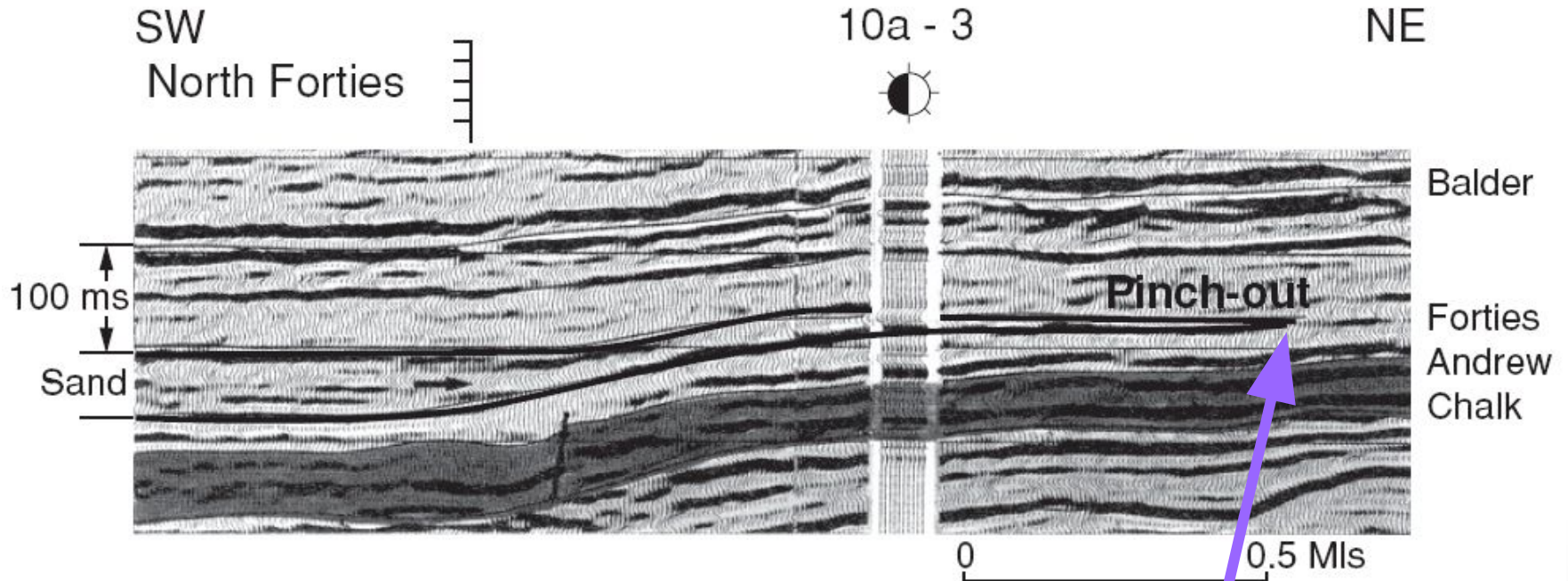


Seismic Stratigraphy

- Correlation of seismic packages bounded by truncations of reflection events
- Advantages
 - Continuous interpretation in inter-well areas
- Disadvantages
 - Limited resolution, uncertainty as to what seismic truncations really mean, must be 'tied' to well information for lithology and age

Целью сейсмостратиграфического анализа является определение условий и обстановок осадконакопления по особенностям волновой картины на сейсмических разрезах отраженных волн

Reservoir Limits

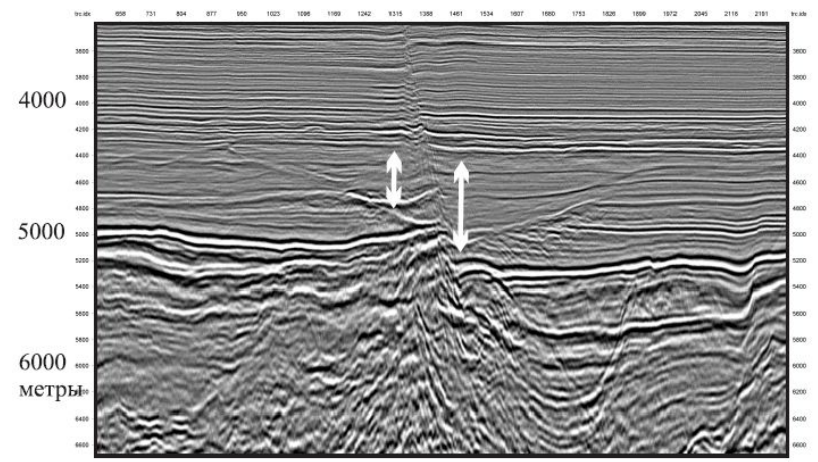
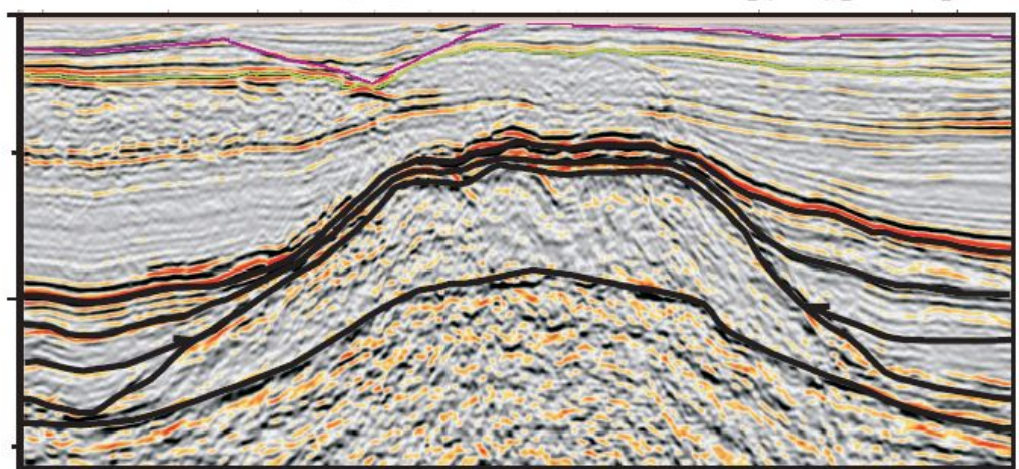


Stratigraphic pinch-out of reservoir unit
(Thompson and Butcher, 1991)

Seismic facies

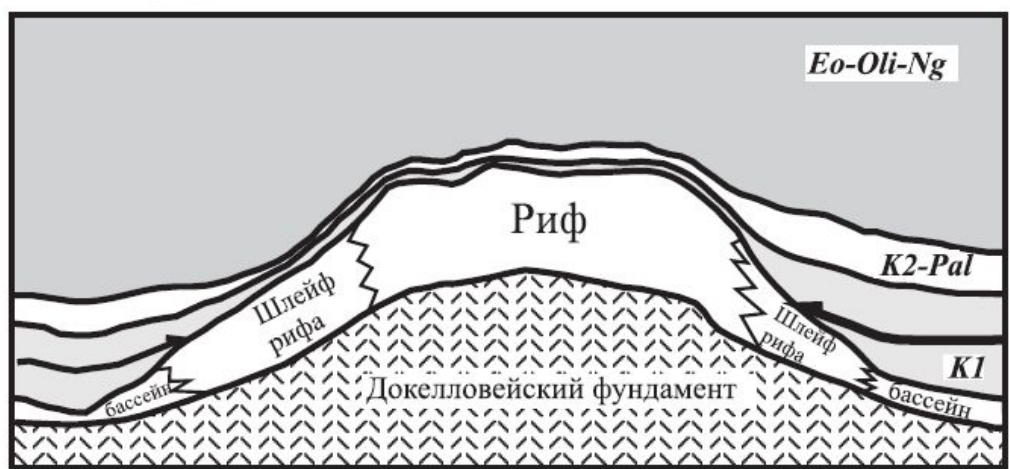
А. Сейсмический профиль

Структура Мария



Пример палеоканалов (русел)
(Черное море, вал Шатского)

Б. Интерпретация



Пример вероятной рифовой постройки
(Черное море, вал Шатского)

(Никишин А.М.)

Основные типы несогласий

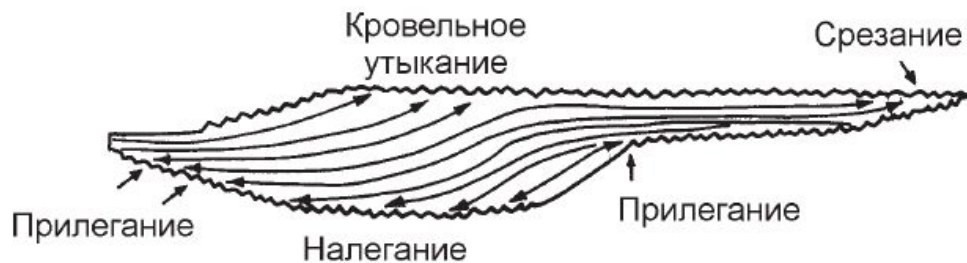
Эрозионное срезание (*erosional truncation*) — залегание вышележащих отложений выше поверхности эрозии.

Кровельное утыкание (*toplap*) — срезание моноклиально залегающей толщи сверху более пологой эрозионной поверхностью. Кровельное утыкание обычно связано с эрозией или перерывом в седиментации.

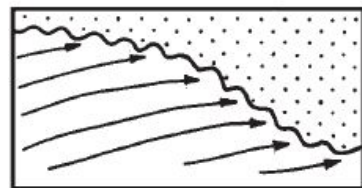
Согласное залегание — несогласие, когда слоистость параллельна поверхности несогласия.

Подошвенное прилегание (*onlap*) — прилегание (*прислонение*) толщи слоев на поверхность, наклоненную в ту же сторону, что и слои, но более круто.

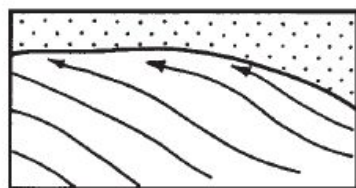
Подошвенное налегание (*downlap*) — несогласие, когда



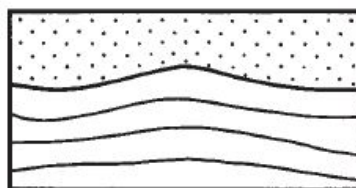
Относительно кровли



Эрозионное срезание

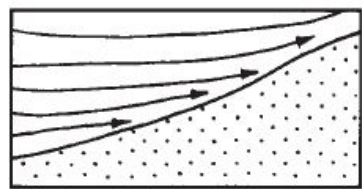


Кровельное утыкание

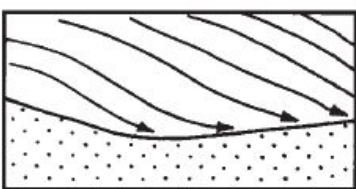


Согласное залегание

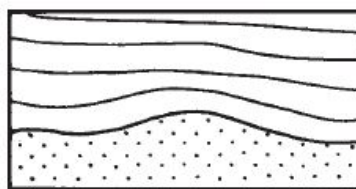
Относительно подошвы



Прилегание



Налегание



Согласное залегание

Raw Data

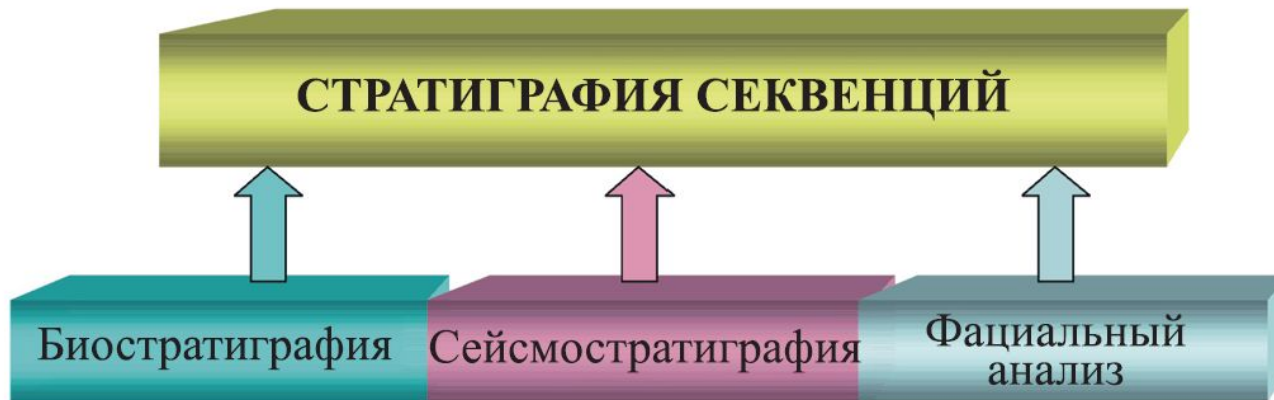


Final Results

Sequence Stratigraphy

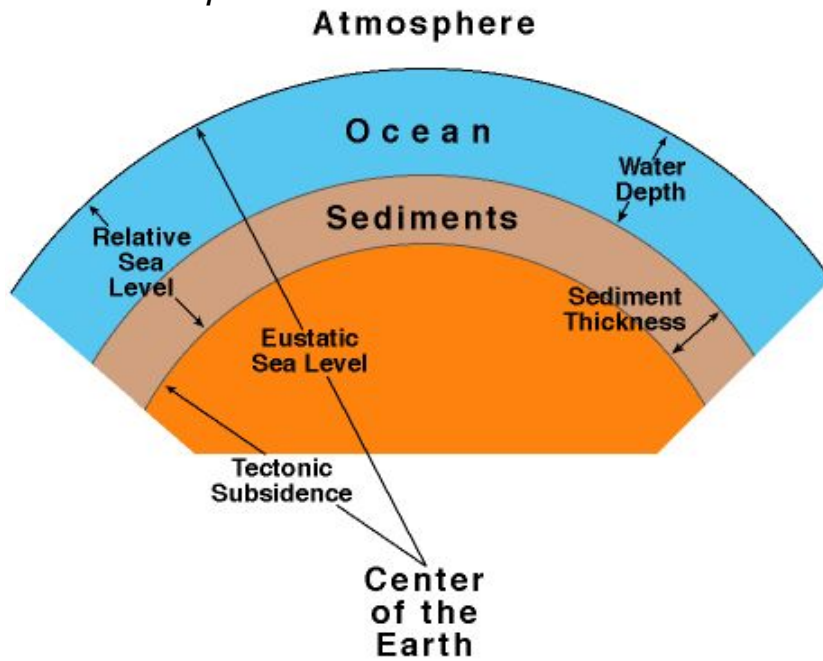
Sequence stratigraphy is the study of genetically related fades within a framework of chronostratigraphically significant surfaces

Sequence stratigraphy processes can exert a strong influence on the geometry, continuity, quality and location of reservoir



Sea-level changes

- Eustatic sea level** is a distance from the sea surface to the fixed datum, usually the center of the Earth. It can vary by changes in the **volume of ocean basins** or changes in the **volume of water** within those basins (*эвстатические колебания уровня моря - медленные (вековые) изменения уровня Мирового океана и связанных с ним морей, вызываемые изменением количества воды в океане вследствие образования или таяния ледниковых масс, а также меняющегося объёма океанических впадин*).



Relative sea level is a distance between the sea surface and reference horizon such as basement, controlled by:

- Tectonic subsidence or uplift
- Eustatic movement of sea-level

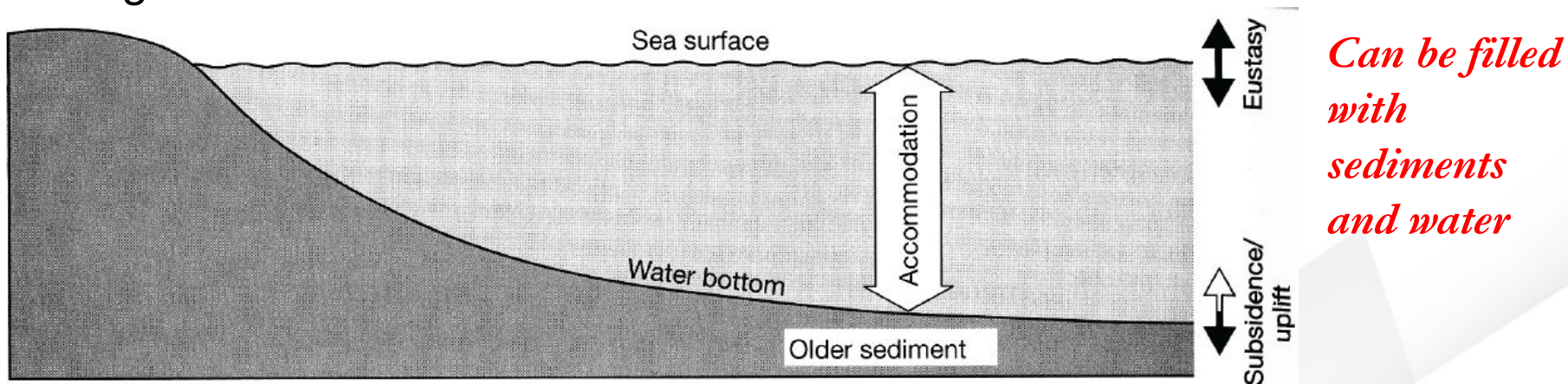
The distance between the sediment/water interface and the sea surface is known as **water depth**.

Accommodation space

Accommodation is defined by Jervy (1998) as "the space available for potential sediment accumulation"

This space is the combined product of movement of:

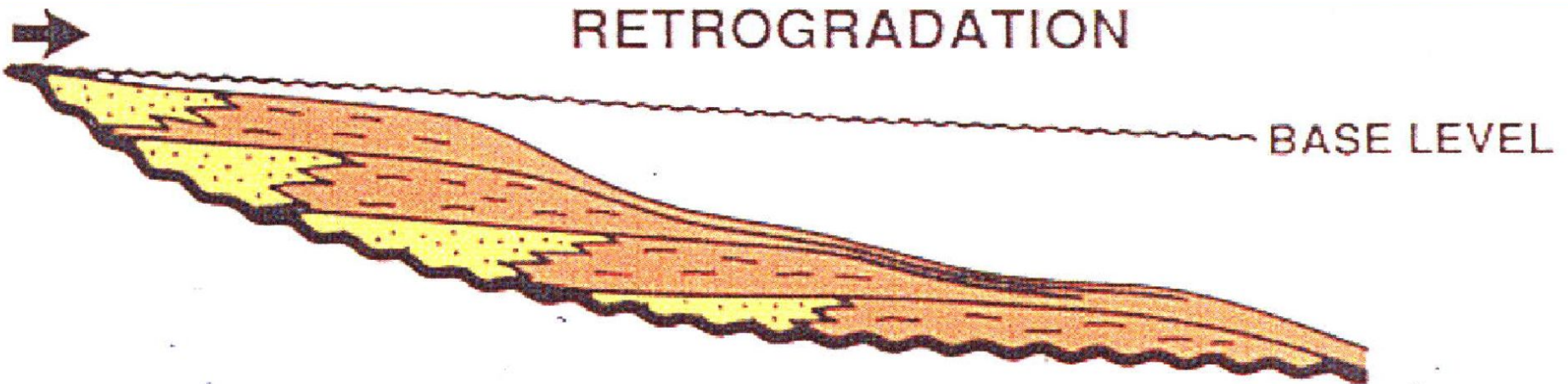
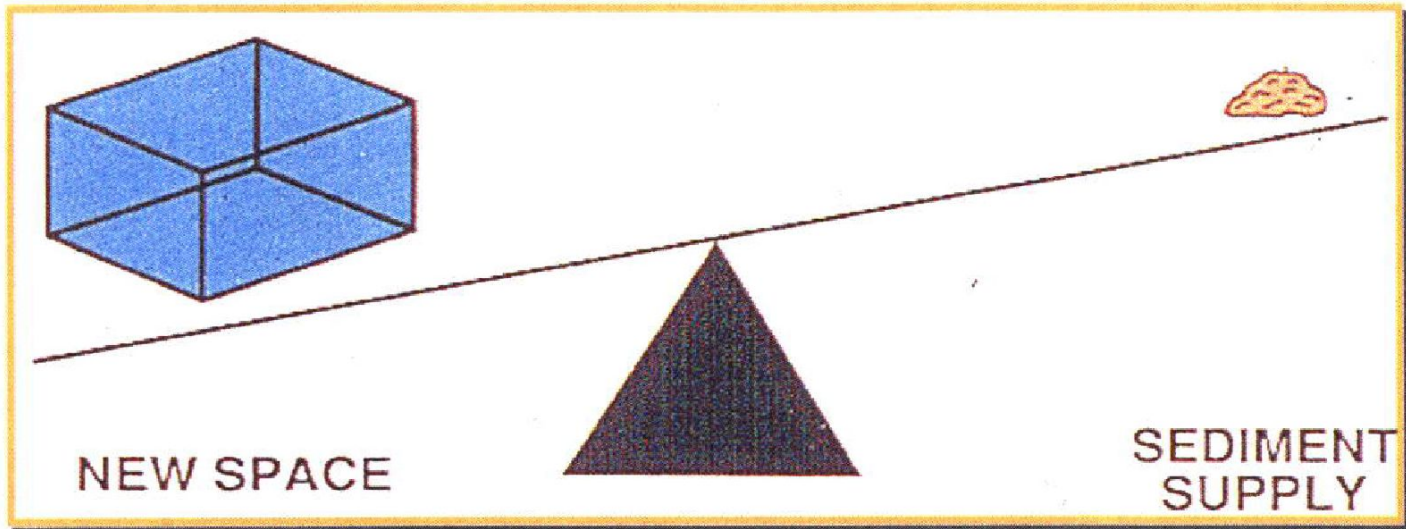
- The sea surface (eustasy: global sea level measured from a datum such as the center of earth)
- The sea floor (tectonics)
- Changes in rates of sediment accumulation



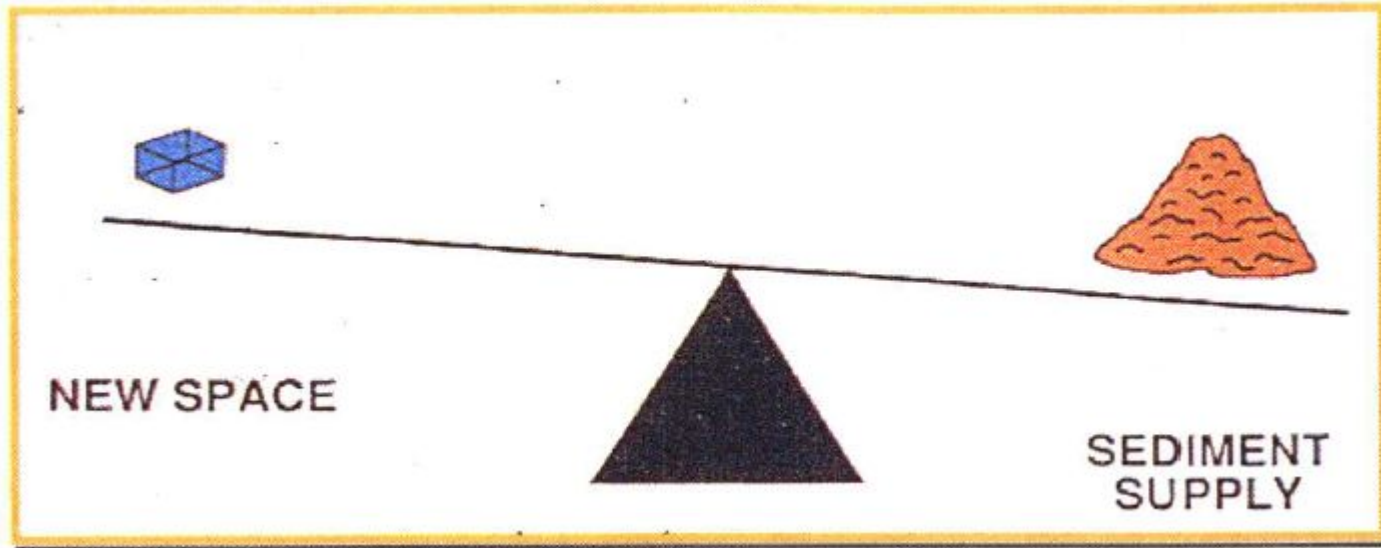
Can be filled with sediments and water

Это то возможное, пространство, где потенциально может накапливаться осадок. Контролируется тектоническими подвижками, климатическими условиями, эвстатическими колебаниями уровня моря, мощностью осадка

Sediment Deficient



Excess Sediment

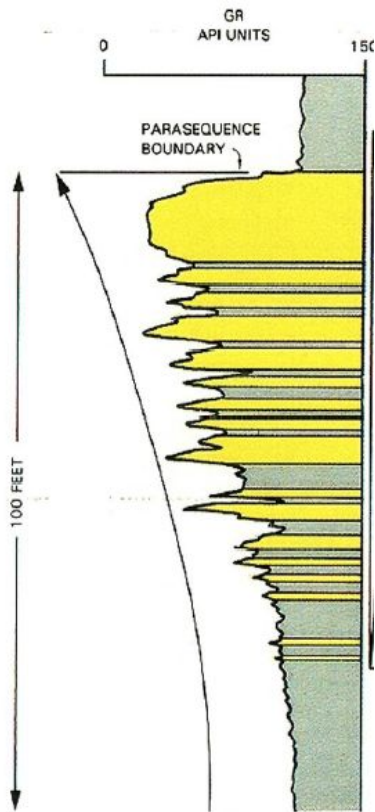


PROGRADATION



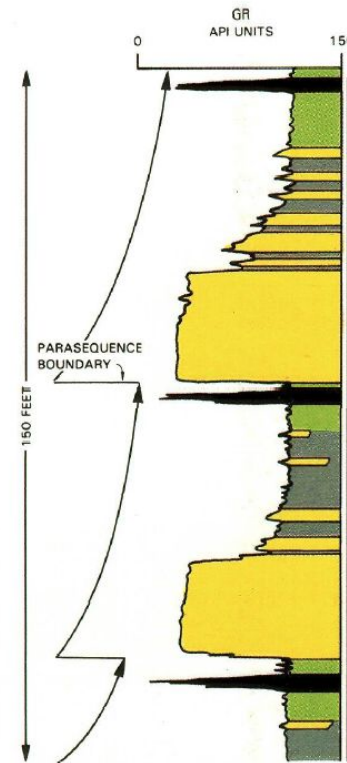
Parasequence

Парасиквенс (или парасевенция) – это мелеющая вверх последовательность слоев, ограниченная поверхностями морского затопления. По сути – это регрессивный цикл.



Upward-coarsening: bedsets thicken, sandstones coarsen, and the sandstone/mudstone ratio increases upward

Upward-fining: bedsets thin, sandstones become finer grained (commonly culminating in mudstones and coals), and the sandstone/mudstone ratio decreases upward.



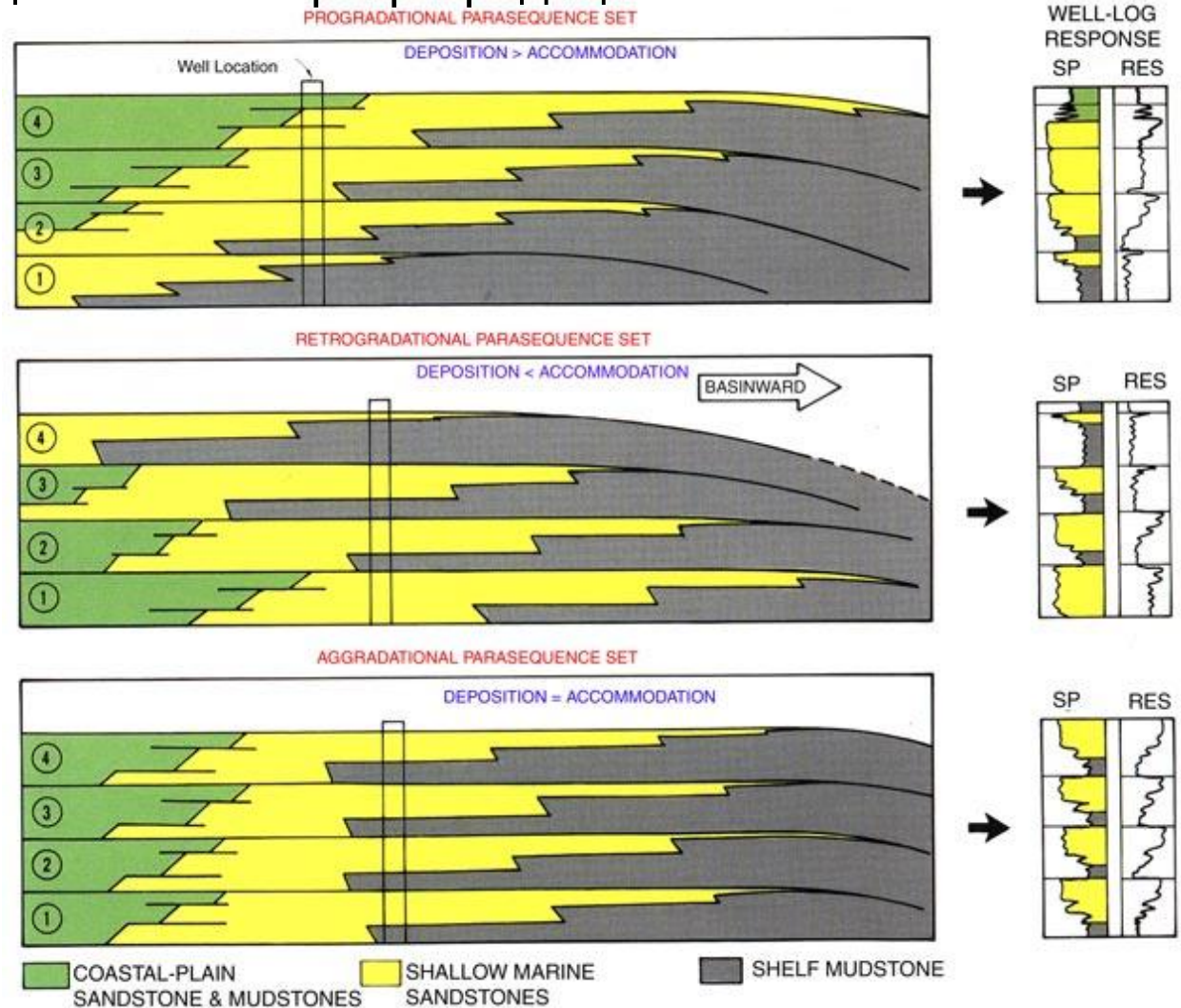
Parasequence set

Пакетом парасеквенций называется последовательность парасеквенций по вертикали, имеющих определенный тип напластования – проградационный, аградационный или ретроградационный.

Проградационный пакет парасеквенций направлен в сторону бассейна и носит регрессивный характер.

Ретроградационный направлен в противоположную сторону и носит трансгрессивный характер.

Агградационный характеризуется стабильным положением береговой линии.



Chronostratigraphy vs. Lithostratigraphy

Progradational parasequence set

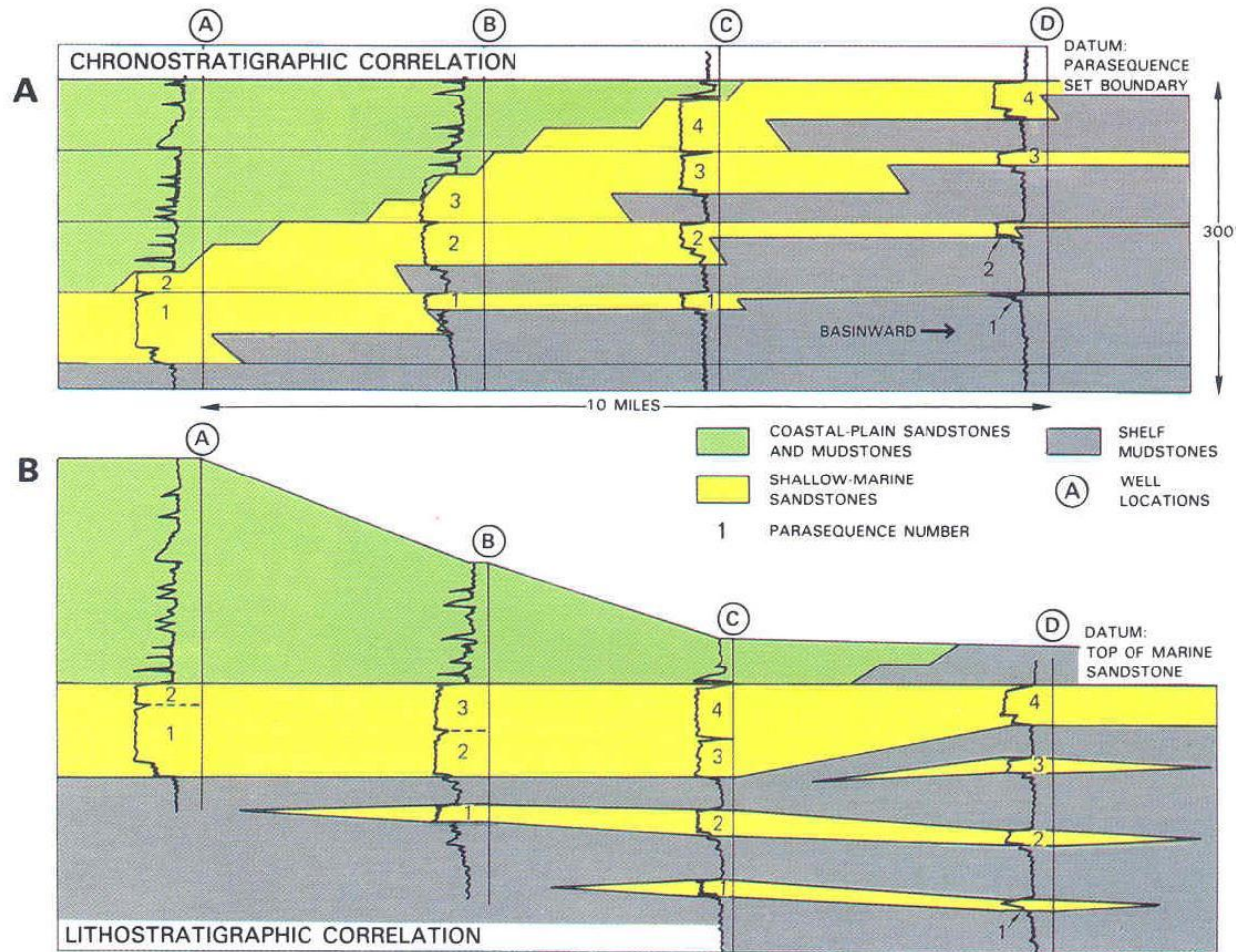
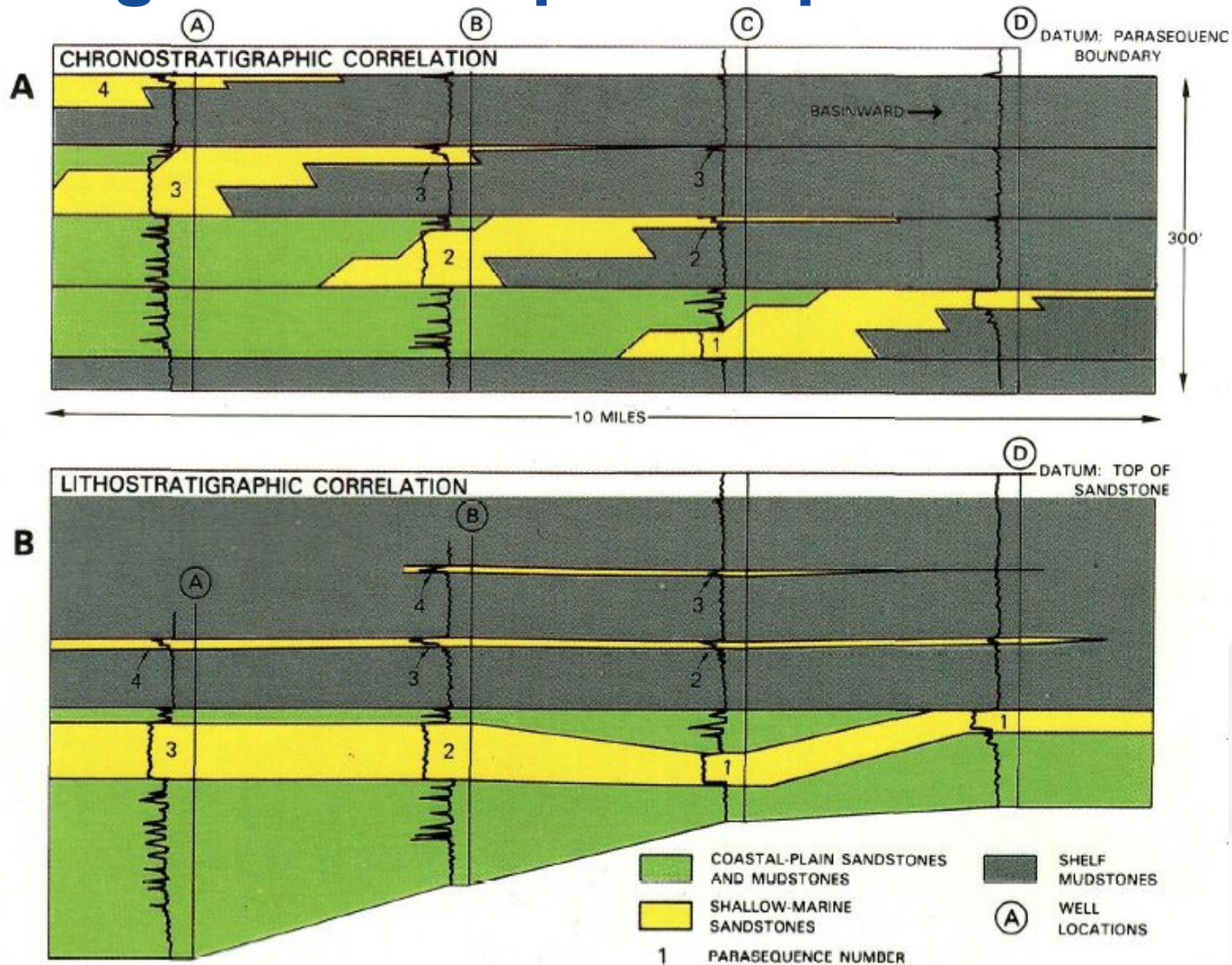


Figure 17—Comparison of (A) chronostratigraphic correlation and (B) lithostratigraphic correlation styles: progradational parasequence set.

Chronostratigraphy vs. Lithostratigraphy

Retrogradational parasequence set



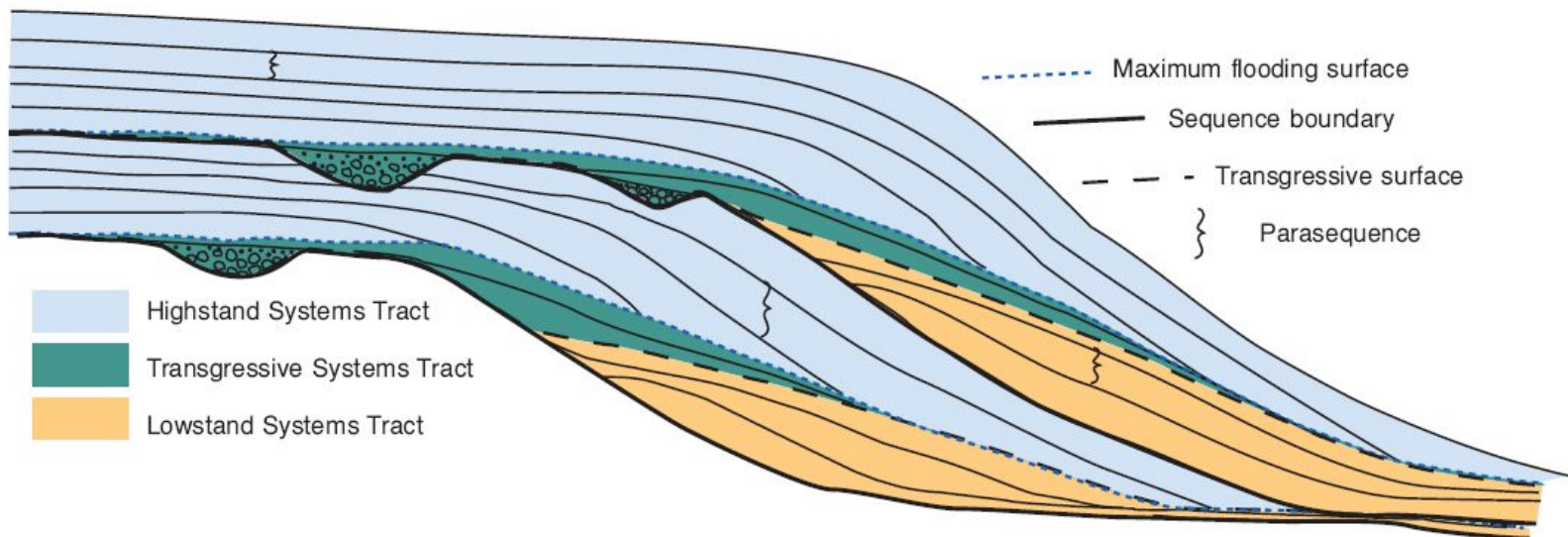


Принципиальная схема строения клиноформ неокома Западной Сибири (по А.А. Нежданову и др., 2000).



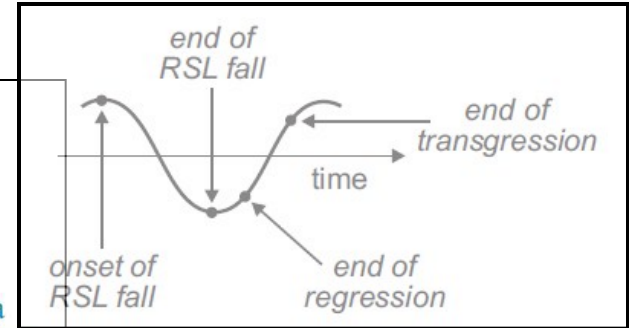
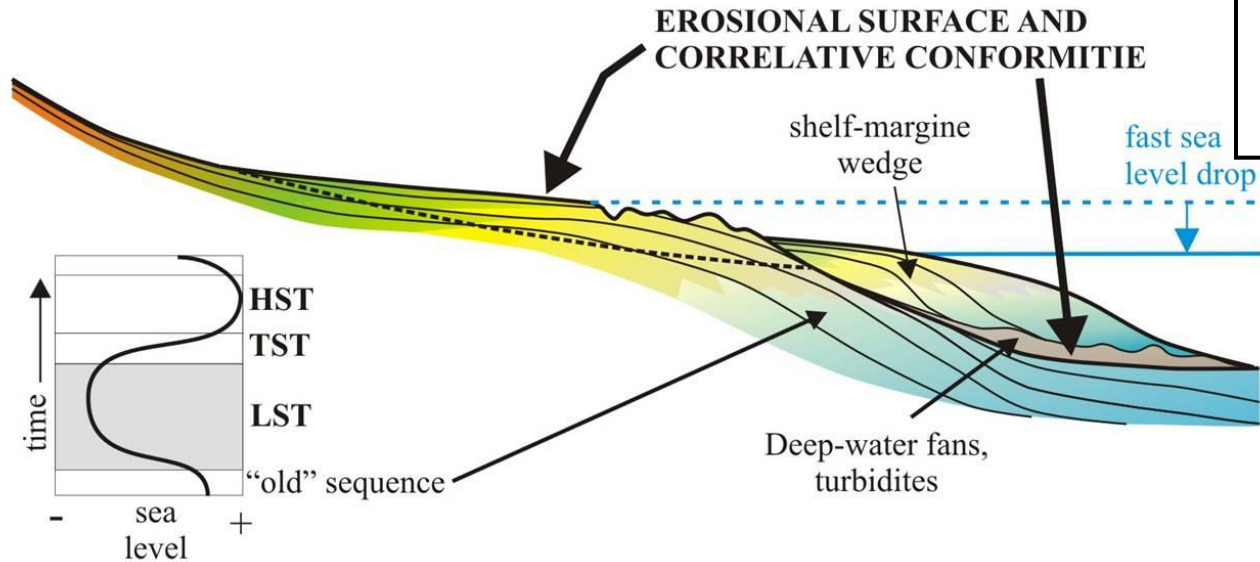
Sequence Stratigraphy

- “A **sequence** is a stratigraphic unit composed of a relatively conformable succession of genetically related strata and bounded at its top and base by unconformities *or their correlative conformities*” (Sloss, 1963). *Относительно согласная последовательность генетически взаимосвязанных слоев, ограниченных несогласиями или коррелятивно связанными с ними согласными поверхностями.*
- **Parasequences** and **parasequence sets** are the stratal building blocks of the sequence



Depositional Systems Tracts: LST

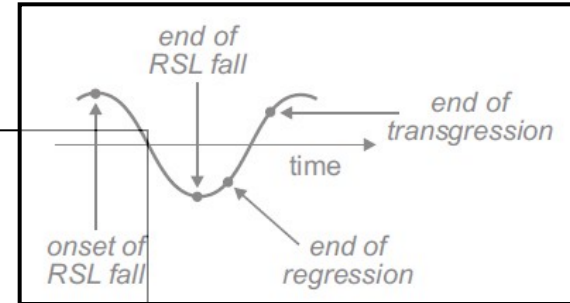
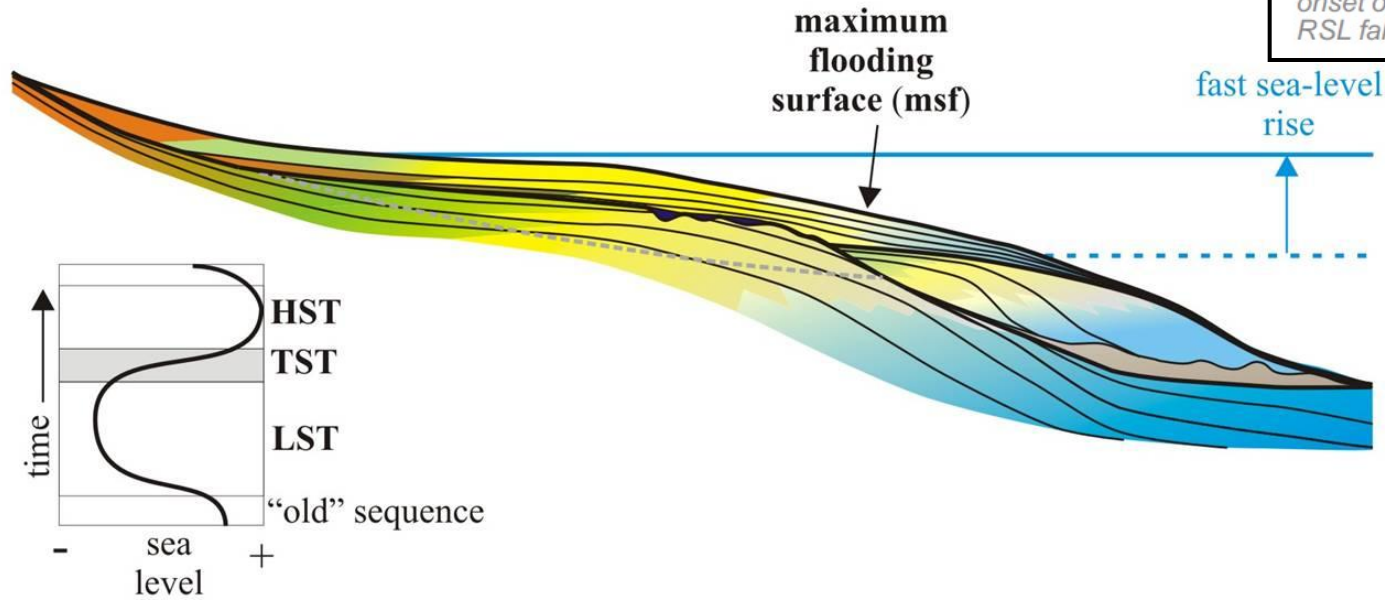
LST: Sea level drops, facies limits moves basinwards



LST = Lowstand Systems Tract: sea level drop, continental shelf subaerial erosion, shelf margin wedge, facies boundary shift toward the sea. (Тракт низкого стояния образуется при падении уровня моря до наименьшего состояния и осушения шельфа. Основная седиментация происходит за счет быстрого транспорта обломочного материала в область подножия континентального склона. При этом осадконакопление происходит в глубоких частях бассейна, где формируется донный конус выноса).

Depositional Systems Tracts: TST

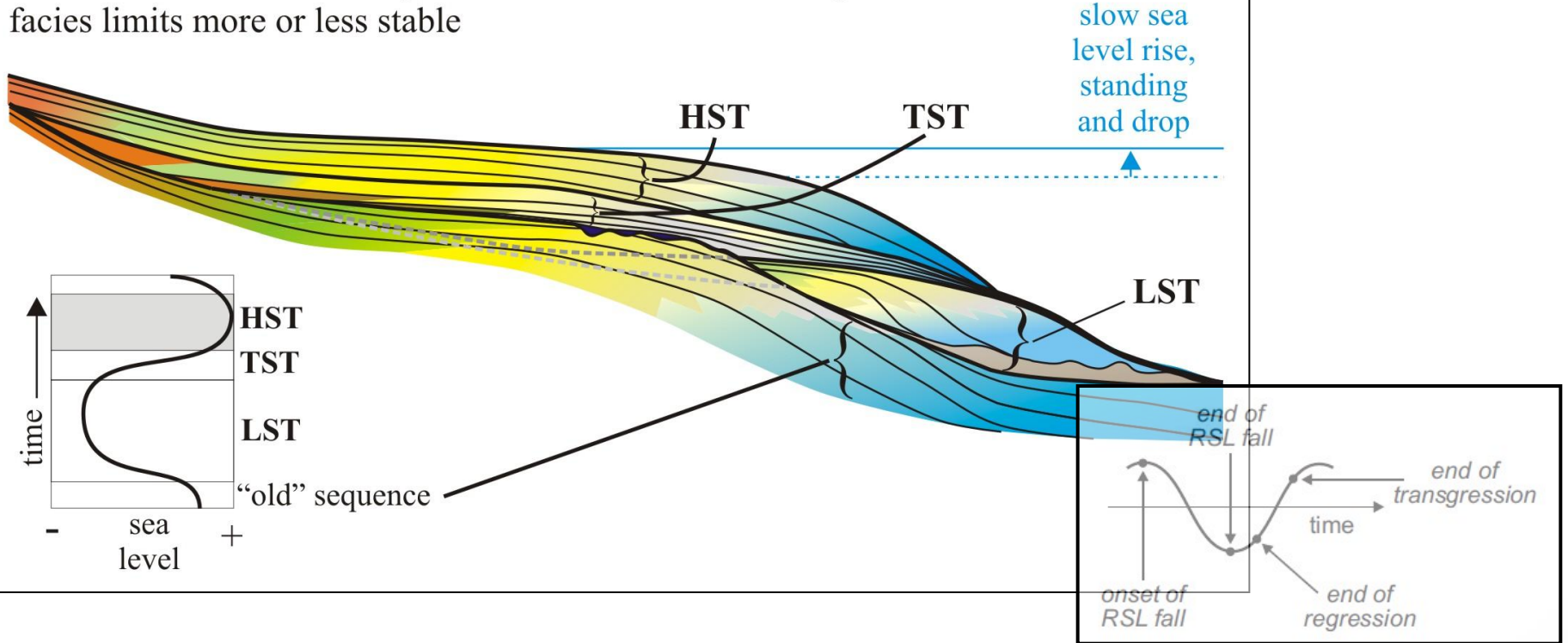
TST: Sea level rises quickly, facies limits moves landwards



TST = Transgressive Systems Tract: sea level rise, maximum flooding surface (MFS), facies boundaries shift towards the land, retrogradational parasequence set

Depositional Systems Tracts: HST

HST: Sea level rises slowly, stands some and start to drop
facies limits more or less stable



HST = Highstand Systems Tract (sometime Regressive Systems Tract): sea level rise, stabilizing and starting to fall, commonly consist of an aggradational parasequence set.

(Тракт высокого стояния – море стабильно затопляет шельф, перекрывая осадочным материалом. Подошва ТВС/НСТ– поверхностью максимального затопления).

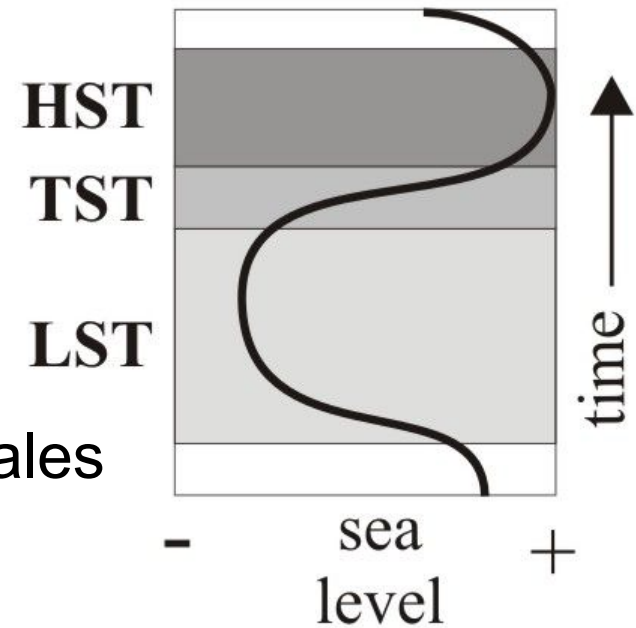
Sequence Stratigraphy

High sea-level:

- Flooding surfaces
- Deposition of reservoir close to shore
- Reservoir marker events – marine shales

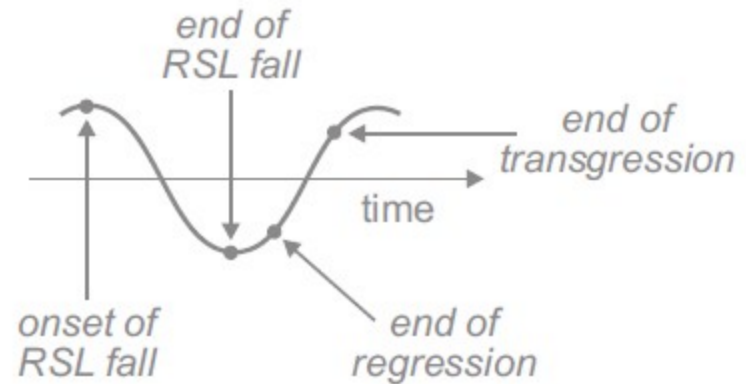
Low sea-level:

- Exposure of shelf, incision, erosion
- Deposition of reservoir in deep water
- Reservoir marker events – unconformities



Sequence stratigraphic surfaces

- The **subaerial unconformity** is an unconformity that forms under subaerial conditions as a result of fluvial erosion or bypass, pedogenesis, wind degradation, or dissolution and karstification.



- The **correlative conformity** is a marine stratigraphic surface that marks the change in stratal stacking patterns from highstand normal regression to forced regression. It is the paleo-seafloor at the onset of forced regression.
- The **maximum flooding surface** (is a stratigraphic surface that marks a change in stratal stacking patterns from transgression to highstand normal regression. It is the paleo-seafloor at the end of transgression, and its correlative surface within the nonmarine setting. Alternative terms include: 'final transgressive surface', 'surface of maximum transgression'.
- The **regressive surface** of marine erosion is an erosional surface that forms typically by means of wave scouring during forced regression in wavedominated shallow-water settings due to the lowering of the wave base relative to the seafloor.

Stratal elements in Hierarchy

STRATAL UNIT	DEFINITION	CHARACTERISTICS OF CONSTITUENT STRATAL UNITS	DEPOSITIONAL PROCESSES	CHARACTERISTICS OF BOUNDING SURFACES
BEDSET	A RELATIVELY CONFORMABLE SUCCESSION OF GENETICALLY RELATED BEDS BOUNDED BY SURFACES (CALLED BEDSET SURFACES) OF EROSION, NON-DEPOSITION, OR THEIR CORRELATIVE CONFORMITIES	BEDS ABOVE AND BELOW BEDSET ALWAYS DIFFER IN COMPOSITION, TEXTURE, OR SEDIMENTARY STRUCTURE FROM THOSE COMPOSING THE BEDSET	EPISODIC OR PERIODIC. (SAME AS BED BELOW)	(SAME AS BED BELOW) PLUS <ul style="list-style-type: none"> ● BEDSETS AND BEDSET SURFACES FORM OVER A LONGER PERIOD OF TIME THAN BEDS ● COMMONLY HAVE A GREATER LATERAL EXTENT THAN BEDDING SURFACES
BED	A RELATIVELY CONFORMABLE SUCCESSION OF GENETICALLY RELATED LAMINAE OR LAMINASETS BOUNDED BY SURFACES (CALLED BEDDING SURFACES) OF EROSION, NON-DEPOSITION OR THEIR CORRELATIVE CONFORMITIES	NOT ALL BEDS CONTAIN LAMINASETS	EPISODIC OR PERIODIC EPISODIC DEPOSITION INCLUDES DEPOSITION FROM STORMS, FLOODS, DEBRIS FLOWS, TURBIDITY CURRENTS PERIODIC DEPOSITION INCLUDES DEPOSITION FROM SEASONAL OR CLIMATIC CHANGES	<ul style="list-style-type: none"> ● FORM RAPIDLY, MINUTES TO YEARS ● SEPARATE ALL YOUNGER STRATA FROM ALL OLDER STRATA OVER THE EXTENT OF THE SURFACES ● FACIES CHANGES ARE BOUNDED BY BEDDING SURFACES ● USEFUL FOR CHRONOSTRATIGRAPHY UNDER CERTAIN CIRCUMSTANCES ● TIME REPRESENTED BY BEDDING SURFACES PROBABLY GREATER THAN TIME REPRESENTED BY BEDS ● AREAL EXTENTS VARY WIDELY FROM SQUARE FEET TO 1000's SQUARE MILES
LAMINASET	A RELATIVELY CONFORMABLE SUCCESSION OF GENETICALLY RELATED LAMINAE BOUNDED BY SURFACES (CALLED LAMINASET SURFACE) OF EROSION, NON-DEPOSITION OR THEIR CORRELATIVE CONFORMITIES	CONSISTS OF A GROUP OR SET OF CONFORMABLE LAMINAE THAT COMPOSE DISTINCTIVE STRUCTURES IN A BED	EPISODIC, COMMONLY FOUND IN WAVE- OR CURRENT-RIPPLED BEDS, TURBIDITES, WAVE-RIPPLED INTERVALS IN HUMMOCKY BEDSETS, OR CROSS BEDS AS REVERSE FLOW RIPPLES OR RIPPLED TOES OF FORESETS	<ul style="list-style-type: none"> ● FORM RAPIDLY, MINUTES TO DAYS. ● SMALLER AREAL EXTENT THAN ENCOMPASSING BED
LAMINA	THE SMALLEST MEGASCOPIC LAYER	UNIFORM IN COMPOSITION/ TEXTURE NEVER INTERNALLY LAYERED	EPISODIC	<ul style="list-style-type: none"> ● FORMS VERY RAPIDLY, MINUTES TO HOURS ● SMALLER AREAL EXTENT THAN ENCOMPASSING BED

Hierarchical arrangement of stratal elements

continental:

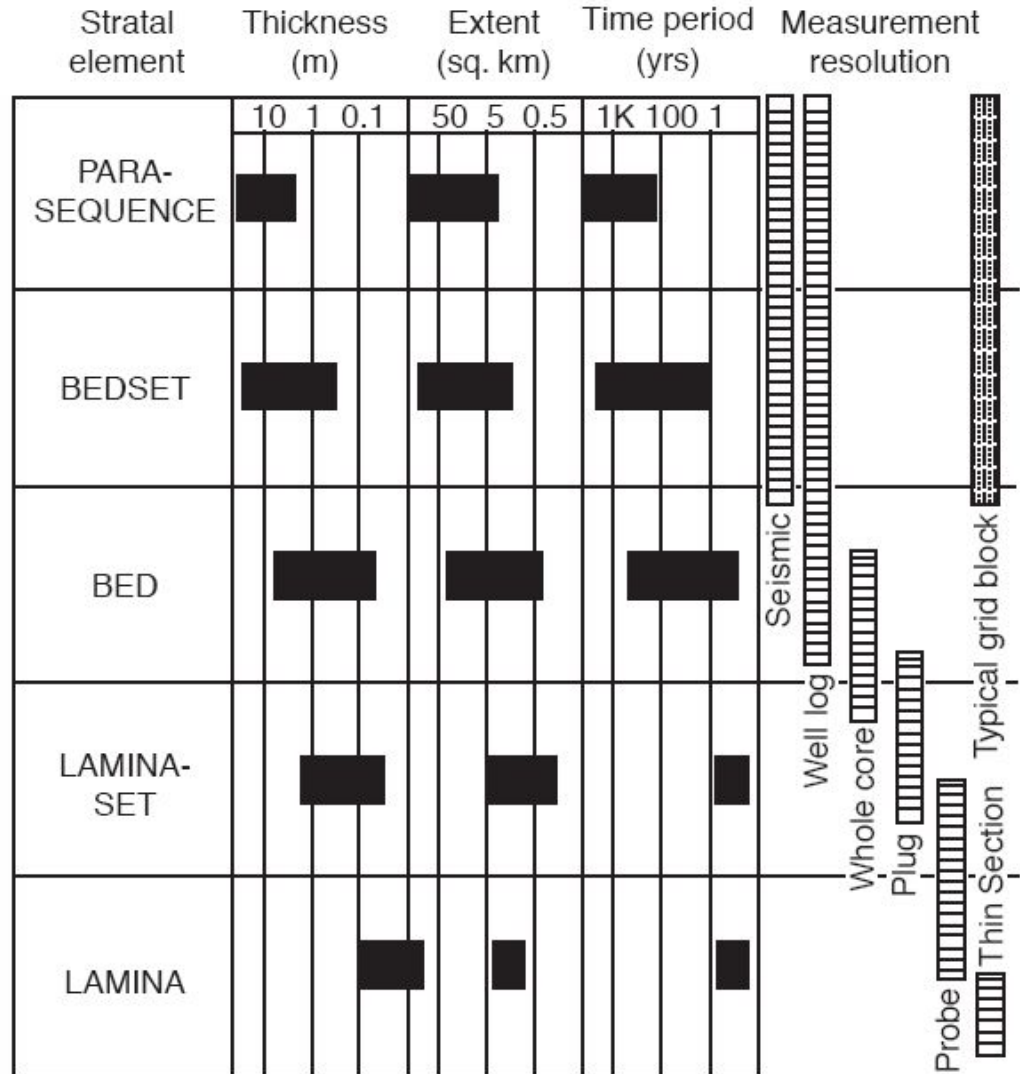
- megasequence
- supersequence

basin:

- **sequence**
- depositional systems tract
- parasequence set

reservoir:

- parasequence
- bedset
- bed
- laminaset
- lamina



(adapted from van Wagoner et al., 1990)

Hierarchical arrangement of stratal elements

continental:

- megasequence
- supersequence

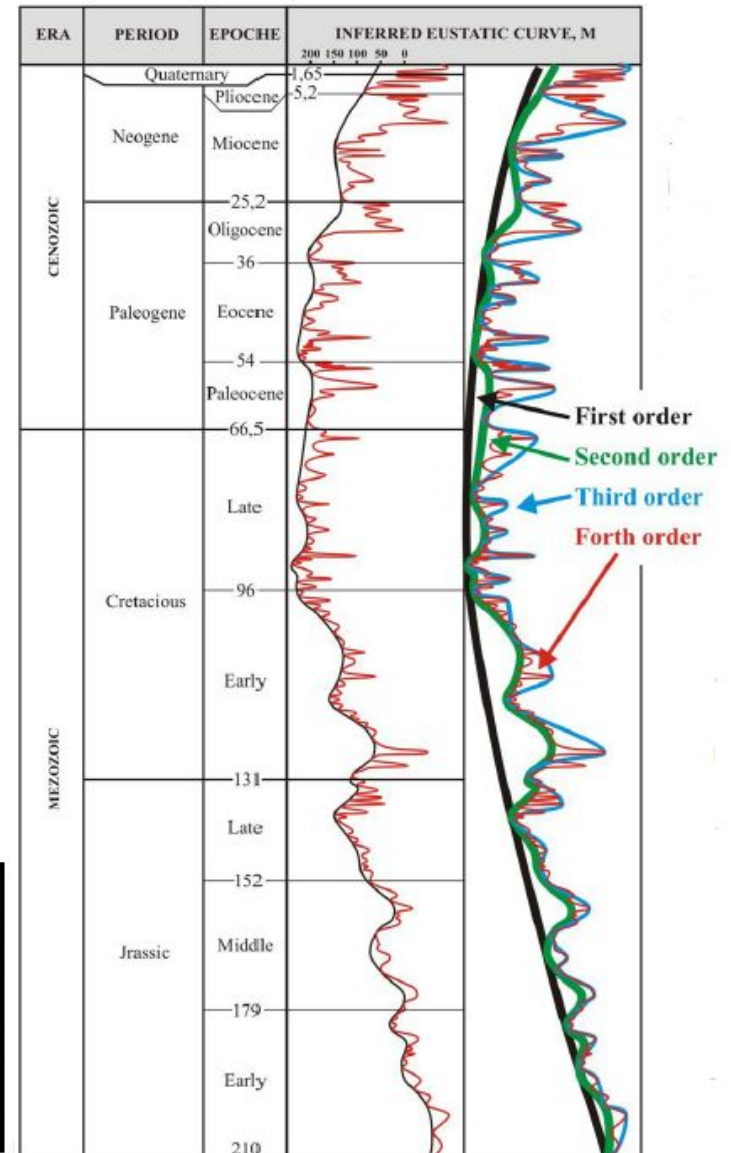
basin:

- **sequence**
- depositional systems tract
- parasequence set

reservoir:

- parasequence
- bedset
- bed
- laminaset
- lamina

Порядок	Стратиграфическая единица	Длительность, млн. лет	Амплитуда колебания уровня моря, м	Скорость изменения уровня моря, см/10 ³ лет
1	Мегасиквенс	>100		<1
2	Суперсиквенс, сиквенс	100-10	50-100	1-3
3	Сиквенс	10-1	50-100	1-10
4	Сиквенс, парасиквенс	1,0-0,1	1-150	40-500
5	Парасиквенс	0,10-0,01	1-150	60-700



Sequence Stratigraphy Terminology

- **Parasequence**: a succession of genetically-related beds bounded by *marine flooding surfaces* and their correlative surfaces.
- Marine flooding surface: a surface separating younger from older strata, across which there is evidence of an abrupt increase in water depth.
- Maximum flooding surface: a marine flooding surface that marks the deepest water facies within a sequence.
- Sequence: a succession of genetically-related strata bounded by unconformities and their correlative conformities.
- Sequence boundary: a regional unconformity that separates sequences. Characterized by subaerial erosion and a basinward shift in facies.
- Transgressive surface: erosional surface that underlies a retreating shoreline during sea level rise.
- Systems tract: all contemporaneous depositional environments deposited during one phase of the sea level cycle.

Терминология

- **Парапоследовательность (парасиквенс):** последовательность генетически связанных геологических тел, ограниченная сверху и снизу *поверхностью затопления и коррелируемых с ней поверхностями*
- Поверхность затопления: поверхность, несущая следы быстрого увеличения глубины моря (затопления)
- Поверхность максимального затопления: поверхность затопления внутри сиквенса, выделяемая по наиболее глубоководным отложениям
- Последовательность (сиквенс): последовательность генетически связанных пород, ограниченных в кровле и подошве поверхностями несогласия и коррелируемыми с ними поверхностями
- Граница последовательности (сиквенса): регионально прослеживающееся несогласие, разделяющие сиквенсы. Несет следы субаэральной эрозии и характеризуется сдвигом границ фаций в сторону бассейна
- Трансгрессивная поверхность: эрозионная поверхность, отделяющая перекрывающий трансгрессивного комплекса при поднятии уровня моря
- Фациальный ряд: совокупность одновозрастных осадочных пород, образовавшихся в течение одного цикла поднятия и опускания уровня моря

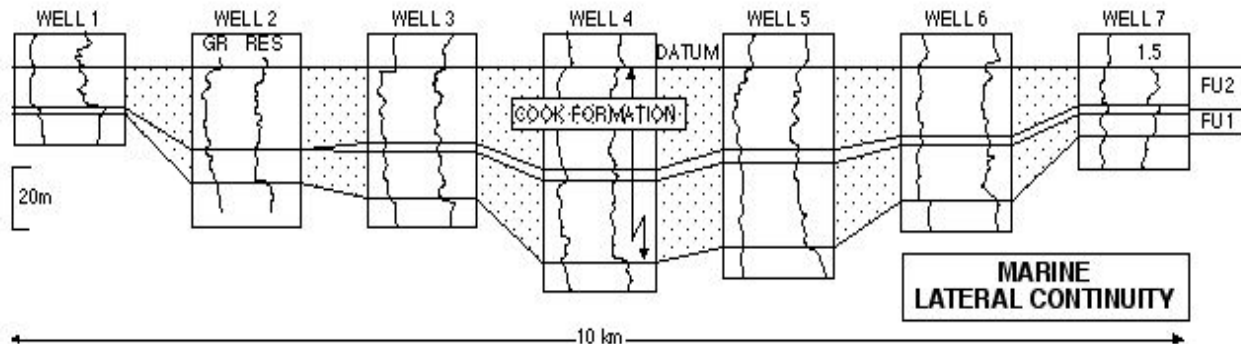
Correlation and Environmental Interpretation

Accurate correlations depends on a little knowledge of the environment of deposition of the sediments:

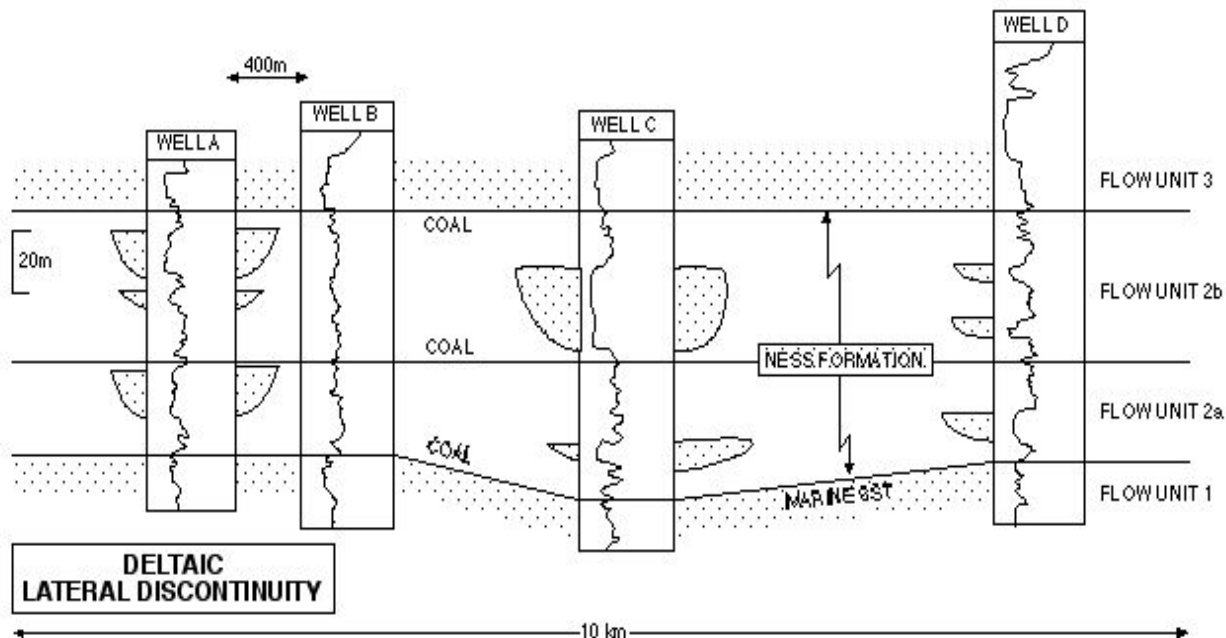
“In different environments, the geometry and extent of sediment bodies is different”

For example in marine settings sand bodies may extend several kilometres, but in fluvial settings they would rarely be wider than a few hundred metres as each body represents a channel fill.

Correlation and Environmental Interpretation

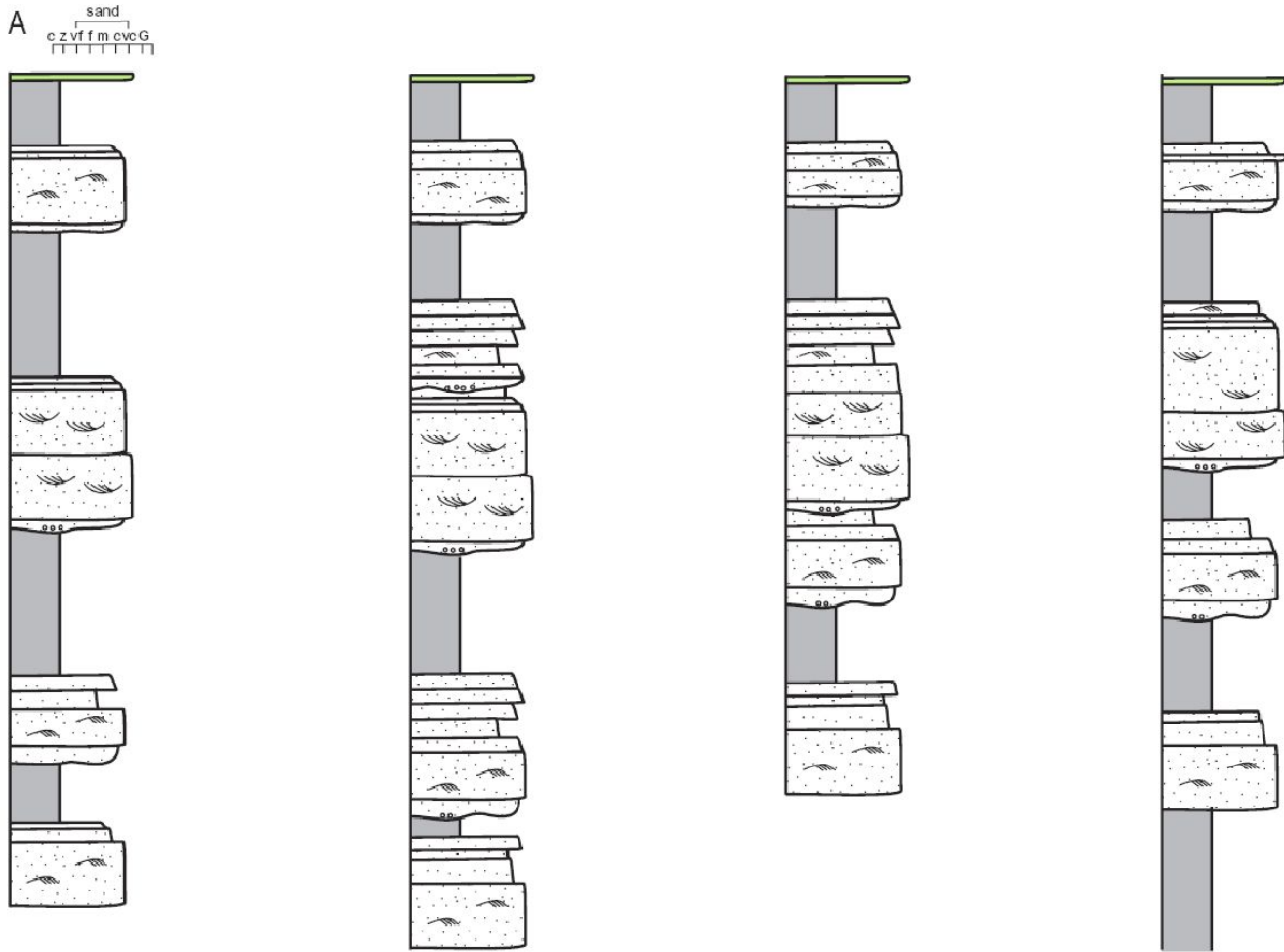


Shallow Marine
Cook Fm., L. Jur.
 From Livbjerg and Mjos, in
 Collinson, 1989



Fluvial-deltaic
Ness Fm., M. Jur.
 From Ryseth, in Collinson,
 1989

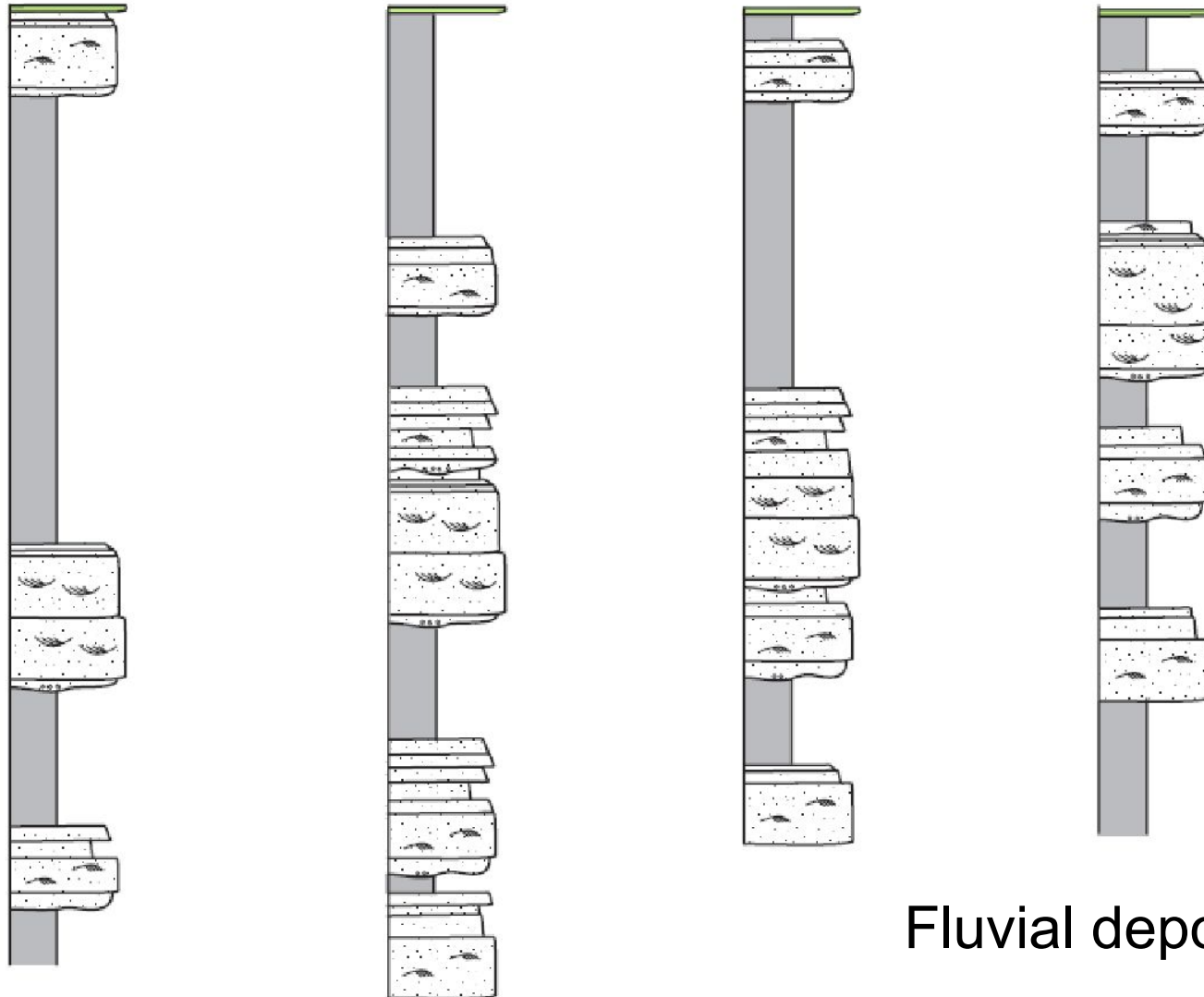
Exercise 4. Different Environments



Shallow-marine deposits

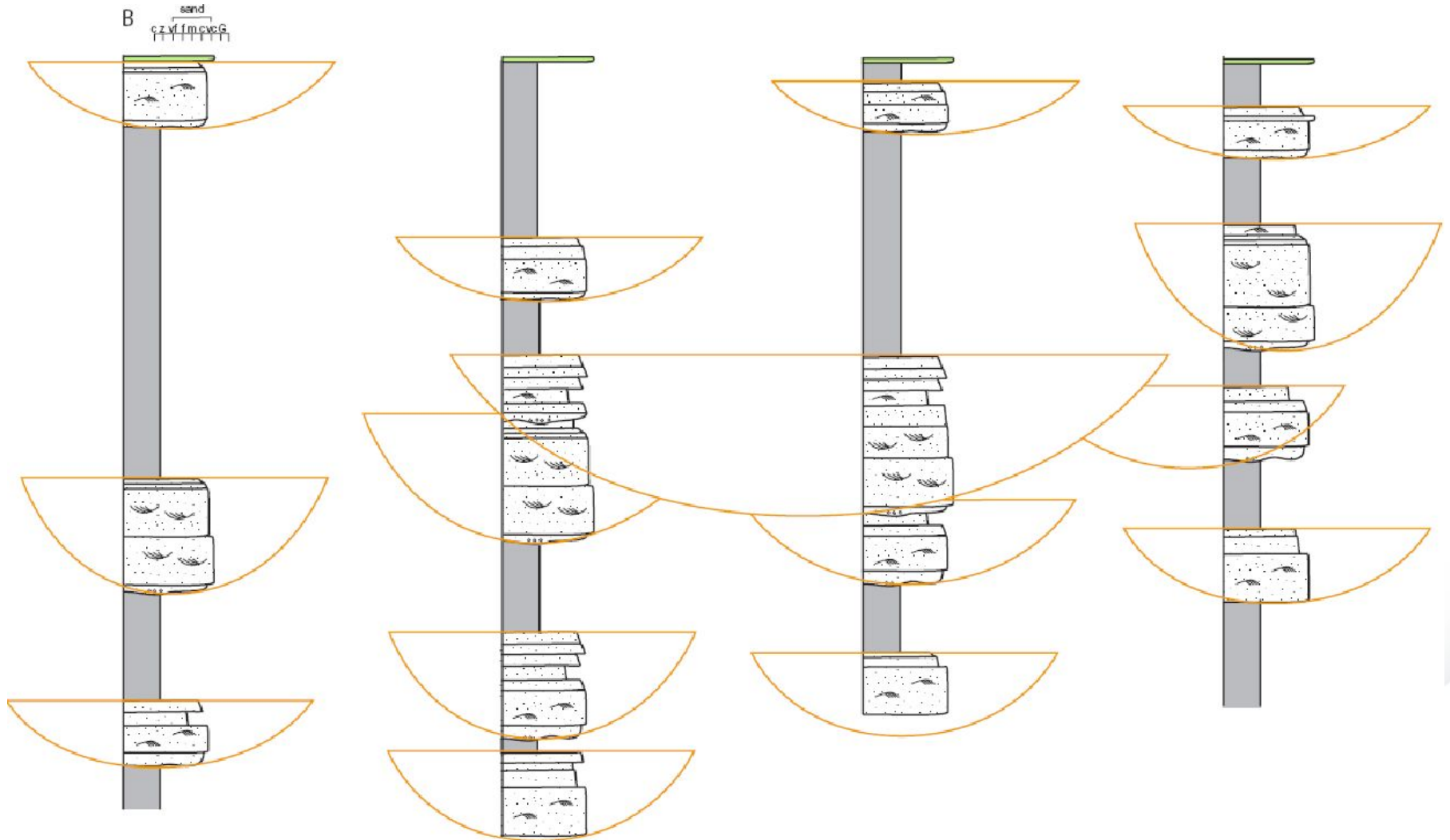
Exercise 4. Different Environments

B
sand
c.c.v. l.m. c.c.c.g.

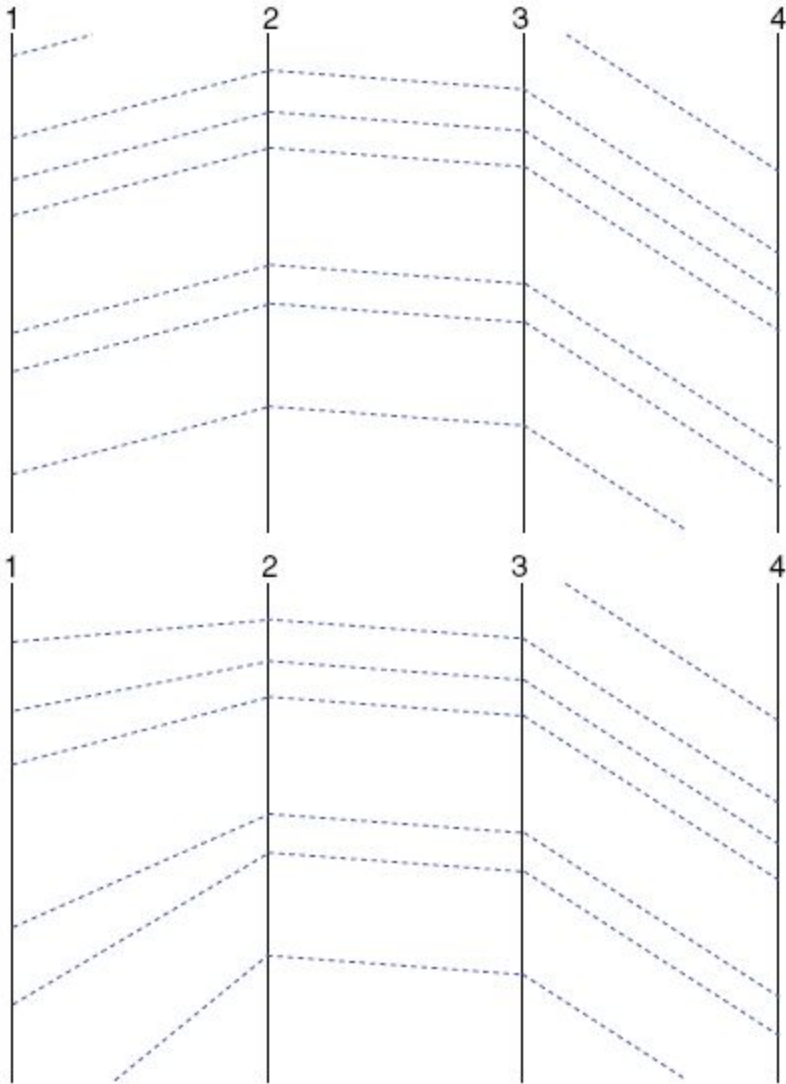


Fluvial deposits

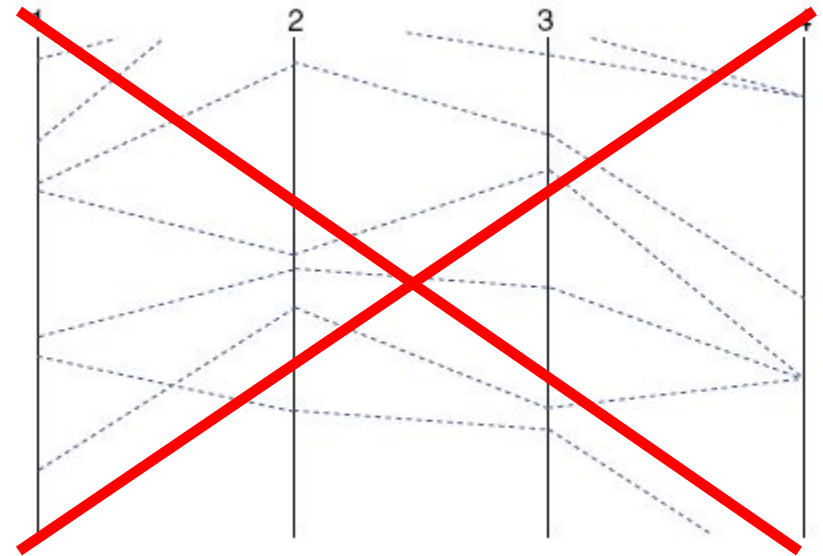
Exercise 4. Different Environments



Realism in correlations

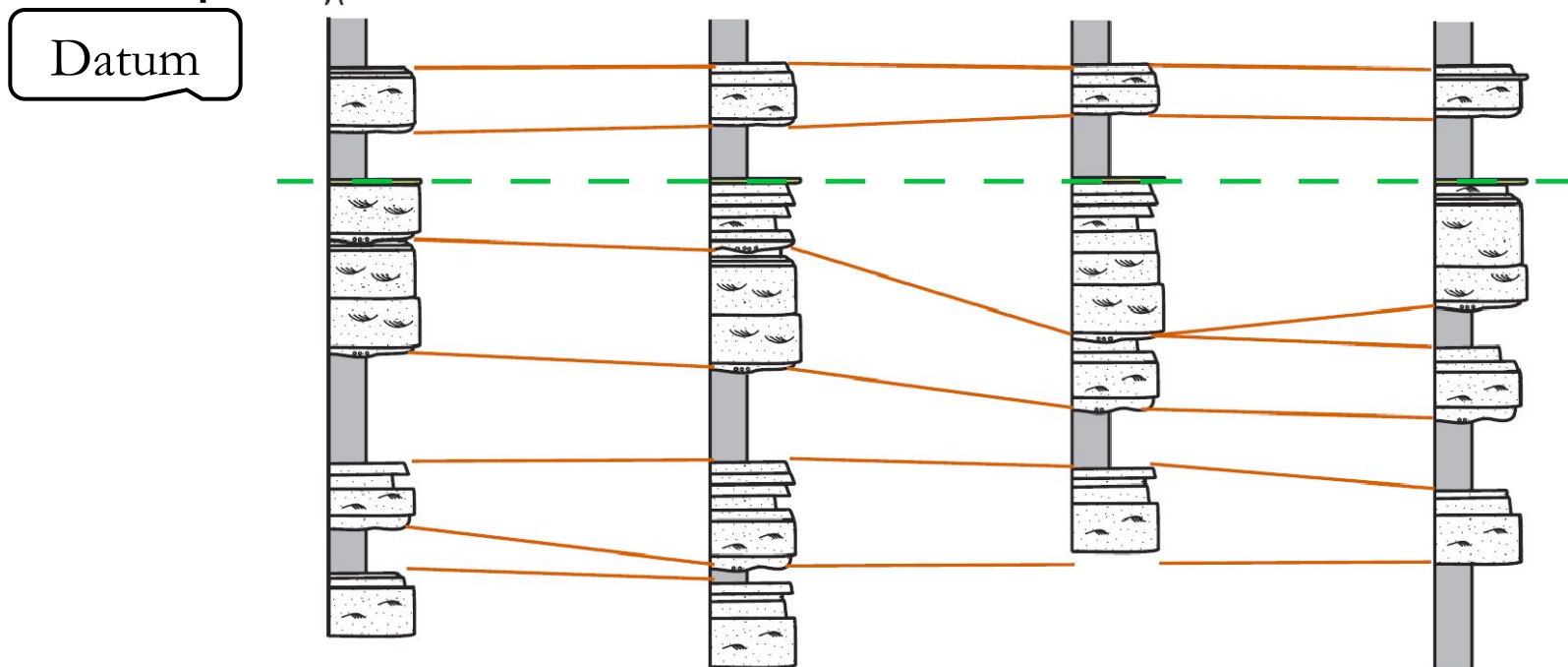


Impossible scenario



Graphic Correlation

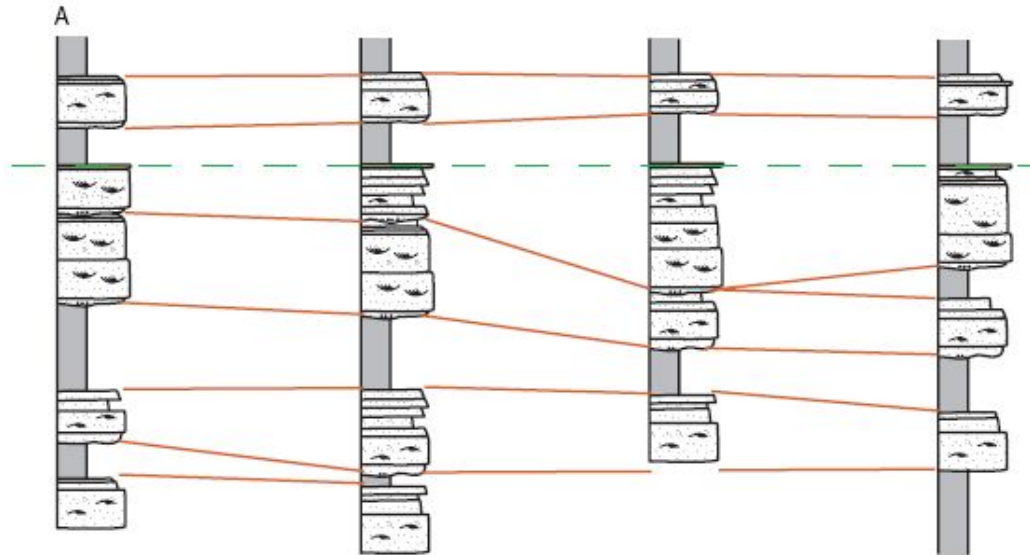
- Stratigraphic relationships are easier to display if you align the logs so that correlated rocks or units more-or-less line up. This is called **hanging**, and usually means that the sections are aligned so that a specific horizon or boundary is horizontal. For example



Correlation panels or cross sections?

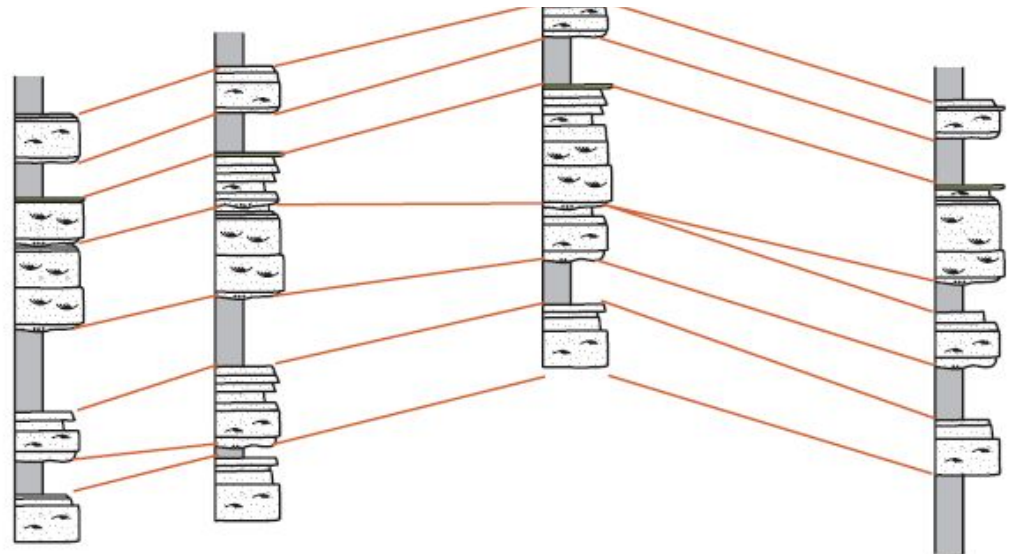
A correlation panel:

- equally spaced wells
- wells have been hung

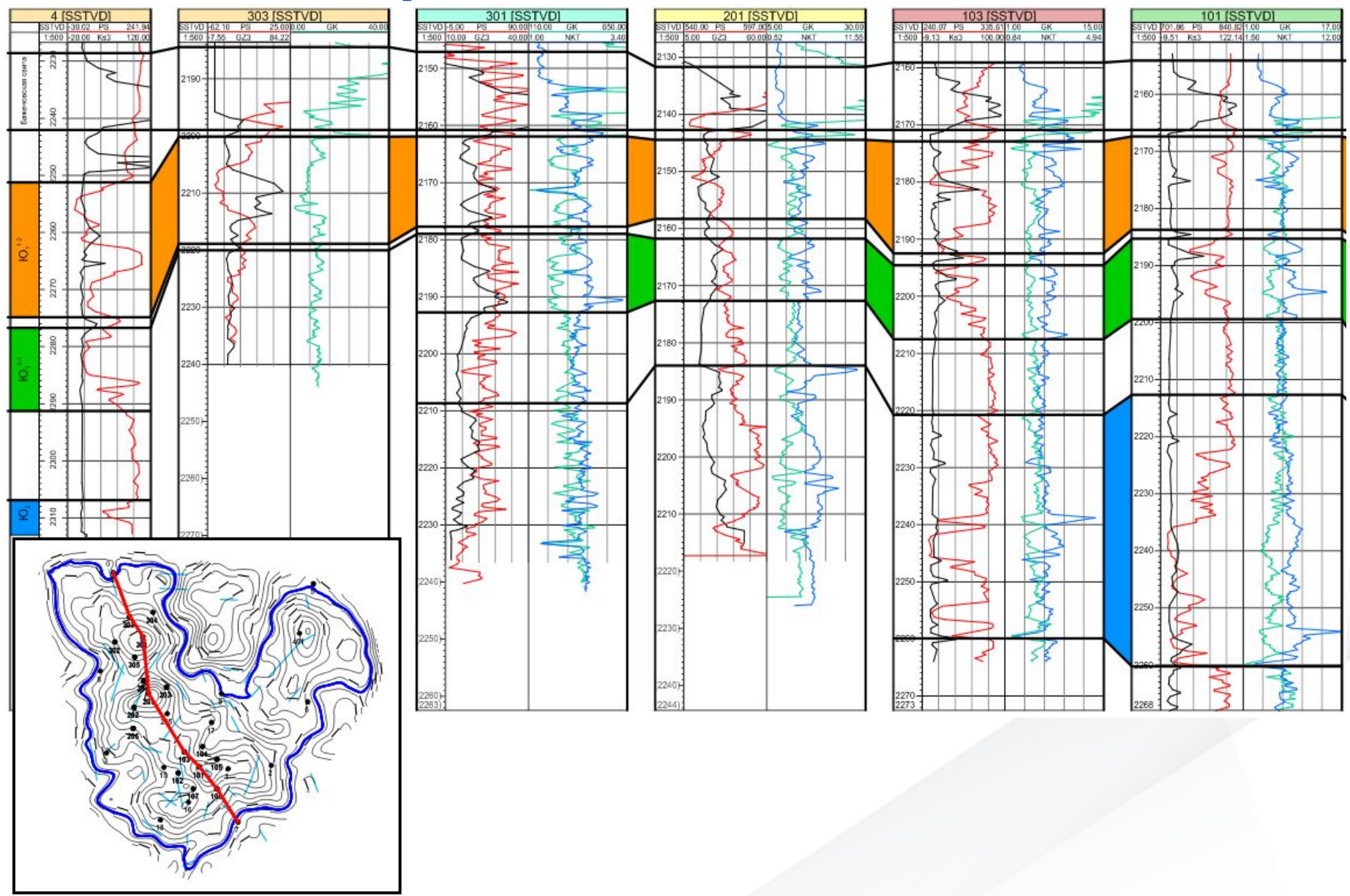


A cross-section:

- spacing of wells reflects distance between wells
- actual arrangement in space of the wells

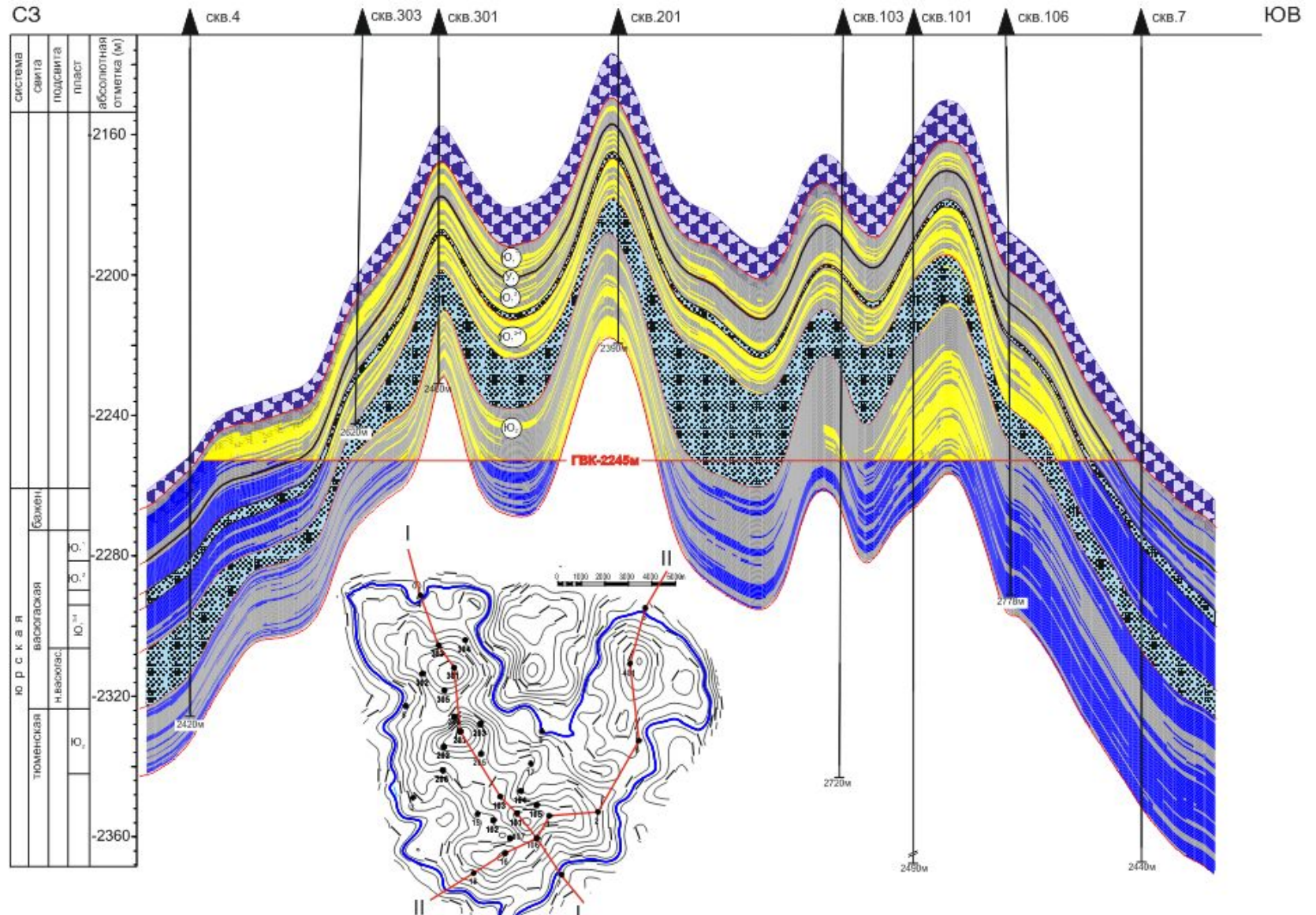


Correlation panel



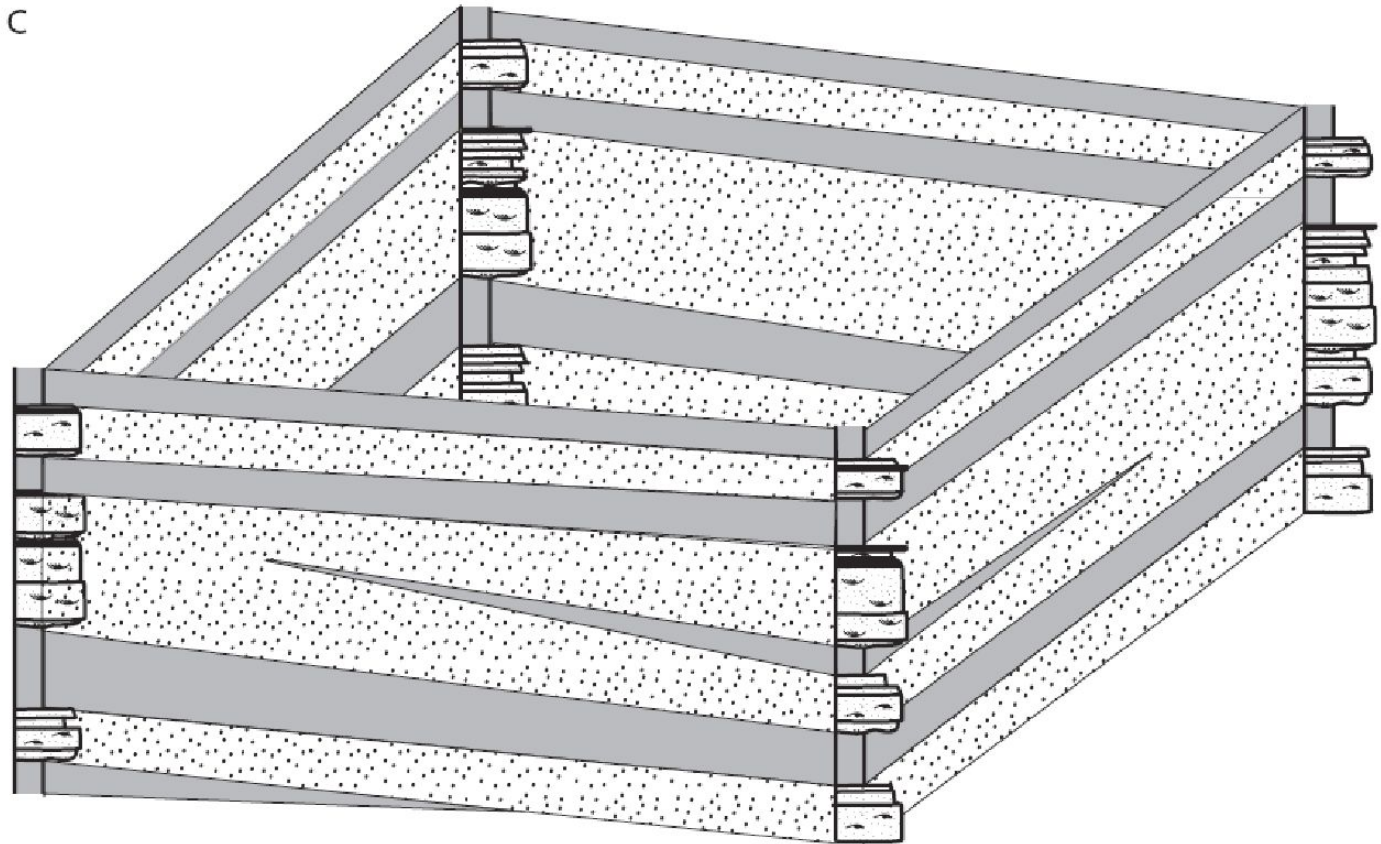
Cross-section

геологический разрез по линии I-I



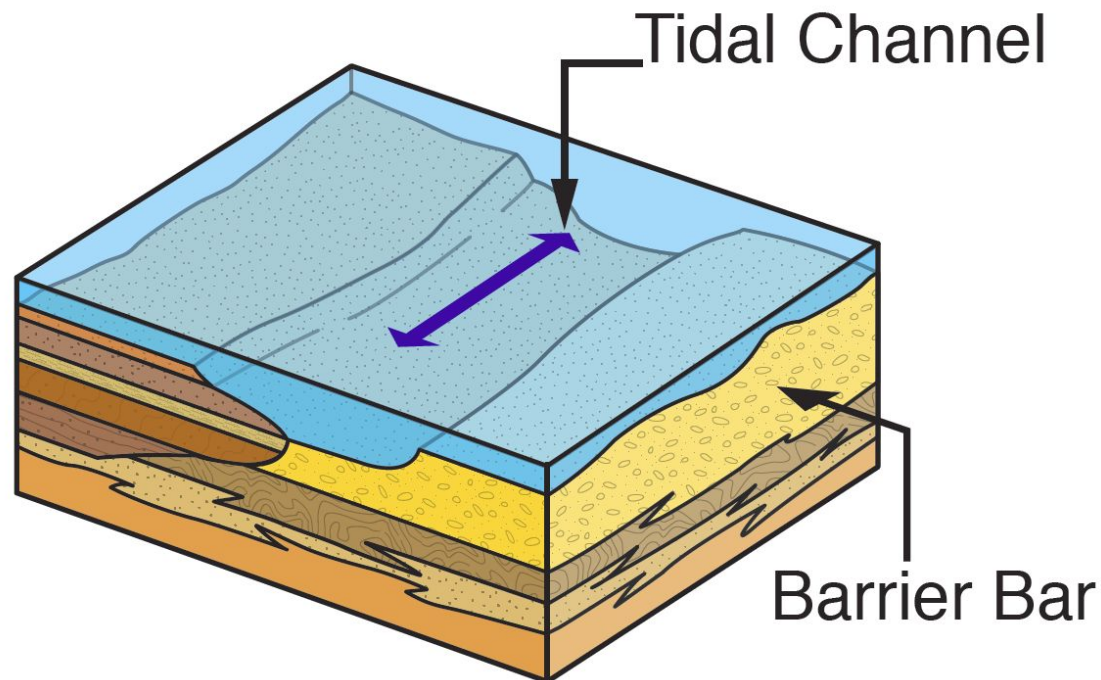
Graphic Correlation

Fence diagram: actual position of the wells



Graphic Correlation

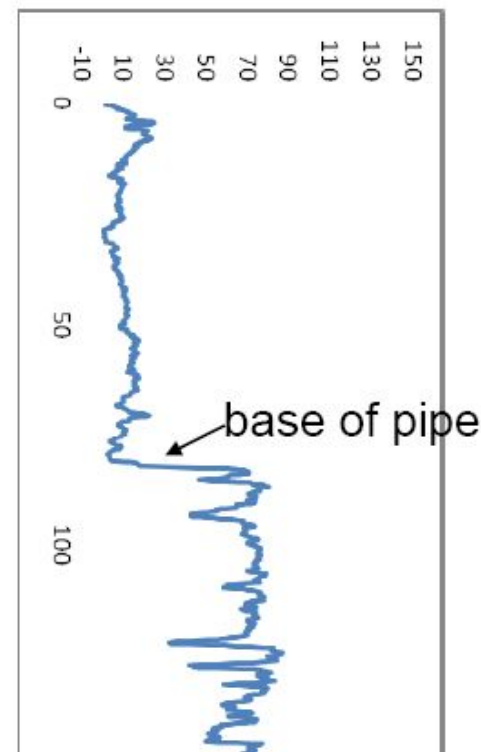
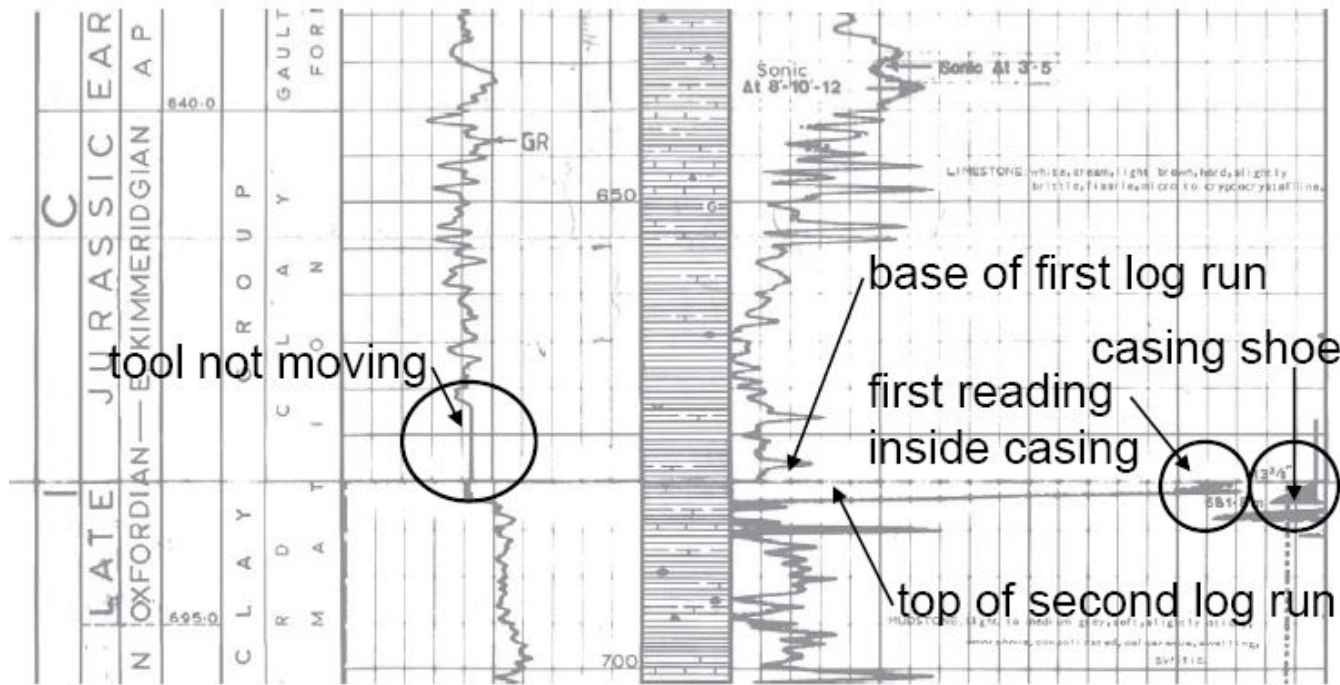
Block-diagram (well location needed) – either 3-D image of current geology/geography, or interpretations of facies relationships, geological evolution etc. (combines map information with a cross section).



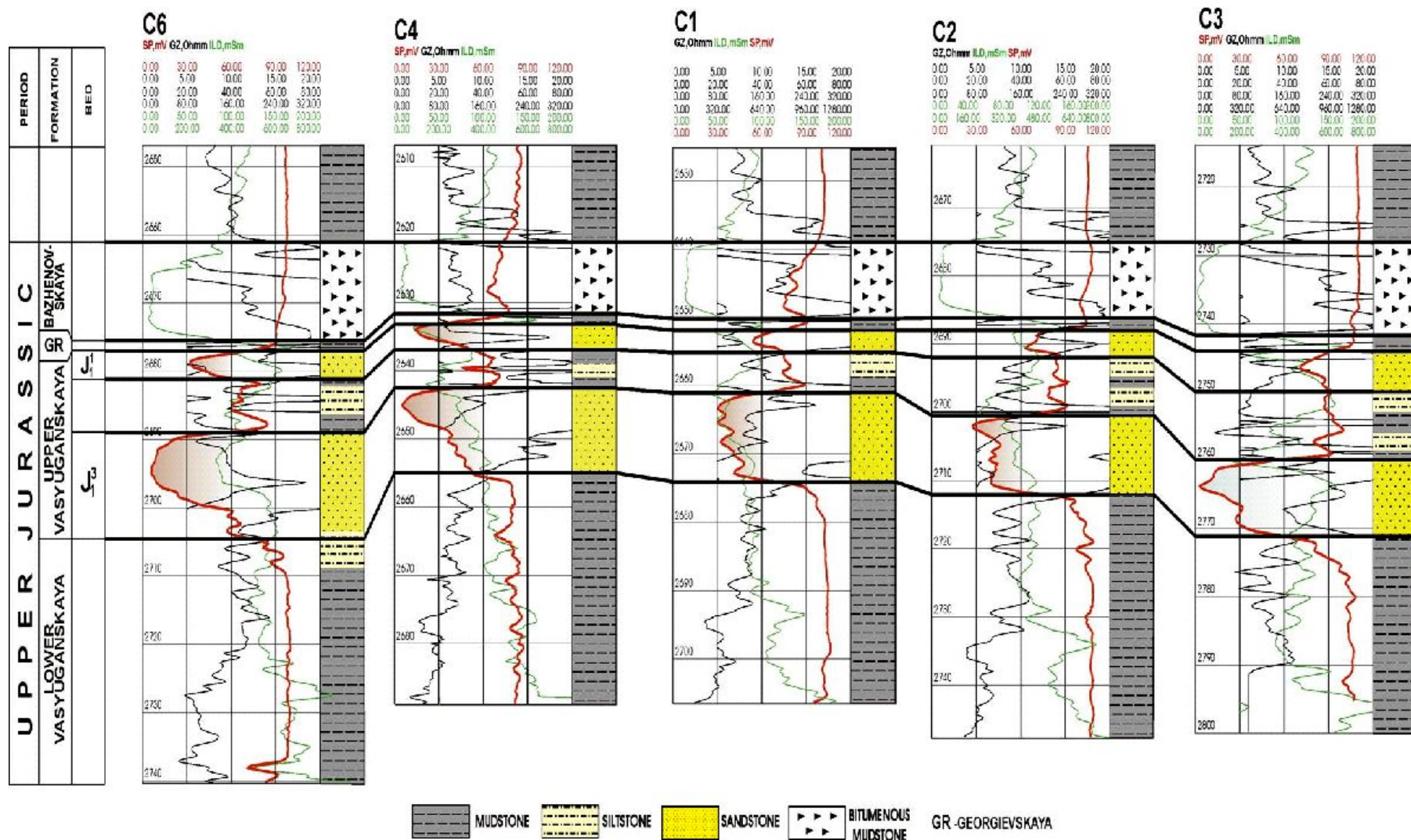
Correlating wireline logs

- Use the **log patterns** to correlate, but beware of differences caused by fluid effects on the resistivity logs.
- Check for **mudstone (shale) colour** changes in the mudlogs – these indicate changing mudstone formations.
- Keep an eye on the **caliper log** – indicates a loss of quality in the other logs but also shows the location of less compacted or damaged layers.
- The **dipmeter log** is also important – sudden changes may indicate the presence of unconformities or faults.
- Natural **gamma** signature is a good lithological indicator, many formations and markers have distinctive signatures.
- **Non-geological features** such as scale changes, casing shoes and sonic log cycle skips can sometimes mislead the unwary

Non-geological features

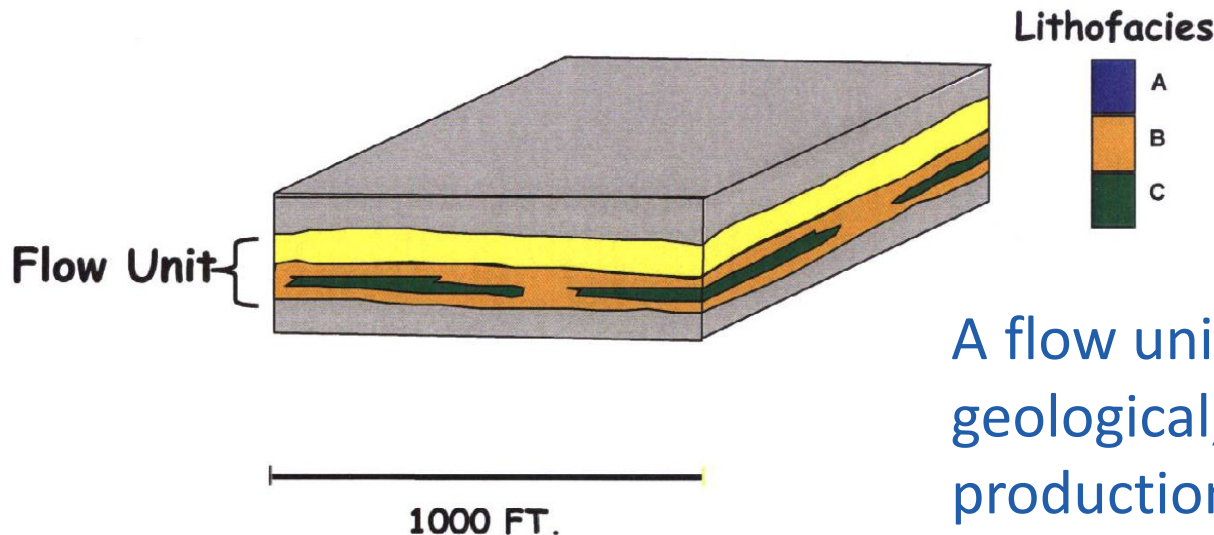


Correlating wireline logs



Reservoir Architecture and Reservoir Performance

Flow unit is a mappable portion of total reservoir within which geological and petrophysical properties that affect the flow of fluids are consistent and predictably different from the properties of other reservoir rock volumes (modified from Ebanks, 1987)

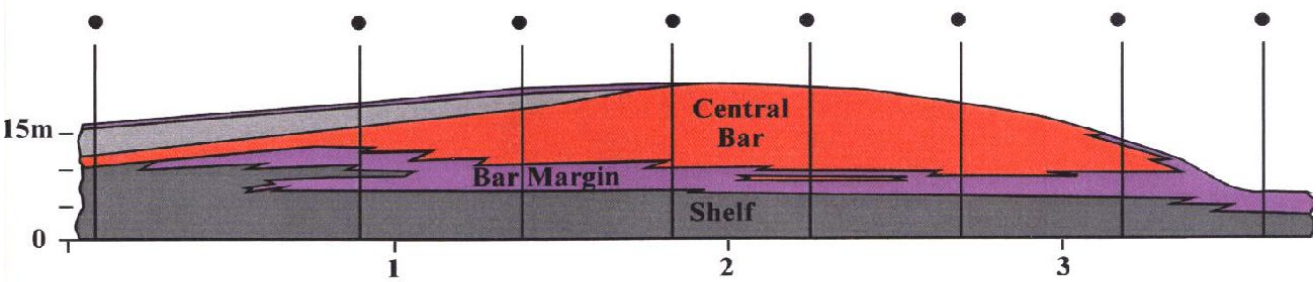


A flow unit zonation integrates geological, petrophysical and production data

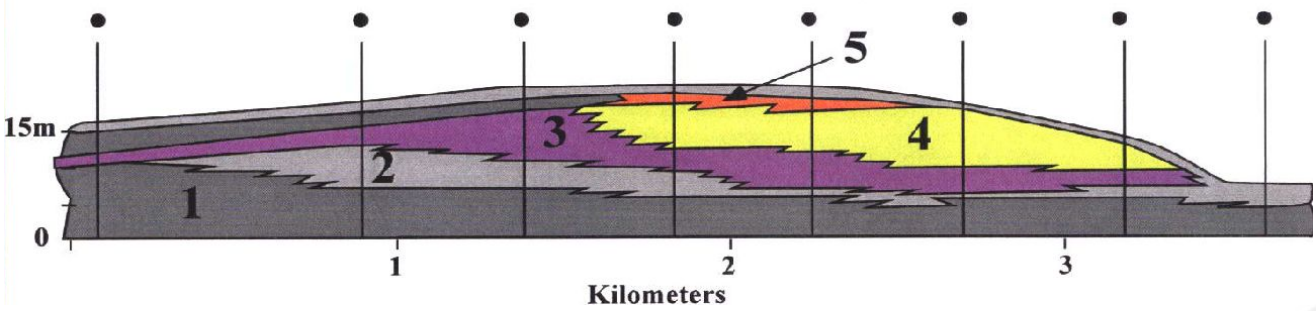
Reservoir Architecture and Reservoir Performance

Flow units concepts:

Geologic Facies Associations

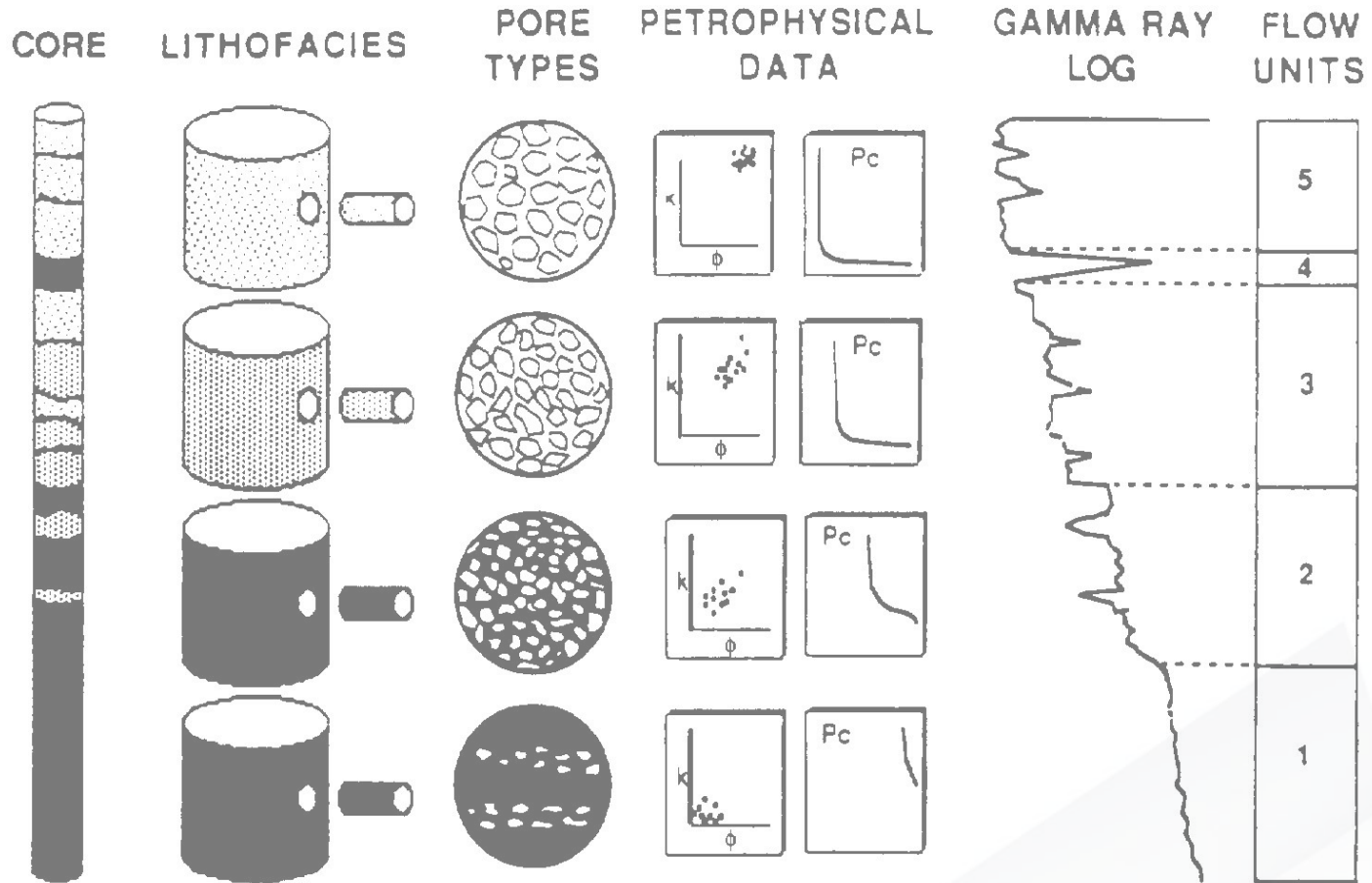


Reservoir Flow Units



1. Have the same petrophysical properties
2. Recognizable on logs and correlatable between wells
3. Include non-pay and pay and the fluids therein

Reservoir Architecture and Reservoir Performance



Reservoir Architecture

Geologically realistic model from Weber and van Geuns (1990)

Three (clastic) reservoir types:

Layercake – Layered reservoirs:

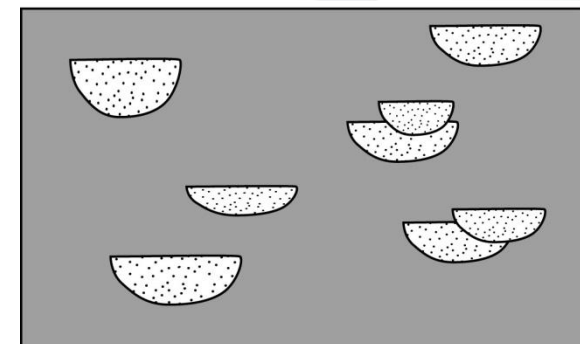
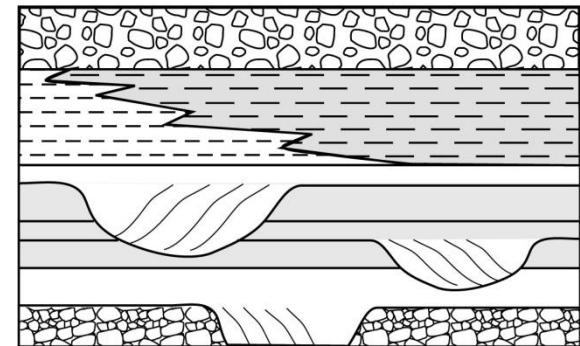
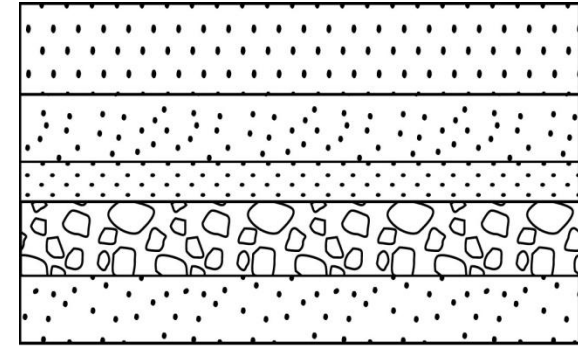
Low permeability contrasts between vertically stacked layers which are laterally extensive

Jigsaw – Mixture of high and low permeability sedimentary layers and bodies:

variable overlap of high permeability bodies, variable difference of permeability vertically and horizontally

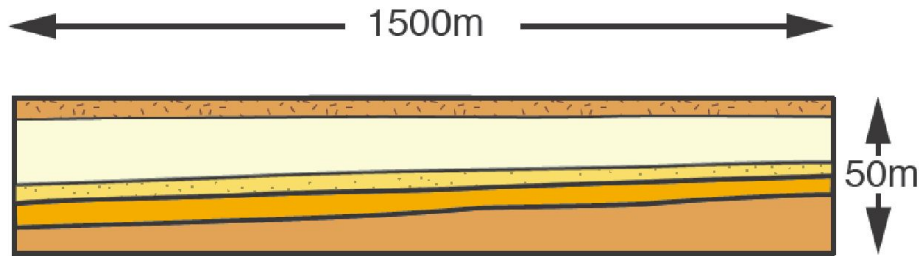
Labyrinth – Isolated high permeability bodies within low permeability ‘background’:

variable overlap of high permeability bodies, variable difference between sandbodies and background sediment

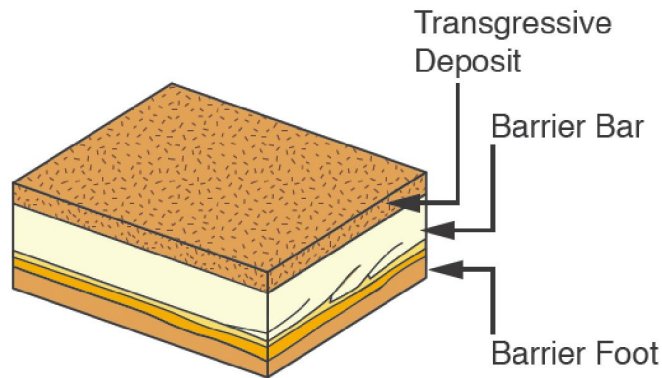


Reservoir Architecture

A Layer-Cake Reservoir Type

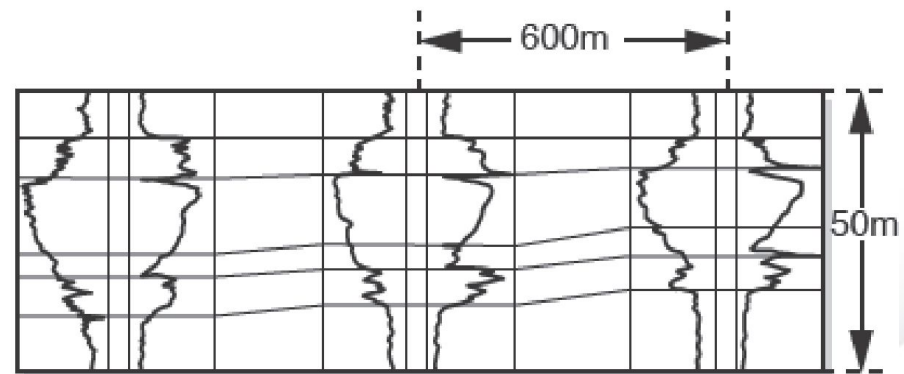


(a) Distinct layering with marked continuity and gradual thickness variation



(b) Layers represent sands deposited in same environment of deposition

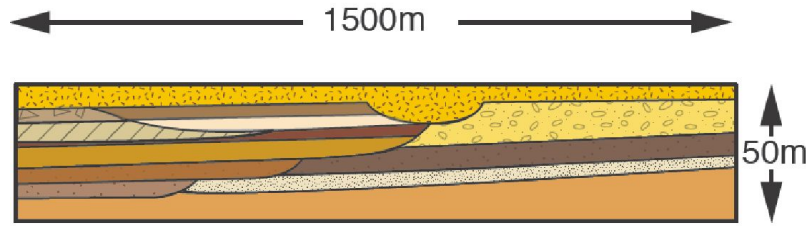
- Deterministic model can be used for correlation
- Simple to model



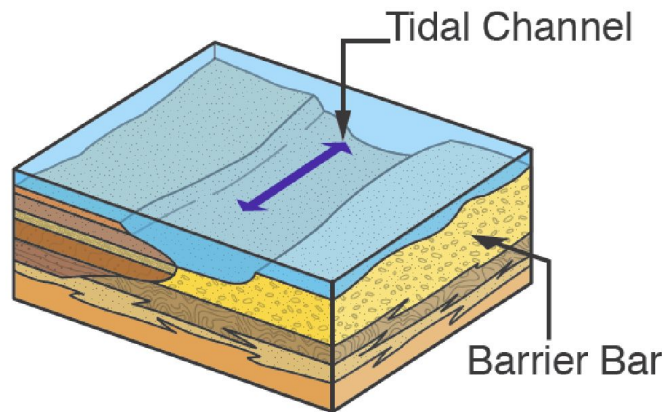
(c) Excellent log correlation showing gradual lateral changes in thickness and properties

Reservoir Architecture

B Jigsaw Puzzle Reservoir Type

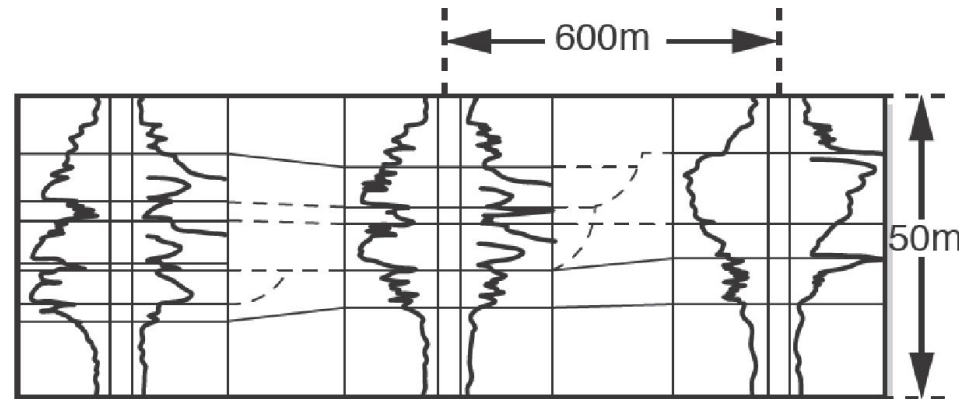


(a) Different sand bodies fitting together without major gaps. Occasional low permeable zones can occur locally between adjacent or superimposed sand bodies



(b) Reservoir architecture determination requires detailed sedimentological analysis

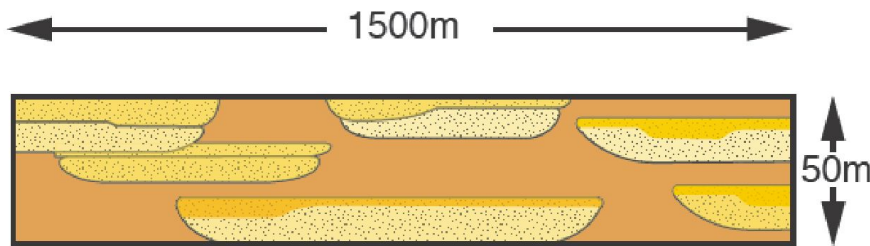
- Deterministic model hardly can be used for correlation – probably stochastic approach (or combination of both) needed for petrophysical modeling as well



(c) Although the sand/shale ratio is high, correlation may be difficult without detailed facies interpretation

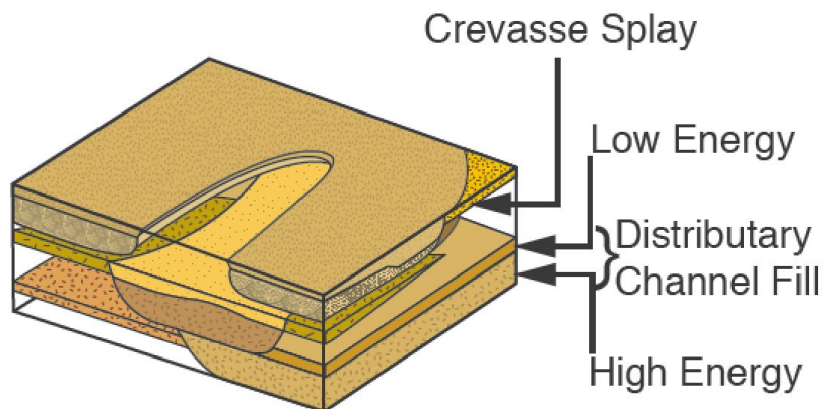
Reservoir Architecture

C Labyrinth Reservoir Type

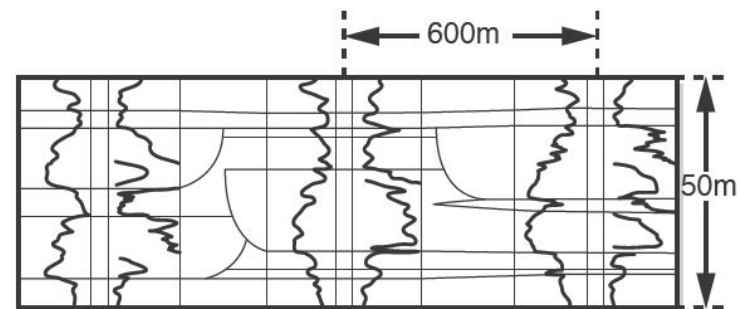


- Connectivity between sand bodies is related to the proportion of sand in the vertical section
- The modelling is complex

(a) Complex arrangements of sand pods and lenses often appearing discontinuous in sections



(b) In 3D interconnections exist but in part only via thin low permeable sheet sands



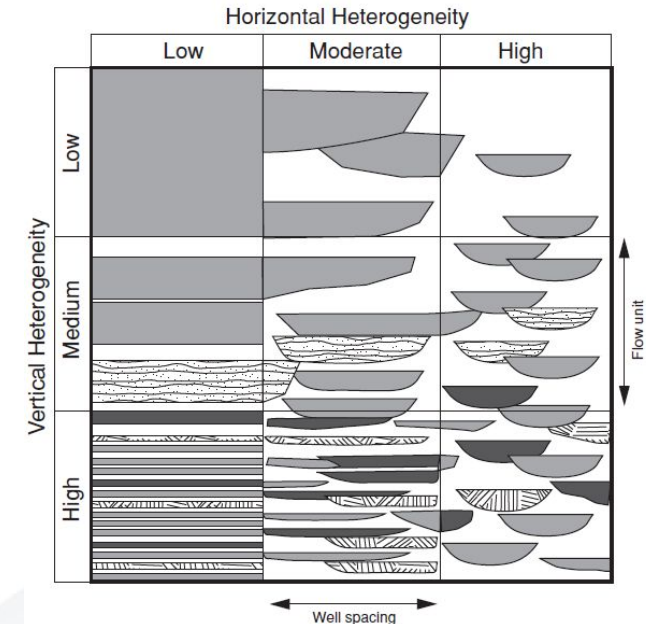
(c) Difficult log correlation even when well spacing is 400m to 600m

Architectural Matrix

		HORIZONTAL HETEROGENEITY		
		LOW	MODERATE	HIGH
VERTICAL HETEROGENEITY	LOW	Wave-dominated (proximal) delta Sand-rich strand plain Barrier island	Distributary mouth bar Proximal delta front Tidal deposits Mud-rich strand plain	Meandering fluvial (single point bar) River dominated delta (single package) Back Barrier (single package)
	MEDIUM	Wave-modified (distal) delta Eolian	Shelf bars Alluvial fan Fan Delta Distal delta front Wave modified delta (proximal)	Braided river Tide dominated delta
	HIGH	Submarine fan (Turbidite)	Meandering fluvial Braid plain	River dominated delta (stacked packages) Meandering fluvial (Stacked pt. bars) Back barrier (stacked packages) Submarine fan (stacked packages)

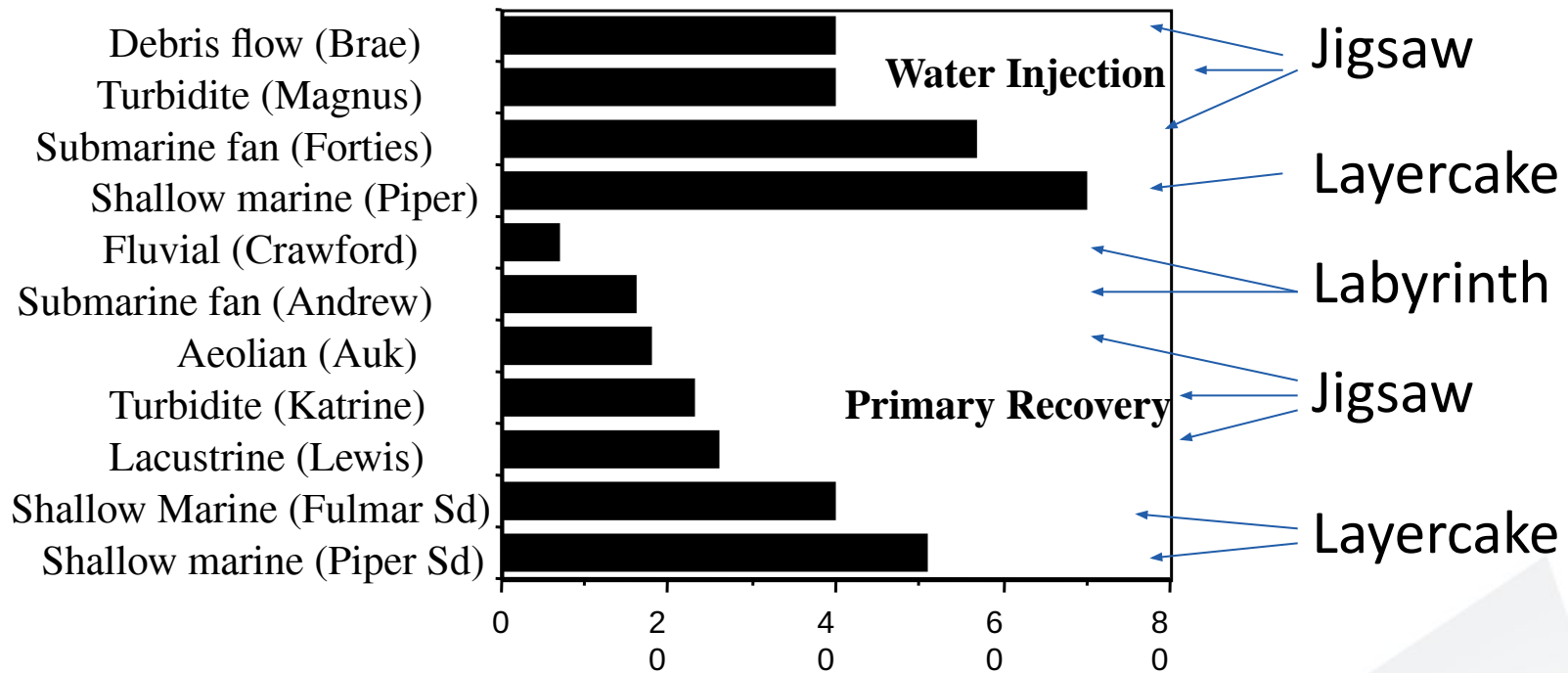
(from Tyler and Finlay, 1991)

- Layered architecture (Layercake)
- Mixed architecture (Jigsaw)
- Isolated architecture (Labyrinth)



Recovery as a function of geology

NORTH SEA RESERVOIRS



Compartmentalisation

- Sedimentary structures or stratal architecture (facies models)
 - Turbidites (Forties), fluvial reservoirs (Brent Ness Formation), deltas etc...
- Faulting
 - Seismically resolvable faults (Gullfaks)
 - Sub-seismic faulting (Thistle)
- Combination - faulting and architecture (NW Hutton)
- Some fields have no compartments

Measurements techniques:

- Formation pressure testers to detect pressure discontinuities and variations in contacts
- Geochemistry to detect variations in oil properties
- Tracer testing

Learning objectives

1. Identify correlation markers
2. Correlate lithological units between wells using lithology and wireline log information
3. Understand how interpretation of depositional environment affects correlation of rock units
4. Describe the role of different data (seismic, log, biostrat) and models (sequence strat.) on correlation
5. Describe pitfalls in correlation

Correlation is the step before mapping - Exercises give useful experience

Exercise 6-8: Correlation

- It involves:
 - 6: Correlation and hanging
 - 7: Faulted sections
 - 8: Structural vs stratigraphic cross-sections

Дополнительные слайды

Основные типы несогласий

Эрозионное срезание (*erosional truncation*) — залегание вышележащих отложений выше поверхности эрозии. Может встречаться в разных позициях в осадочной толще, но чаще в связи с угловыми несогласиями.

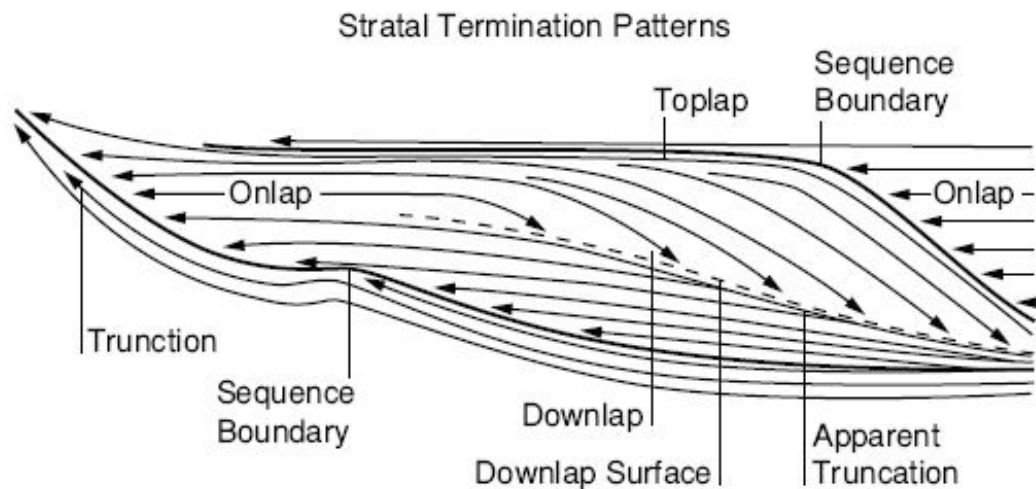
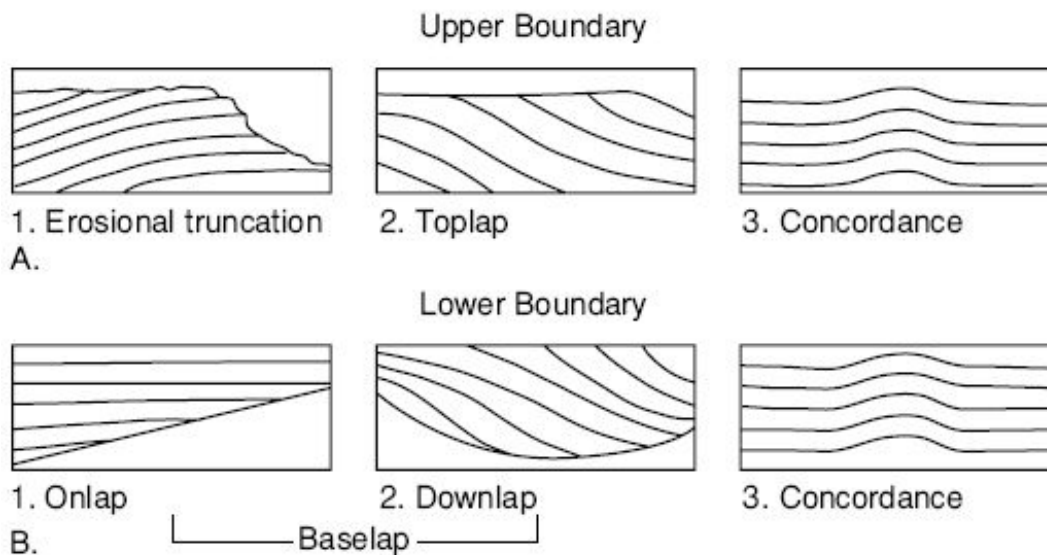
Подошвенное прилегание (*onlap*) — прилегание (*прислонение*) толщи слоев на моноклиналную поверхность, наклоненную в ту же сторону, что и слои, но более круто.

Налегание или подошвенное налегание (*downlap*) — несогласие, когда слоистая толща наклонена и книзу утыкается в более пологую поверхность. Эта поверхность называется *поверхностью налегания* (*downlap surface*). Налегание характерно, например, для подошвы клиноформной серии.

Кровельное утыкание (*toplap*) — срезание моноклинално залегающей толщи сверху более пологой эрозионной поверхностью. Эта поверхность называется *поверхностью утыкания* (*toplap surface*). Кровельное утыкание обычно связано с эрозией или перерывом в седиментации.

Согласное залегание относительно поверхности несогласия (*concordance*) — несогласие, когда слоистость параллельна поверхности несогласия (при этом выше- и нижележащие толщи могут быть между собой несогласны). Выделяется согласное залегание относительно верхней и нижней границы пачки слоев.

Seismic unconformities



•Thank you

Natalia Kaumova

National Research
Tomsk Polytechnic University

•**Petroleum Learning Centre**
Heriot-Watt Approved Learning Partner

•4a Usova Street, Tomsk, Russia
•hw.tpu.ru info@hw.tpu.ru

